

γ -环糊精糖基转移酶菌株的产酶培养基优化

陶志杰*, 辛楠楠, 周洁, 吴伊利

(蚌埠学院 食品与生物工程学院, 安徽 蚌埠 233030)

摘要:为提高 γ -环糊精(γ -CD)产量,改善催化酶 γ -环糊精糖基转移酶的特异性和活力。以重组工程菌 *E. coli* BL21/pET28a(+)- γ -CGTase 为研究菌株,考察其发酵培养基的碳源、氮源、无机盐等对菌株生长以及产酶的影响。采用 $L_9(3^4)$ 的正交试验,以单因素实验的结果为依据对各组分进行优化。结果表明:麦芽糖 $12.5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,牛肉浸膏 $15\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, MgSO_4 $4\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, K_2HPO_4 $0.15\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, NaCl $10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 为发酵培养基的最佳配比。在此条件下酶活为 $1920\text{ U}\cdot\text{mL}^{-1}$,是LB培养基酶活的2.45倍。发酵培养基优化后提高了 γ -CGTase的催化活力,且操作简便,生产成本低。

关键词: γ -环糊精糖基转移酶;培养基优化;正交优化

中图分类号:Q55

文献标识码:A

文章编号:2095-297X(2025)05-0001-06

Optimization of Culture Medium of γ -cyclodextrin Producing Strain Glycosyltransferase

TAO Zhi-jie*, XIN Nan-nan, ZHOU Jie, WU Yi-li

(School of Food and Biology Engineering, Bengbu University, Bengbu, 233030, Anhui)

Abstract: In order to enhance the production of γ -cyclodextrin (γ -CD) and improve the specificity and activity of the catalytic enzyme γ -cyclodextrin glycosyltransferase (γ -CGTase), *E. coli* BL21/pET28a(+)- γ -CGTase was used as the research strain in this study. The effects of carbon sources, nitrogen sources, and norganic salts in the fermentation medium on strain growth and enzyme production were investigated. The composition was optimized by $L_9(3^4)$ orthogonal test that was based on the results of single-factor experiments. The results indicated that the optimal formulation for the fermentation medium was as follows: maltose $12.5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, beef extract $15\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, MgSO_4 $4\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, K_2HPO_4 $0.15\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, and NaCl $10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$. Under these conditions, the enzyme activity reached $1920\text{ U}\cdot\text{mL}^{-1}$, which was 2.45 times that of the enzyme activity in the LB medium. The optimization of the fermentation medium enhanced the catalytic activity of γ -CGTase, and the process was simple and cost-effective.

Key words: γ -cyclodextrin glycosyltransferase; medium optimization; orthogonal optimization

γ -环糊精葡萄糖基转移酶(简称 γ -CGTase)属于 α -淀粉酶的一种,是一类具有多种活性的重要的多功能型酶。它利用淀粉发生环化反应,以主要生成8个葡萄糖残基的 γ -环糊精(γ -CD)而命名^[1-3]。 γ -CD无色、无味,碱性条件下表现稳定,酸性条件下易发生水解。 γ -CD的表面是亲水性的,内部具有疏水性,可以与客体分子组成复合结构,改变有机化合

物的化学和物理性能^[4]。 γ -CD由于含有更多的葡萄糖残基,从而增加了它的溶解度和乳化能力^[5],还可迅速地被人体吸收利用,它在食品、医药、化妆品、环保、农业等方面有着广阔的应用前景^[6-9]。

目前, γ -CD的合成主要利用 γ -CGTase酶催化作用。酶的来源不同,催化的酶活力、 γ -CD产率及其占比差异显著。用于合成 γ -CD的主要微生物来

收稿日期:2025-02-22 * 通讯联系人

基金项目:国家级安徽省大学生创新创业训练项目(202311305067)。

作者简介:陶志杰(1979-),女,陕西咸阳人,副教授,硕士。E-mail:tz584@163.com

源为芽孢杆菌属、嗜热菌属、链霉菌属和克雷伯氏菌属等,其中芽孢杆菌属的 *Bacillus sp. G-825-6*^[10]、*Bacillus macorou*^[11]、*Bacillus thuringiensis*^[12] 和 *Bacillus clarkii* 7364^[13] 等基因通过基因工程技术构建高表达、高产物特异性的工程菌种。但是,由于 γ -CD 产率低,成本高,特别是缺乏高特异性、高活性的 γ -CGTase,至今仍是该课题的研究焦点。陈龙军等^[14] 试图通过基因突变、优化培养基配方、改变催化条件等措施提高 γ -CD 的产量并降低成本。王金鹏^[15] 采用定点突变法将来自 *Bacillus sp. G-825-6* 的 γ -CGTase 的 211 位的酪氨酸突变为亮氨酸,并利用突变体 Y211L 催化木薯淀粉制备 γ -CD,在优化催化条件下催化产 γ -CD 的比率明显提高至 97%,但催化产生 γ -CD 的产率仍仅为 14%。2020 年 DUAN M 等^[16] 构建 *Bacillus clarkii* 7364 基因工程菌, γ -CD 的比率为 98.72%, γ -CD 的产率可达为 42.21% (w/w)。*Bacillus clarkii* 7364 γ -CGTase 基因表现出较好的优越性。

LB 培养基是应用广泛的细菌培养基,主要用于细菌培养、分子生物学实验、发酵工程等,其配方简单,配置方便。但由于其成分混杂,常常不能满足高质量产酶的需要,生产中需对 LB 培养基进行适当的改良和调整。为了提高 γ -CGTase 的催化活力,本研究以来源于 *Bacillus clarkii* 7364 的 γ -CGTase 基因,重组工程菌 *E. coli* BL21/pET28a(+)- γ -CGTase 为研究菌株,优化其发酵培养基以制备活力更高的 γ -CGTase 来实现 γ -CD 的合成。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 菌株与主要试剂

实验室保存的来源于 *Bacillus clarkii* 7364 的 γ -CGTase 基因,重组工程菌 *E. coli* BL21/pET28a(+)- γ -CGTase。(菌株由合肥工业大学食品与生物工程学院提供)

LB 培养基、卡那霉素硫酸盐(Kana)、异丙基- β -D-硫代半乳糖苷(IPTG)均为生化试剂,上海博微生物科技有限公司;可溶性淀粉、蛋白胨为生化试剂;葡萄糖、麦芽糖、尿素、甘氨酸、氢氧化钠均为分析纯,国药集团化学试剂有限公司;牛肉浸膏、酵母浸膏为生化试剂、硫酸镁、氯化钠、磷酸氢二钾均为分析纯,天津市化学试剂批发公司;玉米淀粉,食品级,沧州市盛世鑫泰食品有限公司。

1.1.2 仪器与设备

YX-24HDD 手提式压力蒸汽灭菌锅,江阴滨江

医疗设备有限公司;GW-D 摇床,上海捷呈实验仪器有限公司;SW-CJ-1G 超净工作台,苏州净化设备有限公司;L4 紫外可见分光光度计,上海佑科仪器仪表有限公司;H4-20KR 台式高速冷冻离心机,湖南可成仪器设备有限公司;UH-500B 超声破细胞破碎仪,深圳市格信科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 菌种处理

种子培养:用移液枪取 500 μ L 冷冻菌液加到含 50 μ L Kana(100 mg $\cdot$ mL⁻¹)的 50 mL LB 培养基(胰蛋白胨 10 g $\cdot$ L⁻¹,酵母提取物 5 g $\cdot$ L⁻¹,氯化钠 10 g $\cdot$ L⁻¹)中,37 $^{\circ}$ C,140 r $\cdot$ min⁻¹,摇瓶 18 h。

基础产酶培养基:玉米淀粉 10 g $\cdot$ L⁻¹,蛋白胨 10 g $\cdot$ L⁻¹,K₂HPO₄ 0.1 mol $\cdot$ L⁻¹,MgSO₄ 2 mmol $\cdot$ L⁻¹,NaCl 10 g $\cdot$ L⁻¹,250 mL 锥形瓶装液 50 mL,121 $^{\circ}$ C 灭菌 20 min。

发酵产酶:将上述培养 18 h 的种子液,按 2% (v/v)的接种量接入 50 mL 的产酶培养基中 37 $^{\circ}$ C,140 r $\cdot$ min⁻¹ 培养至 OD_{600nm} 为 1.8 - 2.0 时,加入 150 μ L IPTG(24 mg $\cdot$ mL⁻¹),25 $^{\circ}$ C,140 r $\cdot$ min⁻¹ 摇瓶 20 h^[17]。

1.2.2 生物量测定

以无菌培养基为空白对照,在波长 600 nm 下测待测样品的 OD 值(需要时无菌培养基进行稀释)。

1.2.3 粗酶液的制备

发酵产酶结束后,收集发酵液在 4 $^{\circ}$ C 8000 r $\cdot$ min⁻¹ 离心力的条件下离心 15 min,洗涤一次细胞收集沉淀。然后加入 10 mL pH10.0 的 0.2 mol $\cdot$ L⁻¹ 甘氨酸-NaOH 缓冲液震荡摇匀,冰浴下 20% 功率超声破碎 10 min,最后将菌液在 4 $^{\circ}$ C 6000 r $\cdot$ min⁻¹ 的条件下离心 15 min,取上清即为粗酶液^[18]。

1.2.4 酶活测定

采用蓝值法测定酶的水解活力^[19]。在恒温水浴锅中 40 $^{\circ}$ C 下反应 10 min 后,吸光值下降 10 % 的酶量为 1 个酶活力单位。酶活力计算公式如下:

酶活力(U $\cdot$ mL⁻¹) = (A 对照 - A 样品)/A 对照 $\times$ 1000 $\times$ 稀释倍数

式中:A 对照为未加酶液的吸光度;A 样品为加入酶液的吸光度。

1.2.5 碳、氮源筛选实验

按 2% 的接种量将种子液分别接种到 10 g $\cdot$ L⁻¹ 的不同的碳源(玉米淀粉、可溶性淀粉、葡萄糖和麦芽糖)和不同的氮源(蛋白胨、尿素、牛肉浸膏和酵母粉),培养基的其它成分和上述的基础产酶

发酵培养条件相同。发酵结束后,取菌液检测生物量及酶活,筛选出最佳碳源、氮源。

1.2.6 单因素实验

按 2% 的接种量,在产酶基础培养基基础上,分别考量最佳碳源的不同浓度(2.5、5.0、7.5、10.0、12.5 g · L⁻¹)、最佳氮源的不同浓度(5、10、15、20、25 g · L⁻¹)、MgSO₄ 的不同浓度(2、4、6、8、10 mmol · L⁻¹)、K₂HPO₄ 的不同浓度(0.05、0.10、0.15、

0.20、0.25 mol · L⁻¹)、NaCl 的不同浓度(10、30、50、70、90 g · L⁻¹)对菌体生物量和酶活的影响。

1.2.7 正交试验设计

采用上述的单因素实验结果,制成 L₉(3⁴) 正交试验因素水平表,如表 1 所示。对麦芽糖(A)、牛肉浸膏(B)、MgSO₄(C)和 K₂HPO₄(D)这 4 个因素对酶活力的影响进行探究。

表 1 正交因素水平表

水平	因素			
	A 麦芽糖/g · L ⁻¹	B 牛肉浸膏/g · L ⁻¹	C MgSO ₄ /mmol · L ⁻¹	D K ₂ HPO ₄ /mol · L ⁻¹
1	7.5	15	2	0.05
2	10.0	20	4	0.10
3	12.5	25	6	0.15

1.2.8 验证、比较实验

通过正交实验优化后得到的产酶培养基最佳条件,平行 5 组摇瓶发酵后取样测定其酶活,计算 RSD 值,验证试验的可重复性。同时与优化前基础产酶培养基和 LB 培养基做比较试验。

1.2.9 数据处理

每个实验重复 3 次,结果以“平均值”表示,单因素试验数据使用 Excel 整理,实验数据采用正交设计助手 IIV3.1 对数据进行分析,图表采用 Excel 绘制。

研究不同碳源和氮源对菌株的生长以及产酶的影响。由图 1 可知,葡萄糖为碳源时菌体生物量最高,OD₆₀₀为 3.090,但酶活并不是最高,而麦芽糖为碳源时,虽菌体生物量不是最高,但酶活可达到 1678 U · mL⁻¹,说明麦芽糖更有利于菌株的产酶代谢。综合考虑菌株生长和产酶两方面,麦芽糖为最优,因此选择麦芽糖作为最佳碳源。同理,氮源筛选中,则以牛肉浸膏为最佳氮源,更有利于菌体产酶。

2 结果与分析

2.1 最佳碳源、氮源筛选

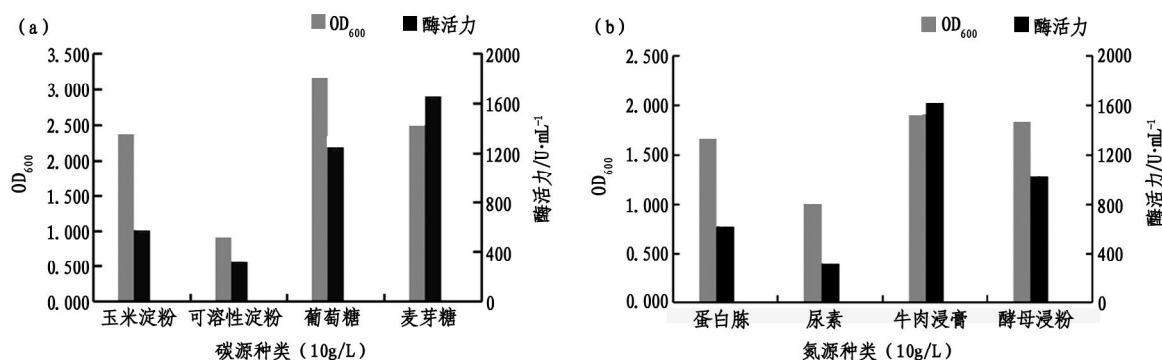


图 1 不同碳源、氮源对细胞生长及产酶的影响

2.2 单因素实验

2.2.1 麦芽糖浓度对菌株产酶的影响

由图 2 可知,菌株在麦芽糖浓度为 12.5 g · L⁻¹时菌体生物量最大,其次是 10 g · L⁻¹时,OD₆₀₀分别为 4.013 和 3.811。麦芽糖浓度为 10 g · L⁻¹时的酶

活高于其它浓度,说明麦芽糖此浓度最适合产酶。分析其原因可能为麦芽糖浓度过低,由于碳源不足不利于菌株的生长,菌量低酶蛋白表达量少,酶活低;而麦芽糖浓度升高时,导致碳氮比偏高,不利于蛋白酶的表达,从而酶活下降^[20]。综合考虑菌株生

长和产酶两方面,浓度为 $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时最优,因此麦芽糖的最佳浓度为 $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

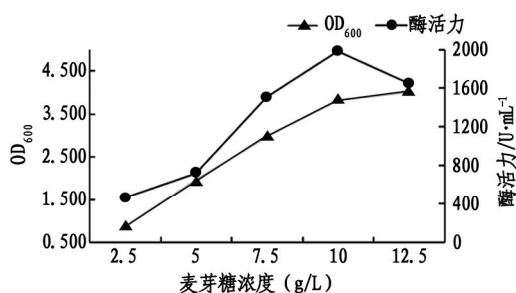


图2 麦芽糖浓度对细胞生长及产酶的影响

2.2.2 牛肉浸膏浓度对菌株产酶的影响

由图3可知,菌株在牛肉浸膏浓度为 $25 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时菌体浓度最大,其次是 $20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,它们的 OD_{600} 分别为 3.494 和 2.337。牛肉浸膏浓度为 $20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时的酶活明显高于其它组,为 $1926 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$,说明它对菌株产酶有很大的促进作用,适当提高氮源更有利于蛋白质的表达。综合考虑菌株生长和产酶两方面,浓度为 $20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时最优,因此牛肉浸膏的最佳浓度为 $20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

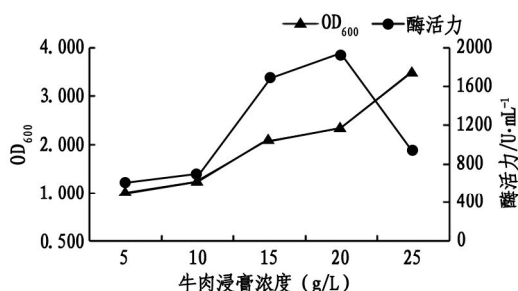


图3 牛肉浸膏浓度对细胞生长及产酶的影响

2.2.3 MgSO_4 浓度对菌株产酶的影响

由图4可看出,菌株在 MgSO_4 浓度为 $4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时菌体浓度最大, OD_{600} 为 1.663,但是与其他浓度的菌体浓度的差距并不是很明显。 MgSO_4 浓度为 $4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时的酶活明显高于其它组,为 $1124 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$ 。说明 Mg^{2+} 浓度对菌株生长影响不大,而低浓度时酶活明显增高, Mg^{2+} 对酶活有促进作用^[17],浓度过高时,对酶活起抑制作用。因此产酶培养基中应控制适当的 Mg^{2+} 浓度。综合考虑菌株生长和产酶两方面, MgSO_4 的最佳浓度为 $4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

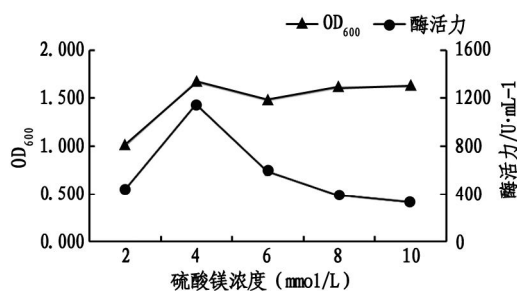


图4 MgSO_4 浓度对细胞生长及产酶的影响

2.2.4 K_2HPO_4 浓度对菌株产酶的影响

由图5可知,菌株在 K_2HPO_4 浓度为 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时菌体浓度最大, OD_{600} 为 2.892,随着 K_2HPO_4 浓度逐步升高,菌体生长受到抑制,菌体浓度呈明显下降趋势,由于菌体细胞数量的减少,表达酶量受到影响,酶活相应也呈现降低。当 K_2HPO_4 浓度为 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时菌体量和酶活均达到最高,酶活为 $1124 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$ 。综合考虑菌株生长和产酶两方面, K_2HPO_4 浓度为 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时最优,因此 K_2HPO_4 的最佳浓度为 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

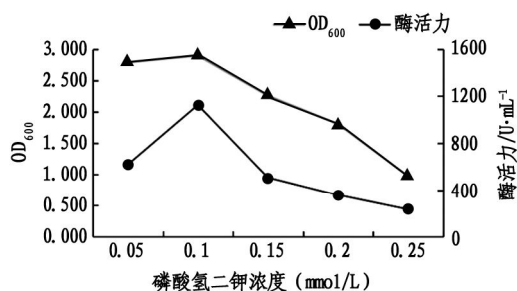


图5 K_2HPO_4 浓度对细胞生长及产酶的影响

2.2.5 NaCl 浓度对菌株产酶的影响

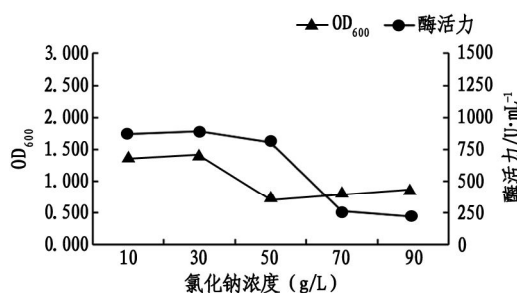


图6 NaCl 浓度对细胞生长及产酶的影响

由图6可知,菌株在 NaCl 浓度为 $30 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时菌体浓度最大, OD_{600} 为 1.404,随着 Na^+ 浓度的上升,菌株生长严重受限,基本停止生长,菌浓 OD_{600} 仅为 0.6 左右。说明 K^+ 、 Na^+ 对菌株的生长起重要调节渗透压作用,细胞处于低渗透压和高渗透压环境时均不利于菌株生长繁殖,从而影响细胞产酶表达。

综合考虑菌株生长和产酶两方面综合效率,NaCl 浓度为 $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时最优,因此 NaCl 的最佳浓度为 $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

2.3 正交优化结果分析

2.3.1 正交试验结果分析

在单因素实验结果基础上,以酶活力为评价指标,通过正交试验设计,对麦芽糖浓度、牛肉浸膏浓度、 MgSO_4 浓度以及 K_2HPO_4 浓度的四个主要影响因子进行优化试验设计。正交试验结果如表 2 所示。

表 2 正交试验结果与分析

试验号	因素				酶活力/ $\text{U} \cdot \text{mL}^{-1}$
	麦芽糖/ $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	牛肉浸膏/ $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	MgSO_4 / $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$	K_2HPO_4 / $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$	
1	1	1	1	1	1519 ± 30.384
2	1	2	2	2	1525 ± 21.358
3	1	3	3	3	616 ± 11.095
4	2	1	2	3	1831 ± 38.457
5	2	2	3	1	682 ± 15.695
6	2	3	1	2	1322 ± 25.128
7	3	1	3	2	1314 ± 24.962
8	3	2	1	3	1774 ± 30.167
9	3	3	2	1	1593 ± 35.054
k_1	1220.000	1554.667	1538.333	1264.667	
k_2	1278.333	1327.000	1649.667	1387.000	
k_3	1560.333	1177.000	870.667	1407.000	
极差	340.333	377.667	779.000	142.333	

由表 2 中极差可知,在产酶培养基优化过程中,四个主要影响因子:麦芽糖浓度(A)、牛肉浸膏浓度(B)、 MgSO_4 浓度(C)以及 K_2HPO_4 浓度(D),对菌株产酶影响由大到小为 $C > B > A > D$,即最大的影响因素是 MgSO_4 浓度,牛肉浸膏浓度次之, K_2HPO_4 浓度的影响最小。从 k 值中分析可知,该产酶培养基最优配方组合是 $A_3B_1C_2D_3$:麦芽糖浓度为 12.5 g

$\cdot \text{L}^{-1}$,牛肉浸膏浓度为 $15 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, MgSO_4 浓度为 $4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, K_2HPO_4 浓度为 $0.15 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。由表 3 可知, MgSO_4 浓度对菌株产酶的影响表现显著($P < 0.05$),证明了 Mg^{2+} 对该酶的活力有显著影响,培养基配方设计中应严格控制 Mg^{2+} 添加量。

表 3 正交试验方差分析表

因素	偏差平方和	自由度	F 比	显著性
麦芽糖浓度	198753.556	2	5.579	
牛肉浸膏浓度	216964.222	2	6.090	
MgSO_4 浓度	1065014.889	2	29.890	*
K_2HPO_4 浓度	35624.222	2	1.000	
误差	35624.22	2		

注: $F_{0.05}(2,2) = 19.000, P < 0.05$, * 表示差异显著。

2.3.2 验证、比较实验结果分析

5 组菌体在最优产酶培养基中发酵产酶,得到的酶活分别为 1933、1914、1955、1878、1920 $\text{U} \cdot$

mL^{-1} ,平均酶活力为 $1920 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$ 。RSD 为 1.47%,说明实验结果有较好的重复性。

最优产酶培养基:麦芽糖 $12.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,牛肉浸

膏 $15 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, MgSO_4 $4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, K_2HPO_4 $0.15 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, NaCl $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。基础产酶培养基在优化前产酶效果不如 LB 培养基,仅为其酶活力的 0.67。而优化后的最优产酶培养基与常用产酶的 LB 培养基比较,是其活力的 2.45 倍,说明优化后的培养基有效地提高了该菌株的产酶能力(见表 4)。

表 4 比较试验结果

试验组号	培养基	酶活力/ $\text{U} \cdot \text{mL}^{-1}$	倍数
第一组	LB 培养基	784 ± 18.237	1.00
第二组	基础产酶培养基	522 ± 9.963	0.67
第三组	最优产酶培养基	1920 ± 35.832	2.45

3 结论

本研究通过利用单因素和正交优化法对重组工程菌 *E. coli* BL21/pET 28a(+)- γ -CGTase 产 γ -环糊精葡萄糖基转移酶的发酵培养基条件进行优化,优化的培养基使得该菌株产的 γ -CGTase 酶活力增强。结果表明:优化后的培养基组成为麦芽糖 $12.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,牛肉浸膏 $15 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, MgSO_4 $4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, K_2HPO_4 $0.15 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, NaCl $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。该条件下产酶,酶活力可达到 $1920 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$,是 LB 培养基的 2.45 倍,明显优于 LB 培养基产酶活力。根据本研究表明, Mg^{2+} 是该酶活力的促进剂,对酶活力有较显著影响,培养基中适当添加 Mg^{2+} 有利于提高酶活力。下一步将在培养基优化的基础上,重点针对其中试放大开展研究,以期在 γ -环糊精葡萄糖基转移酶的大规模工业化生产奠定基础。

参考文献:

- [1] 郑丹妮,柏玉香,纪杭燕,等. γ -CGTase 酶学性质及产物特异性影响因素[J]. 食品与发酵工业,2020,46(5): 38-45.
- [2] 王蕾. 环糊精葡萄糖基转移酶的产物特异性分子改造及发酵制备研究[D]. 无锡:江南大学,2018.
- [3] LAI C S, CHOW J M, WOLF B W. Methods of using gamma cyclodextrin to control blood glucose and insulin secretion[P]. 2013. DOI: WO2006004574A3.
- [4] 凌凯. 环糊精糖基转移酶分子改造、产物特异性及其酶学性质研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2016.
- [5] LI Z F, WANG M, WANG F, et al. γ -cyclodextrin: A review on enzymatic production and applications [J]. Applied Microbiology Biotechnology, 2007, 77(2): 245-255.
- [6] 柏玉香,吴浩. γ -环糊精工业化生产的研究进展[J]. 食品与发酵工业,2021,47(22): 279-287.

- [7] 吴剑峰. 环糊精及其衍生物在药学领域的应用[J]. 时珍国医国药,2004,15(3): 181-182.
- [8] LI L, ZHANG M, JING Z, et al. Preparation of γ -CD from corn starch by double enzyme catalysis[J]. Journal of Food and Biotechnology, 2017, 36(4): 357-363.
- [9] WU D, CHEN S, WANG N, et al. Gamma-cyclodextrin production using cyclodextrin glycosyltransferase from *Bacillus clarkii* 7364[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2012, 167(7): 1954-1962.
- [10] SONNENDECKER C, MELZER S, ZIMMERMANN W. Engineered cyclodextrin glucanotransferases from *Bacillus* sp. G-825-6 produce large-ring cyclodextrins with high specificity[J]. MicrobiologyOpen, 2019, 8: e757.
- [11] WANG F, DU G, LI Y, et al. Optimization of cultivation conditions for the production of γ -cyclodextrin glucanotransferase by *Bacillus macerans* [J]. Food Biotechnology, 2005, 18(2): 251-264.
- [12] GOO B G, HWANG Y J, PARK J K. *Bacillus thuringiensis*: A specific gamma-cyclodextrin producer strain [J]. Carbohydrate Research, 2014, 386: 12-17.
- [13] 王琰, 万, 李皎, 等. *Bacillus clarkii* 7364 γ -环糊精葡萄糖基转移酶的可溶性表达及其催化特性分析[J]. 生物加工过程, 2017, 15(2): 7-12.
- [14] 陈龙军, 林陈强, 张慧, 等. 嗜热芽胞杆菌 α -环糊精葡萄糖基转移酶在枯草芽胞杆菌中的表达[J]. 福建农业学报, 2019, 34(5): 600-605.
- [15] 王金鹏, 王萍, 苑征, 等. γ -CGTase 突变体制备及其产 γ -CD 条件优化[J]. 食品与生物技术学报, 2018, 37(10): 1015-1020.
- [16] DUAN Menglu, WANG Yan, YANG Guowu, et al. High-level production of γ -cyclodextrin glycosyltransferase in recombinant *Escherichia coli* BL21 (DE3): Culture medium optimization, enzymatic properties characterization, and product specificity analysis [J]. Annals of Microbiology, 2020, 70(1): 1-13.
- [17] 陶志杰, 杨静文, 王清晨, 等. γ -环糊精葡萄糖基转移酶的酶学性质及其产物特异性[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(13): 25-32.
- [18] 花敬涵. β -环糊精糖基转移酶的催化机制及理性改造研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2019.
- [19] SONG B H, YUE Y, XIE T, et al. Mutation of Tyrosine167Histidine at Remote Substrate Binding Subsite-6 in alpha-Cyclodextrin Glycosyltransferase Enhancing alpha-Cyclodextrin Specificity by Directed Evolution[J]. Molecular Biotechnology, 2014, 56(3): 232-239.
- [20] 冀成法, 刘忠, 马鲁南, 等. 重组大肠杆菌高密度、高表达研究进展[J]. 生物技术, 2022, 32(2): 246-251.

责任编辑:于舒森

基于非等温热重法的褐煤燃烧动力学研究

刘沐鑫^{1*}, 黄顺进^{1,2}, 王习权¹, 颜艳艳^{1,2}, 赵建军¹

(1. 蚌埠学院 材料与化学工程学院, 安徽 蚌埠 233030; 2. 安徽工业大学 化学与化工学院, 安徽 马鞍山 243002)

摘要:为了深入认识褐煤的燃烧特性,通过非等温热重法考察了5种中国典型褐煤的燃烧规律,并构建了褐煤燃烧动力学模型。研究发现褐煤的变质程度是影响其燃烧特性的重要因素,褐煤的着火温度、燃尽温度和最大燃烧速率温度随褐煤变质程度的增高而增高,褐煤的可燃性和综合燃烧性能随褐煤变质程度的增高而变弱。5种褐煤的燃烧活化能在 $69-101\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ 范围内,褐煤的结构与其燃烧活化能有相关性。褐煤燃烧的活化能随着芳香结构的增加和芳香环缩合程度的增高而增高,随含氧官能团和脂肪结构的增高而降低。

关键词:褐煤;热重分析;动力学;非等温;燃烧

中图分类号:TQ127.1;TQ53

文献标识码:A

文章编号:2095-297X(2025)05-0007-07

Study on Combustion Kinetics of Lignite Based on Non-isothermal Thermogravimetry

LIU Mu-xin^{1*}, HUANG Shun-jin^{1,2}, WANG Xi-quan¹, YAN Yan-yan^{1,2}, ZHAO Jian-jun¹

(1. School of Material and Chemical Engineering, Bengbu University, Bengbu, 233030, Anhui;

2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan, 243002, Anhui)

Abstract: To deeply understand the combustion characteristics of lignite, the combustion laws of five typical Chinese lignite were investigated by non-isothermal thermogravimetric method, and the combustion kinetics model of lignite was established. It found that the metamorphic degree of lignite is an important factor affecting its combustion characteristics. The ignition temperature, burnout temperature and maximum combustion rate temperature of lignite increase with the increase of the metamorphic degree, and the flammability and comprehensive combustion performance of lignite weaken with the increase of the metamorphic degree. The combustion activation energy of five kinds of lignite is in the range of $69-101\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$. It also found that the structure of lignite is correlated with the combustion activation energy. The activation energy of lignite combustion increases with the increase of aromatic structure and condensation degree of aromatic ring, and decreases with the increase of oxygen-containing functional groups and alkyl structures.

Key words: lignite; thermogravimetric analysis; kinetics; non-isothermal; combustion

褐煤是泥炭经脱水、压实转变为有机生物岩的初期产物,是变质程度最低的煤种。褐煤具有含水量高、灰分高、氧含量高、易风化破裂、挥发分高、发热量低等特点,因此褐煤被视为劣质动力煤^[1-3]。然而,褐煤在我国储量巨大,约为1300亿吨,占我国

煤炭总储量的13%,主要分布在我国内蒙古、云南、新疆和黑龙江等边疆地区。因此,褐煤是我国重要的能源资源,褐煤的利用对我国边疆省份的经济发展具有重要的意义。褐煤具有十分广泛的利用方式,其中直接燃烧发电是褐煤利用的主要方式之一。

收稿日期:2025-1-25 * 通讯联系人

基金项目:国家自然科学基金项目(21978003);安徽省优秀青年教师培育重点项目(YQZD2023082);省级大学生创新创业计划(S202211305007)。

作者简介:刘沐鑫(1983-),男,吉林扶余人,副教授,博士。E-mail:liumx49@163.com

目前国内外对煤的燃烧特性开展了大量研究,主要集中在褐煤、烟煤和无烟煤等变质程度跨度层次较大的煤种燃烧特性的对比研究方面^[4-5]。由于褐煤的形成地质条件和所处的地质环境存在差异,造成了不同褐煤的性质和结构的差异,这种差异导致了其燃烧特性的不同。因此,采用灵敏、有效的手段深入研究不同褐煤的燃烧特性差异,并在此基础上优化其燃烧过程,对于提高能源利用效率和减少环境污染具有重要的现实意义。热重技术是研究煤炭、生物质和焦炭等燃料燃烧性能的常用手段^[5-7],通过此方法可以获得热失重(TG)曲线和失重速率(DTG)曲线,进一步分析可以得到煤的着火温度、燃尽温度、最大燃烧速率温度、平均燃烧速率、可燃性指数和综合燃烧特性指数等表征煤炭燃烧特性的信息^[8-10]。尤其是根据 TG 数据构建的燃烧动力学

模型参数可以全面、灵敏的反映出煤炭的燃烧特征^[11-14]。因此,本研究通过非等温热重法考察了我国 5 种褐煤的燃烧特性,构建了褐煤的燃烧动力学模型,并分析了燃烧动力学参数与煤的结构特征之间的关系。

1 材料与方法

1.1 原料与试剂

实验选用 5 种褐煤,分别为昭通褐煤(ZT)、霍林河褐煤(HLH)、小龙潭褐煤(XLT)、胜利褐煤(SL)和新疆褐煤(XJ),这些褐煤的工业分析和元素分析数据如表 1 所示。煤样在使用之前破碎至 100 目,然后在 110 ℃ 真空干燥 24 小时后备用。实验所用的试剂均为分析纯市售试剂。

表 1 煤的工业分析和元素分析

样品	工业分析/wt%			元素分析/wt%				
	M _{ad}	A _d	V _{daf}	C	H	O*	N	S
ZT	32.4	11.4	56.0	63.09	4.91	30.86	0.98	0.16
HLH	11.8	1.3	51.4	68.60	4.72	25.67	0.42	0.59
XLT	3.6	10.2	49.3	68.77	4.91	22.88	2.05	1.39
SL	6.5	13.1	47.8	71.24	4.66	21.83	1.54	0.73
XJ	13.1	5.9	49.5	72.88	4.40	21.51	0.95	0.26

注:M:水分;A:灰分;V:挥发分;ad:空气干燥基;d:干基;daf:干燥无灰基;* :差减法。

1.2 非等温燃烧实验和燃烧特征参数的计算

采用 Netzsch STA 2500 Regulus 热重分析仪进行褐煤的非等温燃烧实验,样品重量为 10 mg,空气为载气,流速为 80 mL · min⁻¹,以 5 ℃ · min⁻¹ 的升温速率由室温升至 900 ℃。热重分析仪给出的 TG 数据为样品重量随温度的变化,为了方便不同煤种之间的比较和后续动力学计算,根据公式(1)将 TG 数据转化为干燥无灰基的煤的燃烧转化率 α (% , daf),然后根据公式(2)计算燃烧速率 V (min⁻¹),进而绘制出燃烧转化率和燃烧速率随温度变化曲线。为了深入对比不同褐煤的燃烧特性,按照国标 GB/T33304-2016 的方法^[4,9-10],根据燃烧转化率和燃烧速率曲线可以确定着火温度、燃尽温度、最大燃烧速率温度和最大燃烧速率。以 ZT 煤为例,这些参数的具体确定方法如图 1 所示。通过公式(3)、(4)、(5)可以分别确定平均燃烧速率、可燃性指数和综合燃烧特性指数。

$$a = (m_0 - m_t) / (m_0 - m_e) \times 100\% \quad (1)$$

$$V = da/dt \quad (2)$$

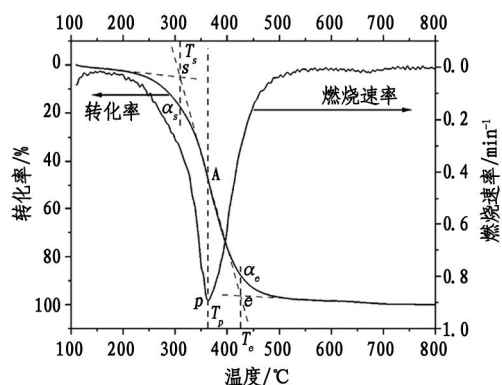


图 1 ZT 煤燃烧特征参数

$$V_m = \beta \frac{\alpha_s - \alpha_e}{T_s - T_e} \times 100\% \quad (3)$$

$$c = \frac{V_p}{T_s^2} \times 100\% \quad (4)$$

$$s = \frac{V_p \times V_m}{T_s^2 \times T_e} \times 100\% \quad (5)$$

以上公式中, t 、 m_0 、 m_t 和 m_e 分别为时间 t (min)、煤样的初始重量 (mg)、 t 时刻煤样的重量

(mg) 和燃烧实验结束后煤样的重量(mg), T_s 、 T_e 和 T_p 分别为着火温度(℃)、燃尽温度(℃)和最大燃烧速率温度(℃), V_p 和 V_m 分别为最大燃烧速率(min^{-1})和平均燃烧速率(min^{-1}), β 为升温速率($^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$), c 为可燃性指数($\text{min}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^2$), s 为综合燃烧特性指数($\text{min}^{-2} \cdot ^{\circ}\text{C}^3$)。 α_s 和 α_e 分别为着火温度的转化率(%)和燃尽温度的转化率(%)。

1.3 煤结构的表征及结构参数的计算

采用 Bruker AV 300 核磁共振仪(瑞士)对褐煤进行 ^{13}C -NMR 分析,检测共振频率为 75.5 MHz,脉冲宽度为 2.5 ms, MAS 转速为 12 kHz,接触时间为 3 ms,循环延迟时间为 5 s,扫描次数为 2000 次。根据文献[15]、[16]煤样的 ^{13}C -NMR 谱图可分为三个区域:0–90 ppm 为脂肪碳,100–165 ppm 为芳香碳,165–220 ppm 为羰基碳(归为脂肪碳)。根据公式(6)、(7),以及各个区域的积分面积可以计算出煤样的芳碳率(f_{ar})和脂肪碳率(f_{al})。

$$f_{ar} = A_{ar}/A_t \quad (6)$$

$$f_{al} = A_{al}/A_t \quad (7)$$

其中, A_{ar} 、 A_{al} 和 A_t 分别为 ^{13}C -NMR 谱图中芳香碳区域积分面积、脂肪碳区域积分面积和总积分面积。

采用 Nicolet iS10 红外光谱仪对煤样进行表征,采用 KBr 压片法制样(1 mg 煤样/100 mg KBr),扫描范围为 4000–400 cm^{-1} ,扫描次数为 64 次,扫描分辨率为 4 cm^{-1} 。根据红外光谱和公式(8)可计算芳香环缩合度(DOC)。

$$DOC = \frac{A_{700-900}}{A_{1600}} \quad (8)$$

其中, $A_{700-900}$ 和 A_{1600} 分别为红外光谱中 700–900 cm^{-1} 和 1600 cm^{-1} 的面积。

1.4 燃烧动力学数据处理与分析

根据文献[13,14]可知动力学方程的一般形式为:

$$\frac{d\alpha}{dt} = kf(\alpha) \quad (9)$$

其中, $f(\alpha)$ 为与反应机理有关的函数, k 为反应速率常数(min^{-1}), k 可以由 Arrhenius 公式表示为:

$$k = A\exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (10)$$

其中, A 为指前因子(min^{-1}), E 为活化能($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$), R 为气体常数,取值为 8.3145 $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, T 为绝对温度(K)。对于褐煤的燃烧过程 $f(\alpha)$ 可以表示为:

$$f(\alpha) = (1 - \alpha)^n \quad (11)$$

其中, n 为反应级数。将公式(10)、(11)代入公式(9)中可得:

$$\frac{d\alpha}{dt} = A\exp\left(-\frac{E}{RT}\right)(1 - \alpha)^n \quad (12)$$

公式(12)也可以表示为差分的形式,即:

$$\Delta\alpha = A\exp\left(-\frac{E}{RT}\right)(1 - \alpha)^n \Delta t \quad (13)$$

若实验测得的第 i 个和第 $i+1$ 个数据点对应的时间分别为 t_i 和 t_{i-1} ,转化率分别为 α_i 和 α_{i-1} ,代入公式(13)可得

$$\alpha_i = \alpha_{i-1} + A\exp\left(-\frac{E}{RT}\right)(1 - \alpha)^n(t_i - t_{i-1}) \quad (14)$$

$$t_i - t_{i-1} = (T_i - T_{i-1})/\beta \quad (15)$$

若已知升温速率 β ,则 $t_i - t_{i-1}$ 可用公式(15)表示,代入公式(14)可得:

$$\alpha_i = \alpha_{i-1} + A\exp\left(-\frac{E}{RT}\right)(1 - \alpha)^n \frac{T_i - T_{i-1}}{\beta} \quad (16)$$

根据褐煤燃烧的转化率随温度变化数据,通过最小二乘法 and 公式(16)即可求出动力学参数 E 、 A 和 n 。

2 结果与讨论

2.1 褐煤的燃烧特性

图 2(a)和图 2(b)分别为褐煤燃烧的转化率和燃烧速率曲线。从图中可以看出,这些褐煤燃烧的温度区间在 250–500 $^{\circ}\text{C}$ 的范围内,而且燃烧区间随着褐煤碳含量的增高向高温区移动。

表 2 为计算得到的褐煤的燃烧特征参数。根据表 1 和表 2 中的数据可以看出,随褐煤碳含量的增高,着火温度、燃尽温度和最大燃烧速率温度均随之增大,即着火温度、燃尽温度和最大燃烧速率温度随褐煤的变质程度的增高而增高。最大燃烧速率和平均燃烧速率随碳含量的增高而降低,表明褐煤的变质程度增高,则褐煤的燃烧速率变缓。可燃性指数 c 能够反映出煤样燃烧前期的反应能力, c 值越大表明煤的可燃性越好,而综合燃烧特性指数 s 可作为评价煤着火与燃尽综合特性的标准,其 s 值越大,煤样的燃烧性能越好。可燃性指数 c 和综合燃烧特性指数 s 均随褐煤碳含量的增高而降低,表明随褐煤变质程度增高,褐煤的可燃性和综合燃烧性能变弱。

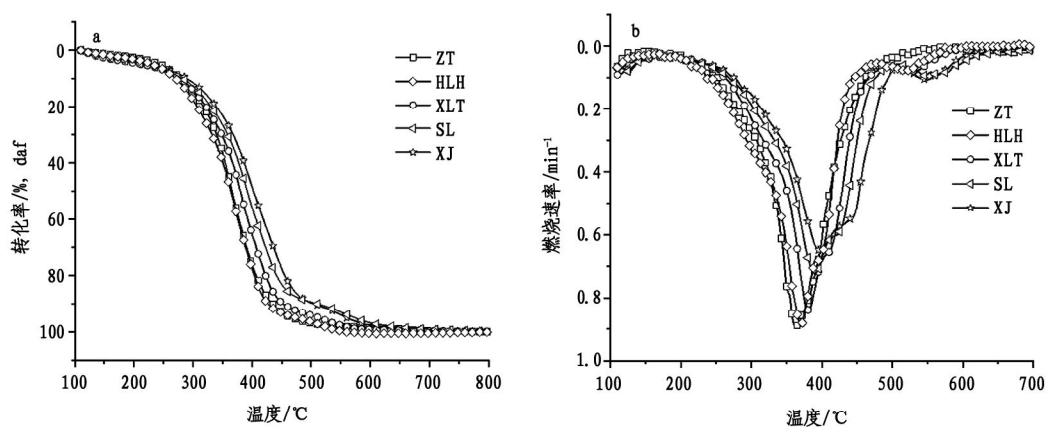


图2 褐煤燃烧转化率和燃烧速率

表2 褐煤燃烧特征参数

煤样	$T_s/^\circ\text{C}$	$T_p/^\circ\text{C}$	$T_e/^\circ\text{C}$	V_p/min^{-1}	V_m/min^{-1}	$c/10^{-6} \cdot \text{min}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-2}$	$s/10^{-8} \cdot \text{min}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^3$
ZT	308	363	425	0.89	0.030	9.4	6.6
HLH	323	370	420	0.88	0.032	8.4	6.4
XLT	324	380	444	0.84	0.028	8.0	5.0
SL	332	390	459	0.72	0.026	6.5	3.6
XJ	334	396	481	0.65	0.023	5.8	2.8

2.2 褐煤的非等温燃烧动力学

表3 为根据图2(a)中的实验数据,采用最小二乘法拟合得到的褐煤燃烧动力学参数和相关系数平方值 r^2 ,图3 为拟合得到的数据与实验数据的对比。从图3 可以看出,拟合数据与实验数据重合度较好,且 r^2 均大于0.993,表明拟合效果较好。从表3 中数据可以看出,5 种褐煤的燃烧活化能存在显著差异,活化能反映了燃烧的难易程度,可以反映出燃烧速率的快慢,活化能越小燃烧越容易进行,燃烧速率越快。5 种褐煤中 ZT 煤的活化能最低,为 $69 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$,其燃烧速率最快,而 XJ 煤的活化能最高,为 $101 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$,其燃烧速率最慢。

表3 褐煤燃烧动力学结果

煤样	$E/\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	A/min^{-1}	n	r^2
ZT	69	2.6×10^4	1.2	0.998
HLH	80	1.8×10^5	1.5	0.998
XLT	86	3.0×10^5	1.7	0.998
SL	92	4.6×10^5	2	0.994
XJ	101	1.8×10^6	2	0.993

2.3 燃烧活化能与煤挥发分的关系

图4 为褐煤非等温燃烧活化能与挥发分之间的关系。挥发分是反应煤化度的重要指标,煤的变质程度越高,煤的挥发分越低。挥发分也是反映煤炭燃烧性能的重要指标,从图4 中可以看出,随煤挥发分的增高,5 种褐煤燃烧的活化能随之降低,表明随挥发分的增高,煤炭越容易着火。这是由于煤受热产生的挥发分是易燃物质,张锦萍等^[17] 的研究表明挥发分的产生导致煤粒的比表面积增加,这也可能是挥发分高的褐煤易于燃烧的原因之一。

2.4 燃烧活化能与煤的元素组成的关系

图5 和图6 分别为活化能随褐煤碳含量和氧含量的变化规律。从图中可以看出,随碳含量的增加,活化能随之升高,与之相反,随氧含量的增加,活化能随之降低。煤炭中碳含量增加,一般表明煤结构中芳香结构增多,而易于热解生成挥发分的脂肪结构减少,氧含量增多表明易于热解产生挥发分的含氧官能团(主要是 C-O-C 结构)增多。较多的挥发分有利于煤的燃烧,所以呈现出图5 和图6 中的规律。此外,与挥发分类似,煤炭的碳含量和氧含量同样是反应煤变质程度的重要指标,随煤的变质程度的增高,碳含量增高而氧含量降低,因此,图中规律说明随着褐煤变质程度的增高,煤的燃烧速度减慢。

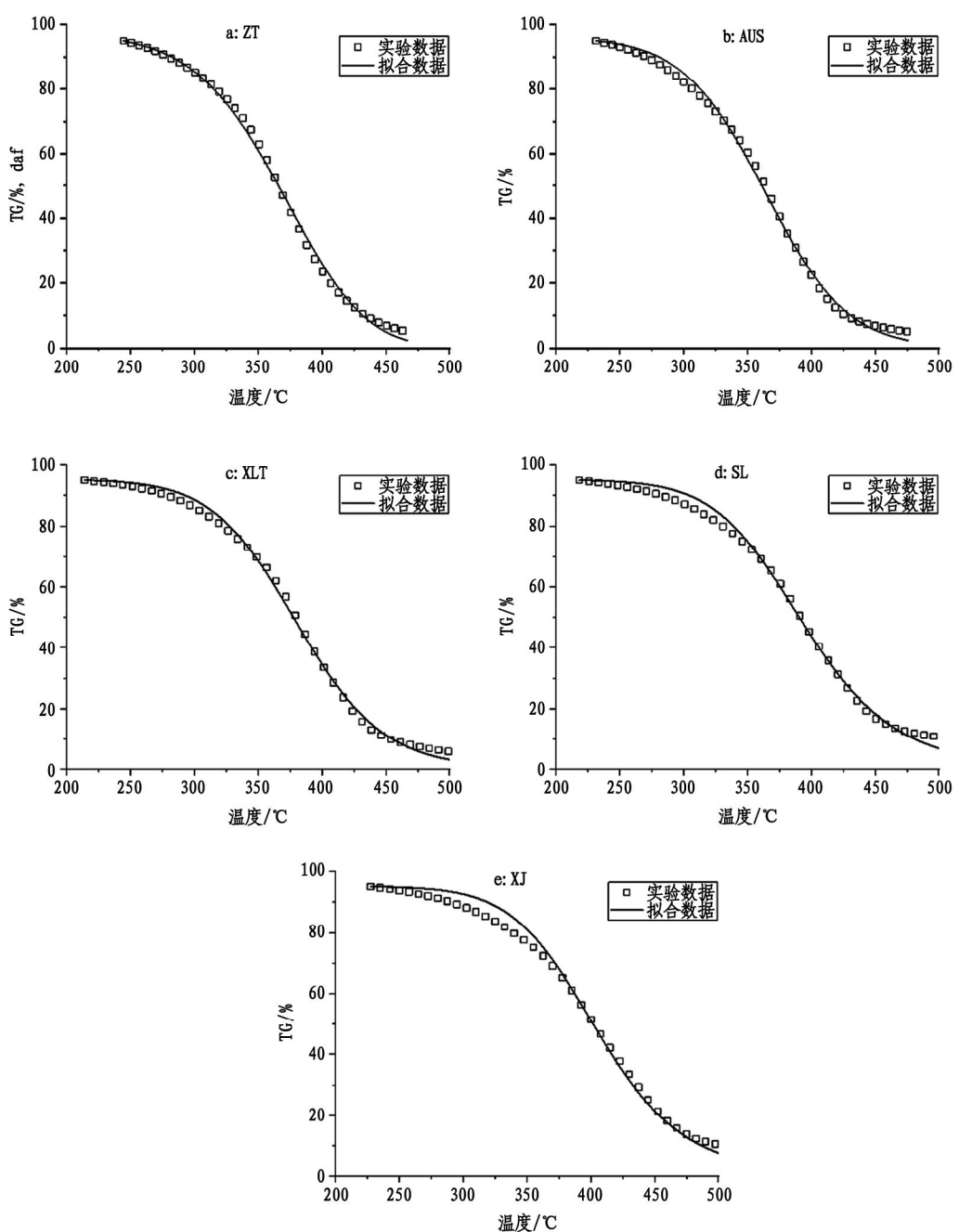


图 3 褐煤燃烧动力学拟合曲线

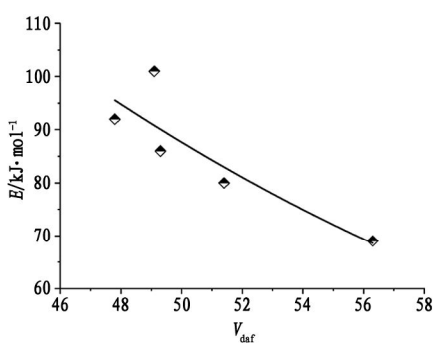


图 4 非等温燃烧活化能与挥发分关系

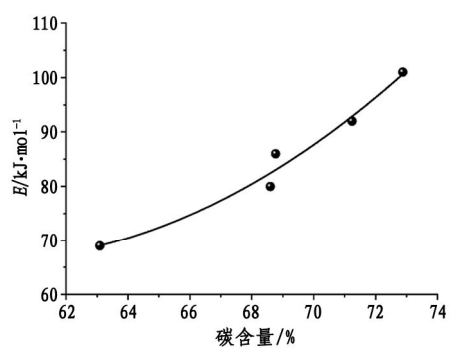


图 5 燃烧活化能与碳含量关系

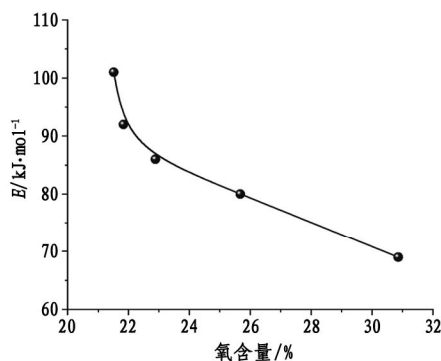


图6 燃烧活化能与氧含量关系

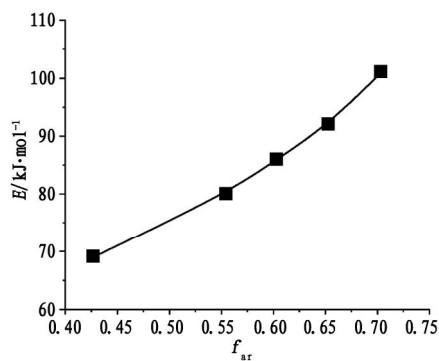


图8 燃烧活化能与芳碳率关系

2.5 燃烧活化能与煤结构的关系

图7为煤样的¹³C-NMR谱图,从图中可以看出100-165 ppm的芳香碳谱峰面积随着煤中碳含量的增加呈现增加的趋势,即不易燃结构呈现增多的趋势。

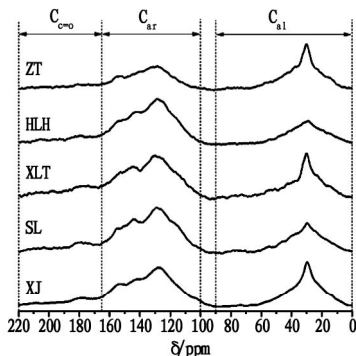


图7 褐煤 C-NMR

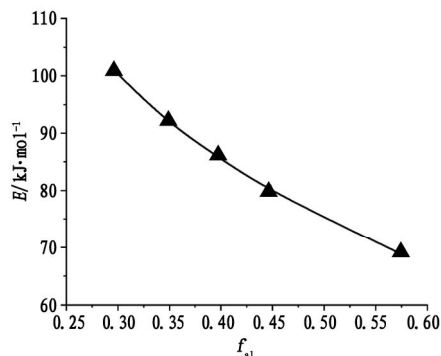


图9 燃烧活化能与脂肪碳率关系

图10为5种褐煤的红外光谱谱图,图中3700-3000 cm^{-1} 为羟基吸收峰,2950-2800 cm^{-1} 为脂肪族C-H吸收峰,1705 cm^{-1} 为C=O吸收峰,1600 cm^{-1} 为芳香环的C=C吸收峰,1380 cm^{-1} 为甲基吸收峰,700-900 cm^{-1} 为苯环C-H弯曲振动吸收峰。从图中可以看出,5种褐煤的红外光谱谱图存在差异,按照ZT、HLH、XLT、SL和XJ的顺序,脂肪族C-H、O-H和C=O的吸收峰依次减弱,这与表1中氢含量和氧含量的变化规律是一致的。图8表明褐煤的燃烧活化能与芳香结构有很好的相关性,为了进一步研究褐煤燃烧特性与其芳香结构的关系,根据公式(8)和红外光谱计算芳香环缩合度(DOC)并与燃烧活化能关联。图11为褐煤燃烧活化能与DOC的关系,从图中可以看出5种褐煤的DOC值在0.054至0.100之间,随着DOC值的增高褐煤燃烧的活化能呈现增高的趋势,表明随着褐煤芳环的缩合程度的增高,褐煤的燃烧速率减慢。通常,随着煤炭的变质程度增高,其芳环的缩合程度会随之增高。因此,图11中的现象也说明褐煤的燃烧速度随着变质程度的增高而变慢。

为了深入认识煤结构对褐煤燃烧的影响规律,根据公式(6)和公式(7)分别计算了5种褐煤的芳碳率和脂肪碳率。芳碳率和脂肪碳率是表征煤结构的重要指标,分别反映出芳香结构和脂肪结构在煤结构中的比例,不同煤炭中芳香结构和脂肪结构的比例不同,相应的燃烧过程也差异明显。图8和图9分别为5种褐煤非等温燃烧活化能与芳碳率和脂肪碳率的关系。由图可知,活化能随着芳碳率的增高而增高,与之相反,活化能随着脂肪碳率的增高而降低。此现象表明褐煤中脂肪结构越多,芳香结构越少,则褐煤越容易燃烧,燃烧速度越快。脂肪结构在受热过程中易于裂解,生成大量挥发性物质,这些物质易于燃烧,因此脂肪碳率越高燃烧活化能越低,这与图4的结果是一致的。煤炭的芳碳率和脂肪碳率随煤的变质程度的增高分别增高和降低,由此可见变质程度是影响褐煤燃烧特性的重要因素。

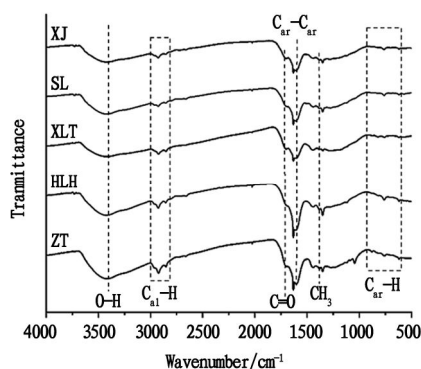


图 10 褐煤红外光谱

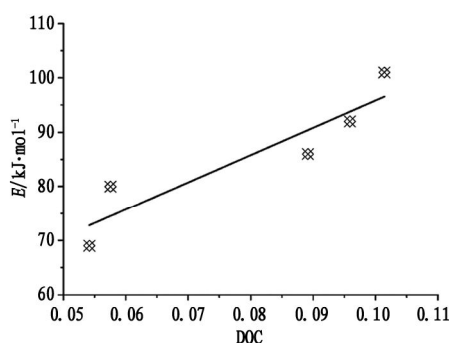


图 11 活化能与芳香环缩合度的关系

3 结论

通过非等温热重法考察了 ZT、HLH、XLT、SL 和 XJ 褐煤的燃烧特征,发现 5 种褐煤的着火温度、燃尽温度和最大燃烧速率温度随褐煤的变质程度的增高而增高,褐煤的可燃性和综合燃烧性能随褐煤变质程度的增高而变弱。通过构建褐煤燃烧动力学模型计算了褐煤燃烧的动力学参数,5 种褐煤燃烧的活化能在 $69 - 101 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 的范围内,活化能随着褐煤变质程度的增高而增高,即随着褐煤变质程度的增高,煤的燃烧速度减慢。煤中脂肪结构和含氧官能团的增高,有利于挥发分的生成,相应的褐煤燃烧的活化能降低,褐煤燃烧速度增快;煤中芳香结构的增高,以及芳香环缩合程度的增高,不利于挥发分的生成,相应的褐煤燃烧的活化能增高,褐煤燃烧速度减慢。

参考文献:

- [1] LEI Z, LIU M, SHUI H, et al. Study on the liquefaction of Shengli lignite with NaOH/methanol[J]. Fuel Processing Technology, 2010, 91: 783 - 788.
- [2] WANG Z, SHUI H, PAN C, et al. Structural characterization of the thermal extracts of lignite[J]. Fuel Processing Technology, 2014, 120: 8 - 15.
- [3] 王延君, 赵云飞, 何润霞, 等. 褐煤显微组分及碱处理对其结构和燃烧性能的影响[J]. 煤炭学报, 2023, 48(4): 1736 - 1746.
- [4] 王秋红, 马超, 刘著, 等. 3 种烟煤燃烧动力学特性对比分析[J]. 西安科技大学学报, 2022, 42(1): 22 - 32.
- [5] 夏志豪, 李吉嘉, 张月良, 等. 煤焦富氧燃烧特性及动力学研究[J]. 沈阳化工大学学报, 2023, 37(2): 104 - 111, 163.
- [6] KE D, ZHANG L, YAN J, et al. Interactions of co-firing coal gangue and high sodium coal: Combustion characteristics and emission behaviors of polluting gases[J]. Fuel, 2023, 339: 127382.
- [7] YAN J, WU Y, ZHANG L, et al. Synergistic retention of heavy metals and in-situ reduction of NO and SO₂ by co-combustion of sewage sludge and coal gangue: A promising approach for contaminant management and emission reduction[J]. Fuel Processing Technology, 2023, 252: 107984.
- [8] 鄢晓忠, 邱靖, 尹艳山, 等. 褐煤中官能团对其燃烧特性的影响[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(4): 169 - 174.
- [9] 武云飞. 基于非等温热重法的煤粉燃烧特性研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2019.
- [10] 胡源. 不同配比下褐煤混合燃烧特性试验研究及评价[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
- [11] 王波, 王勤辉, 卢鑫耀, 等. 多元低热值煤混合燃烧特性热重实验研究[J]. 能源工程, 2023, 43(3): 9 - 16.
- [12] 王小令, 王绍清, 陈昊, 等. 不同镜惰比低阶煤燃烧特性及动力学分析[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(9): 302 - 309.
- [13] SLOVÁK V. Determination of kinetic parameters by direct non-linear regression from TG curves[J]. Thermochimica Acta, 2001, 372: 175 - 182.
- [14] XIAO H, MA X, LIU K. Co-combustion kinetics of sewage sludge with coal and coal gangue under different atmospheres[J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51: 1976 - 1980.
- [15] LIU M, LEI Z, CAO X, et al. Construction of macromolecules of depolymerized lignite[J]. ACS Omega, 2023, 8(25): 22820 - 22826.
- [16] GUO S, GENG W, YUAN S, et al. Understanding the molecular structure of Datong coal by combining experimental and computational study[J]. Journal of Molecular Structure, 2023, 1279: 135035.
- [17] 张锦萍, 李冬, 张成, 等. 低温热提质褐煤的理化结构演化及燃烧特性[J]. 煤炭学报, 2015, 40(3): 671 - 677.

责任编辑: 于舒森

氦离子辐照对轧制 W-HfC 合金抗热冲击性能的影响研究

王永魁*, 吕长鹏

(1. 蚌埠学院 材料与化学工程学院, 安徽 蚌埠 233030; 2. 安徽省硅基新材料工程实验室, 安徽 蚌埠 233030)

摘要:通过机械球磨、真空烧结及热轧工艺制备了 W-0.5wt.% HfC (WHC05) 合金, 利用 100 eV 氦离子进行辐照 (剂量 $6.0 \times 10^{23} - 6.0 \times 10^{24} \text{ He} \cdot \text{m}^{-2}$), 并在 EMS-60 电子束设备中模拟聚变堆瞬态热负荷 (220–440 MW · m⁻², 5 ms 脉冲) 对轧制 (WHC05) 合金抗热冲击性能的影响。结果表明: 未辐照样品的抗热冲击开裂阈值为 330–440 MW · m⁻², 而高剂量辐照 ($6.0 \times 10^{24} \text{ He} \cdot \text{m}^{-2}$) 后阈值降至 220–330 MW · m⁻²。辐照诱导的导热系数降低和脆性增加是性能退化的主要原因, 第二相 HfC 颗粒通过钉扎效应抑制裂纹扩展。研究为聚变堆面向等离子体材料的优化设计提供了关键数据支撑。

关键词:钨合金; 抗热冲击; 离子辐照; 耦合作用

中图分类号: TG146.411

文献标识码: A

文章编号: 2095–297X(2025)05–0014–05

Effect of Helium Ion Irradiation on Thermal Shock Resistance of Rolled W-HfC Alloy

WANG Yongkui*, LYU Changpeng

(1. School of Material and Chemical Engineering, Bengbu University, Bengbu, 233030, Anhui;

2. Anhui Provincial Engineering Research Center of Silicon-Based Materials, Bengbu, 233030, Anhui)

Abstract: W-0.5wt.% HfC (WHC05) alloy was prepared by mechanical ball milling, vacuum sintering and hot rolling. The effect of 100 eV Helium ion irradiation (dose $6.0 \times 10^{23} - 6.0 \times 10^{24} \text{ He} \cdot \text{m}^{-2}$) on the thermal shock resistance of rolled (WHC05) alloy was studied, and the effect of fusion reactor transient heat load (220–440 MW · m⁻², 5 ms pulse) on the EMS-60 electron beam equipment was simulated. The results showed that the thermal shock cracking threshold of the unirradiated samples is 330–440 MW · m⁻², while the threshold is reduced to 220–330 MW · m⁻² after high dose irradiation ($6.0 \times 10^{24} \text{ He} \cdot \text{m}^{-2}$). The decrease of thermal conductivity and the increase of brittleness induced by irradiation are the main reasons for the performance degradation. The second phase HfC particles inhibit crack propagation through pinning effect. The research provides key data support for the optimization design of plasma oriented materials for fusion reactors.

Key words: Tungsten alloy; thermal shock resistance; ion irradiation; coupling effect

可控核聚变能源技术作为人类探寻清洁能源体系的战略方向, 被视为实现能源供给与生态保护协调发展的根本性突破方案。在众多技术路线中, 基于环形磁场的托卡马克装置展现出最具工程可行性的发展前景。这类磁约束装置内部存在的超高温等

离子体、强中子辐照及复杂电磁场等多物理场耦合作用, 对聚变堆关键部位使用的高性能结构材料提出了前所未有的性能挑战, 需要其具备耐极端热负荷、抗辐照损伤以及优异力学稳定性等复合特性^[1–3]。

收稿日期: 2025–04–09 * 通讯联系人

基金项目: 安徽高校自然科学基金重点项目 (2023AH052945); 蚌埠学院自然科学研究项目 (2024YYX33QD); 新能源材料与器件重点创新研究团队 (BBXYKYTDxjZD01)。

作者简介: 王永魁 (1990–), 男, 安徽蚌埠人, 讲师, 博士。E-mail: wyk@bbc.edu.cn

钨基材料具有高熔点、低溅射率、低氦滞留、低热膨胀系数、低化学腐蚀等优异性能,是最有希望的第一壁材料^[4-6]。但钨具有低温脆性、辐照脆性、抗热震性差等特点,严重影响了钨在聚变堆中的应用^[7-8]。

在聚变堆第一壁材料服役寿命的关键制约因素中,周期性热应力引发的热疲劳损伤尤为突出,当装置运行过程中出现瞬时能量沉积超过数十兆焦/平方米量级的极端热负荷时,仅需微秒级脉冲持续时间即可引发偏滤器组件的热失效机制^[9]。这凸显了探究钨基合金在瞬态高热流冲击下动态响应的必要性。值得注意的是,实际工况中材料需同步承受氢同位素渗透、氦离子沉积及梯度热场等多物理场耦合作用,其协同效应会显著改变材料的本征特性^[10]。

为提升钨基材料在极端热载荷下的服役性能,普遍采用纳米第二相强化策略。通过引入 Y_2O_3 、ZrC、HfC 等纳米级陶瓷颗粒^[11-13],可在基体中形成多重强化机制。这种微观结构的协同优化不仅赋予材料优异的机械性能,更使其在瞬态热冲击条件下展现出独特的抗损伤特性。然而,聚变堆极端服役环境下多物理场协同作用可能引发材料性能的不可逆演变,需建立多维度的评估体系。

本研究针对 W-0.5wt. % HfC (WHC05) 合金体系采用梯度热负荷模拟与离子注入联用实验策略^[14],系统解析复合环境对材料热力学响应的耦合作用机理。首先通过构建不同热流密度的实验条件,系统研究材料微观结构演变规律;随后在热冲击测试前对试样实施氦离子梯度剂量辐照预处理,精确模拟聚变堆中氦离子沉积与高能粒子轰击的协同损伤效应。这种分阶段复合加载的试验设计,不仅可定量表征辐照缺陷对热冲击裂纹萌生的影响阈值,更能揭示等离子体-热应力交互作用下材料损伤的跨尺度演化机制,为聚变堆材料服役可靠性评估提供关键实验依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

W-0.5wt. % HfC (WHC05) 复合材料的制备采用高纯度钨基粉体(纯度 $\geq 99.9\%$,厦门钨试剂)与微米级碳化钨粉体(粒径 $1.25\ \mu m$)作为原料。为优化材料均质性及成型特性,采用 WXQM-4B 型卧式行星磨系统(长沙天创)实施机械合金化处理。该工艺选用特殊构造的研磨容器:不锈钢外壳配合碳化钨内衬与研磨介质(球料比 8:1),能有效

防止杂质引入。在惰性气体保护环节,通过三次循环洗气将氧含量降至 $<0.1\ ppm$,水汽浓度同步控制于同等水平。研磨程序设定 300 rpm 的转速参数,采用正反转交替模式(正转 60 min/静置 20 min $\rightarrow$ 反转 60 min/静置 20 min)完成四个循环周期,总处理时长 4 h。经此工序获得的复合粉体在真空环境(1800 $^{\circ}C$ /20 min)完成致密化烧结后,通过热轧工艺将 21 mm 厚坯料加工至 6 mm 成品板材(规格 150 mm $\times$ 220 mm)。该制备体系通过材质优选与工艺参数协同控制,确保了最终制品的冶金质量与尺寸精度。

1.2 试验方法

WHC05 轧制试样首先经历 1000 $^{\circ}C/h$ 的预处理退火工艺,样品在 1000 $^{\circ}C$ 下退火 1 h 以减轻应力,这是储存或额外冷处理(包括研磨和抛光)之前的热处理。然后将样品切割成 10 mm $\times$ 10 mm $\times$ 4 mm 标准样块,并使用 10% 铁氰化钾和 10% 氢氧化钠的水溶液对所有表面进行抛光和蚀刻。使用金相显微镜(OM; ZEISS eAX10)对样品表面进行表征。通过安装在蔡司 SIGMA 场发射扫描电子显微镜(FESEM)上的晶体探测器(英国牛津郡牛津仪器公司)收集电子背散射衍射图(EBSD,加速电压为 10 kV),来分析样品的晶粒取向分布和晶粒尺寸。利用透射电镜(TEM, JEM-2000FX)研究第二相粒子的尺寸和分布。随后采用氦离子(He^+)注入技术对材料表面进行改性处理。辐照区域设定为直径 8 mm 的圆形靶区,离子源与样品间距保持 20 mm。实验采用 100 eV 加速电压,注入通量密度为 $3.7 \times 10^{21}\ ions/(m^2 \cdot s)$,辐照剂量梯度设置为 $6.0 \times 10^{23}\ ions \cdot m^{-2}$ 至 $6.0 \times 10^{24}\ ions \cdot m^{-2}$,以构建不同辐照损伤程度的对比样本。

热冲击评估实验在 EMS-60 型电子束热负荷平台(核工业西南物理研究院)完成。该装置配置 150 kV 高压电子枪与 1 ms 级脉冲控制系统,集成多模态监测单元包括红外热成像仪、光谱测温模块及高速视觉采集系统(见图 1)。电子束与材料交互时产生双重能量传递机制:弹性碰撞引发的背散射电子造成能量损失,非弹性碰撞则实现完全热能沉积。基于文献数据,本研究采用 0.55 的能吸收系数对入射能量进行校正^[15]。

实验参数设定:电子束加速电压 120 kV,4 mm $\times$ 4 mm 动态扫描区域,轴向扫描频率分别设定为 x 轴 37 kHz、 y 轴 27 kHz。通过对比辐照区与非辐照区的热响应特性(见图 2),系统评估材料抗热冲击性能的辐照效应。

研究通过模拟核聚变装置中极端热-辐照耦合工况,系统评估轧态 WHC05 合金的耐瞬态热负荷能力。实验设计依据聚变堆第一壁材料承受的典型热冲击条件(边缘局域模能量密度约 $1 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$),采用电子束加载方式在试样表面施加 $220 \sim 440 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$ 的功率密度,对应单脉冲(5 ms)能量沉积 $1.1 \sim 2.2 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$,每个试样累计承受 100 次循环热冲击。

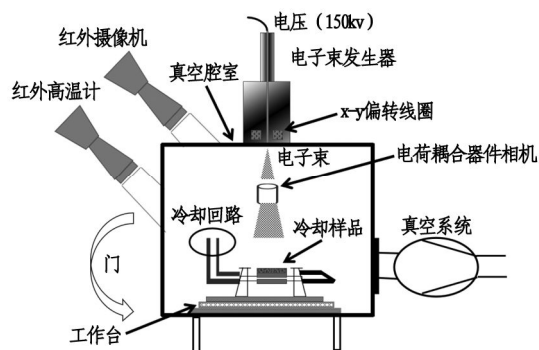


图1 EMS-60 热冲击仪器示意图

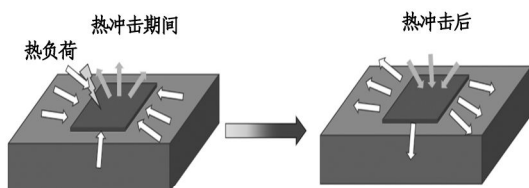


图2 辐照过程中样品表面的变化示意图

2 结果与分析

2.1 钨合金的微观结构

材料的微观结构对材料的力学性能具有极其重要的影响,而高力学性能的钨合金能有效地提高材料的抗热冲击性能。同时由于热轧能够细化晶粒,产生纳米级的亚晶,也能够很好地提高钨合金的抗辐照性能。因此,我们对退火 1000°C 的轧制 WHC05 合金进行了详细的微观结构分析。WHC05 合金表现出较长的晶粒,沿轧制方向和垂直轧制方向平均晶粒尺寸分别为 $140 \mu\text{m}$ 和 $21 \mu\text{m}$,对应的长宽比为 6.67,如图 3a 所示。随后利用具有电子背散射衍射 (EBSD) 分析能力的电子显微镜,对样品的晶粒分布进行分析。将向差大于 10° 的晶粒边界 (GBs) 用黑色的线表示,向差介于 $2^\circ < \theta < 10^\circ$ 之间的晶粒边界用银色的细线表示。在轧制 WHC05 中 (见图 3b),细长晶粒的长度和宽度分别为 $140 \mu\text{m}$ 和 $20 \mu\text{m}$,与金相结果一致。同时,我们发现大晶粒由 $3 \mu\text{m}$ 左右的亚晶组成。在轧制态 WHC05 的透射图 (TEM) 中观察到纳米级 HfC 颗粒,如图 3c 所示。纳米尺度的 HfC 颗粒均匀分布在 W 晶体中,这些在钨晶粒内的第二相颗粒可以钉扎和累积位错,提高材料的抗拉强度。此外,一些第二相颗粒与晶界紧密结合 (见图 3c),可以阻碍晶界的滑移,从而提高轧制 WHC05 合金的高温强度和稳定性。

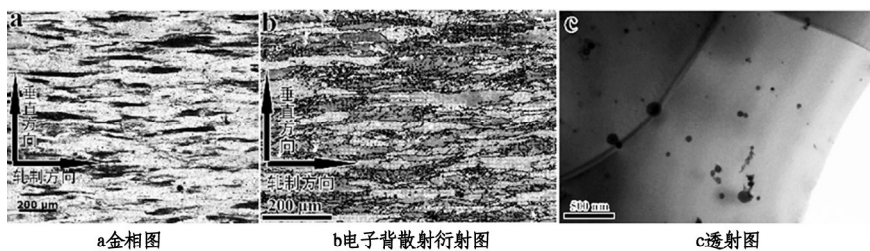


图3 WHC05 合金

2.2 未辐照钨合金的抗热冲击性能

基础性能测试中,未辐照试样在 $220 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$ (见图 4a) 与 $330 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$ (见图 4b) 功率加载下表面形貌保持完整,未出现明显损伤特征。当功率密度提升至 $440 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,试样表面形成由晶界

开裂主导的密集裂纹网络 (见图 4c),表明经 1000°C 退火处理的轧制 WHC05 材料临界失效阈值介于 $330 \sim 440 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间。该阈值范围验证了材料在模拟聚变热冲击条件下的结构稳定性边界。

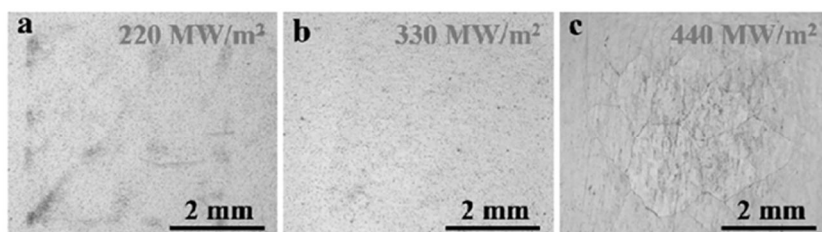


图4 不同能量密度热冲击后样品表面的金相照片

为深入解析高能热冲击下的材料失效机制,对 $440 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$ 能量加载后的试样进行扫描电镜表征(见图 5)。显微形貌分析显示,裂纹呈现准直扩展特征,平均宽度约 $5 \mu\text{m}$,且以沿晶界贯穿扩展为主导(见图 5a)。值得注意的是,第二相弥散强化相通过钉扎效应显著改变裂纹扩展路径:当裂纹尖端接触硬质颗粒时,其传播方向被迫发生偏转,形成绕流式分支裂纹(见图 5b),验证了增强相在裂纹抑制中的关键作用。

2.3 辐照后钨合金的抗热冲击性能

针对 He^+ 辐照改性试样的热冲击响应,实验采用 100 eV 氦离子注入(通量 $3.7 \times 10^{21} \text{ He} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 累计剂量 $6.0 \times 10^{23} \text{ He} \cdot \text{m}^{-2}$)后进行热负荷测试。当加载功率密度为 $220 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,辐照区表面形貌保持完整,与未辐照试样行为一致(见图 6a)。然而在 $330 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$ 热流作用下,辐照试样

表面出现显著塑性流变特征(见图 6b,图 6c),表现为波纹状形貌与局部材料堆积。对比分析表明,氦离子辐照引发的晶格损伤(如空位团簇、氦泡等缺陷)导致材料导热性能劣化(与体导热系数相比,辐照损伤层导热率降低了两个数量级,并且随着辐照温度和注量的升高而降低^[16]),致使热沉积区域热量积聚加剧,从而加速了辐照区的热软化与塑性失稳进程。

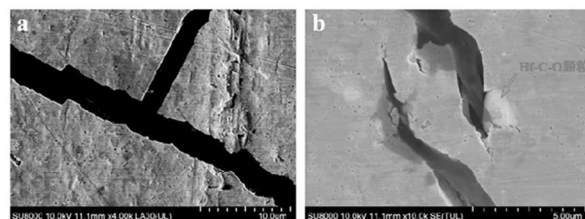


图 5 轧制 WHC05 受到 $440 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$ 热负荷的扫描图

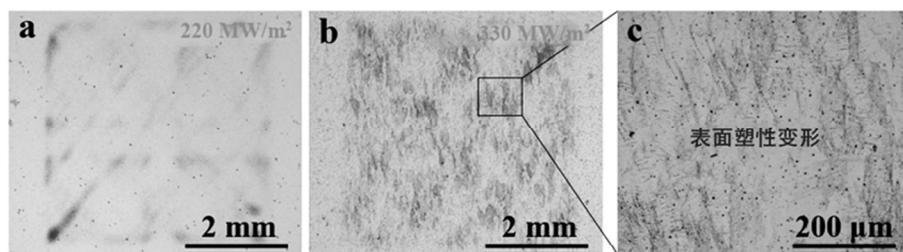


图 6 剂量为 $6.0 \times 10^{23} \text{ He} \cdot \text{m}^{-2}$ 辐照后热冲击样品表面的金相照片

在更高辐照剂量($6.0 \times 10^{24} \text{ He} \cdot \text{m}^{-2}$)条件下(维持 100 eV 注入能量与 $3.7 \times 10^{21} \text{ He} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 通量参数不变),材料热冲击响应呈现显著劣化趋势。当热流密度升至 $220 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,试样表面出现波纹状塑性流变特征;继续提升至 $330 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,辐照区域形成贯穿性裂纹网络(见图 7)。这表明高剂量辐照使材料临界失效阈值降至 $220 - 330 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$ 区间,较未辐照试样降幅达 $33\% - 50\%$ 。

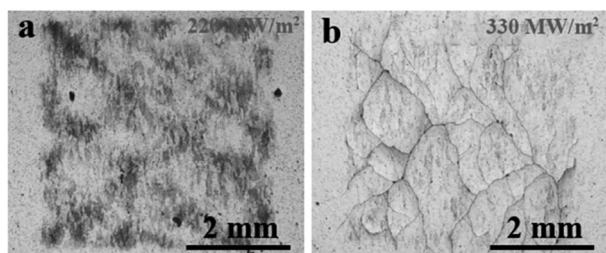


图 7 剂量为 $6.0 \times 10^{24} \text{ He} \cdot \text{m}^{-2}$ 辐照后热冲击样品表面的金相照片

对比不同辐照状态试样的损伤演化规律:未辐照与低剂量($6.0 \times 10^{23} \text{ He} \cdot \text{m}^{-2}$)试样在 $220 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$ 热流下均未发生塑性失稳,而高剂量辐照试样在此能量水平下发生明显形变;当能量达到 $330 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,高剂量组出现快速裂纹扩展现象。这种辐照剂量依赖的损伤敏感性增强可归因于两方面机制:(1)高浓度氦泡与位错环的协同作用导致晶界脆化,断裂韧性降低;(2)辐照缺陷对声子传输的散射作用使材料等效导热系数下降,加剧了热应力集中效应。该研究定量揭示了辐照损伤对钨基合金抗热冲击性能的剂量效应规律。

3 结论

研究系统揭示了氦离子辐照对轧制 W-0.5wt.% HfC (WHC05) 合金抗热冲击性能的剂量依赖性影响及其作用机制。通过机械合金化、真空烧结及热轧工艺制备的 WHC05 合金,在未辐照状态下展现出优异的抗热冲击性能,其临界失效阈值介于 $330 - 440 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间(对应 5 ms 脉冲能量沉

积 $1.65 - 2.2 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$)。然而,经高剂量氦离子辐照($100 \text{ eV}, 6.0 \times 10^{24} \text{ He} \cdot \text{m}^{-2}$)后,材料的抗热冲击性能显著退化,失效阈值降至 $220 - 330 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$,降幅达 $33\% - 50\%$ 。

参考文献:

- [1] HOLTkamp N. The status of the ITER design[J]. Fusion Engineering and Design, 2009, 84(2): 98 - 105.
- [2] MEROLA A, PALMER J. Targeted metallo-drugs: Design, development, and modes of action[J]. Fusion Engineering and Design, 2006, 81: 105.
- [3] 李建刚, 赵君煜, 彭子龙. 全超导托卡马克核聚变实验装置[J]. 中国科学院院刊, 2008, 23(5): 474 - 477.
- [4] NORAJITRA P, BOCCACCINI L V, DIEGELE E, et al. Development of a helium-cooled divertor concept: Design-related requirements on materials and fabrication technology[J]. Journal of Nuclear Materials, 2004, 329(part-PB): 1594 - 1598.
- [5] COTTRELL G A. A survey of plasma facing materials for fusion power plants[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2006, 22(8): 869 - 880.
- [6] NORAJITRA P, BOCCACCINI L V, GERVASH A, et al. Development of a helium-cooled divertor: Material choice and technological studies[J]. Journal of Nuclear Materials, 2007, 367(part-PB): 1416 - 1421.
- [7] STORK D, AGOSTINI P, BOUTARD J L, et al. Developing structural, high-heat flux and plasma facing materials for a near-term DEMO fusion power plant: The EU assessment[J]. Journal of Nuclear Materials, 2014, 455(1/3): 277 - 291.
- [8] 崔莉亚, 王长记, 赵子文, 等. 钨合金的强韧性研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2024, 53(12): 3539 - 3552.
- [9] MEROLA M, AKIBA M, BARABASH V, et al. Overview on fabrication and joining of plasma facing and high heat flux materials for ITER[J]. Journal of Nuclear Materials, 2002, 307: 1524 - 1532.
- [10] 刘伟, 陈婉琦, 马梦晗, 等. 聚变堆用 W 在等离子体作用下的辐照损伤行为研究进展[J]. 金属学报, 2023, 59(8): 986 - 1000.
- [11] LIU R, ZHOU Y, HAO T, et al. Microwave synthesis and properties of fine-grained oxides dispersion strengthened tungsten[J]. Journal of Nuclear Materials, 2012, 424: 171 - 175.
- [12] XIE Z M, LIU R, MIAO S, et al. Extraordinary high ductility/strength of the interface designed bulk W-ZrC alloy plate at relatively low temperature[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 16014.
- [13] WANG Y K, MIAO S, XIE Z M, et al. Thermal stability and mechanical properties of HfC dispersion strengthened W alloys as plasma-facing components in fusion devices[J]. Journal of Nuclear Materials, 2017, 492: 260 - 268.
- [14] WANG Y K, XIE Z M, WANG M M, et al. The superior thermal stability and tensile properties of hot rolled W-HfC alloys[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2019, 81: 42 - 48.
- [15] LIAN Y Y, LIU X, CHENG Z K, et al. Thermal shock performance of CVD tungsten coating at elevated temperatures[J]. Journal of Nuclear Materials, 2014, 455(1/3): 371 - 375.
- [16] QU S, SUN H, KRETER A, et al. Degradation of thermal conductivity of the damaged layer of tungsten irradiated by helium-plasma[J]. Fusion Engineering and Design, 2018, 137: 97 - 103.

责任编辑: 刘娟

巢湖主体流域全氟及多氟烷基化合物的分析研究

刘 群^{1*}, 郑西强², 张艺璇², 郭洪霞¹

(1. 安徽三联学院 现代康养产业学院, 安徽 合肥 230601; 2. 安徽省生态环境科学研究院, 安徽 合肥 230031)

摘 要:基于巢湖主体流域布设的12个采样点,选取水体中常见的PFASs和新型的PFASs为研究变量,通过化学分析方法检测目标污染物在巢湖表层水样、底层水样及沉积物样品的浓度水平,探究其分配规律,旨在揭示水体中全氟及多氟烷基化合物(PFASs)的空间分布、来源及风险,从而为巢湖主体流域的污染控制及预防提供一定的理论基础。

关键词:巢湖;全氟及多氟烷基化合物;分布规律

中图分类号:X524

文献标识码:A

文章编号:2095-297X(2025)05-0019-04

Analysis of Per-and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs) in the Main Basin of Chaohu Lake

LIU Qun^{1*}, ZHENG Xiqiang², ZHANG Yixuan², GUO Hongxia¹

(1. School of Modern Health and Regimen Industry, Anhui Sanlian University, Hefei, 230601, Anhui;

2. Anhui Province Environmental Science Research Institute, Hefei, 230031, Anhui)

Abstract: Based on the twelve sampling sites within the main basin of Chaohu Lake, common PFASs and novel PFASs alternatives in water bodies were chosen as target variables, and the concentration levels of these target pollutants were detected in surface water samples, bottom water samples, and sediment samples in the paper by using chemical analysis methods. The partitioning behavior of the pollutants across different environmental media was explored. It aims to reveal the spatial distribution, sources, and ecological risks of per-and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in aquatic environments. Ultimately, the findings are expected to provide a theoretical foundation for controlling and preventing organic pollution caused by such contaminants in the main basin of Chaohu Lake.

Key words: Chaohu Lake; per-and polyfluoroalkyl substances; regularities of distribution

全氟及多氟烷基化合物(Per-and Polyfluoroalkyl Substances, PFASs)是一类人工合成有机物^[1-2],其碳链中的氢原子部分或者全部被氟原子取代,新构成的共价键(C-F)具有较高的键能,因此PFASs的稳定性较高,具有较强的抗酸碱、耐高温,及耐氧化的能力,故广泛应用于消防、电镀、纺织、食品包装等各类工农业、生产生活中^[3-4]。近年来,随着工业废水和生活污水的排放,湖泊水质逐渐恶化,严重影响周边居民的健康。PFASs因碳氟键的极端稳定性及

抗降解特性,在水环境中呈现出持久性污染特征,需纳入优先控制污染物清单^[5],PFASs会逐步在食物链中累积、富集,传递到人体,并在人体的血液和肝脏等组织器官中存在,继而对人体的神经、生殖、肝脏和内分泌等系统造成损害^[6]。随着人类对其危害认识的加深,越来越多的科研工作者开始聚焦研究PFASs。以PFASs为关键词,以20年为时间轴,对中国知网文献进行检索,结果表明,相关研究文献的数量逐年增长,2022年发表的关于PFASs的文献

收稿日期:2025-05-06 * 通讯联系人

基金项目:省级质量工程专业服务安徽省新兴产业项目(2024fwxx063);安徽省质量工程项目线上线下混合式课程(2023xsxx364);安徽省质量工程项目智慧课程(2024aijy465)。

作者简介:刘群(1984-),女,安徽六安人,副教授,硕士。E-mail:liuqunxq@163.com

数量是2002年的71倍(2002年仅1篇),2023年增长至107篇,从西向东河流水质文献显示污染程度尚轻,从南到北河流污染程度加重,其中西北近合肥地区污染程度较重^[7-8]。合肥区域非常重要的一个湖泊是巢湖,其作为中国第五大淡水湖而闻名,为周边区域提供水源,有调节气候,保障生物多样性等生态功能。而近几年对巢湖主体流域的PFASs研究较少。因此,对巢湖水体中的传统PFASs及新型PFASs的研究具有现实意义,通过综合研究其空间分布、来源及风险,为巢湖主体流域的污染控制及预防提供一定的理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

材料:标准品PFASs,浙江省Wellington Laboratories(上海公司);PP离心管,本和科技有限公司;醋酸纤维滤膜(0.45 μm);机相滤头,诺卓生物科技有限公司;WAX固相萃取柱,美国Waters公司;进样瓶(2 mL)。

试剂:氨水、甲醇(HPLC级)、石英砂等。

仪器:SPE1000-6型全自动高通量柱式固相萃取系统、Q101型定量浓缩仪、离心机、真空抽滤装置、冷冻干燥机,快速溶剂萃取仪,高效液相色谱质谱联用仪(美国Waters公司)等。

1.2 试验方法

1.2.1 样品采集

在巢湖主体流域设置12个采样点(见图1),分别采取巢湖表层水样、底层水样及沉积物样品。全湖和支流入湖区共布设了12个取样点,于2022年4月到每个点位分别采集表层水、底层水和沉积物样品。水样品采集完毕后,装棕色试剂瓶(放于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱中保持),沉积物样品采集完毕后,于 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱中冷冻。

1.2.2 实验前处理

水样中污染物的预提取:取水样(0.5 L)分别用醋酸纤维滤膜(0.45 μm 孔径)和固相萃取小柱(200 mg,6 cc)进行过滤,活化小柱,水样以 $5\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速度通过小柱,收集水中的PFASs。接着,去除残留水分,分别用0.1%(v/v)氨-甲醇溶液和甲醇进行洗脱,速度为 $1\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。将洗脱液收集到聚丙烯管中,定量浓缩定容至1 mL,过滤膜(0.22 μm),最后将样品置于聚丙烯管中密封, $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷藏待测。

沉积样品中污染物的预提取:取1 g沉积物装入萃取池,采用加速溶剂萃取仪进行萃取,完成后将

溶剂按照水样相同的方法和条件进行小柱净化,定量定容,密封冷藏。

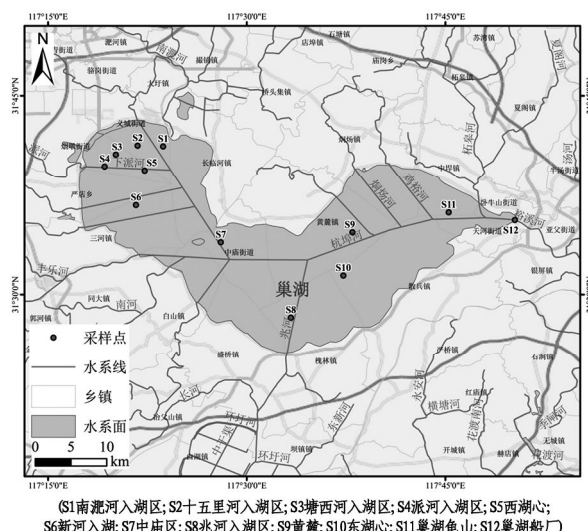


图1 巢湖主体流域采样点设置

1.2.3 仪器分析

采用超高效液相色谱串联质谱仪进行化学定量分析,超高效液相色谱配备的色谱柱为 $2.1\text{ mm}\times 100\text{ mm}, 1.7\text{ }\mu\text{m}$,柱温为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$,样品室温度为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,注入量为 $5\text{ }\mu\text{L}$,流速为 $0.3\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。质谱分析采用的是Waters Acquity Xevo TQ三重四级杆串联质谱仪,采用负离子模式检测目标化合物,质谱仪条件设置如下:毛细管电压 3.0 kV 、碰撞气体流速 $0.16\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 、离子源温度 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、锥孔反吹气流量 50 L/Hr 、脱溶剂气温度 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以及脱溶剂气流量 900 L/Hr 。

2 结果与分析

2.1 PFASs在巢湖水域中检出结果分析

巢湖主体流域污染物PFASs的检测情况如表1和表2所示。

通过数据可以看出,22种PFASs中有13种目标污染物被检出。各采样点表层水和底层水中 ΣPFASs 的浓度范围分别在 $10.08\text{--}135.72\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $58.57\text{--}229.50\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,平均检测浓度分别为 $84.91\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $126.5\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 。其中,PFPeA、PFHxA、PFHpA、PFOA、PFNA、PFBS、PFOS和6:2 FTS在巢湖表层水和底层水中的检出率均达到100%,而PFDoA、PFTTrDA、PFTTeDA、PFHxDA、PFDoDA、PFDS、6:2 Cl-PFE-SA、8:2 Cl-PFESA和ADONA未被检出。PFBA在表层水和底层水中的检出率分别为75.00%和83.33%,在底层水中PFOS、PFOA和PFBS的贡献率

位居前列。对于两种检出的 PFASs,6:2 FTS 平均浓度在表层水和底层水中分别高达 $61.02 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $94.71 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,分别占总浓度的 72% 和 74.78%,因 6:2 FTS 在金属和塑料表面的处理和氟聚物乳化过程中发挥着重要作用,因此许多氟化工厂选择将其作为 PFOS 的替代物使用,故其浓度偏高,可能与巢湖水域附近的氟化工厂有关。

2.2 PFASs 在巢湖主体流域各采样点表层水和底层水中的分布规律

表层水中 PFOA 在西湖心浓度最高,最低的在 S11,PFBS、PFOS 和 6:2 FTS 的空间分布特征与 PFOA 几乎完全吻合(见图 2)。然而 PFBA 空间分布特征与 PFOA 近乎相反,出现相反性的原因主要来自 PFBA 对 PFOA 的可替代性。PFOS 在表层水和底层水中的东西差异均很明显,表层水中 PFOS 在派河入湖口的浓度($8.0 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$)是龟山的 6.7 倍,底层水中 PFOS 在派河入湖口的浓度($33.9 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$)是龟山的 6.2 倍。PFBA 和 PFOS 在底层水的空间变化特征与表层水的一致,但其余 PFASs 的空间变化均不明显。

表 1 PFASs 在巢湖表层水中的检测情况

目标 污染物	检出率 /%	浓度范围 / $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$	平均浓度 / $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$
PFBA	75.00	nd - 3.81	1.40
PFPeA	100.00	0.64 - 2.19	1.25
PFHxA	100.00	1.20 - 2.15	1.49
PFHpA	100.00	0.87 - 2.23	1.60
PFOA	100.00	3.98 - 9.60	6.34

PFNA	100.00	0.45 - 1.22	0.87
PFDA	25.00	nd - 0.34	0.06
PFUnDA	16.67	nd - 0.08	0.02
PFBS	100.00	2.42 - 8.78	4.67
PFHxS	16.67	nd - 1.35	0.18
PFOS	100.00	1.18 - 8.03	3.66
6:2FTS	100.00	33.40 - 108.92	61.02
GenX	75.00	nd - 6.24	2.36

表 2 PFASs 在巢湖底层水中的检测情况

目标 污染物	检出率 /%	浓度范围 / $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$	平均浓度 / $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$
PFBA	83.33	nd - 7.94	2.46
PFPeA	100.00	0.81 - 3.45	1.60
PFHxA	100.00	0.93 - 2.20	1.71
PFHpA	100.00	0.97 - 2.50	1.70
PFOA	100.00	5.12 - 9.19	7.31
PFNA	100.00	0.47 - 1.22	0.91
PFDA	16.67	nd - 0.10	0.02
PFUnDA	16.67	nd - 0.08	0.01
PFBS	100.00	3.02 - 7.14	4.66
PFHxS	25.00	nd - 4.63	0.61
PFOS	100.00	1.10 - 33.92	8.88
6:2FTS	100.00	42.18 - 192.70	94.71
GenX	66.67	nd - 4.63	2.08

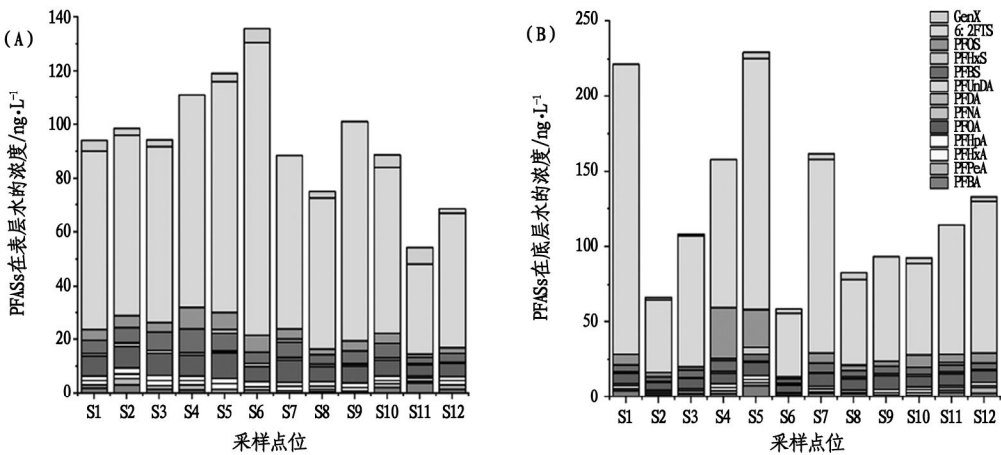


图 2 PFASs 在巢湖各采样点 (A) 表层水和 (B) 底层水中的分布特征

2.3 PFASs 在巢湖主体流域各采样点沉积物中的分布规律

巢湖水体污染物分布规律和沉积物的污染物分布规律表现出高度相似性(见图 3)。首先是西部浓

度比东部高,其次是派河入湖区(S4),表现出与水体检出情况一致的现象。检测浓度中度及最高的地区,经过调查发现,派河流域周边工业区有电子厂、包装厂,工业废水经过处理后排入派河,合肥经开区的污水处理主要以排入派河为主,因而派河承载了大量废水及其污染物,而污水处理工艺的效率不理想^[9],这也是 PFBA 在派河采样点富集的重要原因。针对 PFASs 在水体中及在沉积物中的相关分析,有助于理解污染物在人类环境中的迁移变化及规律,对人类的健康和可持续发展有重要意义。

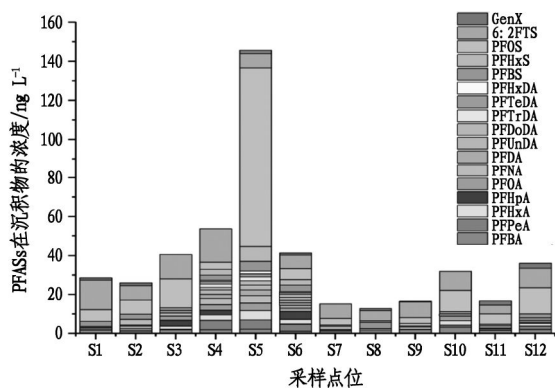


图3 PFASs 在巢湖各采样点沉积物中的分布

2.4 生态风险评估

水体中 PFASs 的持续性存在会对水生生物产生一定的毒害,所以参照慢性毒性数据进行风险评估更为科学,但是目前 PFASs 慢性毒性数据较少,因此本研究利用 PFASs 已知的 PNEC 值和慢性毒性数据,对 PFASs 可能产生的生态风险进行评估。目前,已知的 PNEC 值的物质包括 PFBA、PFPeA、PFHxA、PFOA、PFNA 和 PFOS,浓度分别为 7、32、97、100、100 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 25 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[10]。有文献表明,1000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 PFBS 对斑马鱼幼鱼生存率几乎没有影响,而 1200 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 PFBS 即可造成 40% 的幼鱼死亡^[11],故拟将 1000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 定为 PFBS 的 PNEC 值。有文献指出,6:2 FTS 的最敏感终点为对虹鳟的早期发育毒性,NOEC 值为 2.62 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[12],采用风险评估因子 10 得到 6:2 FTS 的 PNEC 为 262 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。由于沉积物中的 PFASs 缺乏毒性数据,故运用平衡分配法,计算沉积物中 PNEC 值。依据欧盟化学物质风险评价技术指导文件(TGD),得出沉积物中 PFOA 和 PFOS 的 PNEC 值,分别为 2060 $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 67 $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[13]。当下许多关于新型有机污染的风险评估中,PFASs 多采用熵值法进行评估,即以风险熵(Risk Quotient,RQ)为评价标准。水体中 PFASs 的 RQ 值计算公式为:

$$RQ = \text{MEC}/\text{PNEC}$$

其中,MEC 为目标物环境检测浓度($\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$),PNEC 为预测无效应浓度($\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$)。

PNEC 是污染物的无影响浓度和安全评价系数的比值,可从慢性毒理实验中获取,对于缺少的相关化合物的毒理数据,一般采用毒性数据 LC 或 EC50 来预测 PNEC。因污染物将长期存在于环境中,其中 PFASs 因其结构稳定,难以降解,将对人类的健康和生命产生重大威胁。

通过实验发现,PFASs 在巢湖主体流域中均有不同程度的检出,部分污染物的检出浓度较高,因此对该区域中污染物的生态风险评估有重要意义。本研究综合分析 PFASs 的 PNEC 值和慢性毒性数据,对污染物水平进行风险评估。结合表 3,巢湖水体中上述目标污染物的 RQ 值均远小于 0.1,表明各 PFASs 不会对当地水生环境造成生态风险。但需要注意的是沉积物中 PFOA 和 PFOS 的 RQ 值要高于表层水。

表3 RQ 值分类

RQ 范围	风险评价	风险控制
$RQ < 0.1$	低风险	定期监测
$0.1 < RQ < 1.0$	中度风险	加强环境监测
$RQ > 1.0$	高风险	立即采取风险控制措施

3 结论

以巢湖主体流域为研究对象,考察周边水体环境,布设采样点 12 个,通过对巢湖水体及沉积物样品的采集,分析 PFASs 在巢湖主体流域的检出情况。通过对 PFASs 在巢湖主体流域中的浓度范围、分布规律及生态风险评估,判断巢湖水体中污染物 PFASs 的总体情况。巢湖水体中的 22 种目标污染物表现出低风险,沉积物中的污染物表现 PFOA 和 PFOS 的风险熵值高于表层水,因此需要加强对巢湖主体流域沉积物 PFOA 和 PFOS 的检测与防控,以保障巢湖周边居民的用水安全。

参考文献:

[1]BUCK R C,FRANKLIN J,BERGER U,et al. Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in the environment:Terminology,classification, and origins[J]. Integrated Environmental Assessment and Management,2011,7(4):513-541.

(下转第 27 页)

AZ31B 镁合金异步轧制过程数值模拟研究

周 玉, 郑 祥, 赵 峻*

(巢湖学院 机械工程学院, 安徽 合肥 238000)

摘 要:基于热-力耦合有限元法,系统分析了异速比对 AZ31B 镁合金轧件温度场、等效应力场、等效应变场和轧制力的影响规律,结果表明高异速比可减少轧制过程中的热量损耗。随着异速比增大,轧件表面温降逐渐降低,心部温度逐渐上升,轧件温度趋向均匀分布。不同异速比下等效应力都表现出先增大后减小的变化趋势,等效应力峰值随着异速比的增大逐渐降低。等效应变随着异速比的增大而增加,轧件下表面的等效应变值始终大于上表面,心部等效应变最低。采用异步轧制能显著降低轧制力,有利于轧制过程的稳定性。

关键词:AZ31B 镁合金;异步轧制;有限元模型;异速比

中图分类号: TG337.1

文献标识码: A

文章编号: 2095-297X(2025)05-0023-05

Numerical Simulation of AZ31B Magnesium Alloy in Asymmetrical Rolling Process

ZHOU Yu, ZHENG Xiang, ZHAO Jun*

(School of Mechanical Engineering, Chaohu University, Hefei, 238000, Anhui)

Abstract: The effect of speed ratio on the temperature field, equivalent stress field, equivalent strain field as well as the rolling force of AZ31B magnesium alloy rolled strip was analyzed based on the thermal-force coupled finite element method. The results indicated that the increasing speed ratio could reduce the heat loss during the rolling process and suppress the decrease of the surface temperature of the rolled strip, while the middle temperature gradually increased. As a result, the variability of the temperature distribution of the rolled strip gradually decreased. The equivalent forces showed a tendency to increase first and then decrease for different speed ratios. Meanwhile, the peak value of the equivalent force gradually decreased with increasing speed ratio. The equivalent strain increased with the increasing speed ratio and the value of the equivalent strain on the lower surface of the rolled strip was always higher than that on the upper surface, whereas the middle of the rolled strip had the lowest equivalent strain. Asymmetrical rolling could significantly reduce the rolling force, which was beneficial to the stability of the rolling process.

Key words: AZ31B magnesium alloy; asymmetrical rolling; finite element model; speed ratio

镁合金作为最轻的结构材料,具有优异的强塑性、良好的阻尼性能、高比强度和比刚度等优点,在航空航天、能源动力和电子信息等领域得到广泛的应用^[1-2]。镁合金自身的密排六方结构,在轧制过程中易产生强基面织构,各向异性显著并容易引起边裂^[3]。此外,由于镁合金具有低比热和高热导的特性,轧制过程中轧件温度场分布不均匀,进而形成

非均匀相结构,对材料的性能造成不利影响。相关研究表明,弱化基面织构和细化晶粒是改善镁合金轧制过程成形性能和轧后板材综合性能最有效的方法^[4]。中高温轧制可降低非基面滑移的临界剪切应力,达到弱化基面织构和提高板材的成形性的目的^[5]。但在轧制过程中轧件温度降幅较大,需要轧件多次回炉才能保证稳定生产,增加了生产成

收稿日期: 2025-04-11 * 通讯联系人

基金项目: 巢湖学院校级重点项目(XLZ-202204)。

作者简介: 周玉(1990-),女,安徽霍山人,讲师,硕士。E-mail: zhaojun@chu.edu.cn

本。此外,镁合金在回炉保温后轧制还会使晶粒发生异常长大,造成材料力学性能和成形性能的下落^[6]。因此,传统的轧制工艺对镁合金性能提升有限,需要探索新工艺,进而制备高性能镁合金。

异步轧制是指通过调控上下辊直径或角速度使轧辊表面线速度不相等,或调节轧辊与轧件的接触摩擦系数使轧件表面获得不同的摩擦力大小和方向,从而造成变形区发生搓轧变形的新型轧制技术^[7]。由于线速度不同,轧件在厚度方向的金属流动差异会造成强烈的剪切变形。异步轧制时剪切力能够改变晶粒取向,并使晶粒 c 轴倾斜,削弱其基面织构强度,提升材料的成形性能^[5,8]。同时,剪切变形可以细化晶粒,提升材料力学性能。高翔宇等^[9]研究了同径异速和异径同速轧制工艺对镁合金 AZ31 成形过程的影响,发现异步轧制过程中引入的剪切变形可显著改善镁合金轧制边裂问题。KWAK 等^[10]以 Mg-13Zn-1.55Y 镁合金为研究对象,在异速比为 3 的工艺条件下将轧件厚度从 4 mm 轧制成 0.6 mm,发现异步轧制引发了连续动态再结晶,最终获得晶粒尺寸小于 1 μm 的精细显微组织,显著提高了材料的强度和塑性。王旭等^[11]研究了 1.5 异速比下 Mg-Gd-Y-Zn-Zr 镁合金轧件的微观组织演变和力学性能。结果表明,异步轧制后的轧件残留更少的变形区组织,动态再结晶程度更高,晶粒更加细小,轧件的力学性能得到显著提升。但目前关于 AZ31B 镁合金异步轧制有限元模拟研究的文献仍较为有限。本研究采用热-力耦合有限元法对 AZ31B 镁合金异步轧制过程进行研究,首先通过实验验证模型的可靠性,呈现了异速比对异步轧制过程中轧件温度场、等效应力场、等效应变场和轧制力的影响规律,为 AZ31B 镁合金异步轧制工艺的优化提供理论依据。

1 有限元模型的建立

采用 MSC. Marc 软件对 AZ31B 镁合金异步轧制过程进行研究,有限元模型如图 1 所示。由于轧制过程是热-力耦合变形过程,为提高模拟的准确性,将轧制中热传导和轧件的变形生成热耦合到模拟过程中,其中轧件与轧辊之间的接触换热系数设为 15 000 $\text{W}(\text{m}^2\text{K})^{-1}$;轧件、轧辊与空气之间的换热系数为 25 $\text{W}(\text{m}^2\text{K})^{-1}$ 。轧制过程中摩擦和变形产热转化系数分别设为 1 和 0.95。轧件与轧辊之间的摩擦采用库伦摩擦模型,摩擦系数为 0.3。AZ31B 镁合金的物化性能参数通过查文献^[12]可得。环境温度和轧辊温度均设为 25 $^{\circ}\text{C}$,轧制温度设为

350 $^{\circ}\text{C}$ 。轧件长度为 200 mm,宽度为 100 mm。在轧件厚度、宽度和长度方向各划分 $10 \times 20 \times 200 = 40\,000$ 个单元,取轧件中间厚度方向节点作为分析对象。轧件入口厚度为 10 mm,轧后厚度为 7 mm。轧辊直径为 400 mm,上辊转速设为 25 $\text{rad} \cdot \text{min}^{-1}$,通过调整下辊的转速,建立异速比 R_v 分别为 1.0、1.1、1.2、1.4 和 1.6 的有限元模型。

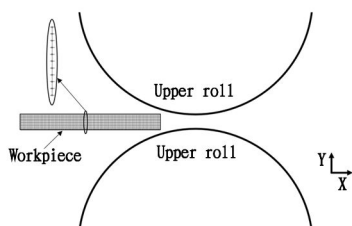


图1 AZ31B 镁合金异步轧制有限元模型

2 有限元模拟的验证

为验证异步轧制模拟结果的准确性,在轧件侧面利用电火花线切割设备,加工出网格线。异速比为 1.4 时,有限元模拟结果和实验得到的镁合金板材的宏观形貌如图 2 所示。由于上下轧辊线速度不同,造成轧件上下部分金属流动存在差异,使沿着轧制方向的轧件网格线产生倾斜。利用 ImageJ 软件测量网格线的倾斜角 θ ,并将轧制压下率 η 代入式(1),可计算出异步轧制所产生的剪切应变 γ ^[13]:

$$\gamma = \frac{\gamma(2-\eta)}{2(1-\eta)} \tan \theta \ln \left(\frac{1}{1-\eta} \right) \quad (1)$$

轧制后的轧件网格线与有限元模拟心部单元的倾斜角度平均值分别为 13.5 $^{\circ}$ 和 13.9 $^{\circ}$,误差仅为 2.96%。将轧件网格线的倾斜角度平均值带入式(1),计算得到剪切应变值为 1.34,与有限元模拟的平均值 1.39 非常接近。可见,轧制实验与有限元模拟结果吻合度较好,表明本研究建立的 AZ31B 镁合金异步轧制有限元模型是准确可靠的。

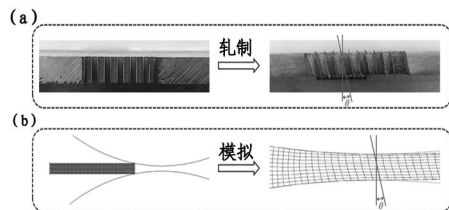


图2 轧制实验与有限元模拟结果对比

3 结果与分析

3.1 温度场分析

图 3 为不同异速比下轧件的温度分布。由图 3 可见,异速比对轧件表面温度变化影响显著,但对心部温度影响较小。异速比的增大可减少轧制过程中

的热量散失,轧件表面温降逐渐降低,而心部温度逐渐上升,轧件温度趋向均匀分布。同步轧制时,轧件表面最大温降为 $51.33\text{ }^{\circ}\text{C}$;当异速比为 1.1 时,轧件表面最大温降为 $48.12\text{ }^{\circ}\text{C}$;当异速比增大至 1.6 时,轧件表面最大温降为 $38.73\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这是由于异速比的增大,降低了轧件与轧辊接触换热时间,抑制了轧件热量散失,进而导致变形区内表面温度降幅减小。此外,异速比的增大也会增强变形区内剪切变形程度,塑性变形功随之增大,温度效应愈显著。同时,

还可以观察到下表面节点温度略大于上表面,这是由于下表面线速度较大,摩擦生成热大于上表面,可以降低部分热量损失。随着轧制过程的进行,轧件与空气和轧辊接触发生传热以及轧件内部热传导作用下,轧件表面与心部温差逐渐减小。这有助于改善轧件变形均匀性。由于镁合金轧件轧制变形对温度要求较高,采用高异速比一方面能够减小轧制过程中热量耗散,还可以减弱轧件温度分布差异。

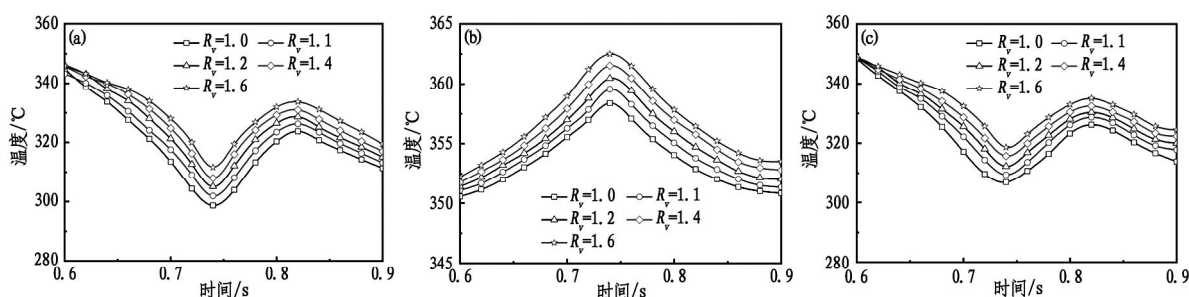


图 3 不同异速比下轧件(a)上表面、(b)心部和(c)下表面温度分布

3.2 等效应力场分析

图 4 为不同异速比下轧件的等效应力分布。由于刚塑性交界面强剪切和变形过程加工硬化作用,大幅度增加了变形抗力^[14]。随着轧制过程的进行,轧件变形区塑性变形量不断增加,诱发动态再结晶的发生,软化开始占据主导作用,从而造成等效应力达到峰值后逐渐降低的现象。同时,还可以观察到轧件等效应力的分布具有不对称性,上表面等效应力值低于下表面,而心部最低。异速比的增加有利于轧件温度场均匀分布,有助于改善变形均匀性,从

而降低应力的产生。此外,由于异步轧制时,上下轧辊速度差造成轧件表面产生金属流动差,中性点发生迁移并形成搓轧区。这一特殊区域所引起的附加剪切应力可显著削弱外摩擦力所形成的水平压力对变形的阻碍,降低轧制过程中的摩擦峰^[15]。这也是异步轧制时各节点等效应力值低于同步轧制的原因。随着异速比的增大,剪切应力逐渐增加,其降低上下表面等效应力的作用也愈发显著^[16]。异步轧制等效应力主要受搓轧区内剪切应力的影响,异速比的增大可促使轧件等效应力分布更加均匀。

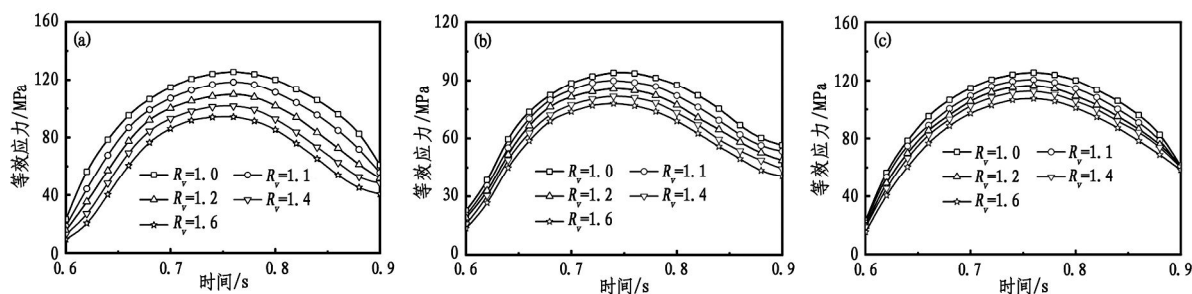


图 4 不同异速比下轧件(a)上表面、(b)心部和(c)下表面等效应力分布

3.3 等效应变场分析

图 5 为不同异速比下轧件的等效应变分布。由于轧制过程中变形区厚度、方向、尺寸逐渐减小,等效应变值逐渐增大,且表面等效应变值略大于心部,如图 5 所示。同步轧制时,上下表面等效应变呈对称分布。异步轧制时,上下表面等效应变值在入口端几乎相等,其余变形区内下表面的等效应变值始

终大于上表面,且上下表面等效应变的差异随着轧制过程的进行逐渐增大,不对称性分布愈发明显。轧件上下表面金属流动速度不同是造成等效应变变化的根本原因。同步轧制时,轧件上下表面金属流动速度相同,其等效应变呈对称分布。由于异步轧制搓轧区同时发生压缩变形和剪切变形。因此,相比于异步轧制,轧件在同步轧制时变形区内等效应

变值较小。异步轧制时,由于轧件下表面的金属流动速度大于上表面,所以下表面的等效应变大于上表面。而轧件心部金属流动速度最小,其等效应变也小于轧件表面。此外,还可以观察到随着异速比的增大,上下表面等效应变的差值也随之增大,加剧了剪切变形程度。由于异速比增加造成剪切应变不断向心部渗入,造成心部等效应变也随之增加。由上述分析可知,高异速比可以获得更高的等效应变,

但异速比的增加会扩大轧件上下表面之间的变形差异,不利于轧件厚度方向的变形均匀性。由图 5 可知,当异速比为 1.0~1.4 时,各节点等效应变差值变化幅度较小,但是由 1.4 增加至 1.6 时,却表现出较大的增幅。因此,异速比为 1.4 是一个较好的选择,此时轧件变形区内变形差异较小,温度场和等效应力场分布也较均匀,有利于力提高轧件变形的均匀性。

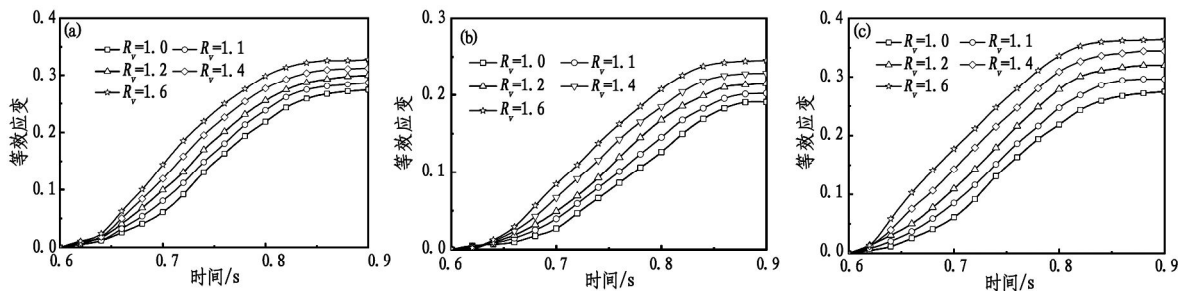


图 5 不同异速比下轧件(a)上表面、(b)心部和(c)下表面等效应变分布

3.4 轧制力分析

图 6 为不同异速比下轧制力的变化曲线。当轧件头部进入辊缝后,轧件发生塑性变形,轧件与轧辊的接触面积不断增加,造成轧制力迅速增加;当轧件头部通过辊缝后,轧件与轧辊的接触面积保持不变,轧制力进入相对平稳的状态,在一定范围内呈锯齿状分布;当轧件尾部脱离辊缝后,轧制力迅速下降至 0 N。相较于同步轧制,异步轧制能显著降低轧制力。这是由于异步轧制搓轧区内上下表面摩擦力方向相反,改变了静水压力的变化趋势,消除了摩擦峰^[17]。此外,轧件在变形区内存在附加剪切应力,削弱了外摩擦水平压力对变形的阻碍,使轧制变形总压力下降。另一方面,异步轧制降低了轧件的温降幅度,与同步轧制相比,提高了轧件变形区内温度,降低了变形抗力。异步轧制时单位压力降低幅度与搓轧区宽度成正比,而搓轧区宽度随着异速比的增大逐渐增加^[18-19]。因此,轧制力随着异速比的增加而不断降低。异步轧制时提高异速比不仅有利于轧制力的降低,还可以提高轧制过程稳定性,降低对轧机强度的要求。

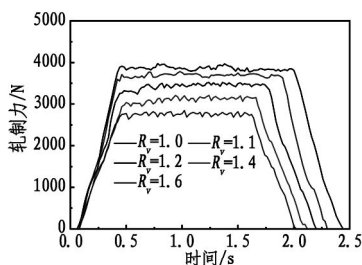


图 6 不同异速比下轧制力的变化曲线

4 结论

随着轧制过程的进行,在接触传热和塑性变形热作用下,轧件表面和心部出现温度梯度。随着异速比的增大,轧件表面温降逐渐降低,心部温度逐渐上升。提高异速比能够减小轧制过程中热量耗散,减弱轧件温度分布差异。

不同异速比下变形区等效应力都呈现先增大后减小的规律,等效应力峰值随着异速比的增大逐渐降低。异速比的增大可促使轧件变形区内等效应力分布更加均匀。

轧件上下表面金属流动速度不同造成等效应变不对称性分布,上表面等效应变值低于下表面,而心部最低。增大异速比可以获得更高的等效应变,但会增大轧件上下表面之间的变形差异,不利于轧件厚度方向的变形均匀性。

相较于同步轧制,异步轧制能显著降低轧制力,增强材料的塑性变形,提升轧制稳定性,且轧制力峰值随着异速比的增大逐渐降低。

参考文献:

- [1] WANG S, LIU S, ZHU Y D, et al. Effect of high-density twinning induced by electromagnetic drive forming on plastic deformation of AZ31B magnesium alloy [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 116: 11-24.
- [2] 郭伟, 李桐. 等温锻造温度对机械外壳用 Mg-8Al-1Zn-0.5Ca 镁合金组织与性能的影响 [J]. 锻压技术, 2024, 49(10): 15-20.

- [3] 程子洲,赵莉萍,王小青,等. 稀土镁合金的研发及应用现状[J]. 稀土信息,2022(5):30-35.
- [4] 张娜娜,李全安,陈晓亚,等. 变形镁合金织构调控的研究进展[J]. 材料热处理学报,2024,45(8):13-26.
- [5] 赵磊杰,马立峰,韩廷状,等. 变形镁合金轧制成形研究进展[J]. 材料导报,2020,34(21):21135-21145.
- [6] AMJAD J,FRANK C. Effect of hot rolling on microstructure and properties of the ZEK100 alloy[J]. Journal of Magnesium and Alloys,2019,7(1):27-37.
- [7] 曹通,郑小平,谢文杰,等. 异步轧制温度对 SPCC/AM60/SPCC 复合板组织与性能的影响[J]. 热加工工艺,2023,52(17):68-72.
- [8] SHIM M,SUH B,KIM J H, et al. Effect of differential speed rolling on the texture evolution of Mg-4Zn-1Gd alloy[J]. Metals and Materials International,2015,21(3):490-497.
- [9] 高翔宇,黄庆学,朱琳,等. 异步轧制 AZ31 镁合金板带的研究[J]. 热加工工艺,2017,46(21):90-93.
- [10] KWAK T Y, KIM W J. Superplastic behavior of an ultrafine-grained Mg-13Zn-1.55Y alloy with a high volume fraction of icosahedral phases prepared by high-ratio differential speed rolling[J]. Journal of Materials Science & Technology,2017,33(9):919-925.
- [11] 王旭,黄元春,王强,等. 异步轧制对 Mg-Gd-Y-Zn-Zr 板材组织、织构和性能的影响[J]. 稀有金属,2023,47(7):934-941.
- [12] 蔡志勇. AZ31B 镁合金板材热轧变形行为研究[D]. 长沙:中南大学,2010.
- [13] KAMIKAWA N, SAKAI T, TSUJI N. Effect of redundant shear strain on microstructure and texture evolution during accumulative roll-bonding in ultralow carbon IF steel[J]. Acta Materialia,2007,55(17):5873-5888.
- [14] 梅瑞斌,包立,张欣,等. AZ31 镁合金带材热轧制温度及变形均匀性[J]. 中国有色金属学报,2023,33(12):3991-4001.
- [15] 唐佳伟,帅美荣,王海宇,等. 异速比对镁合金板材轧制成形的影响分析[J]. 太原科技大学学报,2020,41(4):302-306.
- [16] 王振华,刘元铭,王涛,等. 铜/铝/铜复合板异步轧制变形行为有限元分析[J]. 锻压技术,2022,47(7):175-183.
- [17] 张孝彦,张冀,王卓,等. 平整过程中异步轧制轧制压力计算模型[J]. 钢铁,2024,59(1):108-116.
- [18] 王铭宗,罗海燕,姚利仁. 异步轧制变形区单位压力纵向分布的实验研究[J]. 钢铁研究学报,1990(2):23-30.
- [19] 马存强,侯陇刚,庄林忠,等. 铝合金板材同步/异步轧制变形行为有限元分析[J]. 塑性工程学报,2018,25(6):125-132.

责任编辑:李壮

(上接第 22 页)

- [2] ARVANITI O S, ANDERSEN H R, THOMAIDIS N S, et al. Sorption of perfluorinated compounds onto different types of sewage sludge and assessment of its importance during wastewater treatment[J]. Chemosphere,2014,111:405-411.
- [3] WANG Z Y, DE W J C, HIGGINS C P, et al. A never-ending story of per-and polyfluoroalkyl substances (PFASs) [J]. Environmental Science and Technology,2017,51(5):2508-2518.
- [4] GLÜGE J, SCHERINGER M, COUSINS I T, et al. An overview of the uses of per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) [J]. Environmental Science Processes & Impacts, 2020,22(12):2345-2373.
- [5] 洪雷,丁倩云,亓祥坤,等. 吸附法去除水中全氟化合物的研究进展[J]. 环境化学,2021,40(7):2193-2203.
- [6] SUNDERLAND E M, HU X C, DASSUN CAO C, et al. A review of the pathways of human exposure to poly-and perfluoroalkyl substances (PFASs) and present understanding of health effects[J]. Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology,2019,29(2):131-147.
- [7] 杜国勇,蒋小萍,卓丽,等. 长江流域重庆段水体中全氟化合物的污染特征及风险评价[J]. 生态环境学报,2019,28(11):2266-2272.
- [8] LI Y, FENG X, ZHOU J, et al. Occurrence and source apportionment of novel and legacy poly/perfluoroalkyl substances in Hai River basin in China using receptor models and isomeric fingerprints[J]. Ecology, Environment & Conservation,2020,168:115145.
- [9] CHEN S, ZHOU Y, MENG J, et al. Seasonal and annual variations in removal efficiency of perfluoroalkyl substances by different wastewater treatment processes [J]. Environmental Pollution,2018,242:2059-2067.
- [10] 杨晓溪. 双酚 AF 和全氟化合物对斑马鱼的毒性效应研究[D]. 武汉:华中农业大学,2014.
- [11] HOKE R A, FERRELL B D, RYAN T, et al. Aquatic hazard, bioaccumulation and screening risk assessment for 6:2 fluorotelomer sulfonate [J]. Chemosphere, 2015, 128: 258-265.
- [12] 曹莹,周腾耀,刘秀华,等. 我国环境中全氟辛酸(PFOA)的预测无效应浓度推导[J]. 环境化学,2013,32(7):1180-1187.
- [13] 黄柳青,王雯冉,张浴瞳,等. 地表水中全氟及多氟烷基化合物(PFASs)的污染现状研究进展[J]. 环境化学,2024,43(3):693-710.

责任编辑:李云

基于多特征融合的齿轮箱故障诊断算法研究

张 坤^{1*}, 刘 松², 张德祥³

(1. 安徽文达信息工程学院 实验实训与固定资产管理处, 安徽 合肥 231201;

2. 安徽文达信息工程学院 智能制造学院, 安徽 合肥 231201;

3. 安徽大学 电气工程与自动化学院, 安徽 合肥 230601)

摘 要:对于大多数旋转机械传动系统, 齿轮箱的状态监测和故障诊断对于避免事故和保持运行稳定性具有重要意义。为了增强特征提取的全面性, 提高故障信号的利用率, 准确识别齿轮箱的不同运行状态, 提出了一种基于多模型特征融合的齿轮箱故障诊断算法。该算法由一种双通道特征提取的多域信息融合卷积神经网络(CNN)模型构建, 解决了反映齿轮箱故障状态的单个或少数特征的局限性。实验结果表明, 该算法的诊断准确率高达99.13%, 实现了齿轮箱故障的精确识别。

关键词:卷积神经网络; 故障诊断; 多特征融合; 齿轮箱

中图分类号: TP18

文献标识码: A

文章编号: 2095-297X(2025)05-0028-06

Research on the Gearbox Fault Diagnosis Algorithm Based on Multi-Feature Fusion

ZHANG Kun^{1*}, LIU Song², ZHANG De-xiang³

(1. Division of Experimental Training and Fixed Asset Management, Anhui Wenda University of Information Engineering, Hefei, 231201, Anhui; 2. School of Intelligent Manufacturing, Anhui Wenda University of Information Engineering, Hefei, 231201, Anhui;

3. School of Electrical Engineering and Automation, Anhui University, Hefei, 230601, Anhui)

Abstract: For most rotating mechanical transmission systems, condition monitoring and fault diagnosis of the gearbox are of great significance to avoid accidents and maintain stability in operation. To strengthen the comprehensiveness of feature extraction and improve the utilization rate of fault signals to accurately identify the different operating states of a gearbox, a gearbox fault diagnosis algorithm based on multi-model feature fusion was proposed. The algorithm is a multi-domain information fusion convolutional neural network (CNN) model with dual channel feature extraction, which solves the limitation of single or a few features reflecting the fault state of the gearbox. The experimental results showed that the diagnostic accuracy of the model was up to 99.13%, and the precise identification of gearbox faults was realized.

Key words: convolutional neural network; fault diagnosis; multi-feature fusion; gearbox

齿轮箱是直升机、汽车和风力涡轮机等大型机械的关键部件。齿轮箱包含齿轮、滚动轴承、传动轴和其他部件, 它们通常在恶劣的工作条件下以不同的速度和负载运行, 并且容易发生故障。这些故障会扰乱正常运行, 造成经济损失, 并带来伤害风险。因此, 研究齿轮箱的智能故障诊断具有重要意义

义^[1]。

由于齿轮箱内部结构的复杂性, 在复杂环境中收集的振动信号会受到各种噪声干扰的影响。工作条件的持续变化意味着速度和负载的频繁变化, 从而导致信号频率、幅值和数据分布发生变化。因此, 现有的齿轮箱故障诊断模型难以表现出稳健性和较

收稿日期: 2025-02-07 * 通讯联系人

基金项目: 安徽省高校自然科学研究资助项目(2022AH052851)。

作者简介: 张坤(1984-), 男, 安徽蚌埠人, 实验师。E-mail: 751025761@qq.com

高的诊断精度^[2]。基于信号处理的故障诊断方法是通过分析信号与故障之间的相关性来确定有效的诊断指标。目前基于信号处理的方法可分为时域分析^[3]、频域分析^[4]和时频分析^[5],这些信号处理方法减少了对数学模型的依赖,并在故障诊断方面取得了丰硕的成果。

利用信号处理技术对振动信号进行分析,构建能够有效表达故障的特征向量。再采用机器学习算法进行智能故障诊断,如支持向量机(SVM)^[6]、K近邻算法(KNN)^[7]、随机森林^[8]等。然而,在传统的机器学习算法中,故障特征的筛选和提取仍然依赖于人工操作,这给故障诊断带来了不确定性,无法达到真正智能诊断的目的。近年来随着深度学习的广泛应用,具有强大特征学习能力的深度学习算法可以自动实现特征提取和故障分类,深度学习算法可以减少故障诊断过程中对信号处理技术的依赖,为齿轮箱故障诊断提供了一条新的路径,在故障诊断领域中得到了广泛的应用。根据目前研究,常见的深度学习模型包括长短期记忆(LSTM)^[9]、卷积神经网络(CNN)^[10]、递归神经网络(RNN)^[11]、人工神经网络(ANN)^[12]等。由于CNN在面对复杂数据时具有强大的特征提取和分类能力,CNN在故障识别领域得到了广泛的应用^[13]。

CNN是一种典型的深度学习模型。目前常用的是一维CNN和二维CNN。该模型通过卷积、池化和非线性激活函数映射逐层提取信号特征^[14]。与全连接深度学习模型相比,CNN更具鲁棒性,泛化能力更强,其可通过权重设置和池化来提高网络性能,降低训练成本^[15],且在使用时过拟合现象并不常见。

本研究采用卷积神经网络对齿轮箱故障进行诊断,为了更加有效地获得故障诊断信息的特征信息,一路先对故障信号进行峭度计算,再采取一维卷积神经网络进行特征提取;另外一路将一维故障信号进行短时傅里叶变换获得二维图像,再经过二维卷积神经网络进行特征提取,并通过特征融合获得齿轮箱故障诊断特征信息。最后再利用支持向量机的机器学习算法对故障进行分类诊断。

1 基本算法理论

1.1 一维信号 Teager 峭度计算

Teager 峭度(Teager-Kurtosis, TK)是基于 Teager 能量算子(Teager Energy Operator, TEO)的一种信号分析方法,其用于衡量信号分布的峰度,同时能够有效检测非平稳信号中的冲击成分,并主要用于检测

信号中的瞬态冲击成分。在齿轮箱或轴承故障诊断中,故障通常表现为周期性冲击信号,Teager 峭度对噪声不敏感,能够在噪声背景下有效提取冲击成分,并检测到传统峭度可能忽略的微弱冲击,从而判断故障的是否存在。因此,在齿轮箱、轴承等故障诊断中具有重要应用。

Teager 能量算子(TEO)是由 Kaiser 提出的一种非线性算子,它能够有效提取信号的能量^[16]。在连续时间信号中,TEO 定义为:

$$\psi[x(t)] = \dot{x}(t) - x(t)\ddot{x}(t) \quad (1)$$

式中 $\dot{x}(t) = dx(t)/dt$, $\ddot{x}(t) = d^2x(t)/dt^2$, Teager-Kaiser 能量算子 ψ 可以表达信号的瞬时能量值。

对于离散时间信号,式(1)可以近似表达为:

$$\psi[x(n)] = x^2(n) - x(n+1)x(n-1) \quad (2)$$

其 $x(n)$ 中是信号在时间点 n 的值; $\psi[x(n)]$ 表示信号在 n 点的瞬时能量。

Teager 能量算子不仅可以反映幅值的变化,也可以反映频率的变化。幅值变化得越快,或频率变化得越快,能量算子的输出值就越大,并且针对不同类型的信号时,Teager 能量算子的输出也反映出不同的特性,因此,可以根据这个特性以 Teager 能量算子来计算能量并作为输出特征参与峭度的计算,实现故障信号的检测。

Teager 峭度是基于 TEO 的峭度计算方法,用于衡量信号中瞬态冲击的强度。其计算公式为:

$$TK = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\psi[x(n)] - \mu_\psi)^4}{(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\psi[x(n)] - \mu_\psi)^2)^2} \quad (3)$$

其中 $\psi[x(n)]$ 表示信号 $x(n)$ 的 Teager 能量, μ_ψ 是 Teager 能量的均值, N 是信号长度。

1.2 短时傅里叶变换

短时傅里叶变换(STFT)也称为窗口傅里叶变换。由于傅里叶变换仅适用于稳态信号分析,而非稳态信号在机械设备中非常常见,因此短时傅里叶变换是一种适应非稳态信号分析的方法^[17]。STFT 就是对信号进行加窗,然后在每个窗口内进行傅里叶变换,通过移动窗口函数获得一系列频谱信息,进而获得时频域的信息,其是一个二维矩阵,可以表示为时间-频率的强度图,即为谱图。该方法可以将一维齿轮箱振动信号转换为包含时频域特征信息的二维矩阵,然后将其输入到二维卷积神经网络中。实验中采样汉明窗,窗长 256 点,重叠 192 点(75%重叠率),FFT 点数 512(提高频率分辨率)。

1.3 卷积神经网络(CNN)

卷积神经网络(Convolutional Neural Networks, CNNs)是一种专门用于处理具有网格结构数据(如图像、视频、音频等)的深度学习模型。卷积神经网络(CNN)是一种前馈神经网络,已成为近来深度学习领域最常用的算法之一,特别是在模式分类领域^[18]。卷积神经网络的核心思想是通过局部感受野和权值共享来提取输入数据的特征,相比于全连接神经网络,CNN 更适合处理高维数据(如图像),因为其能够显著减少参数数量,同时保留数据的空间结构信息。卷积神经网络可以避免前期的图像预处理,可以直接输入原始图像。典型的卷积神经网络主要由输入层、卷积层、池化层、全连接层和输出层组成,其核心是通过分层特征提取,逐步从低级特征(边缘、纹理)过渡到高级语义特征(物体部件、整体结构)。其结构如图 1 所示。

1.4 支持向量机(SVM)

支持向量机(SVM)是一种基于统计量开发的数据分析方法。其基本原理是将原始低维输入空间中的非线性问题映射到高维特征空间进行求解,常用于分类和回归分析以及其他问题。在 SVM 非线性数据分类中,输入数据主要通过核函数映射到高

维空间,不同核函数的选择对分类效果有影响。核函数包括多项式、拉普拉斯和径向基函数核。这里选择了径向基函数核进行研究,因为其具有更广泛的应用范围。

2 故障诊断模型构建

2.1 一维 CNN + 二维 CNN + SVM 结构

一维 CNN + 二维 CNN + SVM 模型的整体工作流程如图 2 所示。上部通道二维 CNN 和下部通道一维 CNN 同时工作;然后,通过两个通道提取的特征向量被组合成一个融合的特征向量;最后,使用 SVM 对故障类型进行识别和分类。

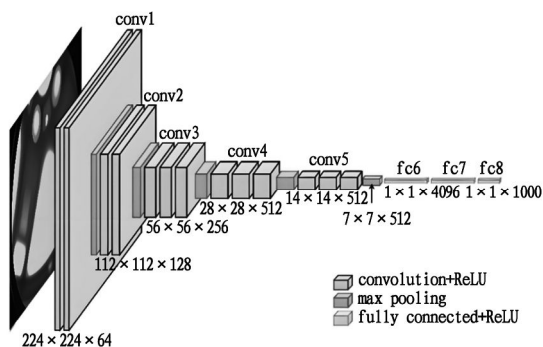


图 1 卷积神经网络的结构图

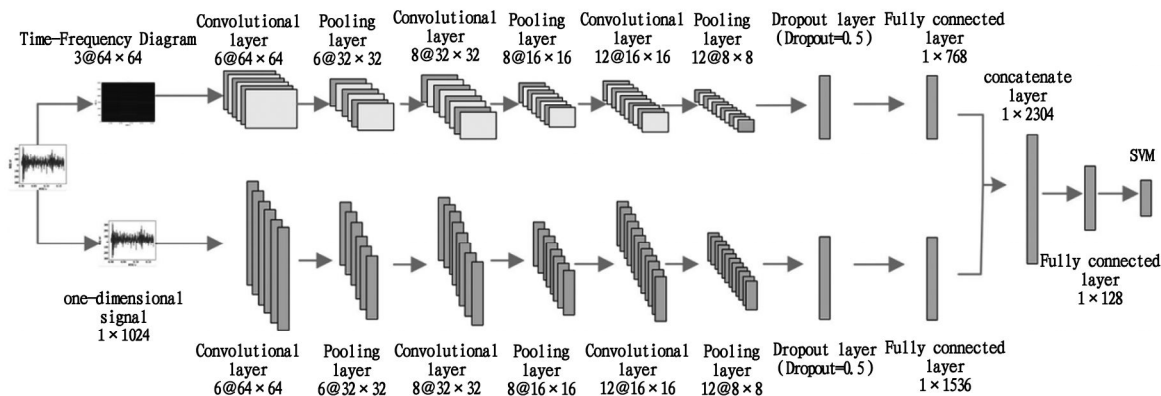


图 2 故障诊断的两通道 CNN 模型结构示意图

2.2 多域信息融合模型

多域信息融合的意义在于通过科学方法整合若干个优秀的模型,以消除未知问题的单一模型的泛化性瓶颈。此外,其可以结合多个模型的优点来获得问题的最优解。其模型融合主要分为四个部分:传感器数据采集、振动信号预处理、数据融合特征提取和模式识别分类。故障诊断模型的整体流程图如图 3 所示。

图中第一部分是传感器数据采集。加速度传感

器获取四种齿轮箱状态的振动信号:点蚀、断齿、磨损和正常。第二部分是对原始变速箱振动信号的降噪预处理。第三部分是特征提取,对降噪振动信号进行双通道 CNN 同步特征提取。上通道对信号数据进行 STFT 变换,得到二维频谱图像,然后将二维频谱图像放入构建的 2DCNN 网络模型中。较低的通道将数据经过峭度计算后放入构建的 1DCNN 网络模型中。最后,在模式识别和分类中,SVM 用于分类。

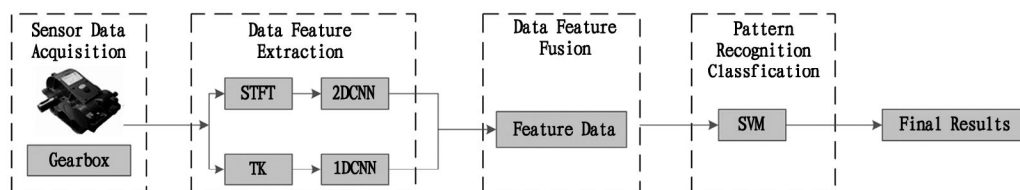


图3 多域信息融合模型流程图

3 实验及结果分析

3.1 实验数据

实验数据是从齿轮箱故障平台获得的。实验平台由变频电机、梅花联轴器、行星减速器、磁粉制动器和加速度传感器组成。三轴加速度传感器用于收集振动信号数据。数据采集通道为8个,采样频率为6 kHz。用于信号数据采集的功能卡集成在同一安装导轨上,减少了设备冗余并简化了系统结构。振动信号以五种速度收集,分别为900、1200、1500、1800、2100 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。变速箱减速器的负载分别为总负载的20%和50%。

这里采用一个空载齿轮箱试验,意味着磁粉制动器关闭。在故障诊断实验设计中,系统的可变性和有限的故障覆盖率将影响故障诊断技术的准确性和可靠性。由于齿轮箱的大多数内部故障发生在齿轮上,因此,主要关注齿轮。实验中用于测量的齿轮加速度传感器获取四种齿轮箱状态的振动信号:点蚀、断齿、磨损和正常,电机转速为900 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$,频率为6 kHz,并且每种类型数据长度取1024,测量的数据组有1000组。

实验中总共使用了4000组样本数据。其包括1000组点蚀、1000组断齿、1000组磨损和1000套普通齿轮,对应的标签是0、1、2和3。同时,该样本数据分别分为2800组训练集、800组验证集和400组测试集。

3.2 实验总体分析

本实验中使用的计算机系统是Windows 10,编程语言是python3.7,深度学习框架是Keras。为了验证提出的多域信息融合CNN网络工作模型的故障精度是否如预期,首先使用训练集和验证集来训练多域信息融合CNN网络模型。然后,将测试集输入到训练好的模型中,输出结果得到测试的准确率。图4和图5显示了模型训练和验证集的损失值的变化曲线以及训练和验证集的准确率变化曲线。

从图4训练集和验证集的损失值变化曲线中可以看出,训练样本和验证样本的损失值随着epoch

的增加而不断下降,直到最后趋于相对稳定。在前10次迭代中,训练样本和验证样本的损失值下降非常迅速,两条基本曲线的下降率同步变化。从图5所示的训练集和验证集准确率的变化曲线可知,在前10次迭代中,训练样本和验证样本的准确率迅速上升并出现显著波动,从约20%上升到约92%。在10到30次迭代之间,训练和验证样本的准确率相对稳定且缓慢地提高,准确率从约92%提高到约96%。经过30次迭代,训练样本和验证样本的准确率无限接近,基本保持不变。整体曲线比较平滑,没有大的折线波动。这表明该模型已经完成训练,收敛性很好,也证明了多域信息融合CNN网络模型收敛快,故障诊断和分类准确率高。

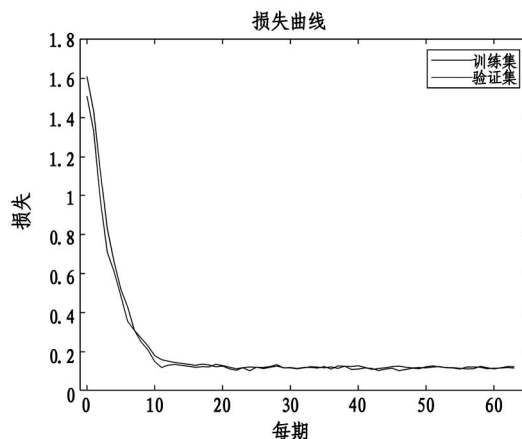


图4 训练集和验证集的损失值变化曲线

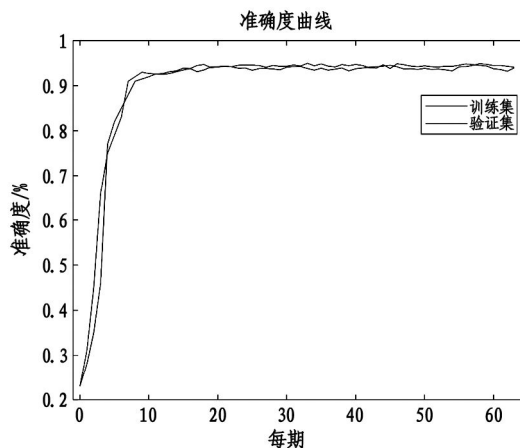


图5 训练集和验证集的精度变化曲线

3.3 实验结果分析

对于最终分类,使用从完全连接层输出的样本特征集作为 SVM 模型的输入样本。SVM 算法本质上是一种二值分类算法,解决分类问题有两种方法。第一种方法是直接修改目标函数,通过求解优化问题实现多分类,但该方法计算复杂度高,一般只适用于小样本数据。第二种方法是结合多个二值分类器构造多个分类器,通常称为一对一方法和一对多方法。本研究采用一对一分类方法,并通过 SVM 惩罚参数 $c=0.75$,核函数参数 $g=0.14$,对齿轮箱故障类型进行识别和分类。本次运行的测试样本分类结果的混合矩阵如图 6 所示(颜色越深,精确度越高)。

从图 6 所示的样本测试结果可知:在此识别过程中,标签 1(断齿)和标签 2(磨损)的识别率均达到 100%。结果表明,该方法能很好地识别齿轮断齿和磨损两种状态。标签 0(齿轮点蚀)和标签 3(齿轮正常)的识别率相对较低,达到 96%。约 1% 的齿轮点蚀状态被误认为是磨损状态,3% 的齿轮点蚀状态被误认为是正常状态,而读数为齿轮正常状态的 4% 则被误认为是齿轮点蚀状态。这种识别错误是由于在特征融合过程中,特征明显度不高,造成特征模糊现象,在识别过程中出现错误识别的稳态,但误差还是在识别误差容许范围内。总体而言,该模型识别精度较高,验证了其在齿轮箱故障诊断中的可行性。

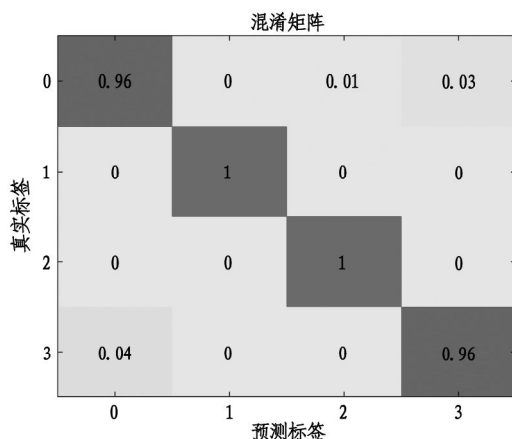


图 6 样品测试结果的混合矩阵

3.4 实验结果对比分析

最后,为了进一步验证多域信息融合 CNN 网络模型的优越性,使用 FFT-2DCNN、1DCNN-SVM 和 2DCNN-SVM 模型进行比较验证。每次运行 10 次获得平均值,最终诊断结果和标准偏差如表 1 所示。

在相同的实验条件下,比较了四种故障诊断方

法。FFT-2DCNN 模型对变速箱的原始振动信号进行 FFT 以获得灰度图像,然后将 FFT 得到的灰度数据集发送到 2DCNN 进行故障识别和分类。1DCNN-SVM 模型直接将变速箱的原始振动信号放入一维卷积神经网络中进行特征提取,然后,使用支持向量机来识别和分类故障。2DCNN-SVM 模型将变速箱的原始振动信号放入二维卷积神经网络中进行特征提取,然后使用支持向量机代替 Softmax 层进行故障识别和分类。所有方法的实验样品选择方式与本研究的实验设计参数相同。从表 1 中可以看出,通过对比四种故障诊断方法的准确率,本研究提出的多域信息融合 CNN 模型的故障识别准确率达到 99.13%。将各种故障诊断方法的诊断结果进行对比表明,提出的模型具有最高的测试精度和最低的标准差,提升效果优势明显,更适合应用于齿轮箱故障诊断和识别。

表 1 四个模型的平均准确率和标准差

诊断算法	FFT	1DCNN	2DCNN	Proposed
	-2DCNN	-SVM	-SVM	
平均准确率/%	93.82	91.47	95.68	99.13
标准偏差/%	2.1673	2.3187	0.9183	0.5153

4 结论

采用基于多域特征信息融合 CNN 模型实现齿轮箱故障诊断,设计构建了故障诊断实验,验证了该方法的有效性。利用加速度传感器获取齿轮箱的原始振动信号,再采用 Teager 峭度对故障信号进行一维处理以及短时傅里叶变换进行二维处理,然后利用并联结构同时进行 1DCNN 和 2DCNN 的特征提取,最后利用 SVM 进行模式识别和分类。基于多域信息融合 CNN 模型的变速箱故障诊断方法可行且有效。该模型将一个一维齿轮箱振动信号的峭度计算与一个短时傅里叶变换的二维时频图用于丰富两个不同维度的特征,并将双通道随机特征池化并融合成一个一维特征数组。提取的特征得到了充分增强,以实现智能变速箱故障诊断的目的。该模型还避免了特征提取导致的特征信息表达不完全和传统模式识别方法的低精度的问题。同时,提出的模型与 FFT-2DCNN、1DCNN-SVM 和 2DCNN-SVM 模型的比较表明,提出的方法具有更高的精度和更强的泛化性,为变速箱故障诊断和识别提供了物理模型的新概念化。

参考文献:

- [1] QIAN Q, QIN Y, LUO J, et al. Deep discriminative transfer learning network for cross-machine fault diagnosis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 186: 109884.
- [2] LIU Z, TANG X, WANG X, et al. Wind turbine blade bearing fault diagnosis under fluctuating speed operations via Bayesian augmented lagrangian analysis[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 7(7): 4613 – 4623.
- [3] YU X, FENG Z, LIANG M. Analytical vibration signal model and signature analysis in resonance region for planetary gearbox fault diagnosis[J]. Journal of Sound and Vibration, 2021, 498(1): 115962.
- [4] MALLA C, PANIGRAHI I. Review of condition monitoring of rolling element bearing using vibration analysis and other techniques[J]. Journal of Vibration Engineering & Technologies, 2019, 7(5): 407 – 414.
- [5] ZHANG P, CHEN C. A two-stage framework for time-frequency analysis and fault diagnosis of planetary gearboxes[J]. Applied Sciences (2076 – 3417), 2023, 13(8): 1 – 15.
- [6] YOU D, GAO X, KATAYAMA S. Multi-sensor fusion system for monitoring high-power disk laser welding using support vector machine[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(2): 1285 – 1295.
- [7] TIAN J, MORILLO C, AZARIAN M H, et al. Motor bearing fault detection using spectral kurtosis-based feature extraction coupled with k-nearest neighbor distance analysis[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(3): 1793 – 1803.
- [8] SHEVCHIK S, SAEIDI F, MEYLAN B, et al. Prediction of failure in lubricated surfaces using acoustic time-frequency features and random forest algorithm[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 3(4): 1541 – 1553.
- [9] LEI Y, KARIMI H, CHEN X. A novel self-supervised deep LSTM network for industrial temperature prediction in aluminum processes application[J]. Neurocomputing, 2022, 502(9): 177 – 185.
- [10] GU J, WANG Z, KUEN J, et al. Recent advances in convolutional neural networks[J]. Pattern Recognition, 2018, 77(5): 354 – 377.
- [11] SHIN H C, ROTH H R, GAO M, et al. Deep convolutional neural networks for computer-aided detection: CNN architectures, dataset characteristics and transfer learning[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2016, 35(5): 1285 – 1298.
- [12] BABU T N, ALI P S N, PRABHA D R, et al. Fault diagnosis in bevel gearbox using coiflet wavelet and fault classification based on ANN including DNN[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2022, 47(12): 15823 – 15849.
- [13] ZHANG K Y, CHEN J L, ZHANG T C, et al. A compact convolutional neural network augmented with multiscale feature extraction of acquired monitoring data for mechanical intelligent fault diagnosis[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2020, 55(4): 273 – 284.
- [14] LI P, YUAN H, WANG Y, et al. Pumping unit fault analysis method based on wavelet transform time-frequency diagram and CNN[J]. International Core Journal of Engineering, 2020, 6(1): 182 – 188.
- [15] FAN H, XUE C, ZHANG X, et al. Vibration images-driven fault diagnosis based on CNN and transfer learning of rolling bearing under strong noise[J]. Shock and Vibration, 2021(2): 1 – 16.
- [16] JAMES F K. On a simple algorithm to calculate the energy of a signal[C]. Albuquerque, USA: Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1990: 381 – 384.
- [17] MUSTAFA D, YICHENG Z, MINJIE G, et al. Motor current based misalignment diagnosis on linear axes with short-time Fourier transform(STFT)[C]. 9th CIRP Conference on Assembly Technology and Systems, Procedia CIRP 2022, 106: 239 – 243.
- [18] WANG J, YANG J, WANG Y, et al. Ensemble decision approach with dislocated time-frequency representation and pre-trained CNN for fault diagnosis of railway vehicle gearboxes under variable conditions[J]. International Journal of Rail Transportation, 2022, 10(5): 655 – 673.

责任编辑:李壮

水稻秸秆切割特性宏微观试验研究

廖忠圆, 彭小平, 马 露*

(安徽科技学院 智能制造学院, 安徽 蚌埠 233100)

摘 要:针对水稻秸秆不同部位参数差异影响其切割特性,导致水稻秸秆还田设备工作时运行过载问题,基于质构仪和电镜设备开展宏微观室内试验,研究秸秆根部横截面积、节部组织和含水率对秸秆切割特性的影响。研究发现:水稻根部横截面积与切割力之间存在线性正相关关系;在本次研究秸秆含水率范围内(5%–70%),水稻秸秆节部组织含水率越高会使秸秆韧性增强,抗切割能力提高;含水率降低会使秸秆韧性下降,脆性增强,秸秆抗切割能力下降。秸秆含水率的变化会直接影响秸秆所需切割力的大小,高含水率秸秆与低含水率秸秆相比会降低还田机整体作业效率;揭示了含水率对秸秆切割强度的微观作用机理(水合作用)。研究成果可为水稻秸秆装置结构设计和优化提供理论依据。

关键词:水稻秸秆;宏微观室内试验;秸秆根部横截面积;秸秆节部组织;含水率

中图分类号:S232.5

文献标识码:A

文章编号:2095–297X(2025)05–0034–07

Macroscopic and Microscopic Experimental Study on the Cutting Characteristics of Rice Straw

LIAO Zhongyuan, PENG Xiaoping, MA Lu*

(School of Intelligent Manufacturing, Anhui University of Science and Technology, Bengbu, 233100, Anhui)

Abstract: In view of the fact that the parameter differences of different parts of rice straw affect its cutting characteristics, resulting in the overload problem of the rice straw returning equipment during operation, macro and micro indoor experiments were carried out based on texture analyzers and electron microscopes to study the effects of cross-sectional area of straw roots, node tissue and moisture content on the cutting characteristics of straw. The research findings are as follows: There is a linear positive correlation between the cross-sectional area of rice roots and the cutting force; Within the moisture content range of the straw studied in this study (5%–70%), the higher the moisture content of the jointing tissue of rice straw, the greater the toughness of the straw and the improved its resistance to cutting. A decrease in the moisture content of straw will lead to a decline in its toughness and an increase in its brittleness, and the lower its resistance to cutting. The change in the moisture content of straw will directly affect the size of the cutting force required for straw. Compared with straw with low moisture content, straw with high moisture content will reduce the overall operation efficiency of the returning machine. The microscopic mechanism of moisture content on the cutting strength of straw (hydration) was revealed. The research results can provide a theoretical basis for the structural design and optimization of the rice straw device.

Key words: rice straw; macro and micro indoor tests; cross-sectional area of straw roots; straw node organization; moisture content

收稿日期:2025–06–02 * 通讯联系人

基金项目:安徽省教育厅高校自然科学重大项目(2023AH040274);安徽省教育厅高校优秀拔尖人才培养项目(gxyq2022052)。

作者简介:廖忠圆(1999–),男,安徽宣城人,硕士研究生;马露(1988–),男,安徽蚌埠人,副教授,博士。E-mail:mal@ahstu.edu.cn

水稻作为我国主要粮食作物之一,其秸秆年产量高达 2.1×10^9 t。目前,结合国内外禁烧管理^[1],大量水稻秸秆被直接还田或被任意堆放废弃,造成严重资源浪费和环境污染。如何实现水稻秸秆资源的高效利用,已成为当前的研究热点。近年来,水稻秸秆已成功应用于复合材料、饲料、菌菇培养基、厌氧消化、成型燃料和制炭等诸多领域。而在水稻秸秆利用前,多种工艺过程均涉及水稻的收获和秸秆粉碎两个步骤,这与水稻秸秆的剪切力学性能密切相关。因此,研究水稻秸秆的剪切性能,获得其切割性能规律,可为设计改进农业机械提供参考^[2]。

水稻秸秆含水率与切割力关系的研究对农业机械具有重要意义。通过研究水稻根部横截面积与切割力之间关系、秸秆含水率与切割力之间关系,可以优化农业机械设计,使其更适应不同湿度的秸秆,提升收割效率,并减少机械损耗。此外,研究这一关系有助于调整机械操作参数,避免机器运行过载,提高机械的耐用性和可靠性,从而降低能源消耗,为合理选择收割时机和调节机械设置提供数据支持,进而提高农民的生产效率和经济收益,促进秸秆的资源化利用,为农业废弃物的处理提供更高效的技术支持^[3]。

1 试验材料与仪器设备

试验材料:水稻秸秆取自安徽省蚌埠市固镇某处高标准农田。该区域水稻成熟时期为 2024 年 10 月左右,对成熟水稻的农田进行规划和取样。

仪器设备:游标卡尺、电子天平、电热鼓风恒温干燥箱(101-4A 型)、微机控制电子万能试验机(WDW-20C)、多功能质构仪、电子显微镜,仪器设备均来源于安徽省水利科学研究院。

2 水稻秸秆主要物理参数研究

2.1 样品选取注意事项

在研究地点水稻农田,随机取 4 行,一行一组。每组随机取 8 株水稻秸秆。编号预处理留样。剔除损伤开裂、表皮剥落或霉变、受虫害等茎秆,选主茎顺直且粗细均匀的水稻秸秆,用剪刀将水稻秸秆剪断取样。为了控制试验变量,应保证取相同部位作为样品。图 1 为水稻秸秆各部位示意图。根据试验要求取秸秆根部组织样品,离地表 80 mm 左右。

在实际情况中,水稻秸秆根部是不规则圆形。因此为了减小测量误差,需进行多次测量且测量同一位置。如图 2 所示,按规律角度测量 3 处位置,每处位置测 2 次。然后利用公式(1)计算水稻秸秆根

部直径平均值,将测量秸秆编号,算出横截面积。为了便于计算将水稻秸秆根部横截面假设为圆形,因此可以使用圆的面积公式来计算^[4],计算后导入到 Excel 表格中。

$$\begin{cases} s = \frac{\pi d_k^2}{4} \\ d_k = \frac{1}{6} \sum^2 (d_1 + d_2 + d_3) \end{cases} \quad (1)$$

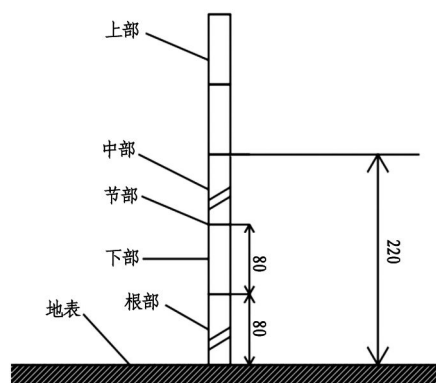


图 1 水稻秸秆各部位示意图

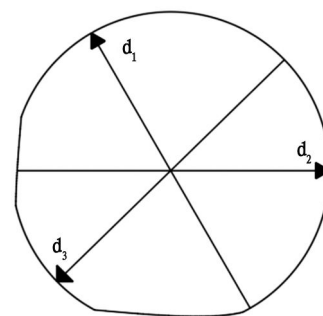


图 2 测量位置示意图

2.2 测量结果分析研究

水稻秸秆测量结果如表 1 所示。

测量后通过计算得出该地区农田水稻秸秆根部平均直径在 3.78 mm 到 3.94 mm 之间。不同品种水稻对各自的根部直径要求也不同。具体原因如下：

水稻根部直径是衡量水稻根系发育和生长状况的重要指标^[5]。过小的根部直径意味着水稻在面对干旱、盐碱等逆境时表现不佳,水稻没有达到理想生长状况,会降低粮食产量;水稻根部直径过大会导致水稻的根系密度降低,减少根系之间的空气流通。水稻根系需要良好的通气来进行呼吸,若根系通气不畅,可能会导致根系缺氧,影响其吸收水分和养分的能力,甚至会导致根部腐烂。水稻根部直径过大会导致水稻根系分布不均,难以在土壤中形成有效吸收网。这种不均匀根系分布会限制根系对水分和

养分的吸收效率,进而影响水稻的生长,也会降低粮食产量^[6]。

水稻根部直径对水稻秸秆力学性能有重要影响。根部直径较大意味着水稻植株更为稳固,秸秆在生长过程中具有更高的抗弯曲和抗压强度。水稻秸秆的力学强度与其根系发育有着密切关系,根系发达的植株其秸秆也表现出较好的力学性能。具体

体现为强抗弯曲性和韧性,有助于其在风雨天气中的稳定性,减少倒伏现象^[7]。

水稻根部生长需要保持适当平衡,既要有足够的根系直径来吸收水分和养分保证自身强度,又不能直径过大以至于影响其生长的其它方面。因此具有合理尺寸根部直径对水稻的生长至关重要。

表 1 水稻秸秆根部直径

组数	编号 1	编号 2	编号 3	编号 4	编号 5	编号 6	编号 7	编号 8
1	3.99	3.37	3.66	3.73	4.13	3.68	4.27	3.62
2	3.54	3.75	3.96	4.16	3.62	3.64	3.87	4.48
3	4.23	3.80	4.01	3.54	4.35	3.61	3.68	4.31
4	3.09	3.55	3.73	3.17	3.80	3.97	4.26	4.66

mm

3 秸秆根部直径与切割力关系研究

3.1 实验方法与注意事项

控制变量:在进行实验前,要确保所有被测秸秆的成熟度相同,秸秆的含水率要保持在正常范围内(5% - 7%)且需要取自于同一处组织。将不同直径的水稻秸秆剪切成统一长度(大约 5 cm 左右),将剪好的秸秆样品稳固地固定在质构仪实验平台上。利用夹具将秸秆牢固地夹在仪器两侧,确保切割过程中的稳定性和准确性,防止秸秆在切割过程中发生偏移或错位^[8]。

实验开始前,调整质构仪(见图 3)刀片的切割速度为 $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,恒定速度可以提高切割过程中切割力数据的精确性,消去过快或过慢速度干扰。刀片的切割角度也需要进行精确调整,以确保其与秸秆的接触位置处于最佳切割状态,最大程度保证实验结果的准确性。启动质构仪后,刀片会匀速向下切割秸秆,并持续对秸秆施加垂直压力,直至秸秆完全断裂。在此过程中,仪器会记录下切割过程中产生的力,生成切割力随位移变化的曲线图,定义曲线图中最大载荷为切割力。这一曲线图将成为后续分析的基础。



图 3 质构仪

在力 - 位移曲线图中,切割力的最大值代表秸秆的抗切割能力,即秸秆在切割过程中所能承受的最大力。这个最大切割力值能够有效反映秸秆的物理强度与韧性,数据记录后可以后续分析^[9]。

3.2 实验数据统计与分析

利用质构仪得出第一组不同根部直径水稻秸秆切割力随位移变化的曲线图,如图 4 所示。

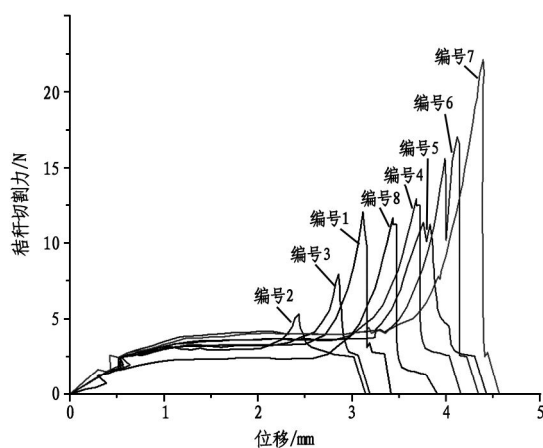


图 4 不同截面积秸秆根部载荷位移曲线(第一组)

曲线的最高点即为水稻秸秆所能承受的最大切割力。该图展示了 8 个不同编号样品在剪切加载下的秸秆切割力 - 位移关系曲线,反映了它们在受力过程中的变形与破坏特性。刀具匀速移动并作用于秸秆外皮,秸秆外皮被破坏,导致剪切力逐渐增大。随着切刀不断深入切割秸秆,秸秆内部纤维断裂,剪切力继续增大直到达到极限应力值,刀具将整根秸秆切断,剪切力随之减小。整个切割过程分为两个阶段,所有样本在质构仪加载初期(0 - 1.5 mm)均表现为剪切力随位移缓慢上升的趋势,随后进入变

形阶段(1.5 – 5 mm),剪切力缓慢增大,并在此之后在达到各自峰值后迅速下降,出现破坏特征。不同秸秆样品的承载能力和延展性能存在明显差异,其中编号7的秸秆样品抗切割力表现最为突出,不仅最大剪切力可达28 N,还能在较大位移条件下保持良好的力学性能,其刚度和韧性更优。相反,编号2和编号3的样品在较小位移时就已发生破坏,承载能力较差,与秸秆组织结构有关。此外,部分曲线在加载过程中出现波动,可能受到加载不均匀、设备振动或秸秆样品局部开裂等因素的影响。此图清晰地

揭示了各样品在剪切作用力下的力学响应差异,为进一步分析结构参数和破坏机制提供了重要依据。通过对比不同秸秆样品的表现,可以为后续秸秆根部直径与切割力研究提供数据支持^[10]。

为了使实验更加精确,消除偶然误差。需要把其它三组实验组里的秸秆样品全部进行取样切割。水稻秸秆根部横截面积可由秸秆根部直径计算得到。完成所有样品试验后绘制水稻秸秆根部横截面积与最大切割力关系表格(按照从小到大的顺序排列),如表2所示。

表2 切断不同横截面积水稻秸秆根部所需最大切割力

第一组		第二组		第三组		第四组	
横截面积	最大切割力	横截面积	最大切割力	横截面积	最大切割力	横截面积	最大切割力
/mm ²	/N	/mm ²	/N	/mm ²	/N	/mm ²	/N
8.92	12.71	10.29	19.21	11.34	27.31	13.59	37.41
10.29	13.82	10.41	20.93	11.52	28.93	14.05	38.62
10.52	14.96	10.52	21.64	11.76	29.13	14.25	39.85
10.63	15.37	10.64	22.48	12.32	30.61	14.32	40.38
10.92	16.24	10.64	23.37	12.38	31.76	14.59	41.59
12.50	17.48	10.81	24.78	12.50	32.48	14.86	42.16
13.39	18.63	10.93	25.10	12.63	33.53	15.76	43.24
14.31	27.69	11.04	26.82	13.40	34.24	17.06	44.71

统计完所有样品所需数据后,利用 Origin 数据处理软件,将水稻秸秆根部横截面积与最大切割力关系进行可视化处理,绘制出两者之间的关系图。通过分析图像,可以找出水稻秸秆根部横截面积与切割力之间的相关性,从而揭示水稻秸秆根部直径如何影响秸秆力学性能,为后续的农业生产或加工过程提供宝贵理论依据。

利用 Origin 软件对图像数据进行拟合和线性回归分析(见图5),得到模型方程式: $y = 4.45444x - 24.31122$ (R^2 为0.96652), R^2 越接近1,模型拟合优度越高。

统计分析结果表明秸秆根部横截面积与秸秆所需切割力呈线性正相关关系^[11]。当秸秆的根部横截面积增大时,需要切割的材料量增多,更多的组织会被刀具剪切。与此同时,秸秆根部包含大量的纤维素和木质素等结构物质,这些物质提高了秸秆的硬度和抗切性能。根部横截面积增大意味着在切割时需要克服更多的组织,切割力会增加^[12]。

秸秆根部横截面积与秸秆所需切割力呈线性正相关关系对于秸秆切割特性研究有着重要意义。通过测量秸秆的根部直径,计算其横截面积可以预测

其所需的切割力。在设计秸秆切割机械时,通过计算根部横截面积来估算所需的切割力,进而提高机械设计的效率和精确度;秸秆切割过程中,切割力是影响机器运行性能的重要因素。了解切割力与根部横截面积的线性关系,可以帮助工程师优化切割刀片的设计、刀具的材质以及切割方式,确保设备在不同秸秆类型下都能高效运行,同时降低能耗和提高工作效率^[13]。

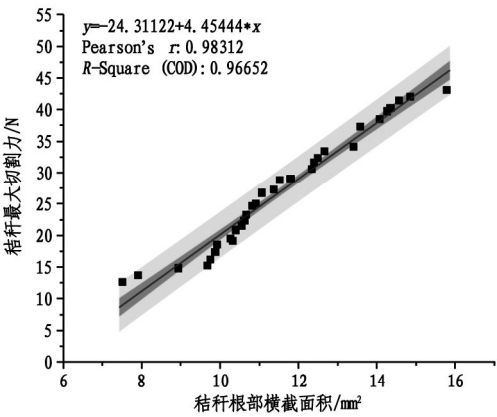


图5 秸秆根部横截面积与秸秆所需切割力分析图像

4 秸秆含水率与切割力关系研究

为了能深入研究秸秆含水率与切割力关系,查阅资料^[14]了解水稻秸秆含水率的变化影响水稻秸秆流体力学特性。本次实验从宏观和微观两个角度全面了解含水率对秸秆切割过程的影响。

从微观角度借助电子显微镜等高精度设备,分析不同含水率下秸秆微观结构变化。电子显微镜可以帮助我们观察秸秆细胞壁的微观结构、纤维排列和细胞壁厚度等细节,进而探讨水分含量变化如何通过改变秸秆细胞结构,影响其切割性能^[15]。

从宏观角度可以通过质构仪建立切割秸秆实验平台,模拟实际切割过程中的力学特征。质构仪可以精确测量在不同水分含量下,切割秸秆所需力及其变化规律。通过控制秸秆的含水率、切割速度、切割角度等实验参数,可以系统研究水分对秸秆切割力的影响,确定不同含水率下秸秆的切割力特征,为实际农业生产中秸秆收割提供数据支持,帮助优化收割机的设计和操作参数。

结合微观与宏观的研究方法,不仅可以深入理解水分对秸秆切割的影响机制,还能为实际应用提供更科学的理论依据。这种多维度的研究方法有助于为农业机械化提供更加精细化的设计方案,提升秸秆切割效率,降低能源消耗。

4.1 建立微观实验与分析

准备实验样品。从之前的组数中取 4 组秸秆,称湿质量,记录。之后放入电热鼓风恒温干燥箱中烘干,再用电子天平量取干燥时的重量。利用公式(2)算出含水率^[16]。取样。

$$W = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \times 100\% \quad (2)$$

其中 W_1 为烘干前的质量, W_2 为烘干后的质量, W 为含水率。

加工样品。使用剪刀将水稻秸秆节间组织切成适合放置在显微镜样品台上的小块,通常切割成 0.5 – 1 cm 长的小块。切割过程中要尽量避免损伤秸秆的细胞结构,确保切面尽量平整,以便后续观察时能够清晰显示组织结构。

固定样品。为了防止秸秆细胞在观察过程中发生形变,保持其原始结构,需要对秸秆样品进行固定。常用的固定液为 2.5% 戊二醛或 4% 多聚甲醛,这两种固定液能够有效固定细胞中的大部分蛋白质,确保细胞形态保持稳定。将切割后的秸秆样品放入固定液中,确保固定液完全覆盖样品。固定时间一般为 2 – 4 h,根据固定液的浓度和样品的大小,

固定时间可以适当调整,最终调整为 3 h。固定要在室温下或在 4 ℃ 低温环境中进行。

脱水处理。电子显微镜需要样品在真空环境下观察,而水分会影响样品的观测效果,因此需要将样品中的水分完全去除。常用的脱水方法是使用逐步增加浓度的乙醇溶液进行脱水。脱水过程包括 50%、70%、90%、100% 乙醇的逐级处理,每次脱水时间为 30 min 到 1 h,尽可能去除样品水分。

启动仪器,等待电子束加载完成,穿透样品,形成图像,根据所研究的部位将探头进行移动观察,得到想要的图像后,保存。重复进行实验直至完成所有实验样品观察。

用电镜设备进行观察,进行多次实验后取实验效果最明显的 4 组秸秆样品,再进行对比,观察差异^[17]。图 6 为利用电子显微镜 15 和 1000 倍数下观察含水率 33.15% 水稻秸秆(编号 1)、6.56% 水稻秸秆(编号 2)、18.31% 水稻秸秆(编号 3)、23.58% 水稻秸秆(编号 4)的节间组织图片。

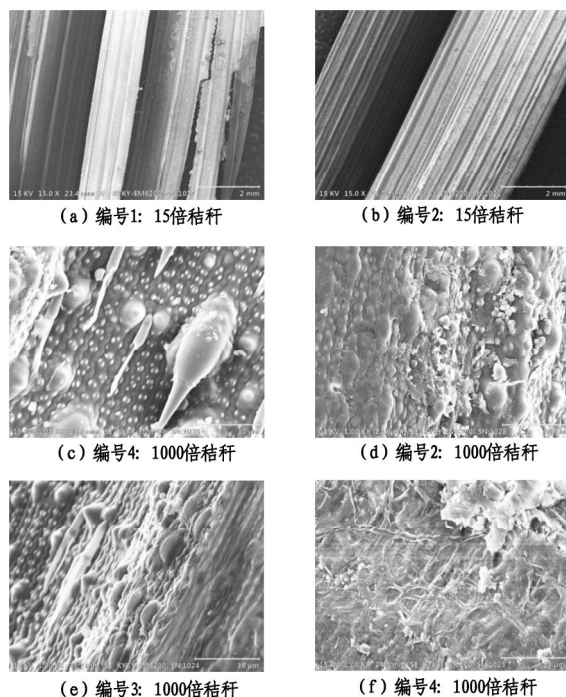


图 6 电子显微镜观察水稻秸秆节间组织

进行多次实验,通过系统性调整实验条件和观察不同水稻秸秆样本,最终筛选出实验效果最为显著的两组数据图片,如图 7 所示。这两组图片显示出较为突出的特征,在显微镜下能够清晰地展示出样本之间的差异和变化。将这两组实验结果进行对比分析,重点观察它们在微观结构、形态特征、组织分布等方面的差异。

图像分析:水稻秸秆的主要成分是纤维素、半纤

纤维素和木质素,它们构成了植物的细胞壁。当水稻秸秆含水率增加时,细胞壁中纤维素和半纤维素分子之间的水合作用增强。这种水合作用会使细胞壁变得更加柔软而富有延展性,从而缓解剪切过程中的变形,所需剪切力增加。图 7(a)中木质部细胞壁中高水分使组织变得膨胀和松散,这样的膨胀会使秸秆的密度变小。剪切时需要克服这些松散结构带来的局部恢复力,导致秸秆所需切割力增大^[18]。刀具在切割过程中会产生更大的阻力,切割速度变慢,降低整体作业效率,增加了机器的能量消耗。

图 7(b)中低含水率秸秆后生木质部因干燥而变得更加坚硬和脆弱,秸秆在切割过程中会发生折断而非顺利切割,提高了秸秆整体作业效率^[19-20]。秸秆含水率的变化会直接影响秸秆所需切割力的大小,高含水率秸秆与低含水率秸秆相比会降低还田机整体作业效率。

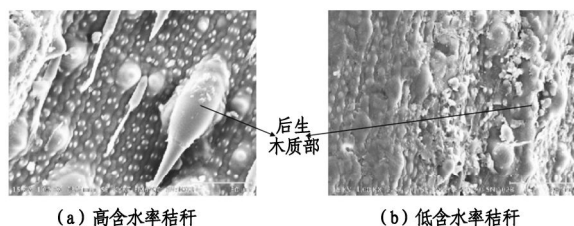


图 7 水稻秸秆节间横切面组织结构

4.2 建立宏观实验与分析

控制变量:实验开始前,需确保所有秸秆样本的成熟度相近,并且根部直径误差不超过 0.1 mm 且均取自于节间组织,避免由于根部直径差异导致的形态偏差。将不同直径的水稻秸秆剪成统一的长度,并将修剪好的秸秆样品稳固地固定在实验平台上。通过夹具将秸秆固定,保证仪器在切割过程中的稳定性和准确性,防止秸秆在切割过程中发生偏移或错位。后续试验步骤与 3.1 节实验步骤一致。表 3 为本次实验所准备样品。

表 3 水稻秸秆(节间组织)含水率实验样本

编号	水稻秸秆含水率/%	编号	水稻秸秆含水率/%
1	53.16	6	40.62
2	33.15	7	23.58
3	6.56	8	15.26
4	28.67	9	27.85
5	18.31		

利用质构仪得出本组实验不同含水率水稻秸秆切割力随位移变化的曲线图,如图 8 所示(曲线上

数字表示实验样本编号)。

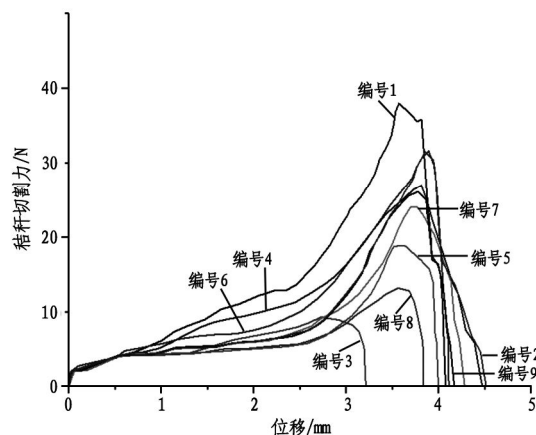


图 8 不同含水率水稻秸秆节部载荷位移曲线

图像分析:利用质构仪得出不同含水率水稻秸秆节部切割力随位移变化的曲线图。该图展示了 9 个不同编号样品在剪切加载下的秸秆切割力与位移关系曲线,反映了它们在受力过程中的变形与破坏特性。所有样品在加载初期(0-2.5 mm)均表现为剪切力随位移缓慢上升的趋势;随后进入变形阶段(2.5-4.5 mm),剪切力显著增大,并在此之后在达到各自峰值后下降。只是各样品曲线下降的速度有明显区别。不同含水率秸秆样品的承载能力和延展性能存在明显差异,在此实验中编号 1 的秸秆样品抗切割力表现最为突出,最大剪切力约为 38 N。而编号 3 样品秸秆的抗切割性能最差,大约为 7 N。

出现此图像特征的原因与前面 4.1 节微观实验结论有密切联系,秸秆含水率越高会使秸秆韧性增强,抗切割能力提升。编号 1 是本次实验样本含水率最高的,它的曲线图峰值是最大的。秸秆含水率越低会使秸秆韧性下降,脆性增强,秸秆抗切割能力降低。编号 3 含水率是本次实验样本中最小的,曲线图峰值是本次实验中最底的^[21]。

在秸秆根部直径、秸秆含水率与切割力学试验过程中,为了减少实验误差,已对试验条件加以限制。但是从实验数据上看,各实验样本之间存在较大差异。如图 8 中编号 6 和编号 2 含水率差距与其它样本含水率差距相比较,但是这两组数据峰值接近。这可能与秸秆成熟度,秸秆个体生长差异性有关。

查阅资料^[22]得出在正常生长条件下水稻秸秆含水率范围为 3% - 70%,本次研究水稻秸秆含水率范围在正常生长条件范围内(5% - 70%),在本次研究范围内,秸秆含水率的变化会直接影响秸秆所需切割力的大小,秸秆含水率越高会使秸秆韧性

增强,抗切割能力提高;秸秆含水率越低会使秸秆韧性下降,脆性增强,秸秆抗切割能力降低。高含水率秸秆与低含水率秸秆相比所需切割力会更大,降低了还田机整体作业效率。

5 结论

本次研究对水稻秸秆物理参数、组织结构及切割特性进行研究,具体内容包括:

水稻秸秆主要物理参数研究。在研究地点水稻农田采集了满足试验条件的水稻秸秆样本,测得某品种水稻秸秆根部平均直径值在 3.78 mm 到 3.94 mm 之间,在此品种水稻正常根部直径范围内。

水稻秸秆根部横截面积对切割力学特性影响规律研究。利用质构仪对不同水稻秸秆根部横截面积进行切割试验,建立根部横截面积与切割力线性模型 $y = 4.45444x - 24.31122$ (R^2 为 0.966 52),得出秸秆根部横截面积与秸秆所需切割力呈线性正相关关系,并解释了两者的呈线性正相关关系对于秸秆切割特性研究的重要意义。

含水率对切割力学特性影响规律研究。利用质构仪对不同含水率水稻秸秆节间组织进行切割实验,建立秸秆含水率与剪切力图像。通过电子显微镜观察不同含水率水稻秸秆节间组织横切面组织结构,分析秸秆含水率变化对秸秆切割特性的影响。

在本次研究范围内,秸秆含水率的变化会直接影响秸秆所需切割力的大小,秸秆含水率越高会使秸秆韧性增强,抗切割能力提高;秸秆含水率降低会使秸秆韧性下降,脆性增强,秸秆抗切割能力降低。高含水率秸秆与低含水率秸秆相比所需切割力会更大,降低了还田机整体作业效率,为后续水稻秸秆装置结构设计和优化提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 覃诚. 中国秸秆禁烧管理与美国秸秆计划焚烧管理比较研究[D]. 北京:中国农业科学院,2019:10-12.
- [2] 刘军军,满增光,郭兰中,等. 不同预处理条件下稻秸秆性能研究[J]. 常熟理工学院学报,2018,32(2):119-124.
- [3] 闫二伟,王振伟,韩柏和,等. 含水率及切割滑切角对秸秆切割功耗影响规律[J]. 农机化研究,2020,42(2):162-167.
- [4] 赵竹. 玉米收获机纵置切碎装置切刀-秸秆互作机理及刀刃仿生研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2023:127-129.

- [5] 蔡昆争,骆世明,段舜山. 水稻群体根系特征与地上部生长发育和产量的关系[J]. 华南农业大学学报,2005(2):1-4.
- [6] 段庆飞. 基于离散元法的旋耕还田秸秆空间分布质量研究[D]. 南京:南京农业大学,2022:117-123.
- [7] 李小城,刘梅英,牛智有. 小麦秸秆剪切力学性能的测试[J]. 华中农业大学学报,2012,31(2):253-257.
- [8] 罗斌,赵有斌,尹学清,等. 质构仪在果蔬品质评定中应用的研究进展[J]. 食品研究与开发,2019,40(5):209-213.
- [9] 张光浩,张道林,陈延鑫,等. 玉米茎秆切割能耗试验研究[J]. 农机化研究,2013,35(1):169-172.
- [10] 魏俞涌,钱少平,姚文超,等. 水稻秸秆不同部位剪切性能分析[J]. 农业工程,2021,11(8):108-112.
- [11] 张开飞,李赫,何玉静,等. 大豆秸秆力学特性的试验研究[J]. 大豆科学,2016,35(2):78-82.
- [12] 王将,王晓燕,李洪文,等. 水稻秸秆激荡滑切与撕裂两级切割粉碎装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(10):87-92.
- [13] 张文良. 犁旋式秸秆还田联合作业机设计与试验[D]. 武汉:华中农业大学,2020:20-24.
- [14] 陈海涛,张颖,黄振华,等. 含水率对水稻秸秆流体力学特性的影响[J]. 东北农业大学学报,2013,44(11):90-94.
- [15] 陆筑凤,李加友. 扫描电镜-能谱法分析水稻秸秆改性材料对铬的吸附性能[J]. 江苏农业科学,2016,44(3):332-334.
- [16] 李峰. 烘干法对测定玉米秸秆含水率不确定度的评定[J]. 新疆农机化,2023(4):46-48.
- [17] 陈中兰,曾艳. 环氧稻草纤维球的傅立叶红外及扫描电镜研究[J]. 化学研究与应用,2016,28(9):37-41.
- [18] 李艳洁,陈玉滢,孙雪,等. 不同含水率玉米秸秆的可断裂柔性纤维模型参数标定[J]. 农业工程学报,2025,41(3):109-113.
- [19] 朱皓森. 分子动力学模拟研究羧铵两性离子水合作用[D]. 南京:南京师范大学,2019:34-37.
- [20] 赵月. 温度和含水量对不同作物秸秆土壤降解速率及相关指标影响的研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2012:41-49.
- [21] 余璐璐,李绍才,孙海龙. 秸秆含水率对揉丝性状的影响[J]. 农机化研究,2011,33(1):87-92.
- [22] 朱惠斌,李榕东,白丽珍,等. 不同含水率下水稻秸秆的离散元参数标定[J/OL]. 南京农业大学学报,2025:61-63[2025-06-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1148.S.20240731.0931.002.html>.

责任编辑:李云

基于 GJO-VMD 的声发射信号特征提取与类型识别研究

孟玲玲^{1*}, 董仕尚², 方贞琪¹, 闵祥河¹, 李 壮¹

(1. 蚌埠学院 电子与电气工程学院, 安徽 蚌埠 233030; 2. 安徽工程大学 电气工程学院, 安徽 芜湖 241000)

摘 要:为了研究声发射(AE)信号在工业机器人机械本体上的传播特性与类型识别,提出了一种基于金豺优化(GJO)变分模态分解(VMD)参数的AE信号的特征频率提取方法,根据频率特征范围判断内外表面AE信号类型。首先,在工业机器人本体的内外表面产生AE源,通过两个压电传感器以3 MHz的采样频率采集AE信号。然后,利用最小信息熵作为优化适度函数,采用GJO对VMD进行优化,确定VMD的最佳模态个数 K 和惩罚因子 α 。并利用最大相关系数对AE波形进行重构。提取出AE信号在机器人本体内外表面传播的频率特征,并进行多次实验得到内外表面AE信号的特征频率范围。研究表明,两个传感器的特征频率范围分别在130–150 kHz、160–180 kHz和100–125 kHz、130–165 kHz,需要联合内外表面AE信号的主要频率范围才能辨识AE信号的类型。

关键词:声发射;工业机器人;金豺优化(GJO);VMD分析

中图分类号:TP183

文献标识码:A

文章编号:2095–297X(2025)05–0041–07

Research on Feature Extraction and Type Recognition of Acoustic Emission Signals Based on GJO-VMD

MENG Lingling^{1*}, DONG Shishang², FANG Zhenqi¹, MIN Xianghe¹, LI Zhuang¹

(1. School of Electronics and Electrical Engineering, Bengbu University, Bengbu, 233030, Anhui;

2. School of Electrical Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu, 241000, Anhui)

Abstract: In order to study the propagation characteristics and type recognition of acoustic emission (AE) signals on industrial robot body, a method for extracting the characteristic frequency of AE signals based on variational mode decomposition (VMD) parameters of golden jackal optimization (GJO) was proposed, and the type of AE signals on interior and exterior surfaces was determined according to the frequency feature range. First, AE sources were generated on the interior and exterior surfaces of the industrial robot body, and AE signals were collected at a sampling frequency of 3 MHz by two piezoelectric sensors. Then, using the minimum information entropy as optimization moderation function, GJO was used to optimize VMD, and the optimal number of modes K and penalty factor α were determined. The AE waveform was reconstructed using the maximum correlation coefficient. The frequency characteristics of AE signals propagating on the inside and outside surfaces of the robot body were extracted, and the characteristic frequency range of AE signals on the inside and outside surfaces was obtained by several experiments. The research results showed that the characteristic frequency range of the two sensors is 130–150 kHz, 160–180 kHz, 100–125 kHz, 130–165 kHz, and the main frequency range of AE signals on the inner and outer surfaces needs to be combined to identify the type of AE signals.

Key words: acoustic emission; industrial robots; golden jackal optimization (GJO); VMD analysis

收稿日期:2025–01–06 * 通讯联系人

基金项目:蚌埠学院自然科学研究项目(2023ZR03)。

作者简介:孟玲玲(1989–),女,河南卫辉人,助教,硕士研究生。E-mail:905625796@qq.com

工业机器人已成为现代工业制造领域、自动化生产的重要组成部分之一,由于机器人本体机械故障会造成重大经济损失甚至安全事故,因此对机器人的健康监测变得十分重要^[1]。工业机器人本体机械产生早期不可预测的损伤时会以机械波的形式释放应变能,所以通过声发射技术可以监测其动态力学性能。因此声发射无损检测(AENT)技术为工业机器人本体机械的健康监测提供了一种创新的方法。声发射技术已经在桥梁^[2]、滚动轴承^[3]、航空航天材料^[4]等领域得到成熟的应用,然而,在工业机器人领域中的应用还不多见。近年来,声发射技术逐渐受到工业机器人检测领域的关注。

常见的信号提取方法为 EMD 分析法^[5],然而,EMD 算法本身存在诸如模态混叠、端点效应、筛分迭代停止标准等问题,在实际计算与应用中还存在许多不足。而 VMD 分析法则解决了 EMD 分析法所存在的问题。近年来,VMD 分析法被广泛地应用于故障信号分析中。郭跃楠等^[6]采用变分模态分解算法对信号进行自适应分解,提取信号的局部特征,再根据信息熵的不变性和对冲击信号的敏感性,提出故障因子的敏感模态筛选方法对信号进行重构,有效地抑制振动信号中的干扰和噪声。任学平等^[7]采用 VMD 对轴承早期故障信号进行预处理,依据峭度准则选取峭度值较大的分量进行重构,有效提取出早期故障信号。然而,对于 VMD 分解来说,模态个数 K 和惩罚因子 α 对分解的结果有很大的影响。 K 取值过大会导致过分解,反之,则会欠分解; α 取值过大,会造成频带信息丢失,反之,会信息冗余。因此,对于参数 K 的选择十分重要。张帅等^[8]采用样本熵为亲和度函数,应用免疫算法对变分模态分解中的模态数 K 和惩罚因子 α 进行优化,能够有效获得表征浮环密封主密封面碰摩状态的声发射信号。蒋敏等^[9]为了进一步提高轴承故障诊断效率,设计了一种通过粒子群优化算法(PSO)优化 VMD 分解有限带宽本征模态分量(IMF)的方法,达到重构阈值信号的目的,验证了该方法对轴承状态实施故障诊断的可行性与有效性。

在探究声发射信号的过程中,信号类型识别对于深入了解其传播特性而言,有着极为重要的意义,主要用于辨识声发射源位置。部分相关研究通过借助改进的经验模态分解(EMD)方法,对声发射信号展开处理,旨在获取相应的频率范围,进而达到类型识别的目的^[10]。如不能合理地对声发射信号处理,会使得最后的频率范围缺乏足够的精确性,进而对识别具体位置的准确性产生不良影响。鉴于此,

DONG 等人在运用 EMD 方法之前,采用小波降噪的方式对声发射信号进行预处理,提取出更为准确的频率范围,以此来准确地实现信号类型识别^[11]。

AENT 健康监测在工业机器人安全操作中至关重要。为了实现工业机器人本体的 AENT 健康监测,需了解 AE 信号在本体内的传播特性,同时考虑到表面涂层对 AE 信号传播的影响。依据 ASTM 相关声发射检测标准,通过在本体内外表面进行铅芯折断来生成模拟 AE 源,研究 AE 信号的传播差异。为了防止 VMD 分解过程中发生欠分解和过分解,以及频带信息丢失和冗余的情况。本研究利用最小信息熵作为优化适度函数,采用金豺优化算法对 VMD 进行优化,从而确定 VMD 的最佳模态个数 K 和惩罚因子 α 参数,并利用最大相关系数重构 AE 信号,再通过快速傅里叶变换得到特征频率的分布,并进行多次实验得到内外表面 AE 信号的特征频率范围,从而提升机器人机械本体健康监测和故障诊断的准确性和效率。

1 材料与方法

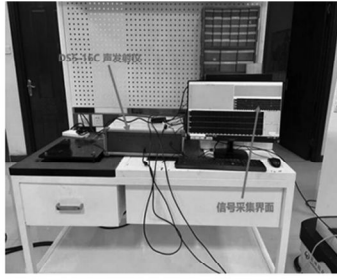
1.1 实验器材与材料

研究材料为国产工业六轴机器人,工业机器人和机械本体如图 1(b)所示,具体参数如表 1 所示。

表 1 工业机器人主要参数

产品名称	工业机器人
产品型号	ER3B-C10
额定功率	1 kW
最大负载	3 kG
额定电压	220 V
设备重量	27 kG

该本体由整体浇铸的金属铝制成,表面均匀涂有漆面。实验使用软岛 DS5-16C 声发射仪采集声发射波形,采样速率为 3 MHz,传感器采用 RS-2A 压电陶瓷传感器,前置放大器增益设定为 40 dB,声发射信号采集设备如图 1(a)所示。声发射源通过铅芯折断产生,按照国家对铅芯折断所制定的标准,使用直径为 0.5 mm 的 HB 铅笔,铅芯伸长量为 3 mm,每次断铅时保持铅芯与本体表面成 30°。声发射传感器固定在机器人机械本体上,间距为 160 mm,上方传感器标记为 1 传感器,下方传感器标记为 2 传感器,传感器布置和铅芯折断点位置如图 1(b)所示。



(a) 声发射信号采集设备



(b) 传感器布置和铅芯折断点图

图 1 声发射信号采集设备,工业机器人机械本体,传感器布置和铅芯折断点位置图

1.2 VMD 算法原理

VMD 分析法是一个自适应、准正交的信号分解方法,能够将多分量调幅调频信号一次性分解成多个单分量调幅调频信号^[12]。

$$\min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} \left\{ \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\sigma(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] \exp(-j\omega_k t) \right\|_2^2 \right\}; \text{subject to } \sum_k u_k(t) = y(t) \quad (1)$$

式中, $\delta(t)$ 是脉冲函数, “*” 表示卷积。 ∂_t 表示对 t 求偏导。 $u_k(t)$ 是 AE 信号经过 VMD 分解后得到的 k 个 IMFs。

$$L(\{u_k(t)\}, \{\omega_k(t)\}, \lambda) = \alpha \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\sigma(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] \exp(-j\omega_k t) \right\|_2^2 + \left\| x(t) - \sum_k u_k(t) \right\|_2^2 + \langle \lambda(t), x(t) - \sum_k u_k(t) \rangle \quad (2)$$

利用交替方向乘子算法持续更新各 IMF 及中心频率,从而求得式(2)增广拉格朗日函数的鞍点,即为所求问题的最优解,从而实现对原始信号的分解:

$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega) = \frac{\hat{y}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega) + \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2}}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2} \quad (3)$$

有关 VMD 的详细描述见文献[13]。

1.3 金豺优化算法原理

金豺优化 (Golden Jackal Optimization, GJO) 算法是 Chopra 等^[14]在 2022 年提出的一种模仿金豺相互合作狩猎行为的新型智能优化算法, GJO 初始化学描述如下:

$$Y_0 = Y_2 + L \times (Y_1 - Y_2) \quad (4)$$

式中: Y_0 表示初始金豺种群的位置; L 是 $[0, 1]$ 范围内的均匀随机向量; Y_1 和 Y_2 分别是上下边界。

使用优化适度函数估计优化过程中每个猎物的适度值,则可得到优化的适度值矩阵:

$$F_{OA} = [f(a)] = [f(Y_{n,1}; Y_{n,2}; \cdots; Y_{n,k})] \quad (5)$$

式中: F_{OA} 为猎物的适应度值矩阵; $f(a)$ 为适应度函数或目标函数。

适应度最优值对应的解为雄豺位置坐标,次优

假设原信号 $y(t)$ 是多分量信号,被分解为 k 个 IMFs,且各 IMF 的中心频率为 ω_k ,则构造的约束变分模型为:

式(1)可以通过引入一个二次惩罚因子 α 和拉格朗日乘子项 λ 来将一个有约束最优化问题转换为一个无约束最优化问题:

值对应的解为雌豺位置坐标。

1.3.1 搜索猎物阶段

当雄豺发现到猎物时会带领雌豺开始追逐,而猎物逃脱后,它们继续等待或寻找其他猎物。金豺群体感知到的猎物的相对位置可以表示为:

$$\begin{cases} Y_1(t) = Y_g(t) - E \cdot |Y_g(t) - rl \cdot \text{Prey}(t)| \\ Y_2(t) = Y_m(t) - E \cdot |Y_m(t) - rl \cdot \text{Prey}(t)| \end{cases} \quad (6)$$

式中: t 为当前迭代次数; $Y_g(t)$ 、 $Y_m(t)$ 分别表示第 t 次迭代的雄豺和雌豺的位置; $Y_1(t)$ 、 $Y_2(t)$ 分别表示第 t 次迭代相应的雄豺和雌豺更新后的位置; rl 表示一个基于莱维分布的随机数; Prey 表示猎物矩阵; E 为猎物的逃脱能量。

最后,金豺种群中的每个个体位置的更新位置为:

$$Y(t+1) = \frac{Y_1(t) + Y_2(t)}{2} \quad (7)$$

1.3.2 包围并抓捕阶段

当猎物被包围时, E 的能量会随之减少,此时,金豺就会攻击并吞食猎物,其数学模型如下:

$$\begin{cases} Y_1(t) = Y_g(t) - E \cdot |rl \cdot Y_g(t) - \text{Prey}(t)| \\ Y_2(t) = Y_m(t) - E \cdot |rl \cdot Y_m(t) - \text{Prey}(t)| \end{cases} \quad (8)$$

1.4 金豺优化 VMD 算法原理

在金豺优化算法优化 VMD 参数的过程中,将最小信息熵作为目标。对 VMD 分解后的每个模态分量 $u_k(t)$, 计算其信息熵, 通过金豺优化算法找到一组和的值, 使得 F_{0A} 最小。金豺优化算法模拟金豺群体的行为。群体中的金豺个体代表不同的和组合, 通过适当的映射将金豺个体的位置向量映射到 K 和 α 的取值范围。雄豺负责探索新的参数空间区域, 寻找可能使适应度函数值更小的位置。雌豺根据雄豺的位置和群体信息来更新自己的位置, 以期找到更优的 K 和 α 组合。在每次迭代过程中, 对每个金豺个体所代表的 K 和 α 组合进行 VMD 分解, 计算分解后模态分量的信息熵之和。随着迭代的进行, 金豺个体不断更新自己的位置, 适应度函数值不断优化。当算法达到最大迭代次数或者满足一定的收敛条件时, 就认为找到了最优或近似最优的 K 和 α 组合, 使得 VMD 分解后的模态分量信息熵最小, 从而实现了 VMD 参数的优化。

1.5 相关系数

对每个 IMF 与原始信号进行相关系数计算, 使相关系数的值在 $[-1, 1]$ 之间, 越接近 1 表示两者之间的线性相关性越强^[15]。相关系数的算法如下:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (9)$$

其中, $\bar{X}$ 为样本期望。

2 结果与分析

2.1 本体外表面折铅的 AE 信号特征

设置一个测试点 A 位于两个传感器同一水平线, 距离 1 传感器 60 mm, 在 A 点的内外表面通过铅芯折断产生 AE 源, 采集到 4 组原始 AE 信号, 外表面的信号记为 Se1 (1 传感器) 和 Se2 (2 传感器), 内表面的信号记为 Si1 (1 传感器) 和 Si2 (2 传感器)。本研究以外表面采集到的声发射信号 Se1 和 Se2 为例, 说明数据处理过程与处理结果展示, 内表面的信号采用相同的处理方式。

从原始信号中截取包含声发射事件的 2 ms 长度的波形数据用于特征分析, 其中外表面 AE 信号相应的波形和频谱如图 2 所示。在时域波形图中可以观察到 AE 信号从突然发生到逐渐衰减的全过程。且在频谱图中发现, 内外表面的 AE 信号主要特征频率集中在 0 ~ 500 kHz 范围内, 其中混杂着许多噪声频率。因此, 铅芯折断的特征频率无法从原始信号的频谱中得知。

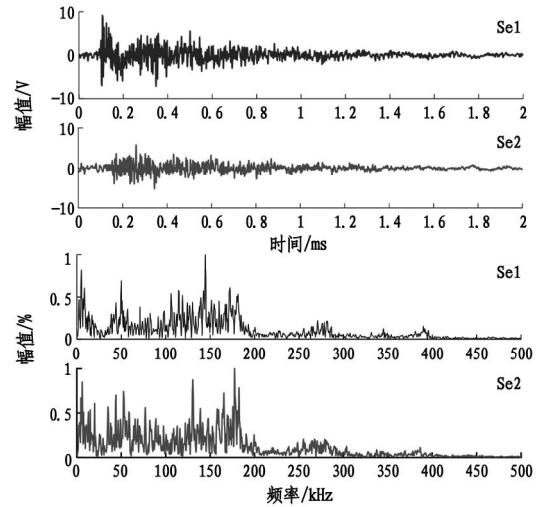


图2 本体外表面 AE 信号原始波形与频谱

2.2 本体外表面的 AE 信号 GJO-VMD 分解

本研究以最小信息熵为优化适应度函数, 采用金豺优化算法优化 VMD 参数的方法对采集到的 AE 信号进行分解。金豺优化算法优化 VMD 参数所需要设置的变量为: 分解模态数 K 和惩罚因子 α , 所以优化变量 Dim 数目设置为 2, 以对应这两个待优化参数; 迭代次数设置需兼顾算法收敛效果与计算效率。若迭代次数太少, 算法可能无法充分搜索到最优解; 若太多, 计算时间会大幅增加。经多次试验, 设置最大迭代数目 T 为 20, 在此研究中可使 GJO 在合理时间内找到较优的 VMD 参数解; 种群规模影响算法的搜索范围和收敛速度。规模较小, 搜索空间有限, 可能遗漏最优解; 规模过大, 计算复杂度会剧增。种群规模 N 设为 30, 能在保证一定搜索广度的同时, 控制计算量, 确保算法有效运行; 分解模态数 K 值决定了 VMD 分析后得到的 IMF 分量的数目。 K 取值过大会导致过分解, 产生虚假模态, 使分解结果过于复杂且难以解释; K 取值过小则会欠分解, 不能充分提取信号中隐含的特征信息^[16]。在本研究中, K 的下限设为 3, 上限设为 10, 在此范围内寻找合适的 K 值, 以实现对声发射信号的有效分解。 α 取值影响模态分量的带宽, 与带宽成反比。 α 设置较小, 会出现模态混叠现象, 不同模态之间的界限模糊, 影响信号特征提取; α 设置较大, 虽能避免模态混叠, 但会造成局部信息丢失, 导致信号细节特征被忽略。本研究中 α 的下限设为 100, 上限设为 2500, 通过 GJO 在该区间内寻找合适的 α 值, 平衡频带信息保留与模态分离效果。将上述变量带入 GJO 算法中得到目标函数最优值曲线如图 3 所示, 搜索到的最佳模态个数 K 为 7, 惩罚因子 α 为 1420。图 4 为 Se1 信号分解后的各层 IMF 分量信号, Se2、

Si1 和 Si2 信号处理过程同 Se1。

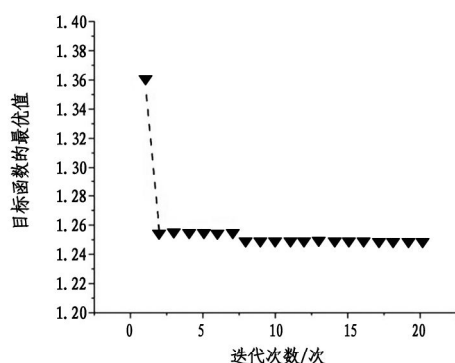


图3 GJO 搜索到的目标函数最优值曲线

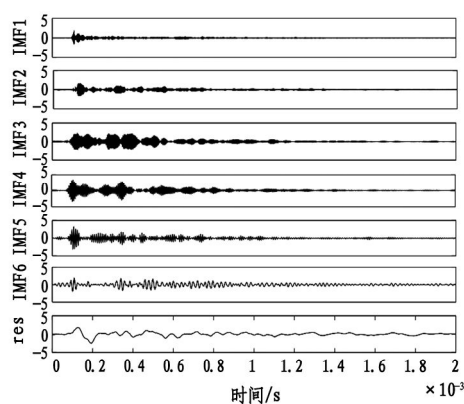


图4 Se1 信号 VMD 分析结果

由文献[16]可知,当相关系数大于 0.5 时,IMFs 与原始信号呈强相关;反之,呈弱相关或无相关。由图 5 可知,Se1 分解后的 IMF4 分量的相关系数为 0.56,与原始信号呈强相关。而其他的 IMFs 与原始信号的相关系数均小于 0.5,呈弱相关或无相关,可以认为是虚假的 IMFs 分量,不计入后续的分析。Se2 分解后的 IMF3 分量的相关系数为 0.55,与原始信号呈强相关,而其他的 IMFs 与原始信号的相关系数均小于 0.5,呈弱相关或无相关,不计入后续的分析。根据上述分析对信号进行重构,经过频率分析后得到波形图和频谱图如图 6 所示。

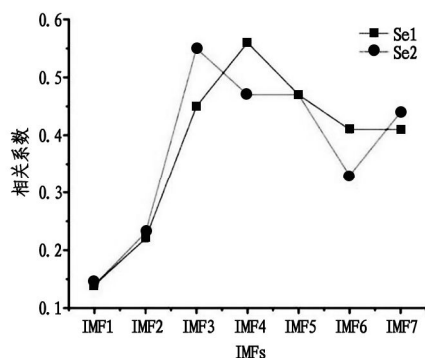


图5 Se1 和 Se2 信号 VMD 分解的 IMFs 分量与原始信号的相关系数折线图

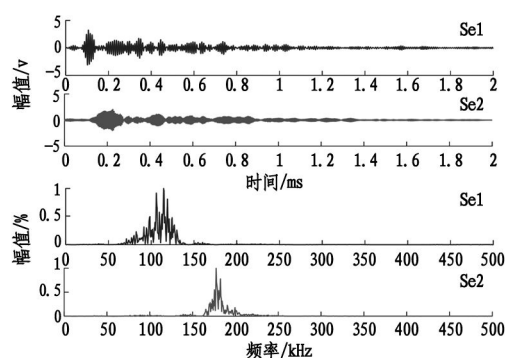


图6 外表面 AE 信号重构波形和频谱

由图 6 可以看出,经过 VMD 分解再重构后的信号时域波形图具有完整的折铅声发射过程。同时,在 Se1 信号 VMD 分解重构后的频谱中可以看出,它的主频率分布在 140 kHz 附近,Se2 信号的主频率分布在 180 kHz 附近。同理,对内表面的 AE 信号进行上述相同的处理方式,得到的结果是:Si1 信号的主频率分布在 120 kHz 附近,Se2 信号的主频率分布在 165 kHz 附近。

2.3 对比实验

2.3.1 采用不同优化适度函数对比

在金豺优化算法优化 VMD 参数的过程中,将最小包络熵^[17]作为优化适度函数进行对比。选择一组信号进行验证,得到优化适度曲线如图 7 所示。

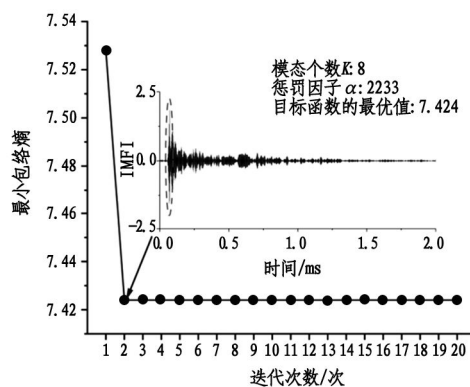


图7 GJO 搜索到的目标函数最优值曲线

由最小包络熵作为优化适度函数,通过 GJO 算法搜索到的 VMD 参数 $[K, \alpha]$ 分别为 8 和 2233,将其输入 VMD 程序中对信号进行分解。由前小节可知,使用信息熵作为优化适度函数搜索的 $[K, \alpha]$ 在分解过程中避免了传统 VMD 分析造成的模态混叠情况。然而,使用本小节采用的方法后,IMF1 细节信号产生了模态混叠的情况。此外,在优化算法优化 VMD 参数的研究中,通常需要经过多次迭代才能逐渐收敛到一个相对稳定且可信的最优值,与之相比,以最小包络熵作为优化适度函数的优化过程中仅第二次迭代就出现最优值,这与常规的研究经

验不符。

2.3.2 与传统 VMD 分析对比

本节采用传统 VMD 分析方法处理声发射信号,分别计算原信号与 IMFs 的相关系数。选择相关系数较大的分量进行重构,然后进行频率分析。最后,将该方法与本文提出的方法进行了比较。由于,同时分析所有来自内外表面的声发射信号数据工作量较大。因此,本小节只介绍一组来自内外表面的声发射数据,其余数据采用相同的方法分析。传统 VMD 分解需要自主选择分解最佳模态个数 K 和惩罚因子 α ,本研究根据文献[18],采用观察频率中心法确定 K ,惩罚因子则确定为默认值 2000。 τ 被选为 4×10^{-6} ,Se1 信号不同 K 值下的中心频率如表 2 所示,其中,从 K 为 6 开始,出现了中心频率相近的模态,本研究认为出现了过分解,因此,模态数选为 5。

表 2 Se1 信号不同 K 值下的中心频率

K	中心频率/kHz				
2	144	50			
3	172	144	50		
4	172	144	50	5	
5	281	172	144	50	5
6	281	171	144	139	50

将上述参数代入 VMD 分析后进行相关性分析重构,得到的频谱如图 8 所示,图 8 中部分信号的频率峰值,虽然可以看到能量较高的主频率,但整个频谱中仍然混杂着各种次要频率,不能真正反映信号的主要频率特性。结果表明,传统的 VMD 提取声发射信号频率特征是不可靠的。

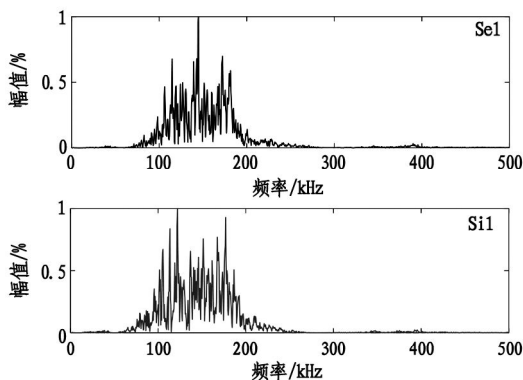


图 8 传统 VMD 分析后 AE 信号的特征频率

3 机器人本体内外面 AE 信号类型判断

通过对工业机器人本体 A 点内外表面位置进

行铅芯折断的 AE 信号进行分析后得到外表面折铅频率:1 传感器为 140 kHz,2 传感器为 180 kHz;内表面折铅频率:1 传感器为 120 kHz,2 传感器为 165 kHz。分析数据后发现,不同位置的 AE 信号频率特性各不相同。因此,可以通过这些差异判断 AE 信号的产生类型。如图 1(b)所示,在位置 B 和 C,分别在内外表面进行铅芯折断实验,经过本研究提出的方法处理后,得到 AE 信号各点处特征频率如图 9 柱形图所示。由图 9 可知,外表面的 AE 信号频率都相对稳定,说明数据波动较小,结合 A 点处的外表面 AE 信号特征频率发现:1 传感器频率的平均值在 130 – 150 kHz 范围内,2 传感器频率的平均值都在 160 – 180 kHz 范围内;对于内表面的 AE 信号特征频率:1 传感器频率的平均值在 100 – 125 kHz 之间,2 传感器频率的平均值在 130 – 165 kHz 之间。而且由于涂层的影响,外表面的 AE 信号频率高于内表面的 AE 信号频率。

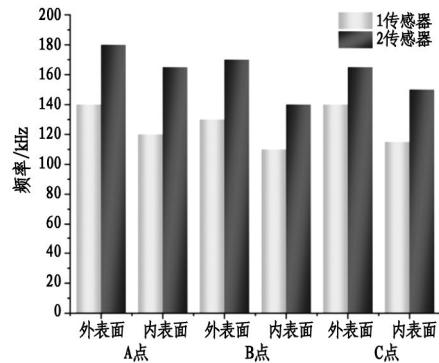


图 9 A,B,C 位置 AE 信号的特征频率

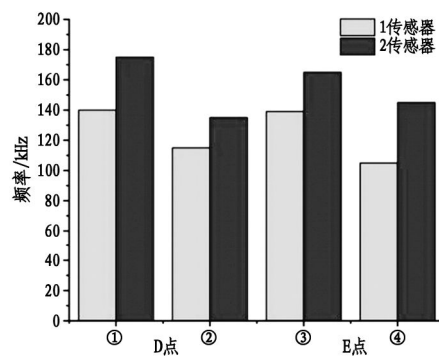


图 10 测试点四个位置的两个通道的频率

为了验证上述范围的可靠性,在机器人本体左下方 D 点和 E 点的内表面或外表面四个位置分别进行铅芯折断,同样经过上述分析处理后得到频率特性柱形图如图 10 所示。根据上述频率范围,可以确定四个位置是在外表面还是内表面。根据上述讨论得知外表面和内表面的声发射频率范围各不相同。然而,对比发现内表面 2 号传感器的频率范围包含外表面 1 号传感器频率范围,因此,仅靠 1 号传

感器或 2 号传感器无法判断折铅类型。所以,需要通过内外表面两个通道的频率范围共同决定。图 10 中,位置①和③的 1 号传感器频率分别为 140 kHz 和 139 kHz,2 号传感器频率分别为 175 kHz 和 165 kHz,由此可判断,①和③的频率均在外表面频率范围内。位置②和④的 1 号传感器频率分别为 115 kHz 和 105 kHz,2 号传感器频率分别为 135 kHz 和 145 kHz,均在内表面频率范围内。因此,可以判断位置①和③的铅芯折断位置位于外表面,位置②和④的铅芯折断位置位于内表面。综上,机器人本体内外表面的频率特性在不同的平均范围内,由此可以判断外部涂层特性对声发射信号的传播速度和特征频率有显著影响。

4 结论

由于仪器采集到的信号是 AE 信号与噪声的混合信号,因此直接对采集到的信号进行频率分析意义不大。为此,本研究利用最小信息熵作为优化适度函数,采用金豺优化算法对 VMD 进行优化,从而确定 VMD 的最佳模态个数 K 和惩罚因子 α 参数。有效地避免了 VMD 分解过程中发生欠分解和过分解,以及频带信息丢失和冗余的情况,并通过最大相关系数重构获得较为完整的 AE 信号,并对其进行频率分析,较为准确地提取出了 AE 信号的主要频率范围。

工业机器人机械本体外表面 AE 信号主要频率范围中,1 传感器频率的平均值在 130 – 150 kHz 之间,2 传感器频率的平均值在 160 – 180 kHz 之间。内表面 AE 信号主要频率范围为 1 传感器频率的平均值在 100 – 125 kHz 之间,2 传感器频率的平均值在 130 – 165 kHz 之间。结果显示,仅靠 1 传感器或 2 传感器无法判断折铅类型,需要联合内外表面 AE 信号的主要频率范围才能辨识 AE 源的类型。

参考文献:

- [1] 安海博,梁伟,张吟龙. 机器人 RV 减速器声发射信号传播机理分析及实验研究[J]. 机器人,2020,42(5):557 – 567.
- [2] 李丹,沈鹏,贺文字,等. 基于声发射信号时频图深度学习的桥梁钢桁架焊接节点损伤程度识别[J]. 振动与冲击,2024,43(1):107 – 115.
- [3] 缪祥垚,伍星,柳小勤,等. 基于声发射 Lamb 波频散特性的轴承损伤单传感器定位[J]. 振动与冲击,2023,42(6):196 – 201.
- [4] 刘青旭,陈海峰, BRYANSKY Anton, 等. 航天复合材料结构健康监测技术应用进展[J]. 复合材料学报,2024,41(9):4563 – 4588.
- [5] XIONG Z, YAO J, HUANG Y, et al. A wind speed forecasting method based on EMD-MGM with switching QR loss function and novel subsequence superposition[J]. Applied Energy, 2024, 353:122248.
- [6] 郭跃楠,杜福嘉,黄康,等. 基于模态筛选的滚动轴承微小故障诊断研究[J]. 机械设计与制造,2024(9):169 – 174.
- [7] 任学平,李攀,王朝阁. 基于 VMD 和快速谱峭度的滚动轴承早期故障诊断[J]. 轴承,2017(12):39 – 43.
- [8] 张帅,丁俊华,丁雪兴,等. 基于 IA-VMD 的浮环密封声发射信号降噪与特征提取[J]. 振动与冲击,2024,43(4):222 – 229.
- [9] 蒋敏,王明,张建强. 基于 PSO 优化 VMD 算法的轴承振动信号重构及故障诊断[J]. 机械设计与研究,2022,38(5):138 – 141,147.
- [10] DONG S, GONG S, LI M, et al. Acoustic Emission Signal Characteristics Extraction Based on Improved EMD Method for Industrial Robot Body[C]. International Conference on Robotics, Control and Automation Engineering, Suzhou, China, 2023:280 – 284.
- [11] DONG S, YOU J, LI M, et al. Research on features and localization of AE signals from the mechanical body of industrial robots based on WD-EMD[J]. Measurement Science and Technology, 2024, 35(9):096117.
- [12] 刘泽锐,邢济收,王红军,等. 基于 VMD 与快速谱峭度的滚动轴承故障诊断[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(2):73 – 79.
- [13] DRAGOMIRETSKIY K, ZOISSO D. Variational mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3):531 – 544.
- [14] CHOPRA N, ANSARI M. Golden jackal optimization: A novel nature-inspired optimizer for engineering applications[J]. Expert Systems with Application, 2022, 198(7):116924.
- [15] 张超,任杰,何闯进. 基于 VMD 包络相关系数的齿轮故障特征提取方法[J]. 煤矿机械,2020,41(10):168 – 171.
- [16] DONG S, YOU J, LI M, et al. Investigation of Lamb wave modes recognition and acoustic emission source localization for steel plate based on golden jackal optimization VMD parameters and CWT[J]. Measurement, 2024, 242:116103.
- [17] 唐贵基,王晓龙. 参数优化变分模态分解方法在滚动轴承早期故障诊断中的应用[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(5):73 – 81.
- [18] 刘长良,武英杰,甄成刚. 基于变分模态分解和模糊 C 均值聚类的滚动轴承故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(13):3358 – 3365. 责任编辑:葛圣志

TF-YOLO: 上下文感知与多尺度增强的脑肿瘤 MRI 检测

蒋文虎

(安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: 针对脑肿瘤 MRI 检测中形态异质性强、边界模糊及噪声干扰导致的漏检问题, 改进一种高精度且鲁棒性强的检测框架, 即改进了 TF-YOLO 模型: 上下文感知 Transformer (CoT), 融合 3×3 卷积局部编码与全局自注意力机制, 显式建模肿瘤-水肿带-卫星病灶的长程空间依赖, 自适应调整感受野; 嵌入多尺度金字塔增强网络 (PENet), 通过可微分拉普拉斯金字塔分解、残差边缘增强与动态通道滤波三阶段策略, 抑制高频伪影并增强肿瘤边缘及低频解剖特征。在 Br35H 数据集上, mAP50 达 98.2%, 较基线 YOLOv11 提升 2.4%; 肿瘤召回率提升 1.8%, 消融实验验证 CoT 与 PENet 的互补性。协同设计有效解决形态异质性与边界模糊问题, 显著降低漏检风险并抑制背景干扰, 为复杂医学场景下的弱显著性目标检测提供可靠解决方案。

关键词: 脑肿瘤检测; YOLOv11 算法; 上下文感知 Transformer; 多尺度金字塔增强网络

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 2095-297X(2025)05-0048-07

TF-YOLO: Context-Aware and Multi-Scale Enhanced Brain Tumor MRI Detection

JIANG Wenhui

(School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan, 232001, Anhui)

Abstract: To address the issue of missed detection resulting from high morphological heterogeneity, ill-defined boundaries, and noise interference in brain tumor MRI detection, it enhanced a high-precision and robust detection framework in the paper. Specifically, the TF-YOLO model was enhanced: A contextual transformer (CoT) was designed, integrating local 3×3 convolutional encoding and global self-attention mechanisms to explicitly model long-range spatial dependencies among tumors, peritumoral edema zones, and satellite lesions, with adaptive receptive field adjustment; A pyramid enhancement network (PENet) was embedded, employing a three-stage strategy of differentiable Laplacian pyramid decomposition, residual edge enhancement, and dynamic channel filtering to suppress high-frequency artifacts while enhancing edge and low-frequency anatomical features of tumors. On the Br35H dataset, TF-YOLO achieved 98.2% mAP50, surpassing the baseline YOLOv11 by 2.4%. Tumor recall rate increased by 1.8%, with ablation studies confirming the complementary contributions of CoT and PENet. The synergistic design effectively resolves morphological heterogeneity and boundary ambiguity, significantly reducing missed detection risks while suppressing background interference, providing a reliable solution for weakly salient target detection in complex medical scenarios.

Key words: brain tumor detection; YOLOv11 algorithm; contextual transformer; multi-scale pyramid enhancement network

脑肿瘤的精准检测是临床诊疗决策的核心环节, 其效能直接影响治疗方案制定与患者生存质量。

磁共振成像 (MRI) 虽为脑肿瘤诊断的影像学金标准, 但其影像存在形态异质性强、边界模糊及小样本

收稿日期: 2025-06-12

作者简介: 蒋文虎 (1998-), 男, 安徽合肥人, 硕士研究生。E-mail: 1966131302@qq.com

标注稀缺等关键挑战^[1]。

近年来,针对脑肿瘤检测的算法研究主要围绕两大技术路线展开:基于卷积神经网络^[2](CNN)的多尺度检测框架与基于 Transformer 的全局建模方法^[3],并辅以特征增强策略提升模型鲁棒性。CNN 多尺度检测框架:以 YOLO 系列模型为代表的改进方法通过多尺度特征融合提升通用目标检测性能。例如,BGF-YOLO^[4]引入双向门控特征金字塔,显著增强小目标(如卫星病灶)的定位能力。然而,此类方法在脑肿瘤场景下仍面临显著瓶颈:静态卷积核的固定感受野难以获取肿瘤动态扩展特性(如不规则边界与卫星病灶的关联性),导致边界定位误差累积;MRI 图像的噪声与背景杂波干扰使模型难以聚焦肿瘤区域,尤其对模糊病灶敏感性不足。Transformer 全局建模方法:以 TransMed^[5]为代表的模型通过自注意力机制在医学图像分类中展现出全局上下文建模优势。研究表明,Transformer 的长程依赖建模能力可有效缓解肿瘤边界模糊问题。但现有研究多聚焦单一任务(分类或分割),缺乏与检测任务的高效协同设计。特征增强策略:针对医学图像噪声抑制问题,PE-YOLO^[6]通过拉普拉斯金字塔分解提升暗光场景的细节恢复能力,但其高频噪声抑制策略在复杂医学背景(如 MRI 伪影)中泛化性有限。类似地,PK-YOLO^[7]基于预训练知识引导的增强方法虽提升了多平面 MRI 切片检测精度,但对肿瘤-水肿带的长程空间关联性建模不足,导致卫星病灶漏检。

上述研究揭示了脑肿瘤检测领域的普遍性规律与共性挑战:(1)形态异质性与边界模糊问题需结合局部细节保留与全局依赖建模的协同优化;(2)噪声干扰抑制需平衡高频伪影消除与低频解剖特征增强;(3)小样本条件下^[8],模型对肿瘤动态扩展特性的自适应能力有待提升。然而,现有方法仍存在两大技术局限:其一,动态特征增强与多尺度^[9]输入优化的协同设计不足,难以兼顾细节保留与噪声抑制;其二,缺乏针对弱显著性目标的轻量化检测框架,导致临床高噪声场景下的漏检风险升高^[10]。

针对上述挑战,本研究提出一种融合上下文感知 Transformer (CoT) 与多尺度金字塔增强网络 (PENet) 的改进型 YOLOv11^[11] 框架 (TF-YOLO),其创新性体现在以下三方面:

(1) 动态上下文建模:通过将 C3k2 模块替换为 CoT 单元,CoT 模块结合局部卷积编码与全局自注意力机制,显式建模肿瘤-水肿带-卫星病灶的长程空间依赖,自适应调整感受野范围。

(2) 多尺度特征优化协同设计:在检测管道前端嵌入轻量化 PENet 模块,采用可微分金字塔分解、残差边缘增强与动态通道滤波三阶段策略,实现高频噪声抑制与低频解剖特征增强的平衡。

(3) 轻量化与高效性:通过层级式模块替换(仅替换骨干网络中 4 个 C3k2 模块)与可微分金字塔分解策略,TF-YOLO 在保持 YOLOv11 实时性的同时,mAP50 提升 2.4% (达 98.2%),为临床弱显著性目标检测提供了兼顾精度与效率的解决方案。

1 方法

1.1 整体架构设计

TF-YOLO 的整体架构以 YOLOv11 为基础框架,通过引入多尺度金字塔增强网络 (PENet) 和上下文感知 Transformer (CoT) 模块,构建了一个端到端的脑肿瘤检测系统(见图 1),其设计核心在于通过前端特征增强与动态上下文建模的协同优化,解决 MRI 图像中噪声干扰、形态异质性及边界模糊等关键问题。PENet 通过噪声抑制与特征增强为骨干网络提供高信噪比输入,而 CoT 模块通过动态上下文建模进一步提升特征表达质量,形成“预处理-特征提取”的闭环优化。整体框架仅替换骨干网络中 4 个 C3k2 模块,原 YOLOv11 的 Conv、SPPF、Concat、Upsample 等模块保留于骨干网络及颈部,确保模型的高效性与可扩展性。

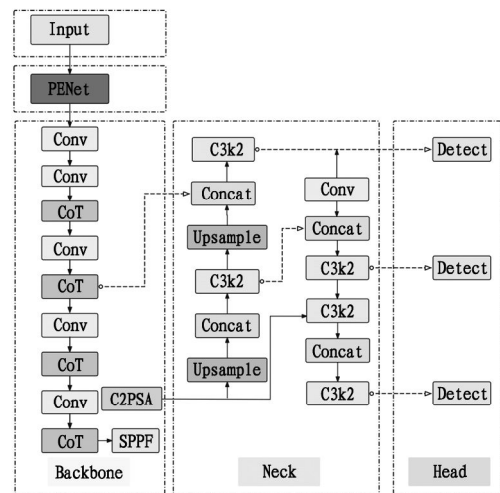


图 1 TF-YOLO 网络架构

输入 MRI 图像首先经多尺度金字塔增强网络 (PENet) 预处理,抑制噪声并强化肿瘤区域的边缘及低频解剖特征;优化后的特征随后输入改进的骨干网络,其中原始 YOLOv11 的 4 个 C3k2 模块被层级式替换为上下文感知 Transformer (CoT) 单元。跨尺度特征融合颈部 (Neck) 进一步整合骨干网络输

出的多层次特征,通过上采样与跳跃连接保留肿瘤边界细节;最终,动态检测头(Head)输出肿瘤位置与分类结果。PENet 与骨干网络通过端到端梯度协同传播联合优化,实现输入特征增强与动态上下文建模的深度融合,确保模型在复杂医学场景下的鲁棒性。

1.2 上下文感知 Transform 骨干

针对脑肿瘤 MRI 图像中弱显著性特征(如边界模糊、对比度低)与多尺度形态异质性(如肿瘤主体

与微小卫星病灶共存)带来的检测挑战,本研究引入上下文 Transformer(CoT)模块^[12],如图 2 所示。输入特征图经过 3×3 卷积提取局部细节(静态编码);其次,动态分支通过查询/键/值投影生成全局自注意力权重,结合通道归一化抑制背景噪声,实现特征重校准;最后,静态与动态分支通过残差连接融合,保留肿瘤边界的低频梯度信息。该设计通过隐式多尺度建模自适应调整感受野,显著提升了对卫星病灶的检测敏感性。

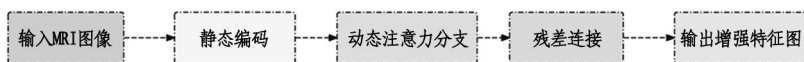


图 2 CoT 模块结构

该模块基于 Contextual Transformer Networks(CoTNet)^[13],通过静态局部编码与动态全局注意力的协同机制优化检测性能。传统 C3k2 模块依赖固定尺寸卷积核,其静态感受野难以适应肿瘤的动态扩展特性(如不规则边界、多尺度形态异质性),且在复杂解剖背景干扰下,局部卷积操作无法建模肿瘤-水肿带的长程空间依赖,导致关键解剖标志(如瘤周水肿带)误判率升高。本研究在 CoTNet 基础上进行以下针对性改进:

(1)残差连接设计。在 CoTNet 静态编码(3×3 卷积)与动态注意力分支的基础上,引入跨层跳跃连接,保留肿瘤边界的低频梯度信息,缓解深层网络的梯度弥散问题。

(2)注意力权重优化。调整动态注意力矩阵的生成策略,通过通道归一化抑制背景噪声对注意力分布的干扰,强化肿瘤区域的权重分配。

(3)动态感受野调整。通过全局自注意力机制隐式建模多尺度空间依赖,自适应捕捉肿瘤主体与卫星病灶的关联性。

1.3 多尺度金字塔增强网络

本研究的 PENet 模块(见图 3)源自 PE-YOLO 框架中的金字塔增强网络,通过改进其多尺度分解与特征增强策略,适配脑肿瘤 MRI 图像的特性。具体而言,PE-YOLO 提出的拉普拉斯金字塔分解(公式(1)、公式(2))与动态通道滤波(公式(5))为本研究提供了基础框架。在此基础上,本研究进行以下改进:

(1)可微分金字塔分解。沿用 PE-YOLO 的拉普拉斯金字塔分解^[14]方法,将输入图像分解为多尺度分量。

(2)残差细节增强(AE 模块)。受 PE-YOLO 中细节处理模块的启发,本模块通过双残差卷积块强化肿瘤边缘特征,其残差学习机制参考了 PE-YOLO 的上下文分支(Context Branch)设计。

(3)动态通道滤波(DPM 模块)。改进 PE-YOLO 的低频增强滤波器,提出动态通道调制函数,通过自适应权重分配抑制高频伪影,同时保留低频解剖结构。

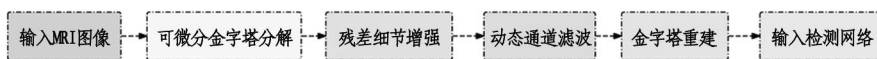


图 3 PENet 模块结构

通过上述改进,PENet 在保留 PE-YOLO 多尺度特征增强优势的基础上,针对医学图像的高噪声与弱显著性特征进行了优化。具体实现如下:

1.3.1 可微分金字塔分解

为抑制 MRI 图像中的高频伪影干扰,PENet 首先对输入图像进行多尺度分解。通过可微分高斯滤波生成拉普拉斯金字塔分量,输入 MRI 图像 $I \in \mathbb{R}^{H \times W \times 3}$,其中 $H, W, 3$ 分别为高度、宽度和通道数,经可学习高斯核分解为 4 层拉普拉斯金字塔分量:

$$L_i = P(I), i = 1, 2, 3, 4 \quad (1)$$

式(1)中, L_i 为第 i 层拉普拉斯金字塔分量,其中 $i = 1$ 为最高分辨率层, $i = 4$ 为最低分辨率层。 P 为可微分高斯金字塔分解函数,核尺寸为 5×5 ,步长为 2。

可微分设计的优势在于其灵活性与自适应性。传统金字塔分解方法(如固定高斯核)因无法适应图像局部特性,常导致噪声抑制与细节保留的权衡失衡。例如,在胶质瘤检测中,固定核可能过度平滑

水肿带与肿瘤的过渡区域,导致边界定位误差。而可学习核通过梯度优化,能够根据输入图像的噪声分布与目标特征动态调整滤波强度,显著提升分解过程的鲁棒性。

1.3.2 残差细节增强

为增强肿瘤边缘特征,每个金字塔层级通过自适应增强模块处理:

$$L_i^e = R(R(L_i)) \quad (2)$$

式(2)中, e 表示为增强, L_i^e 为第*i*层金字塔分量经过两次残差块处理后的增强特征图, R 为双残差卷积块,包含两次卷积和跳跃连接。公式展开为:

$$R(x) = x + C_{3 \times 3}(L_R(C_{3 \times 3}(x))) \quad (3)$$

式(3)中, $R(x)$ 残差块的最终输出,通过将输入 x 与残差分支的结果相加,保留原始信息并增强特征表达能力, x 为输入特征图, $C_{3 \times 3}$ 表示 3×3 卷积核的卷积操作,用于提取局部特征, L_R 为带泄漏的修正线性单元。通过级联残差学习增强肿瘤边缘梯度。

残差细节增强模块是 PENet 中提升肿瘤边缘特征判别性的核心组件,其设计灵感源于医学影像处理中对微弱信号增强的需求。传统边缘增强方法(如非锐化掩模)常因全局操作引入背景噪声,而 AE 模块通过双残差卷积块的级联设计,实现了局部细节强化与噪声抑制的平衡。

1.3.3 动态通道滤波

在重建阶段,通过动态通道调制融合多尺度增强特征,抑制噪声并保留解剖结构具体操作如下:

$$I' = D\left(\sum_{i=1}^4 U(L_i^e)\right) \quad (4)$$

式(4)中, I' 为增强后的输出图像, U 为上采样函数,将增强特征图恢复到输入分辨率, D 为动态通道调制函数。该模块在测试集上使加权图像中 Gibbs 伪影区域的误检率降低。

动态通道滤波模块(DPM 模块)通过自适应权重分配策略,解决了多尺度金字塔分量融合中的噪声干扰问题。该模块的核心思想是根据不同金字塔层级的频段特性,动态调整各通道的贡献权重。例如,在高频层,滤波器会降低噪声主导通道的权重,同时增强包含微小病灶边缘的通道响应;而在低频层,则通过增加解剖结构相关通道的权重,保留肿瘤主体的整体形态。

1.3.4 金字塔重建

将增强后的各层金字塔分量上采样并逐级融合,重建为完整图像:

$$I' = \sum_{i=1}^4 U_p(L_i^e) + L_4 \quad (5)$$

式(5)中, L_i^e 为第*i*层经过 AE 和 DPM 处理后的特征, U_p 可微分上采样操作,将低分辨率特征恢复到输入图像分辨率。 L_4 为保留最底层的原始分辨率信息,避免高频信息在多次上采样中丢失。最终输出图像 I' 通过逐级叠加高频细节与低频解剖信息,显著提升肿瘤区域的显著性,随后输入至检测网络进行定位与分类。

与传统的线性金字塔重建相比,本方法通过动态权重分配,使高频信息的利用率得到提升,同时减少伪影生成^[15]。最终输出图像在肿瘤区域呈现更高的信噪比与边缘锐度,为后续检测网络提供了理想的输入条件,为模型的多尺度检测能力奠定了坚实基础。

2 结果与分析

2.1 数据集详情

在公共脑肿瘤图像数据集 Br35H 上评估了所提出的模型的性能,在“train”和“val”两个文件夹中共 701 张图像,其中“train”文件夹中的 500 张图像被选中作为训练集,而“val”文件夹中的另外 201 张图像被选中作为测试集。

2.2 实验细节

本模型所有结果都是使用 4 张 NVIDIA GeForce GTXQR 3090 GPU,Python 版本 3.10.16,PyTorch 版本为 2.5.1 + cu124 进行训练和测试。训练参数 batch size 设置为 16, epoch 设置为 100,动量设置为 0.937,权重衰减系数设置为 0.0005,初始学习率设置为 0.01,图像大小为 640 × 640。

2.3 实验结果

在 Br35H 数据集上的实验结果表明,TF-YOLO 在脑肿瘤检测任务中展现出显著的性能优势。如表 1 所示,TF-YOLO 的 mAP50 达到 98.2%,较基线模型 YOLOv11(95.8%)提升了 2.4%,这一提升幅度在医学影像检测领域具有重要价值。例如,mAP50 作为衡量模型在 IoU 阈值 50% 下的平均精度,其提升意味着 TF-YOLO 对肿瘤定位的准确性更高,尤其在复杂解剖背景中能更可靠地区分肿瘤与伪影区域。此外,mAP50:95 指标(从 73.4% 提升至 79.1%)的显著提升进一步验证了模型在严格 IoU 阈值下的鲁棒性,表明其边界定位能力更贴近临床实际需求。

横向对比其他先进模型,TF-YOLO 在精确率(95.9%)和召回率(93.8%)上均优于 YOLOv11(94.8%和90.7%),尤其是召回率的 3.1%提升,表明模型对弱显著性目标(如卫星病灶)的漏检风险

显著降低。它也优于 YOLOv9-E^[16], YOLOv10-X^[17],值得注意的是,TF-YOLO 的召回率甚至超过了专为小目标设计的 BGF-YOLO(92.3%),这说明

PENet 与 CoT 模块的协同设计不仅增强了局部细节的捕捉能力,还通过全局依赖建模有效缓解了传统多尺度方法在长程关联性上的不足。

表 1 网络模型对比

模型	精确率	召回率	平均精度均值 A	平均精度均值 B
YOLOv11	0.948	0.907	0.958	0.734
YOLOv9-E	0.928	0.893	0.943	0.731
YOLOv10-X	0.892	0.826	0.906	0.699
BGF-YOLO	0.939	0.923	0.955	0.728
PK-YOLO	0.932	0.886	0.944	0.724
TF-YOLO	0.959	0.938	0.982	0.791

注:平均精度均值 A 是 mAP50,表示 IoU 阈值为 0.5,平均精度均值 B 是 mAP50:95,表示 IoU 阈值从 0.5 到 0.95 逐步递增。

2.4 定性分析

为进一步验证 TF-YOLO 在复杂医学场景中的改进效果,本节通过典型病例的视觉对比,直观展示基线模型(YOLOv11)与 TF-YOLO 的检测差异。如图 4 所示,在肿瘤检测中,基线模型因噪声干扰导致漏检,而 TF-YOLO 通过 PENet 显著提升边缘特征判别性;如图 5 所示,YOLOv11 因静态感受野限制,仅能覆盖主肿瘤区域且边界定位存在显著扩展偏差,尤其对卫星病灶。而 TF-YOLO 通过 CoT 模块的全局依赖建模能力,显式捕捉主肿瘤与卫星病灶的长程空间关联性(如图 5(b)框所示),同时自适应调整感受野范围,使边界定位精度与卫星病灶召回率有所提升。

如图 4 所示,图 4(a)显示 YOLOv11 因高频噪声干扰完全漏检(箭头),而图 4(b)显示 TF-YOLO 通过 PENet 的多尺度分解与动态滤波策略,有效抑制噪声并提升目标显著性(框为正确检测结果)。

如图 5 所示,YOLOv11 因静态感受野限制,仅能覆盖主肿瘤区域(图 5(a),其中箭头指向漏检区域),而 TF-YOLO 通过 CoT 模块的全局注意力机制,显式建模主肿瘤与卫星病灶的长程依赖关系(图 5(b),框为正确检测结果),显著提升对边界的检测完整性,充分体现了动态上下文建模的临床价值。

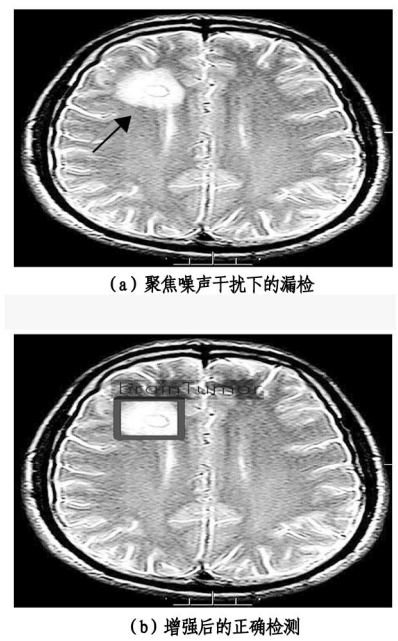


图 4 噪声条件下肿瘤检测性能对比

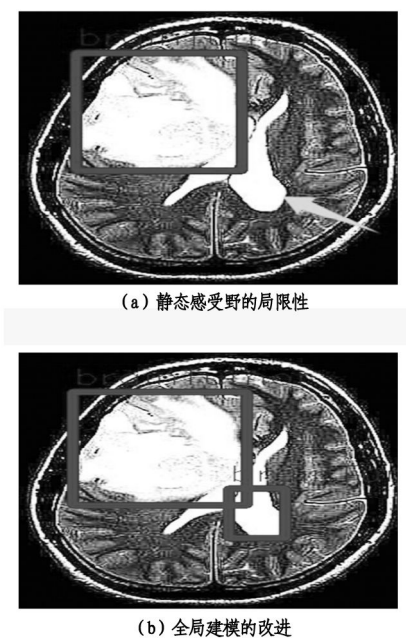


图 5 主肿瘤与卫星病灶检测对比

综上,TF-YOLO 通过 PENet 与 CoT 的协同设计,在噪声抑制、边缘增强和长程关联建模方面展现出显著优势,解决了传统模型在高噪声与形态异质性场景下的漏检问题。

2.5 消融实验

为验证各模块的贡献,消融实验通过逐步引入 PENet 与 CoT 模块,定量分析了其对性能的影响(见

表 2)。结果表明,当仅引入 CoT 模块(TR-YOLO)时,mAP50 从 YOLOv11 的 95.8% 提升至 97.2%,表明全局注意力机制有效缓解了静态卷积感受野的局限性,尤其在卫星病灶检测中贡献显著(Recall 从 90.7% 提升至 93.9%)。然而,TR-YOLO 的精确率(94.5%)略低于基线模型(94.8%),说明仅依赖全局建模可能因背景噪声干扰导致少量误检。

表 2 消融实验结果

模型	精确率	召回率	平均精度均值 A	平均精度均值 B
YOLOv11	0.948	0.907	0.958	0.734
TR-YOLO	0.945	0.939	0.972	0.741
PEN-YOLO	0.944	0.925	0.963	0.751
TF-YOLO	0.959	0.938	0.982	0.791

注:平均精度均值 A,B 同表 1。

相比之下,单独引入 PENet 的模型(PEN-YOLO)在噪声抑制方面表现突出,其 mAP50:95 达到 75.1%,较基线模型提升 1.7%,验证了多尺度分解与动态滤波策略对高频伪影的有效抑制。然而,PEN-YOLO 的 mAP50(96.3%)提升幅度有限,表明仅优化输入特征难以解决肿瘤形态异质性带来的检测瓶颈。

当 CoT 与 PENet 协同工作时(TF-YOLO),模型在精确率(95.9%)、召回率(93.8%)和 mAP50(98.2%)上均达到最优值,且 mAP50:95 提升 5.7%(79.1% vs. 73.4%),充分证明了两模块的互补性: PENet 通过前端特征增强抑制噪声干扰,为后续检测提供高信噪比的输入; CoT 则通过动态上下文建模捕捉肿瘤与卫星病灶的长程关联,弥补了传统多尺度方法在空间依赖性上的不足。例如,在噪声场景下(见图 4),PENet 的残差边缘增强显著提升了肿瘤边缘的判别性,而 CoT 的全局注意力机制则进一步确保卫星病灶的准确召回(见图 5),两者协同使漏检率与误检率同步降低。

3 结论

本研究通过融合上下文感知 Transformer(CoT)与多尺度金字塔增强网络(PENet),改进了 TF-YOLO 模型,提升了脑肿瘤 MRI 影像检测的精度与鲁棒性。实验结果表明,CoT 模块通过局部卷积编码与动态注意力机制的协同设计,突破了传统卷积网络因静态感受野受限导致的边界定位误差累积问题。PENet 通过可微分金字塔分解、残差边缘增强与动态通道滤波三阶段策略,在抑制高频伪影干扰

(如 Gibbs 伪影)的同时增强肿瘤区域的低频解剖特征,其与 CoT 模块的协同效应使模型在高噪声场景下的误检率降低,消融实验显示两者贡献互补。相比现有模型(如 YOLOv11 等),TF-YOLO 在 Br35H 数据集上的 mAP50 提升 2.4%,证明其在多尺度形态异质性与边缘检测中的优势,与前期研究目标一致。

然而,PENet 的多尺度分解策略增加了计算复杂度,导致实时性略微受限,未来可通过神经架构搜索^[18]或知识蒸馏^[19]优化推理效率。此外,当前数据集集中于常见肿瘤类型,罕见病例的检测性能仍需通过多中心数据验证进一步提升。研究结果为复杂医学场景下的弱显著性目标检测提供了可扩展的解决方案,其动态上下文建模与特征增强机制对类似医学影像分析任务具有借鉴意义。

参考文献:

- [1] JYOTHI P, SINGH A R. Deep learning models and traditional automated techniques for brain tumor segmentation in MRI: A review[J]. Artificial Intelligence Review, 2023, 56(4): 2923–2969.
- [2] LI Z, LIU F, YANG W, et al. A survey of convolutional neural networks: Analysis, applications, and prospects[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2021, 33(12): 6999–7019.
- [3] ZHOU T, CANU S, VERA P, et al. A Dual Supervision Guided Attentional Network for Multimodal MR Brain Tumor Segmentation[C]//International Conference on Medical Imaging and Computer-Aided Diagnosis. Singapore: Springer Singapore, 2021: 3–11.

- [4] KANG M, TING C M, TING F F, et al. BGF-YOLO: Enhanced YOLOv8 With Multiscale Attentional Feature Fusion for Brain Tumor Detection[C]//International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024: 35 – 45.
- [5] DAI Y, GAO Y, LIU F. TransMed: Transformers advance multi-modal medical image classification[J]. Diagnostics, 2021, 11(8): 1384 – 1395.
- [6] YIN X, YU Z, FEI Z, et al. PE-YOLO: Pyramid Enhancement Network for Dark Object Detection[C]//International Conference on Artificial Neural Networks. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023: 163 – 174.
- [7] KANG M, TING F F, PHAN R C W, et al. PK-YOLO: Pre-trained Knowledge Guided YOLO for Brain Tumor Detection in Multiplanar MRI Slices [C]//2025 IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV). IEEE, 2025: 3732 – 3741.
- [8] WANG K. An Overview of Deep Learning Based Small Sample Medical Imaging Classification[C]//2021 International Conference on Signal Processing and Machine Learning (CONF-SPML). IEEE, 2021: 278 – 281.
- [9] ZHONG G, DING W, CHEN L, et al. Multi-scale attention generative adversarial network for medical image enhancement[J]. IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence, 2023, 7(4): 1113 – 1125.
- [10] KUMAR R R, PRIYADARSHI R. Denoising and segmentation in medical image analysis: A comprehensive review on machine learning and deep learning approaches[J]. Multimedia Tools and Applications, 2025, 84(12): 10817 – 10875.
- [11] WAHIDIN M F, KOSALA G. Brain Tumor Detection Using YOLO Models in MRI Images [C]//2025 International Conference on Advancement in Data Science, E-Learning and Information Systems (ICADEIS). IEEE, 2025: 1 – 6.
- [12] KOYUNCU A B, GAO H, BOEV A, et al. Contextformer: A Transformer With Spatio-Channel Attention for Context Modeling in Learned Image Compression[C]//European Conference on Computer Vision. Cham: Springer Nature Switzerland, 2022: 447 – 463.
- [13] LI Y, YAO T, PAN Y, et al. Contextual transformer networks for visual recognition[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2022, 45(2): 1489 – 1500.
- [14] KUMAR A, SHARMA A, SINGH A K, et al. Data augmentation for medical image classification based on Gaussian Laplacian pyramid blending with a similarity measure[J]. IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, 2023, 27(4): 1890 – 1902.
- [15] MEI Y, FAN Y, ZHANG Y, et al. Pyramid attention network for image restoration [J]. International Journal of Computer Vision, 2023, 131(12): 3207 – 3225.
- [16] WANG C Y, YEH I H, LIAO H Y. YOLOv9: Learning What You Want to Learn Using Programmable Gradient Information[C]//European Conference on Computer Vision. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024: 1 – 21.
- [17] TASIN M A U, FAIYAZ G M F, UDDIN M N. Deep Learning for Brain Tumor Detection Leveraging YOLOv10 for Precise Localization [C]//2024 IEEE 3rd International Conference on Robotics, Automation, Artificial-Intelligence and Internet-of-Things (RAAICON). IEEE, 2024: 207 – 212.
- [18] REN P, XIAO Y, CHANG X, et al. A comprehensive survey of neural architecture search: Challenges and solutions [J]. ACM Computing Surveys (CSUR), 2021, 54(4): 1 – 34.
- [19] GOU J, YU B, MAYBANK S J, et al. Knowledge distillation: A survey[J]. International Journal of Computer Vision, 2021, 129(6): 1789 – 1819.

责任编辑:李云

水平定向钻穿越弯曲段多因素影响机制与关联度分析

魏捷^{1*}, 舒灏¹, 朱珺², 李子涵³

(1. 合肥城市学院 土木工程学院, 安徽 合肥 230301; 2. 安徽建工技师学院 建筑工程系, 安徽 合肥 230601;
3. 安徽宏泰交通工程设计研究院有限公司, 安徽 合肥 230601)

摘要:依托实际工程,通过数值仿真和灰色理论分析,系统探究水平定向钻弯曲段管道回拖力的多因素耦合作用规律。数值仿真模拟结果显示:管道半径越大,所需回拖力越大;而增大弯曲段曲率半径,则能同时降低回拖力与管壁应力;此外,提高孔径-管径比也可有效减小回拖阻力及管道应力。通过灰色理论对各影响因素进行量化分析,得出最大回拖力影响因素的敏感性排序:管径(0.012 13) > 曲率半径(0.011 05) > 孔管比(0.011 01)。该研究通过多参数耦合作用解析,为工程实践中优化回拖工艺、防控管道应力集中提供了理论依据。

关键词:水平定向钻;灰色理论;有限元;回拖力;管道应力

中图分类号:TU990.3

文献标识码:A

文章编号:2095-297X(2025)05-0055-10

Multi-factor Influencing Mechanism and Correlation Analysis of Horizontal Directional Drilling Through Curved Sections

WEI Jie^{1*}, SHU Hao¹, ZHU Jun², LI Zihan³

(1. School of Civil Engineering, Hefei City College, Hefei, 230301, Anhui;
2. Department of Architecture and Civil Engineering, Anhui Construction Engineering Technician College, Hefei, 230601, Anhui;
3. Anhui Hongtai Transportation Engineering Design and Research Institute Ltd, Hefei, 230601, Anhui)

Abstract: Based on practical engineering projects, it systematically investigated the multi-factor coupling effects on the pullback force of pipelines in curved segments during horizontal directional drilling (HDD) in the paper through numerical simulation and grey theory analysis. Numerical simulation results demonstrated that: a larger pullback radius was correlated with an increased pullback force requirement; increasing the curvature radius of the curved segment simultaneously reduced both the pullback force and the pipe wall stress; furthermore, an increased borehole-to-pipe diameter ratio (BDR) was also found to effectively decrease the pullback resistance and pipeline stress. Through quantitative analysis of various influencing factors using grey theory, the sensitivity ranking of factors affecting the maximum pullback force was identified as: pipe diameter (0.012 13) > curvature radius (0.011 05) > borehole-to-pipe diameter ratio (0.011 01). Through multi-parameter coupling analysis, a theoretical basis was provided for optimizing the pullback process and preventing pipeline stress concentration in engineering practice.

Key words: horizontal directional drilling; grey theory; finite element; pull back force; piping stress

水平定向钻(HDD)技术因其成本低、扰动小、工期快及环境适应性强等优势,在各类地质条件如近海、冻土的管道穿越工程中应用广泛。国际上,自

Martin等^[1]1971年开创性应用以来,相关理论研究体系逐步建立,包括ASTM^[2]首次提出的回拖力计算方法、Polak团队^[3]的高密度聚乙烯管材回拖力模

收稿日期:2025-04-27 * 通讯联系人

基金项目:2024年安徽省高等学校科学研究项目(2024AH05149);安徽省质量工程项目(2023zygzt5150,2024zybj068)。

作者简介:魏捷(1984-),男,安徽合肥人,高级工程师,硕士。E-mail:471464223@qq.com

型,以及 Cheng 等^[4]揭示管径参数与回拖力非线性关系的数值模拟研究。国内研究则侧重于具体参数优化与机制解析:王荣馨等^[5]研究了弯曲段 S 曲线轨迹与曲率控制;蔡学亮等^[6]研究了管道穿越时泥浆的力学特性;陈洁等^[7]优化了过江工程中的入洞角度与曲率半径;王显^[8]量化了土体角度及埋深的影响;汪爽等^[9]通过正交试验验证了悬吊高程、入土矢量角对牵引阻力的耦合作用;常琼等^[10]基于有限元模型解析了曲率梯度、台阶高度对接触应力的影响;董顺等^[11-14]构建了泥浆-钻杆-地层耦合模型,阐明了工艺参数对能量耗散的调控机制。

然而,工程实践表明,管道回拖力是受多因素综合影响的复杂问题。当前研究多聚焦于单因素分析或特定参数优化,对多因素间耦合作用的显著性及其动态演变规律的系统性研究明显欠缺。这一研究的缺少限制了工程风险预控能力的提升。基于此,本研究依托北京西六环天然气管道工程,提出结合灰色关联度分析与偏最小二乘回归的混合模型,通过数值仿真与灰色理论,系统探究 HDD 弯曲段多因素对回拖力的耦合作用规律,并基于敏感性分析揭示主控因子的动态演变特征。该研究旨在构建多变量协同分析的有效工具,为 HDD 工程的风险精准预控提供量化依据,弥补现有理论在复杂耦合效应解析方面的不足。

1 弯曲段管道回拖概述

水平定向钻穿越工程的路径规划如图 1 所示,其轨迹构成可划分为斜直线段、曲线段及水平直线段三个特征区域。在管道行进过程中,受到多元力学因素的叠加影响,其中曲线穿越段的力学响应呈现高度复杂性。在回拖作业中,管道通过弯曲段时会产生几何适应性变形。这种形变源于管壁间的挤压作用,从而引发显著的弯曲效应,同时行进方向的变化会同时诱发绞盘效应。这种复合力学作用导致弯曲段作业时的牵引负荷显著增大。特别需要注意的是,当轨迹曲率半径设计不足时,管壁与钻孔界面将承受异常应力集中,可能引发管体结构失效或牵引力超出设备承载极限,最终导致工程事故并伴随重大经济损失^[15-16]。

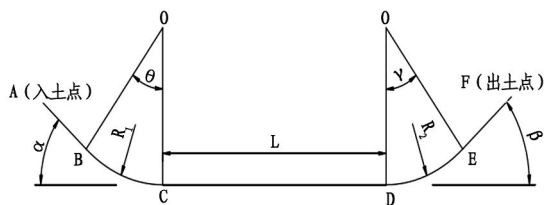


图 1 水平定向钻管道回拖路径示意图

2 水平定向钻弯曲段仿真研究

2.1 弯曲段管道模型简化与假设条件

针对管道回拖过程中弯曲段的力学特性分析,其受力机制呈现多因素耦合作用特征。在弯曲区域,管道不仅承受钻孔壁的摩擦阻抗和泥浆介质的浮托效应,还需考虑因几何形变引发的弯曲应力及方向改变引发的牵引效应。值得注意的是,回拖力的动态响应与工程地质参数、管径-孔径比例系数、轨迹曲率特征及管道敷设工艺等变量具有显著相关性,这种多参数交互作用导致通过有限元方法构建完全符合实际工况的力学模型存在理论挑战。

本研究以管道回拖弯曲段为分析对象,构建数值模型研究其力学响应。为提高计算稳定性与效率,采用以下简化策略:

(1) 孔道几何简化。采用刚体假设建立圆柱形孔道模型,忽略施工中土体压缩导致的截面异化现象。针对大型水平定向钻工程中上土荷载诱发的梨形截面效应,虽其将改变回拖力分布模式,但为避免非对称建模引发的数值不稳定性,采用摩擦系数等效法进行参数修正。

(2) 浆液阻力等效。实测数据显示管壁泥浆剪切应力对总阻力贡献不足 5%。基于计算经济性考虑,将流体剪切效应转换为等效摩擦阻力,规避多物理场耦合带来的建模复杂性。

(3) 接触边界优化。依据静力学平衡原理,假定管道重力、配重荷载与浮力维持稳态平衡。由此建立管壁全接触初始条件,消除接触状态迭代计算需求,保障弹性力学框架下的模型收敛性。

2.2 弯曲段管道相关计算参数

本研究以北京西六环天然气输送系统工程为实证对象,工程高程为 140-370 m,相对高程 15-250 m,山坡坡脚 20°-45°。穿越出、入土点高差为 13 m;穿越深度 18 m,穿越入土角度为 5°-9°。穿越水平直线段 1911.2 m;穿越平面曲线,起偏角 15°,回收角 7°,最大偏距 56 m,穿越工程总曲线长度 1920.47 m,平直段长度 1500.47 m。管道外径 $D = 1.016$ m,内径 $d = 0.981$ m,管道密度 $P_1 = 7850$ kg·m⁻³,泥浆密度 $P_2 = 1204$ kg·m⁻³,回拖管道和岩土孔道之间的摩擦系数 $\mu = 0.3$,施工管道具体回拖路线如图 2 所示。

施工过程中所用管道关键特征参数如表 1、表 2 所示。



图 2 管道回拖现场施工示意图

表 1 管道弹性阶段材料的本构关系

密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	弹性模量	泊松比
7800	2.1E11	0.3

表 2 管道塑性阶段的应力-应变关系

真实应力/MPa	418	500	605	695	780	829	882	908	921	932	955	1080
塑性应变	0	0.01	0.02	0.056	0.095	0.15	0.25	0.35	0.45	0.55	0.65	0.75

2.3 弯曲段管道模型的建立

在实施大直径管道牵引作业的力学分析中,通常采用流体介质减阻工艺来平衡管道在钻孔过程中产生的浮力效应。基于此技术特征,在构建理论模型时可设定管道系统的重力载荷与浮力载荷处于动态平衡状态。针对管道穿越出土弯曲段的受力特性研究,本研究建立如下基本假设体系:

(1) 钻孔内部流体压力场呈现稳态分布特征;

(2) 弯曲段力学分析中管道与钻孔上壁面保持持续接触状态;

(3) 钻孔围岩结构满足几何稳定性要求。

本研究通过有限元分析软件 Abaqus 构建了管道回拖过程的数值仿真模型,重点考察弯曲段的力学响应特性。所建立的数值模型完整表征了管道-流体-围岩多物理场耦合作用关系,管道回拖模型如图 3 所示。

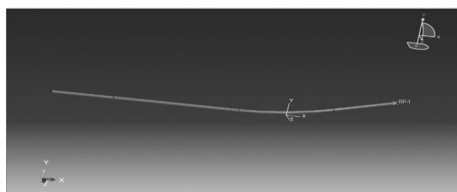


图 3 数值仿真模型示意

2.4 边界条件与网格划分

本次数值模拟过程中,针对岩土体介质部分,采用刚体假设并施加固定边界条件,通过抑制其位移自由度来确保土体在计算域内的几何稳定性;对于地下管道构件,则设置位移驱动边界条件以模拟其

渐进式穿越土体的运动过程,添加边界约束后的模型如图 4 所示。

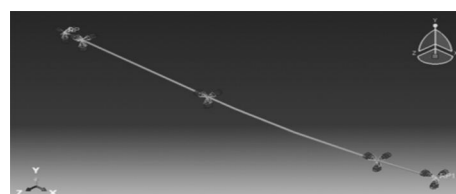


图 4 数值仿真模型边界约束示意图

在对模型进行网格划分时,土体和管道均采用 C3D8R 单元,但土体尺寸控制全局设置为 2,管道尺寸控制全局设置为 1;弯曲段回拖模型网格划分局部示意图如图 5 所示。

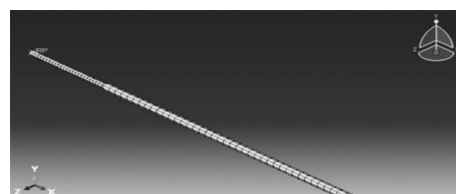


图 5 数值仿真模型网格局部放大图

3 水平定向钻弯曲度管道仿真结果分析

3.1 管道半径与管道应力和回拖力增量的变化关系

在控制变量法的理论框架下建立有限元数值分析模型,将管道半径设定为独立变量进行参数化研究。通过数值模拟方法获取不同管径条件下的应力场分布特征。管道半径 $R = 0.45 \text{ m}$ 管道回拖应力云图如图 6 所示。

S, Mises
SNEG, (fraction = -1.0)

+4.285e+08
+3.928e+08
+3.571e+08
+3.214e+08
+2.857e+08
+2.500e+08
+2.142e+08
+1.785e+08
+1.428e+08
+1.071e+08
+7.142e+07
+3.571e+07
+0.000e+00

S, Mises
SNEG, (fraction = -1.0)

+4.285e+08
+3.928e+08
+3.571e+08
+3.214e+08
+2.857e+08
+2.500e+08
+2.142e+08
+1.785e+08
+1.428e+08
+1.071e+08
+7.142e+07
+3.571e+07
+0.000e+00

图 6 管道半径 $R = 0.45 \text{ m}$ 管道回拖应力云图

通过对应力分布云图的分析可知,在保持孔管比与弯曲曲率半径恒定的条件下,随着管径尺寸的增大,管体通过弯曲段时承受的最大等效应力呈现显著增长趋势。为深入探究管径参数对回拖力学特性的影响机制,本研究采用单变量控制策略开展有限元数值仿真实验。通过固定曲率半径与孔管比参数,系统性地改变管径参数进行多工况模拟计算,最终获得管径与最大回拖载荷、峰值应力的量化关系模型,如图 7 所示。

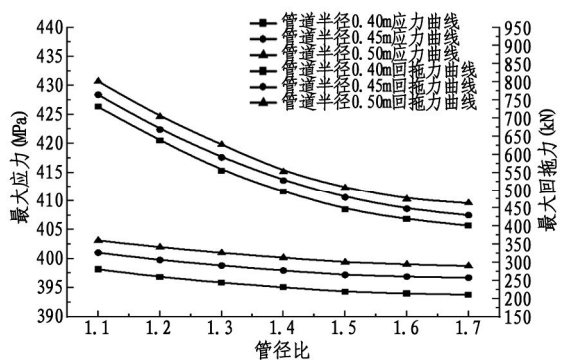


图 7 管道半径与最大应力及回拖力关系曲线图

通过对图 7 中管径与力学响应参数的关联曲线分析可知,在固定曲率半径和孔径管径比的工况条件下,管径尺寸的增大会显著影响管道的力学特性。研究数据显示,管径每增加一个量级,管道表面最大

应力和回拖阻力呈现近似线性增长趋势。这种现象的力学机理可解释为:随着管径尺寸的扩大,管道外壁与钻孔内壁的接触面积呈正相关增长,接触面积的增加直接导致滑动摩擦力的提升。由此可见,在定向钻穿越工程设计中,采用基于风险管控的管径优化方法,通过构建多目标决策模型来平衡施工可行性与经济性指标,可有效将管土接触面的摩擦系数控制在安全阈值范围内,从而显著降低管材塑性变形和孔壁失稳等工程风险的发生概率。

3.2 轨迹弯曲曲率对管道应力和回拖力增量的影响

在管道穿越施工过程中,管体结构的应力分布特征可通过图 8 的力学云图进行观测。数据分析表明,在管体进入弯曲段的初始阶段,其应力场呈现显著的梯度变化特征。值得注意的是,应力极值集中显现在管壁与钻孔曲率界面接触区域,该现象可归因于两个力学机制的耦合作用:一是几何曲率引发的管体弯曲变形效应,二是运动学参数突变诱发的绞盘效应。这种复合力学环境使得钻孔轨迹的弯曲过渡区成为最易引发工程失效的敏感区域。基于此,实施轨迹参数优化对于保障施工安全性和工程可靠性具有关键性技术价值。

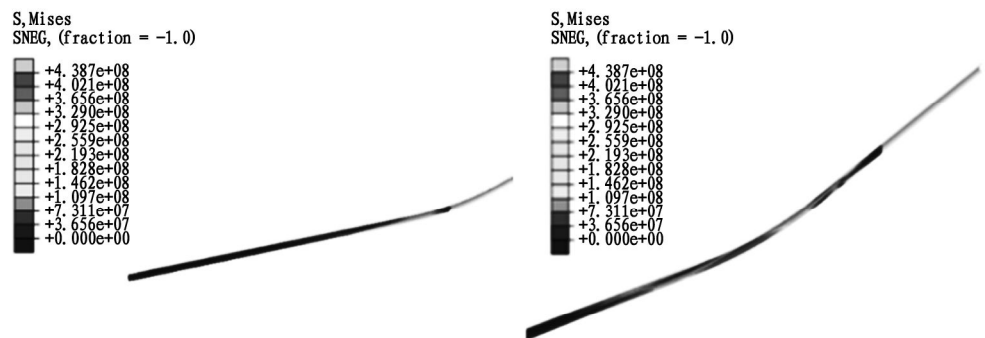


图 8 水平段与弯曲段交接处管道应力云图(左)、弯曲段管道应力云图(右)

为系统探究钻孔轨迹曲率半径对管线牵引力学特性及应力分布的影响规律,本研究基于控制变量原理构建有限元数值模型。在保持管径参数与孔径比恒定的前提下,通过建立不同曲率半径的钻孔轨

迹模型进行对比仿真计算。表 3 详细列出了各工况下获得的管道牵引力峰值及关键部位应力极值数据,这些量化结果为后续工程参数优化提供了重要依据。

表 3 曲率半径与管道应力与回拖力

曲率半径/m	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
最大应力/MPa	478.3	446.4	445.6	435.2	431.9	429.9	428.1	426.3	424.9	424.0	423.5
回拖力/kN	712.5	611.6	531.1	433.9	391.9	350.9	317.9	295.9	270.2	264.7	263.7

由表 3 可以看出,随着曲率半径增加,最大回拖力与管道应力都呈现降低的趋势。为进一步分析曲

率半径与二者之间的变化趋势,仿真结果绘制成关系曲线,如图 9 所示。

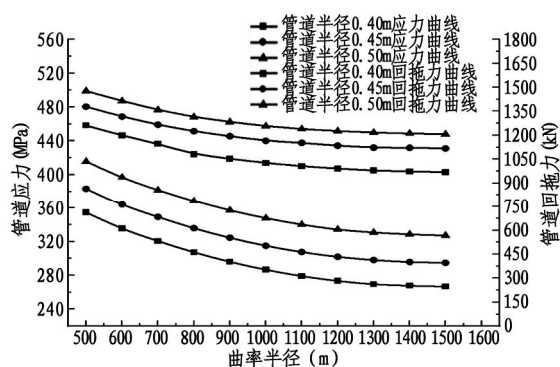


图9 不同管道半径下曲率半径与最大应力及最大回拖力关系曲线图

图9参量关联趋势表明:水平定向钻弯曲段曲率半径增大时,管道穿越弯曲区的峰值应力和回拖力同步降低。其原理在于曲率半径增加使管道曲率变化率下降,导致管道弹性形变减缓从而降低应力峰值;同时管土接触界面的几何约束效应因管孔贴合度下降而减弱,显著削弱了摩擦阻力复合效应。该双参量协同衰减揭示了曲率半径在定向钻力学系统中的核心调控机制。

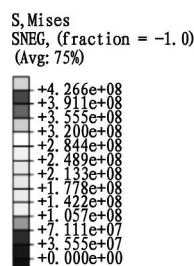
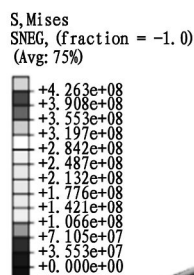


图10 不同孔管比管道应力云图

本研究通过数值模拟方法探究孔管比对管道牵引力学性能的影响规律。在确保管道几何尺寸恒定的前提下(截面半径 $R = 0.4$ m, 曲率半径保持定值),基于单一变量原则构建了多组对比模型,系统分析了不同孔管比参数下管道的牵引力学响应特性。图11展示了在 $R = 0.4$ m 基准条件下,通过数值计算获得的孔管比参数与管道结构最大等效应力之间的量化关系曲线,该曲线呈现了二者之间具有显著的非线性相关特征,为工程实践中管道牵引参数的优化选择提供了理论依据。

根据数据曲线分析可知,在差异化曲率半径条件下,孔管比参数与管道应力峰值之间呈现相似的变化规律。

通过对曲率半径与管道回拖力、管道应力数据进一步分析可知,随曲率半径增大,最大应力和回拖力呈非线性递减:当半径小于 1000 m 时降幅显著,超过临界值后递减速率趋缓,至 1300 m 以上参数变化趋于稳定。从工程经济性角度考虑,优化施工参数需平衡技术与成本控制。曲率半径达 1400 m 时应力仅降低 0.5%,但成本增加 18%,效费比显著下降。目标优化建议将阈值控制在 1300 - 1400 m 区间,该范围既可满足结构力学规范要求,又能实现施工成本最优配置,展现显著技术经济优势。

3.3 孔管比对管道应力和回拖力增量的影响

孔管比定义为扩孔后孔道直径与原始管体外径之比。管径恒定时,孔管比增大会扩大环形间隙,导致管壁-地层接触面积减少导致界面摩擦阻力降低;管体回拖过程中的曲率载荷与周向应力显著降低。实验数据表明,当孔管比超过临界阈值时,管道牵引力呈现非线性衰减规律。但需注意,钻孔半径的增大会加剧地层扰动风险并提高施工成本,故需综合施工稳定性与成本效益确定合理阈值。不同孔管比管道应力云图如图10所示。

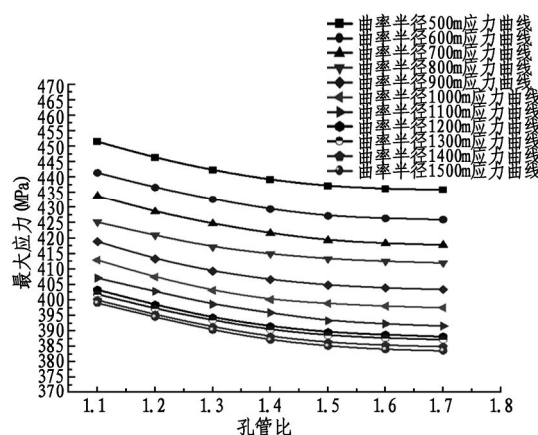


图11 $R = 0.4$ m 时孔管比与最大应力关系曲线图

具体而言,当孔管比参数从 1.1 逐步提升至 1.5 时,管道穿越作业中承受的应力水平呈现显著

下降态势,其降幅达到约 23%。值得注意的是,在孔管比增至 1.5–1.6 区间时,应力衰减速率明显趋缓,降幅收窄至不足 5%。而当孔管比继续提升至 1.6–1.7 区间时,应力数值曲线呈现水平延伸特征,最大应力值无明显波动,维持在相对稳定状态。该现象表明当孔管比超过 1.6 阈值后,应力参数对孔管比变化的敏感性显著降低。

孔管比与最大回拖力关联曲线的分析结果表明,孔管比的逐步提升会显著减弱管道的回拖阻力(见图 12)。通过分析回拖力的变化规律可以发现,当孔管比处于 1.1 至 1.5 区间时,该参数的增加将导致最大回拖力呈现持续递减趋势。然而当孔管比达到 1.6 临界值后,继续增大孔管比对回拖力的影响显著减弱,其数值变化进入相对稳定的波动区间。这一现象说明孔管比对回拖力的调控效应存在明显的阈值效应,在工程实践中需特别注意该关键参数的合理设定范围。

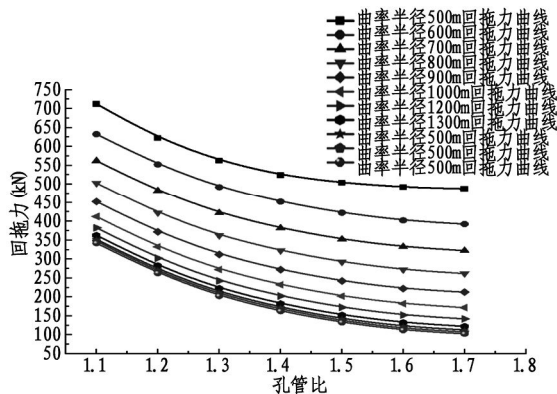


图 12 $R=0.4$ m 时孔管比与最大回拖力关系曲线

经研究分析可知,孔管比参数与工程力学特性之间存在显著相关性。随着孔管比数值的上升,管道所受最大回拖力与结构应力均呈现递减规律。值得注意的是,当钻孔断面尺寸扩大时,孔道的结构稳定性会相应减弱,具体表现为管线下部出现沉降现象,同时工程经济成本亦随之上升。通过多因素耦合分析发现,在实施直径约 0.8 m 的管线水平定向钻进工程时,建议将孔管比参数控制在 1.5–1.6 区间,此取值范围既能有效保障孔道成形质量,又能实现工程可靠性与经济性的优化平衡。

当采用管道半径为 0.45 m 进行数值模拟时,孔管比与最大应力关系曲线如图 13 所示。

通过对图 13 的应力分布特性分析可知,在管道半径为 0.45 m 的工况条件下,孔管比参数与管道回拖作业中的峰值应力存在显著关联性。随着孔管比参数从初始值逐步提升,管体结构承受的应力极值呈现非线性递减规律。具体而言,当孔管比处于

1.1–1.5 区间时,其数值每增加 0.1 单位,管道最大应力水平约下降 8.7%–12.3%,表现出明显的负相关特性。然而当孔管比突破 1.5 临界值后,继续增大该参数对管道应力状态的改善效果趋于饱和,此时应力值波动范围稳定在 ± 2.1 MPa 以内。基于此应力响应规律,从工程力学优化角度建议将孔管比调控在 1.5–1.6 区间,此范围内既可实现应力水平最小化,又能有效控制钻孔施工成本,具有最佳的技术经济综合效益。

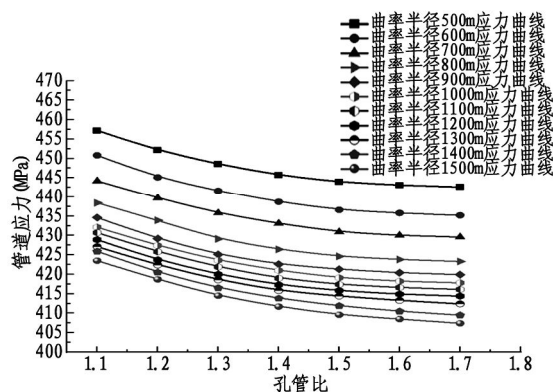


图 13 $R=0.45$ m 时孔管比与最大管道应力关系曲线图

基于最大回拖力影响机制分析,图 14 展示了孔管比参数与系统最大回拖力之间的动态关联特性。

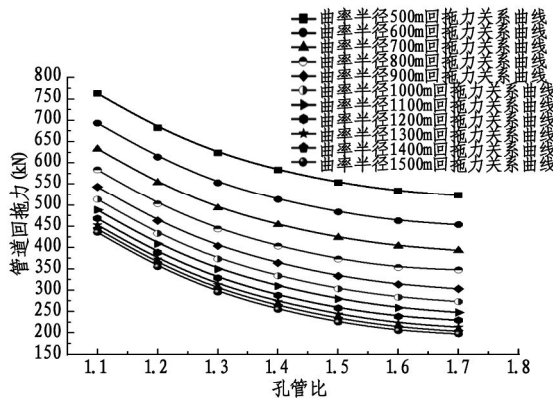


图 14 $R=0.45$ m 时孔管比与最大回拖力关系曲线图

通过对孔管比与最大回拖力参数关联趋势图的分析可知,随着孔管比值的持续上升,管道系统所受最大回拖力呈现显著递减趋势。当该比值突破 1.6 临界值后,回拖力的衰减速率明显趋于平缓,此时孔管比对管道牵引力学特性的主导作用逐渐弱化。结合有限元模型对管道应力场的数值模拟结果,并综合考虑工程钻孔的稳定性要求,在实施管径约 0.9 m 的非开挖施工时,建议将孔管比的工程控制参数优化至 1.5–1.6 区间。该取值区间既能有效控制管道安装过程中的应力峰值,又能确保回拖系统处于较优的力学状态,同时满足施工过程中孔壁稳定性的技术要求。

当采用管道半径为 0.50 m 进行数值模拟时,孔管比与最大应力关系曲线如图 15 所示。

基于图 15 所示孔管比与应力响应特征曲线的试验数据分析,可得出以下结论:对于截面直径为 1 m 的待回拖管道,其回拖作业中的峰值应力水平与孔管比参数呈显著负相关关系。具体而言,随着孔管比数值的持续增大,管体所受最大应力值呈现单调递减趋势。进一步分析表明,当孔管比突破 1.5 阈值后,应力参数的衰减速率显著放缓并逐渐趋于稳定状态。据此建议,在工程实践中针对直径约 1 m 的管道回拖施工,为实现应力场的最优分布,宜将孔管比设计参数严格控制在 1.5 - 1.6 区间范围内。这种参数配置不仅能有效规避应力集中现象,同时可确保施工过程满足结构力学性能要求。

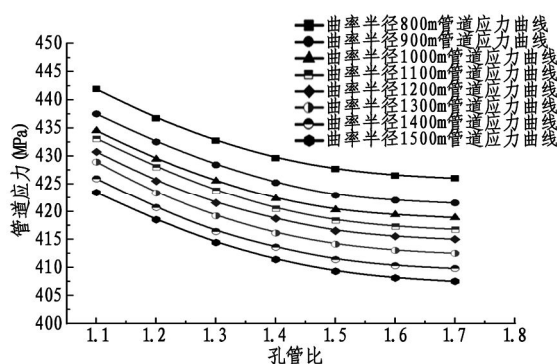


图 15 $R=0.50$ m 时孔管比与最大应力关系曲线图

由图 16 曲率半径与孔管比对管道回拖力的耦合作用关系曲线可得:在实施管径约 1 m 的非开挖施工过程中,孔管比参数与管道最大回拖力之间存在显著的非线性关联。试验数据表明,随着孔管比值的逐步增大,管道系统所受回拖阻力呈现显著递减规律。值得注意的是,当孔管比突破 1.5 的临界阈值后,该力学参数的敏感性出现明显弱化现象,具体表现为回拖力的降幅梯度由初始阶段的急剧下降转为渐进式衰减。

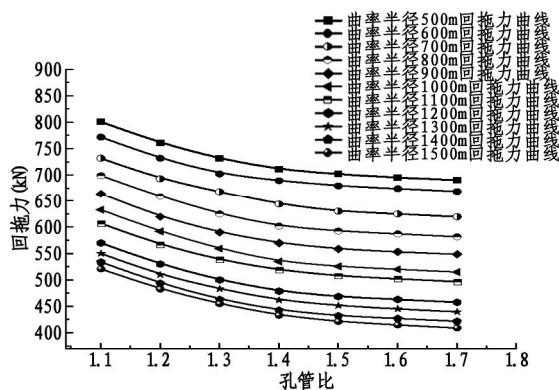


图 16 $R=0.50$ m 时孔管比与最大回拖力关系曲线图

在大口径水平定向钻铺管工程实施过程中,随着孔管比参数值的提升,管体所受回拖力峰值与应力极值均呈现递减现象。然而,钻孔直径的增大将引发成孔稳定性逐步劣化,具体表现为孔道基底出现渐进式沉降变形,致使钻孔截面产生梨形态畸变。这种几何变形将显著增强管土界面间的卷缆效应,进而加剧施工机械载荷。通过多因素耦合分析表明,当孔管比参数维持在 1.5 - 1.6 区间时,既能有效保障成孔结构的形态稳定性,又可实现施工设备荷载与经济成本的最优平衡。因此,该数值区间被确认为大口径水平定向钻工程的关键设计阈值。

4 水平定向钻弯曲段影响因素关联度分析

综合研究表明,管道回拖力作为工程控制参数,其数值演变受制于弯曲半径、孔管比及管径等多重变量的协同作用。各影响因子与目标参数间的量化关系仍存在显著的非线性特征。基于灰色系统理论中的关联度模型,本研究通过构建关联序矩阵,实现了对关键变量与回拖力动态响应关系的定量解析。

灰色理论是由邓聚龙教授在 20 世纪 80 年代率先提出,获得了广大学者的关注。灰色系统理论在历经持续发展与优化后,其应用范围逐步拓展至土木工程学科领域,尤其在地下工程开挖、道路工程关键因素识别等场景中展现出显著实践价值。该理论体系中的关联度分析模块,其核心原理在于通过对比动态数列与基准序列的几何形态吻合度,进而量化评估各比较序列与参考序列之间的相关性强度。具体而言,当比较序列与参考序列的曲线拟合度较高时,表明二者具有强关联性;反之则反映其关联程度较弱。在此分析框架下,关联度系数作为核心量化工具,通过数学建模精确表征序列间相互作用关系的密切程度^[17-24]。

灰色关联度分析数列处理公式首先行为序列公式如下:

$$X_i(k) = (X_1(k), X_2(k), X_3(k), \dots, X_i(n)) \quad (1)$$

对行为序列进行初值项公式如下:

$$X_i D_1 = (x_1(1)d_1, x_2(2)d_1, \dots, x_i(n)d_1) \quad (2)$$

其中

$$x_i(1)d_1 = \frac{x_i(k)}{x_i(1)}, x_i(1) \neq 0, k=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

行为数列的均值像公式如下:

$$X_i D_2 = (x_i(1)d_2, x_i(2)d_2, \dots, x_i(n)d_2) \quad (4)$$

其中

$$x_i d_2 = \frac{x_i(k)}{\bar{x}}, \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_i(k), k=1, 2, \dots, n \quad (5)$$

最大差值与最小差值求解,公式如下:

$$M = \max \Delta_i(k), m = \min \Delta_i(k) \quad (6)$$

其中

$$\Delta_i(k) = |X_0(K) - X_i(K)|, i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

关联系数计算公式如下:

$$\gamma_{0i}(k) = \frac{m + \xi M}{\Delta_i + \xi M} \quad (8)$$

其中 $\xi = 0.5; k = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, \dots, m$ 。

通过有限元软件分别模拟不同影响因素下管道回拖情况 36 组不同回拖力数据。

4.1 各数列初值化处理

将上述表中数据进行区分,分为对比数列与参考数列。对比数列是影响事件系统的主要因素,参考数列反映系统行为特征。将最大回拖力作为参考数列,其余三个影响因素作为对比数列,并对上述表格数据根据下列公式进行初值化处理。

$$\omega_i = (\omega_1(k), \omega_2(k), \dots, \omega_i(k)) \quad (9)$$

式中, $k = 1, 2, \dots, 36; i = 0, 1, 2, 3$ 。

根据公式(9)进行初值化数据处理(见表4)。

表4 数据初值化处理

序号	ω_0	ω_1	ω_2	ω_3
1	282.1	0.4	1.4	1100
2	260.8	0.4	1.4	1200
3	255.9	0.4	1.4	1300
4	247.8	0.4	1.4	1400
5	203.6	0.4	1.5	1100
6	177.7	0.4	1.5	1200
7	167.3	0.4	1.5	1300
8	157.1	0.4	1.5	1400
9	194.6	0.4	1.6	1100
10	168.7	0.4	1.6	1200
11	163.1	0.4	1.6	1300
12	151.6	0.4	1.6	1400
13	466.9	0.45	1.4	1100
14	439.1	0.45	1.4	1200
15	413.7	0.45	1.4	1300
16	411.8	0.45	1.4	1400
17	429.6	0.45	1.5	1100
18	411.4	0.45	1.5	1200
19	387.9	0.45	1.5	1300
20	380.7	0.45	1.5	1400

21	415.8	0.45	1.6	1100
22	400.6	0.45	1.6	1200
23	379.1	0.45	1.6	1300
24	367.5	0.45	1.6	1400
25	519.1	0.5	1.4	1100
26	476.1	0.5	1.4	1200
27	452.1	0.5	1.4	1300
28	435.2	0.5	1.4	1400
29	477.9	0.5	1.5	1100
30	439.9	0.5	1.5	1200
31	417.9	0.5	1.5	1300
32	398.7	0.5	1.5	1400
33	462.4	0.5	1.6	1100
34	417.4	0.5	1.6	1200
35	405.4	0.5	1.6	1300
36	387.4	0.5	1.6	1400

4.2 变量均值化处理

由于比较数列中存在数量纲的影响,因此对比较数列进行无量纲处理以消除对分析结果的影响。无量纲处理公式如下:

$$x_i = \frac{\omega_i}{\sum_{k=1}^{36} \omega_i} \quad (10)$$

式中, $k = 1, 2, \dots, 36; i = 0, 1, 2, 3$ 。

根据公式(10)对表4各列进行均值化处理。

4.3 计算各对比数列与参考数列差值

求解均值化处理后的比较数列与参考数列的绝对差,并得出数列中最大差与最小差,根据公式(11)进行绝对差计算。

$$\Delta_{0i} = |x_0(k) - x_i(k)| \quad (11)$$

式中, $k = 1, 2, \dots, 36; i = 0, 1, 2, 3$ 。

4.4 求各对比数列与参考数列极差

根据公式(11)求出的绝对差,求出最大绝对差与最小绝对差,结果如公式(12)、(13)所示:

$$\Delta_{0i}(\max) = \max_i \max_k \Delta_{0i}(k) = 0.688 \quad (12)$$

$$\Delta_{0i}(\min) = \min_i \min_k \Delta_{0i}(k) = 0.006 \quad (13)$$

4.5 计算关联度

根据上述计算所得数据求得关联系数,计算公式如下:

$$\varepsilon(x_0(k), x_i(k)) = \frac{\min_i \min_k \Delta_{0i}(k)}{\Delta_{0i}(k) + \xi \max_i \max_k \Delta_{0i}(k)} \quad (14)$$

式中 $\xi = 0.5$ 。

计算结果如表 5 所示:

表 5 关联度系数计算结果

序号	ε_{01}	ε_{02}	ε_{03}
1	0.015	0.013	0.015
2	0.013	0.012	0.011
3	0.013	0.012	0.010
4	0.012	0.011	0.008
5	0.010	0.008	0.010
6	0.009	0.008	0.008
7	0.008	0.007	0.007
8	0.008	0.007	0.006
9	0.009	0.007	0.009
10	0.008	0.007	0.008
11	0.008	0.007	0.007
12	0.008	0.006	0.006
13	0.009	0.009	0.008
14	0.011	0.010	0.010
15	0.012	0.011	0.013
16	0.012	0.011	0.016
17	0.011	0.011	0.009
18	0.012	0.012	0.011
19	0.014	0.014	0.015
20	0.015	0.015	0.017
21	0.012	0.014	0.010
22	0.013	0.015	0.012
23	0.015	0.018	0.016
24	0.016	0.018	0.015
25	0.009	0.007	0.007
26	0.011	0.008	0.009
27	0.012	0.009	0.011
28	0.013	0.010	0.014
29	0.011	0.009	0.008
30	0.013	0.011	0.010
31	0.015	0.012	0.013
32	0.017	0.013	0.018
33	0.012	0.011	0.008
34	0.015	0.014	0.011
35	0.016	0.015	0.014
36	0.018	0.017	0.018

4.6 关联度计算

关联度是反映对比数列与参考数列关系的密切程度,关联度越大,说明二者之间的密切程度越高,将计算得到的关联系数平均值作为对比数列与参考数列之间的关联度。计算公式如下:

$$\gamma(x_0, x_i) = \frac{1}{36} \sum_{k=1}^{36} \varepsilon(x_0(k), x_i(k)) \quad (15)$$

根据公式(15)计算出各对比数列关联度并进行排序如表 6 所示。

表 6 关联度计算结果

影响因素	关联度	关联排序
管道半径	0.01213	1
孔管比	0.01101	3
曲率半径	0.01105	2

由表 6 可知,引起管道回拖力变化的各影响因素显著性排序为管道半径>曲率半径>孔管比。

本研究通过关键影响因素的权重分析表明,在管道定向穿越工程的回拖作业中,建议优先选用较小半径的管材作为施工材料。工程实践表明,在轨迹规划阶段需将弯曲段的曲率半径控制在适当区间,该参数优化可有效减少因曲率半径不当引起的回拖阻力增量。此外,数值模拟结果显示,在扩孔工艺实施过程中,需维持孔管比在最优阈值区间内,该参数控制对于确保管道敷设质量具有显著的工程应用价值。

5 结论

数值模拟表明,管道回拖力学响应与弯曲段曲率半径显著相关:随着曲率半径增大时,管壁接触压力降低使最大回拖力与峰值应力同步下降;挠曲变形减小缓解应变集中,降低等效应力峰值。当曲率半径超过 1300 m 临界值后,力学参数降幅趋缓,系统趋于稳定。工程分析证实,曲率半径过大会导致施工成本激增及轨迹控制难度增加。综合数值模拟与工程验证,建议水平定向钻管道工程穿越弯曲段时采用 1300-1400 m 曲率半径,可在控制回拖力与保障应力安全间实现最优平衡。

研究表明,随着孔管比增大可优化管道系统力学特性,峰值应力和回拖阻力随比值增大而降低。但扩大孔径会引发岩土扰动,导致孔道轴线偏移(如下端沉降),影响成形质量。进一步分析表明,当孔管比超过 1.5 时,其对应力和阻力的影响减弱,孔壁稳定性转为控制因素。工程实践建议在长距离

大口径水平定向钻工程中将该参数控制在 1.5 – 1.6, 以实现应力与阻力优化并保障结构稳定。

基于灰色系统理论构建管道回拖弯曲段显著性分析模型, 通过将影响因素设为自变量序列、回拖力作为参照序列进行定量关联分析。结果表明: 管道半径($\gamma=0.01213$) > 曲率半径($\gamma=0.01105$) > 孔管比($\gamma=0.01101$) 对回拖力影响显著。据此提出分级优化策略: 施工中优先选用小管径, 轨迹设计时限定曲率半径阈值, 扩孔时控制孔管比技术指标, 系统性减小回拖阻力并提升施工效率。

参考文献:

- [1] HASTAK M, GOKHALE S, THAKKALLAPALLI V. Decision model for assessment of underground pipeline rehabilitation options[J]. Urban Water Journal, 2004, 1(1): 27 – 37.
- [2] ASTM F1962 – 11, Standard Guide for Use of Maxi – Horizontal Directional Drilling for Placement of Polyethylene Pipe or Conduit Under Obstacles, Including River Crossings (Withdrawn 2020)[S].
- [3] POLAK A M, CHU D. Pulling loads for polyethylene pipes in horizontal directional drilling: Theoretical modeling and parametric study[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2005, 11(2): 142 – 150.
- [4] CHENG E, POLAK A M. Theoretical model for calculating pulling loads for pipes in horizontal directional drilling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2007, 22(5): 633 – 643.
- [5] 王荣馨, 杨畅, 张吉祥, 等. 水平定向钻施工大口径 S 曲线钻进技术分析[J]. 地质装备, 2023, 24(2): 27 – 30, 34.
- [6] 蔡亮学, 何利民, 吕宇玲, 等. 水平定向钻管道穿越孔底泥浆的力学特性[J]. 油气储运, 2011, 30(1): 25 – 29.
- [7] 陈洁, 高月婷, 廖洋波. 天然气输气管道定向钻穿越长江施工技术[J]. 石化技术, 2023, 30(6): 83 – 85.
- [8] 王显. 龙泉河主槽穿越工程定向钻参数研究[J]. 水利水电快报, 2023, 44(8): 87 – 90.
- [9] 汪爽. 水平定向钻穿越管道回拖作业过程的力学分析及软件实现[D]. 成都: 西南石油大学, 2014.
- [10] 常琼. 水平定向钻管道回拖过程数值仿真研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2018.
- [11] DENG S, KANG C, BAYAT A, et al. Rheological properties of clay-based drilling fluids and evaluation of their hole-cleaning performances in horizontal directional grilling[J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2020, 11(3): 04020031. 1 – 04020031. 12. DOI: 10.1061/(ASCE)PS.1949 – 1204.0000475.
- [12] LIU X, AI Z, QI J, et al. Mechanics analysis of pipe lifting in horizontal directional drilling[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 31: 272 – 282.
- [13] DONG S, ZENG C, ARIARATNAM T S, et al. Experimental and performance analysis of reverse circulation reaming in horizontal directional drilling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020. DOI: 10.1016/j.tust.2019.103128.
- [14] 李志杰, 曾聪, 杨善, 等. 非开挖水平定向钻钻杆全尺寸疲劳试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(3): 741 – 748.
- [15] 李子涵. 大口径长距水平定向钻管道回拖影响因素显著性分析[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2022.
- [16] 石贤增, 李子涵, 康小方. 水平定向钻管道回拖影响因素的显著性分析[J]. 湖北理工学院学报, 2021, 37(6): 32 – 38.
- [17] LYU Y, LIU T, MA J, et al. Study on settlement prediction model of deep foundation pit in sand and pebble strata based on grey theory and BP neural network[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(23): 1 – 13.
- [18] ZHOU Qihong, WU Guangzong, WANG Zhenxi, et al. Analysis and prediction of the width of spreading carbon fiber tow based on gray system theory[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2020, 138(12). DOI: 10.1002/app.50069.
- [19] LUO X, YAN X, CHEN Y, et al. The prediction of shale gas well production rate based on grey system theory dynamic model GM(1, N)[J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2020, 10(8): 1 – 7.
- [20] ZHENG Q, Qiwen Z, Haiyun W, et al. Prediction of convergence deformation and stability analysis of deep buried tunnel based on grey theory[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 525(1): 012031.
- [21] YE J, DANG Y, YANG Y. Forecasting the multifactorial interval grey number sequences using grey relational model and GM(1, N) model based on effective information transformation[J]. Soft Computing: A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications, 2020, 24(8): 5255 – 5269.
- [22] 黄媚, 何晓峰, 曾炎, 等. 基于灰色理论的电网负荷特性影响因素定量分析[J]. 南方电网技术, 2014, 8(3): 72 – 77.
- [23] 苏煌蓉. M 公司公路货运运价定价模型研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2018.
- [24] 刘思峰. 灰色系统理论及其应用[M]. 8 版. 北京: 科学出版社, 2017. 责任编辑: 汤庆国

地下室深基坑土方分层开挖过程边坡动态变形规律数值模拟

王梦博

(亳州学院 审计处,安徽 亳州 236800)

摘要:针对地下室深基坑土方分层开挖过程边坡动态变形规律进行数值模拟,研究开挖过程对边坡稳定性变化的影响,采用有限元软件FLAC3D对地下室深基坑开挖过程中的边坡进行三维建模,创新性地采用3D单元对基坑内部支撑体系的力学材料性能进行模拟。通过选取四面体单元对三维模型进行网格划分,并对三维位移监测点位进行布置,记录整个开挖过程中基坑周边沉降变化及位移变化,通过计算边坡安全系数,分析边坡的动态变形规律。结果表明:随着开挖工作的进行,基坑两侧的周边地表沉降由四周向中间靠拢。其中以非偏压侧周边45 m内的沉降变化较为明显,对于偏压侧周边沉降变化范围,以35 m作为主要边界向外侧呈现递减趋势。模拟结果与实际值的误差始终低于0.15 mm。最终支护阶段,采用复合土钉墙支护结构后,安全系数达到1.60。开挖工作导致基坑周边区域呈现出不均匀的沉降分布状态,并以基坑边缘附近最为显著。同时支护结构的引入和加强显著提高了边坡稳定性,能够有效控制边坡变形。

关键词:地下室;深基坑;分层开挖;动态变形;数值模拟

中图分类号:TU444

文献标识码:A

文章编号:2095-297X(2025)05-0065-07

Numerical Simulation of Dynamic Deformation Law of Slope During Layered Excavation of Earthwork in Deep Foundation Pit of Basement

WANG Mengbo

(Audit office Bozhou University, Bozhou, 236800, Anhui)

Abstract: The dynamic deformation law of slope in the process of layered excavation of deep foundation pit in basement was numerically simulated, and the influence of excavation process on slope stability was studied. The finite element software FLAC3D was used to model the slope in the process of deep foundation pit excavation in the basement, and the mechanical properties of the internal support system of the foundation pit were simulated by 3D beam element. The 3D model was meshed by selecting tetrahedral elements, and the 3D displacement monitoring points were arranged, and the settlement and displacement changes around the foundation pit during the whole excavation process were recorded, and the safety factor of the slope was calculated, so as to analyze the dynamic deformation law of the slope. With the progress of excavation, the surface subsidence around the two sides of the foundation pit moved closer to the middle from the periphery. Among them, the change of settlement within 45m around the non-biased side was obvious, and the change range of settlement around the biased side showed a decreasing trend to the outside with 35m as the main boundary. The error between the simulation results and the actual value was always lower than 0.15mm. In the final support stage, after adopting the composite soil nail wall support structure, the safety factor reached 1.60. The excavation results in uneven settlement distribution around the foundation pit, especially near the edge of the foundation pit. At the same time, the introduction and strengthening of supporting structure significantly improve the slope stability and can effectively control

收稿日期:2025-05-11

作者简介:王梦博(1988-),女,安徽亳州人,高级工程师,硕士。E-mail:278590501@qq.com

the slope deformation.

Key words: basement; deep foundation pit; excavation by layers; dynamic deformation; numerical simulation

在高层建筑、地铁、隧道等大型基础设施建设中,地下室深基坑工程能够为地下施工提供足够的施工空间,从而保证主体工程地基的安全性。但在工程实际开展的过程中,受到地形等多方面因素的影响,该类型的施工往往伴随着边坡稳定性问题,这不仅影响施工进度,更可能危及施工安全^[1]。因此,深入研究地下室深基坑土方分层开挖过程中边坡的动态变形规律,对于确保施工安全、提高施工效率具有重要的现实意义。地下室深基坑开挖过程中的边坡变形是一个复杂的力学问题,涉及土体力学、岩土工程学、结构工程学等多个学科。通过数值模拟方法,可以模拟不同地质条件、不同施工方案下的边坡变形情况,为工程开展提供可靠的理论支持^[2]。此外,数值模拟还能有效预测边坡变形趋势,及时发现潜在的安全隐患,为施工安全风险评估提供科学依据。

近年来,已经有越来越多的学者从不同角度针对深基坑开挖过程中的边坡变形情况进行了模拟分析。叶炜钠等^[3]采用强度折减法,依托实际工程案例,对边坡失稳过程在三种弹塑性模型下进行数值剖析,旨在揭示边坡坡面变形特征,并探讨不同模型下土体材料参数对变形行为的影响。通过识别变形突变点对应的折减系数,确立了变形与边坡安全系数的关联机制,为构建边坡监测预警体系提供了理论支撑,对推动边坡工程信息化发展具有深远意义。由于不同弹塑性模型基于特定假设构建,可能无法全面反映复杂地质条件下边坡的真实状态。高振宇等^[4]借助3DEC数值模拟工具,系统分析了不同冻融循环次数与开采速率下边坡的动态响应,涵盖位移、应力分布、塑性区域扩展、安全系数评估及能量转化等多个维度,探究了地下开采条件变化下既有冻融边坡的稳定性,然而,该研究主要聚焦于位移、应力等宏观力学响应,对微观结构变化、水分迁移等关键过程的影响探讨不足,可能影响对边坡稳定性机制的全面理解。郝廷伟等^[5]设计了一种柔性轻型格构梁。旨在探究其物理力学性能、护坡应力分布及浅层防护稳定性,通过物理力学试验、数值模拟及浅层稳定性分析展开研究。通过优化格构埋深与

间距,可提升边坡浅层土体安全系数并降低施工成本。但格构梁的模型未进行网格精细划分,变形模拟分析结果可能不够准确。Sun Y等^[6]研究聚焦于河流洪水、堰塞湖与水库泄洪及海水退库等情景下,边坡前水位下降所触发的土壤稳态渗流场变化及其对边坡稳定性的影响。通过GeoStudio软件与Slope/W模块的耦合构建数值模型,并依托室内中砂与粉土模型试验数据进行验证。虽然该方法考虑了基质吸力对边坡稳定性的正面作用,但基质吸力的动态变化、空间分布及其与土壤其他性质的相互作用机制复杂,当前模型可能难以全面捕捉这些效应。

针对以上问题,本研究采用先进的数值模拟技术,通过设定不同的模拟参数,对开挖不同阶段下的边坡变形情况进行了有效模拟。旨在揭示地下室深基坑土方分层开挖过程中边坡的动态变形规律,为实际工程提供更为科学和准确的指导和建议。

1 工程概况

以亳州学院五期(亳州学院中医药学院)设计施工项目作为模拟对象,该项目总建筑面积26.339万平方米,操场占地面积约6700 m²。工程基坑处于操场范围内,平面呈不规则多边形,基坑平面最长约183.1 m,最宽约121.2 m。总计土方量约111 720方。工程施工前整平至场平均标高36.6 m,开挖深度是5.10~6.20 m,分四层开挖每层开挖深度1.5 m。

研究区域的场地地基土在35.00 m深度范围内均为第四系松散沉积物,主要由饱和粘性土、粉性土和砂土组成,拟建场地范围内土层从上至下依次为①1杂填土、①2素填土、②灰黄色粉土夹粉质粘土、③1灰黄色粉质粘土、③1-1灰色淤泥质粉质粘土、③2灰黄色粉质粘土、④1灰黄~草黄色粉土、④2灰黄~灰色粉砂、④2-1灰黄~灰色粉质粘土夹粉土、④3灰黄色粉土、⑤灰黄~褐黄色粉质粘土、⑥灰黄色粉土与粉质粘土互层。研究区域岩层土体物理力学参数如表1所示。

表 1 研究区域土体力学参数

土层编号	土层名称	重力密度 /kN·m ⁻³	粘聚力 /kPa	内摩擦角 /°	渗透系数 /cm·s ⁻¹	承载力特征值 /kPa
①1	杂填土	18	10	8	—	—
①2	素填土	17	15	10	3.0E-04	75
②	灰黄色粉土夹粉质粘土	19.2	12	16	6.0E-05	130
③1	灰黄色粉质粘土	18.7	45	7	4.0E-06	130
③1-1	灰色淤泥质粉质粘土	17.1	16	8	4.0E-06	81
③2	灰黄色粉质粘土	20.0	36	6.5	3.0E-06	180
④1	灰黄~草黄色粉土	20.2	15	25	7.0E-05	230
④2	灰黄~灰色粉砂	19.1	3	30	4.0E-03	125
④2-1	灰黄~灰色粉质粘土夹粉土	18.5	17	18	7.0E-05	122
④3	灰黄色粉土	19.1	12	24	8.0E-04	133
⑤	灰黄~褐黄色粉质粘土	19.5	32	19	9.0E-06	188
⑥	灰黄色粉土与粉质粘土互层	19.1	23	21	4.0E-04	155

依据《建筑工程质量管理条例》《建筑地基基础设计规范》等施工规范,深基坑整体开挖工作采用分段分层的方式进行^[7]。每层开挖工作完成后,对其开挖标准进行检验,待支护结构施工完毕且混凝土面层达到设计要求 70% 后方可进行下层土方开挖。若开挖程度符合施工标准,则对该层进行支护。同时待支护体系搭建完成后,再进行下一层的开挖工作。土方开挖形式为一级放坡,放坡坡率为 1:1.5。降水采用管井降水,基坑内外共 47 口,降水井深度从地面往下 18 m。基坑土方开挖后沿坡道将土方转运至未施工绿化场地及其它需方区域,临时堆土覆盖喷雾抑尘。土方开挖严格遵循“分层分段,对称均衡,及时施工”的原则^[8]。开挖工作面、修理边坡自上而下分层分段进行。在上一层土方开挖后间隔 5 天后开挖下一层土方,操作人员之间安全距离大于 2.5 m。机械开挖土方预留厚度 20 cm,采用人工修整坡面,整平坡面,清除虚土,保证坡面顺直平整,坡度到达设计要求。每层土方开挖前,将地下水位降到挖土标高以下 1 m 才开挖。分层开挖剖面如图 1 所示。

深基坑土方分层开挖过程中,边坡采用深基坑开挖边坡复合土钉墙分层支护施工方式。基坑支护平面图如图 2 所示。

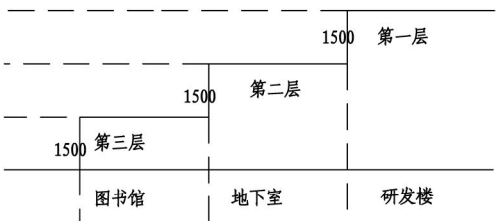


图 1 分层开挖剖面图

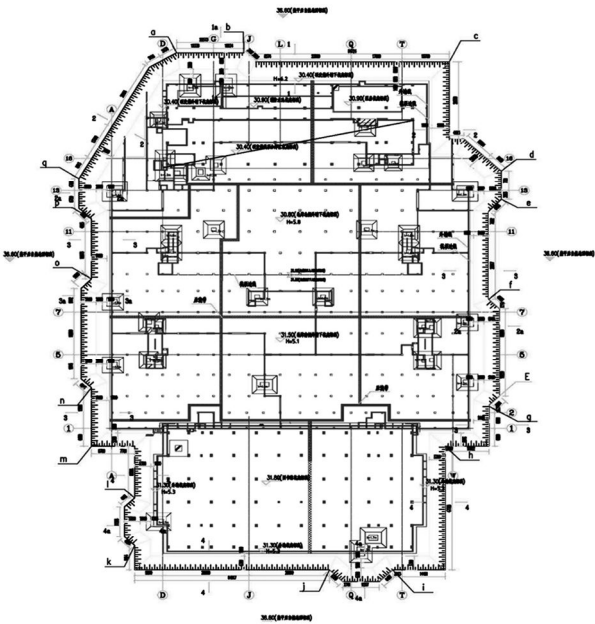


图 2 基坑支护平面布置图

深基坑开挖边坡复合土钉墙分层支护施工共使用到三种不同长度的土钉,其横向间距以及纵向间距等具体参数如表 2 所示。

表 2 土钉施工参数

土钉编号	土钉长度/m	横向间距/m	纵向间距/m	钻孔直径/mm	钻设角度/°
1D1	5	1.5	1.5	20	10
1D2	6	1.5	1.5	20	15
1D3	7	1.5	1.5	20	10

针对模拟实验所选取的基坑开挖工程,结合仿真软件对开挖过程中边坡动态变形规律进行模拟研究。

2 动态变形规律数值模拟

为对开挖过程中边坡动态变形规律进行分析,采用 FLAC3D 软件构建出数值模拟模型,对基坑的沉降变化以及位移变化情况进行模拟,FLAC3D 软件基于显式拉格朗日算法和混合离散化技术,能够高效、准确地模拟岩土和其他材料的非线性、大变形行为,能够更精确地模拟基坑在开挖过程中的沉降和位移变化情况,从而揭示边坡动态的变化规律,评估基坑在开挖过程中的稳定性和安全性。

2.1 三维数值模型构建

应用典型剖面,构建出三维数值模拟模型,设定宽度为 9.2 m,边坡开挖侧模型高度为 6.2 m,倾斜侧模型高度为 5.1 m,基坑内部采用复合土钉墙^[9]作为主要支撑体系,复合土钉墙通过在土体内设置一定长度与分布密度的土钉体,与岩土共同作用,形成复合体,从而提高土体强度,以弥补土体强度本身的不足。这种增强作用有助于提升边坡的整体稳定性,防止边坡在开挖过程中发生失稳或坍塌。同时,在复合土体中,土钉与土体共同承担外荷载和土体自重应力。当土体进入塑性状态后,应力逐渐向土钉转移。这种分担作用有助于减轻土体的受力情

况,防止土体因过度受力而发生破坏。同时,土钉内出现弯剪、拉剪等复合应力,能够进一步发挥土钉的加固作用。采用 1D 土钉单元模拟内部支撑体系中土钉在基坑开挖过程中的受力特性,评估土钉的加固效果。采用实体单元中的摩尔库伦材料单元模拟深基坑土体在受力过程中的弹塑性行为,由此构建出的深基坑三维数值模型如图 3 所示。

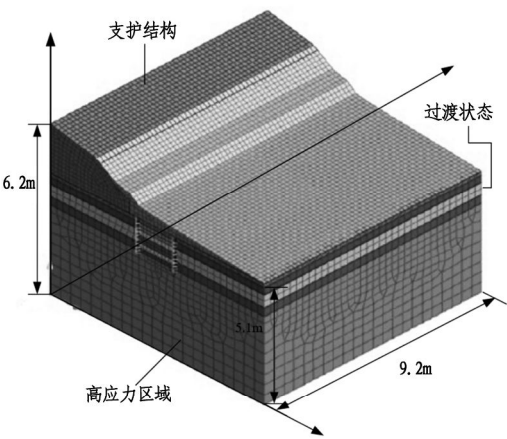


图 3 三维数值几何模型

该模型以地下室深基坑的开挖步骤为基础,对模型的工况进行模拟,同时针对每个模拟工况下支护结构的变形情况以及边坡变形情况进行记录与分析^[10]。地下室深基坑开挖工程的模拟工况划分情况如表 3 所示。

表 3 模拟工况阶段及具体内容

模拟工况(施工阶段)	开挖深度/m	分层开挖厚度/m	支护施工描述	支撑拆除描述
阶段 1	1.5	1.5	第一层土钉安装,喷射混凝土面层	无
阶段 2	3.0	1.5	第二层锚杆安装,喷射混凝土面层	无
阶段 3	4.5	1.5	第三层土钉复合墙安装,喷射混凝土面层	拆除第一层临时土钉
阶段 4	6.2	1.7	开挖至坑底,坑底排水系统施工	拆除第二层锚杆及临时支护结构

2.2 材料力学参数设置

采用模拟单元对支护结构的材料力学参数进行设置,从而实现支护结构建模处理。复合土钉墙土钉物理学参数如表 4 所示。

表 4 复合土钉墙土钉物理学参数

物理学参数	1D1	1D2	1D3
密度 $\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	780	780	780
弹性模量 E/GPa	200	210	220
横截面积 A/mm^2	314.2	518.8	645.8
浆体粘聚力 $C_g/\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	2×10^5	2×10^5	2×10^5
浆体摩擦角 $\varphi_g/^\circ$	30	30	30
浆体刚度 $k_g/\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	1.75×10^7	1.75×10^7	1.75×10^7
浆体周长 P_g/mm	40.82	41.56	42.38
压缩强度 F_c/kN	105.26	150.48	205.16
拉伸强度 F_t/kN	139.28	182.45	274.03

界面中的材料参数转换公式如下:

$$K_1 = \frac{E_c}{t_v} \quad (1)$$

$$K_2 = \frac{G_t}{t_v} \quad (2)$$

$$C_t = R \times C_s \quad (3)$$

式中, t_v 为虚拟厚度系数, R 为材料强度衰减参数, G_t 为支护结构材料刚性参数, C_s 为润滑摩擦参数^[11]。利用上述公式对支护结构中的材料力学参数进行计算,并结合 FLAC3D 软件中不同结构模拟单元,模拟得出支撑结构模型。

2.3 单元选取及网格划分

考虑到施工区域的复杂地形以及基坑的不规则边界,采用 FLAC3D 软件中的四面体单元作为基础单元,对模型网格进行单元划分^[12],四面体单元在计算过程中能够更有效地传递应力和应变,准确地模拟材料的塑性破坏和流动,提高模拟的精度和可靠性。根据模型尺寸和所关注的变形范围,设定最大网格长度。在边坡表面和开挖区域附近,使用较细的网格对其进行划分,网格尺寸为 0.5 m,而在远离边坡的区域,选择使用较粗的网格对其进行划分,最大网格尺寸为 5 m^[13]。同时,为了避免网格尺寸突变引起的应力集中,选择在不同尺寸的网格之间

设置过渡区,采用逐渐变化的网格尺寸。具体网格划分情况如图 4 所示。

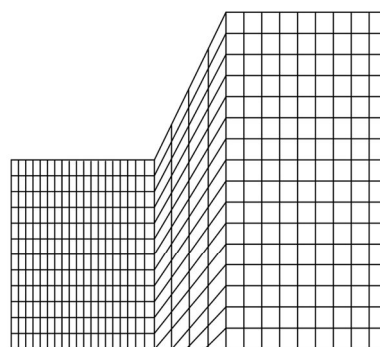


图 4 网格划分情况

使用 FLAC3D 内置的地形生成工具生成地形数据,并导入 FLAC3D 中。对于底部边界,将其设置为固定约束(零位移边界条件),即限制所有方向的位移^[14],确保模型在开挖过程中不会因为底部土体的移动而失稳。对于侧面边界,根据具体情况选择滚动约束或自由边界条件。如果侧面是岩石或硬土,可以设置滚动约束;如果侧面是软土或水体,可以设置自由边界条件。考虑到研究区域的顶部可能受到周围环境的限制,将顶部边界设为自由边界条件,并在顶部与侧部的交界处设置载荷边界以及位移边界^[15]。

2.4 实际监测点位设置

针对边坡顶处共布设了 8 个不同的三维位移监测点位,用于监测开挖过程中支撑体系的位移变换情况。同时在边坡顶部建筑物设置了 8 个沉降监测点位,具体监测点位分布情况如图 5 所示。

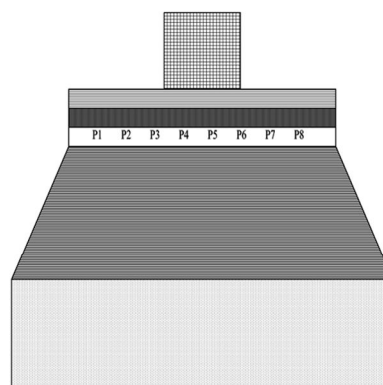


图 5 位移监测点位分布情况

针对上述监测点位,对监控位移的报警值进行了规定,具体情况如表 5 所示。

表 5 地下室深基坑监测报警标准

监测项目	报警值 /mm	允许值 /mm	变化速率 /mm/天
坡顶水平位移(北/南/西)	14	20	3
坡顶水平位移(东)	22	30	3
坡顶竖向位移(北/南/西)	14	20	3
坡顶竖向位移(东)	22	30	3
周边管线监测	10	15	2

按照上述监测点位分布情况对点位进行布设,并以 3d 的监测频率对点位的横向以及竖向位移情况进行监测与记录^[16]。监测周期覆盖整个土方分层开挖过程,从初始开挖阶段(阶段 1,开挖深度 1.5 m)开始,持续至最终开挖完成(阶段 4,开挖深度 6.2 m)及支护结构施工完毕。整个周期与施工阶段同步,包括四层开挖(每层开挖间隔 5 天),监测持续时间为 30 天,确保监测贯穿开挖全过程,直至变形稳定。

3 地下室深基坑土方分层开挖过程边坡动态变形规律数值模拟结果

3.1 地表沉降变形规律

模拟得到的深基坑周边地表沉降变形情况如图 6 所示。

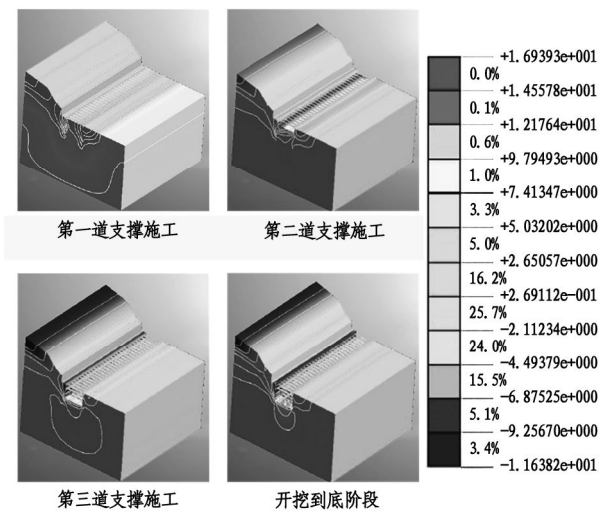


图 6 深基坑周边地表沉降变化情况

通过上述模拟结果可以看出,随着开挖工作的进行,基坑两侧的周边地表沉降由四周向中间靠拢。其中以非偏压侧周边 45 m 内的沉降变化较为明显,对于偏压侧周边沉降变化范围,以 35 m 作为主要边界向外侧呈现递减趋势。地下室深基坑左右两侧的

周边区域最大沉降量分别为 15.6 mm 和 7.45 mm。分析以上模拟计算数据可知,随着开挖工作的进行,地表沉降并非均匀分布,而是在基坑边缘附近最为显著。这是由于基坑开挖导致周围土体失去支撑,从而导致应力分布出现了密度差异。在基坑的角部区域,沉降往往更为集中,形成所谓的“沉降漏斗”。这是由于角部区域的应力集中和土体的非线性变形特性所致。随着开挖深度的增加,地表沉降逐渐增大,但这种增大并非线性关系,而是呈现出加速的趋势。

3.2 地表沉降变形模拟结果与实际对比

为了测试本研究的地表沉降变形模拟准确性,将数值模拟结果与亳州学院实际项目工程记录实测值进行对比分析,以位移流变误差作为衡量模拟结果与实际结果的差值指标,工程要求误差需小于 0.2 mm。地下室深基坑左右两侧最大沉降量变化 4 个阶段模拟误差如图 7 所示。

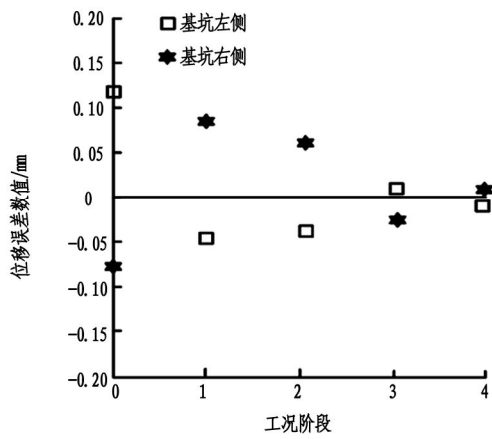


图 7 变形模拟误差变化对比

分析图 7 数据可知本研究的变形模拟结果与实际值的误差始终低于 0.15 mm,不仅低于工程误差标准,且随着施工阶段推移不断缩小至 0.05 mm 以下,展现出良好的模拟精度,微小误差验证了该方法的准确性与可靠性。

3.3 边坡安全系数模拟分析与实际对比

为了验证所提方法的支护结构对边坡变形控制的有效性,将亳州学院五期施工项目操场基坑挖掘的实际边坡安全系数作为对照。应用所提方法进行模拟分析,对边坡安全系数进行计算,由此得到整个施工过程中安全系数的变化情况如表 6 所示。

表 6 中各阶段间隔 5 天,用于支护结构施工及养护。通过上述实验结果可以看出,随着开挖深度的增加(从初始时间到阶段 3 的开挖),边坡的安全系数逐渐降低,到开挖工作完成后,边坡安全系数下降了 14.8%。而支护结构的引入和加强显著提高

了边坡的安全系数。最终支护阶段 4,采用三种土钉复合墙支护后,安全系数达到 1.65,明显高于无支护或仅有临时支护的阶段,与实际安全系数值相吻合,符合施工规范要求(深基坑安全系数 ≥ 1.2),支护结构能够保障边坡稳定性和安全。这是因为所提方法采用的三种土钉复合墙支护在基坑开挖过程中,能够协同工作,共同抵抗外部荷载和土体变形,

使得支护结构更加稳定可靠,进一步提高了安全系数。并采用 3D 单元对基坑内部支撑体系的力学材料性能进行模拟,能够更准确地反映边坡的实际情况,提高模拟的准确性。通过选取四面体单元对三维模型进行网格划分,能够更细致地模拟边坡的变形和位移情况,保证了变形规律数值模拟的有效性和应用性。

表 6 边坡安全系数模拟结果

工况节点	开挖深度/m	边坡坡度/°	支护结构类型	模拟结果安全系数/ F_s	实际安全系数/ F_s
初始	0	—	无	∞	∞
阶段 1	1.5	1:1.5	第一层土钉安装,面层铺设施工	1.35	1.36
阶段 2	3.0	1:1.5	第二层土钉安装,面层铺设施工	1.52	1.52
阶段 3	4.5	1:1.5	第三层土钉复合墙安装,面层铺设施工	1.65	1.64
阶段 4	6.2	1:1.5	开挖至坑底	1.62	1.63

4 结论

本研究以地下室深基坑土方分层开挖过程边坡动态变形规律数值模拟为核心,通过精细的数值模拟和深入的分析,为地下室深基坑开挖工程的安全施工提供了重要的理论支撑和实践指导。研究不仅揭示了土方分层开挖过程中边坡变形的动态规律,还为实际工程提供了更为精准的风险评估和防控措施。

参考文献:

- [1] 王晓俊,吕文伟,韩流,等. 地下开采扰动对露天排土场边坡变形破坏的影响[J]. 煤炭工程,2024,56(4):164-170.
- [2] 丁玎,陈志坚. 基于离散元的岩质高边坡开挖支护数值模拟[J]. 沈阳大学学报(自然科学版),2024,36(2):163-170.
- [3] 叶炜钠,周勇,叶帅华. 弹性模量对框架预应力锚杆支护边坡坡面变形影响分析[J]. 兰州理工大学学报,2024,50(2):136-141.
- [4] 高振宇,苗浩东,常远. 冻融循环下地下开采对既有边坡稳定性影响数值分析[J]. 金属矿山,2024(4):221-227.
- [5] 郝廷伟,李驰,高瑜,等. 轻型格构边坡防护数值应力及稳定性分析[J]. 水利水电技术(中英文),2023,54(6):176-188.
- [6] SUN Y,LI Z,YANG K,et al. Analysis of the influence of water level change on the seepage field and stability of a slope based on a numerical simulation method[J]. Water,2023,15(2):216.1-216.6.
- [7] 柴卓,吴彪,张海锋,等. 陕西某黄土高边坡稳定性的数值模拟研究[J]. 山西建筑,2024,50(7):70-73.
- [8] 李经宇,于英霞,代均德,等. 超大深基坑支护结构综合选型及变形规律研究[J]. 河南大学学报(自然科学版),2023,53(6):718-728.
- [9] 赵邵华,尹素仙,邓羿,等. 深基坑支护技术选型与复合土钉墙支护技术应用要点研究——以湖南省某车站工程为例[J]. 房地产世界,2023,000(19):145-147.
- [10] 郑斌. 邻近建筑物深基坑开挖支护方案选择及效果模拟[J]. 四川水泥,2023(7):148-150.
- [11] 高亚鹏,赵文辉,魏铸,等. 某高速铁路明挖隧道黄土深基坑变形规律分析[J]. 兰州工业学院学报,2023,30(2):60-65.
- [12] 宋健,陆朱汐,谢华威,等. 地震作用下分层土边坡多滑面变形破坏的数值模拟研究[J]. 地震工程学报,2023,45(2):296-305.
- [13] 黄秘昌,黄祖芹,邓检强,等. 含软弱夹层构造的临水深基坑变形规律与支护研究[J]. 水利水电技术(中英文),2022,53(S2):399-405.
- [14] 孙铁军,孟灵鑫,沈立中,等. 临江公路隧道基坑边坡变形特性及控制措施分析[J]. 公路,2022,67(7):451-456.
- [15] 李小军. 地下隧道深基坑仰坡开挖与支护数值模拟及安全性分析[J]. 安全与环境学报,2023,23(3):812-818.
- [16] 李彦奇,黄达,孟秋杰. 基于离心机和数值模拟的软硬互层反倾层状岩质边坡变形特征分析[J]. 水文地质工程地质,2021,48(4):141-150.

责任编辑:汤庆国

近接群桩深基坑支护结构受力及变形特性研究

赵平*, 季陈晨

(铜陵学院 建筑工程学院, 安徽 铜陵 244000)

摘要:依托郑州市某近接群桩深基坑开挖工程,采取数值计算和现场监测相结合的方法,研究了近接群桩深基坑支护结构受力及变形特性。结果表明:模型计算结果与实测数据吻合良好,验证了模型的有效性。地下连续墙的变形呈现出非对称图形的特征,且地下连续墙A的位移更大。随着开挖深度的不断增加,地下连续墙的位移、弯矩,以及剪力总体上呈现出“不断增大”的规律,最大值都出现在工况6。地下连续墙轴力呈现出“波动变化”的规律,最大拉力和压力分别出现在工况6和4。研究成果可为近接群桩基坑支护结构的设计优化及施工提供技术支撑。

关键词:近接群桩;支护结构;变形特性;深基坑

中图分类号:TU753

文献标识码:A

文章编号:2095-297X(2025)05-0072-08

Study on Stress and Deformation Characteristics of Retaining Structure of Close Pile Group Deep Foundation Pit

ZHAO Ping*, JI Chenchen

(School of Architectural Engineering, Tongling University, Tongling, 244000, Anhui)

Abstract: Relying on the excavation project of a close group pile deep foundation pit in Zhengzhou City, the force and deformation characteristics of the supporting structure of the close group pile deep foundation pit were studied by combining numerical calculation and on-site monitoring. The results showed that the calculated results of the model were in good agreement with the measured data, verifying the validity of the model. The deformation of the underground continuous wall presented the characteristics of asymmetric graphics, and the displacement of the underground continuous wall A was greater. With the continuous increase of excavation depth, the displacement, bending moment and shear force of the underground continuous wall generally show a "constantly increasing" rule, and the maximum values all occur in working condition 6. The axial force of the underground continuous wall showed a "fluctuating change" pattern, with the maximum tensile force and compressive force occurring respectively in working conditions 6 and 4. The research results can provide technical support for the design optimization and construction of the foundation pit support structure of the adjacent group pile.

Key words: close pile group; supporting structure; deformation characteristics; deep foundation pit

当前,许多大城市出现了土地资源短缺、建筑空间拥挤等问题^[1-2]。城市地下空间开发和利用可以有效缓解大城市土地资源短缺与建筑空间拥挤等问题^[3]。但城市地下空间的开发不可避免的需要开

挖基坑^[4];基坑施工不可避免地造成周围土体变形,对周围环境产生影响^[5]。此外,随着我国城市空间的利用及纵向立体化发展,对基坑的变形控制提出了更高的要求^[6]。在实际应用过程中,由于设

收稿日期:2025-04-14 * 通讯联系人

基金项目:安徽省自然科学基金资助项目(2308085QE190);安徽省大学生创新训练项目(S202310383386)。

作者简介:赵平(1989-),男,安徽铜陵人,讲师,硕士。E-mail:ping_zhao2014@163.com

计、施工或现场管理等各种原因,部分采用内支撑支护结构的基坑出现了严重的工程事故^[7]。因此,选用可靠经济的支撑方式至关重要。地下连续墙因为具有刚度大、占地少,以及对城市环境扰动影响小等特点,成为基坑围护结构的首选类型^[8]。

基坑开挖相关的研究日益被学者所关注,并取得了许多成果。理论分析方面,薛秀丽等^[9]建立了土体应变与围挡侧移的数学方程,并构建了考虑基坑围挡侧移影响的土压力计算模型。郭景琢等^[10]提出了一种考虑桩土相互作用的倾斜桩设计计算方法。应宏伟等^[11]借助 Lamé 方程推导得到了柔性挡墙诱发地表沉降的半解析解。马伟亮等^[12]将隧道简化为 Timoshenko 梁,建立了基坑卸荷引起的隧道变形理论计算模型。现场监测方面,郭延辉等^[13]研究了现有基坑支护结构和临近道路的受力与变形特征。谢强等^[14]分析了上跨基坑开挖对空间分布隧道的变形影响规律。喻莹等^[15]对不同施工阶段的支护结构内力和变形进行了分析。刘长红等^[16]对地铁车站基坑爆破对邻近框架结构的动力响应特征展开了研究。模型试验方面,胡指南等^[17]研究了既有隧道结构在基坑开挖作用下产生的位移的变化规律。吴楷等^[18]为探究土拱效应影响下基坑底土体竖向应力响应,开展了离心模型试验。亓源水等^[19]利用模型试验对基坑在不同水压地层中可行性和差异性进行了分析。程雪松等^[20]研究了局部超挖对单道锚杆支护结构变形及冠梁内力等的影响。数值模拟方面,宋博文等^[21]研究了软土深基坑开挖对邻近地铁隧道变形的影响规律。魏纲等^[22]的研究结果表明基坑开挖会引起下卧盾构隧道产生上浮,隧道内堆载可以有效控制上浮量。陈仁朋等^[23]采用有限元软件建立了超大直径隧道旁侧基坑开挖的三维有限元模型。吴怀娜等^[24]对门式抗浮框架施作过程以及基坑大面积开挖对下卧盾构隧道的影响进行了数值模拟研究。

综上所述,关于各种作用下基坑开挖的影响日益被学者所关注,并取得了较丰富的成果。研究方法主要为理论分析法、现场监测法、模型试验法,以及数值模拟法。研究内容主要包括基坑围护结构及土体内力和变形、基坑开挖对临近隧道影响、基坑开挖对临近道路影响,以及基坑开挖对临近建筑物影响等。然而,以往的研究中很少有学者开展近接群桩深基坑支护结构受力及变形特性的研究^[5]。此外,由于城市用地紧张,基坑周围往往环境复杂,可能会在高架桥附近开挖基坑,施工环境相对较复杂。因此,有必要对近接群桩深基坑支护结构受力及变形特性展开深入研究。鉴于此,本文在上述研究的基础上,以某近接群桩深基坑工程开挖为背景展开了相关研究。研究成果可为基坑工程的设计及施工提供一定的科学指导和理论依据。

1 工程概况

以郑州市某一地区典型地层深基坑工程为研究对象开展研究。基坑附近有高架桥。基坑为明挖法施工。图1为基坑截面示意图。工程概况具体内容参见文献^[5]。根据岩土工程勘察报告,简化后的土层为5层。自上而下分别为人工填土、淤泥质粘土、淤泥、细砂、粉质粘土。土层相关的力学参数如表1所示。围护结构、承台以及桩的材料参数参见文献^[5]。

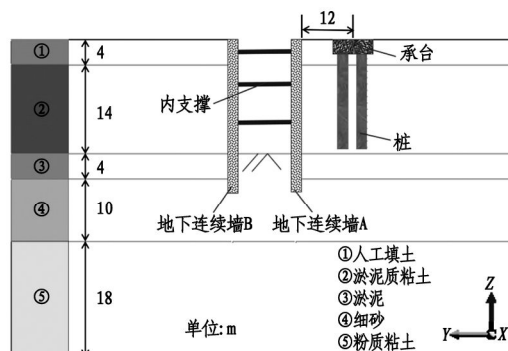


图1 基坑截面示意图

表1 土层力学参数表

土层名称	E_{50}^{ref} /kN · m ⁻²	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ /kN · m ⁻²	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ /kN · m ⁻²	ν	γ /kN · m ⁻³	c /kN · m ⁻²	φ /°
①人工填土	3000	3000	9000	0.2	18	5	5
②淤泥质粘土	7000	7000	21000	0.23	19.3	13	25
③淤泥	16500	16500	49500	0.3	20	3	28
④细砂	24000	24000	72000	0.32	20	0	32
⑤粉质粘土	12700	12700	38100	0.25	19.5	27	16

2 建模与计算

2.1 基本假定

施工过程和现场工程条件比较复杂。为了便于计算研究,数值模型需要对实际情况进行一定简化。本研究基本假设与文献[5]保持一致。

采用 MIDAS GTS NX 有限元软件建立三维有限元模型进行数值模拟。对近接群桩深基坑支护结构受力及变形特性展开了研究。需要说明的是,本次的研究对象为对称结构,因此可以取一半进行建模。最终确定本次研究建立的模型长(x)、宽(y)、高(z)分别为 100 m、80 m、50 m。计算模型如图 2 所示。模型的单元数为 227 515,节点数为 165 985。模型坐标系及边界条件与文献[5]保持一致。模型中土体采用修正摩尔库伦本构关系。此外,围护结构和内支撑都采用弹性本构关系。模型中土体和承台为 3D 实体单元。地下连续墙为 2D 面单元、内支撑、冠梁,以及钢围檩都采用 1D 梁单元,桩为 1D 植入式梁单元。

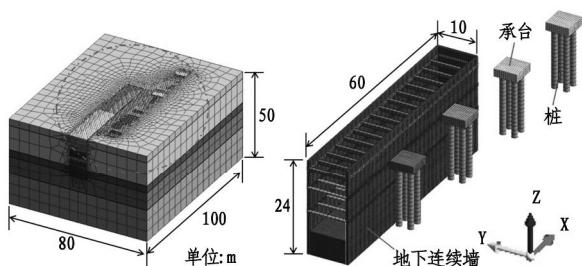


图 2 数值模型

2.2 模拟施工

模拟施工过程的具体内容见表 2。

表 2 主要施工阶段

阶段	模拟内容
1	初始地应力阶段。
2	高架桥桩和承台施工。
3	位移清零。
4	地下连续墙施工。
5	工况 1,开挖深度为 4 m。增设冠梁和第一道内支撑。
6	工况 2,开挖深度为 4 m。增设腰梁和第二道内支撑。
7	工况 3,开挖深度为 4 m。
8	工况 4,开挖深度为 2 m。增设腰梁和第三道内支撑。
9	工况 5,开挖深度为 2 m。
10	工况 6,开挖深度为 2 m。

3 数值模拟结果与现场实测对比分析

图 3 为开挖完成时地下连续墙 A-A 截面 Y 方向位移对比图。可以看出,开挖完成时,地下连续墙最大水平位移现场监测结果约为 8.4 mm。数值模拟方面的结果约为 8 mm。出现的位置都在开挖面附近。另外,无论是数值模拟还是现场监测结果都呈现出“凸肚”的变化趋势。这表明数值模拟结果与实际监测结果吻合较好。同时,还可以发现,现场监测结果与数值模拟结果有一定的差别,但两者之间的差别较小。出现差异的原因可能为:数值模拟不能完全考虑实际施工条件的复杂程度,导致模拟结果与实际变形有一定差别。例如在施工现场可能有挖掘机、土方车的扰动。综上所述,数值模拟与现场监测结果比较接近,差别不大。由此说明本次基坑开挖模型具有一定的合理性和可靠性,可以在本次建立的模型基础上开展近接群桩深基坑支护结构受力及变形特性研究。

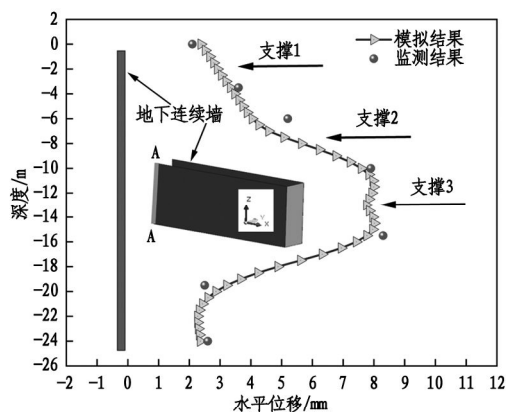


图 3 地下连续墙 A-A 截面 Y 方向位移对比图

4 数值计算结果

4.1 地下连续墙在 Y 方向位移

图 4 为地下连续墙在 Y 方向位移云图。由图 4 可以看出,开挖阶段不同,地下连续墙在 Y 方向位移云图也不同。地下连续墙的变形呈现出非对称图形的特征。位移最大值有不断下移的趋势。这说明开挖深度对地下连续墙的位移产生了一定影响。且同一开挖深度时,地下连续墙 A 和 B 的位移值不同。这可能是由于基坑附近有高架桥,高架桥桩对地下连续墙的变形产生了一定影响。具体来看,地下连续墙 A,工况 1 时,最大值为 1.87 mm。工况 2 时,最大值为 3.28 mm。工况 6 时,最大值为 8.81 mm。地下连续墙 B,工况 1 时,最大值为 -2.12 mm。工况 2 时,最大值为 -3.93 mm。工况 6 时,最大值为 -8.14 mm。

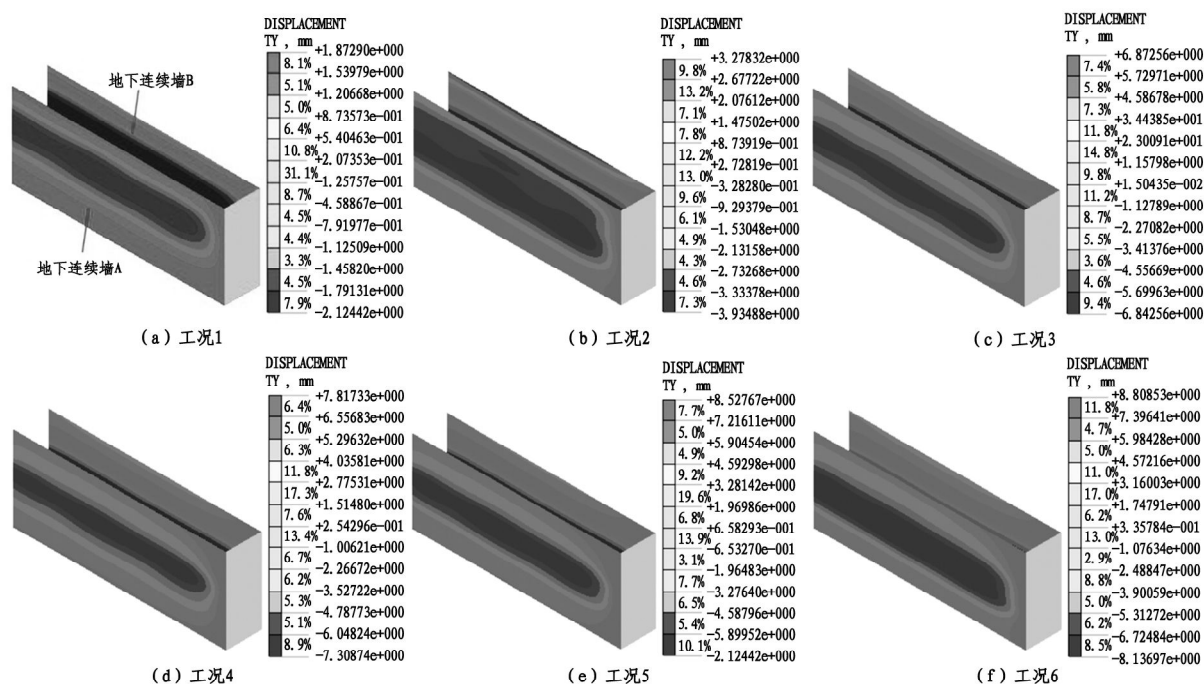


图4 地下连续墙在Y方向位移云图

图5为地下连续墙在Y方向位移最大值对比图。由图5(a)可以看出,地下连续墙A最大位移呈现出“逐渐增加”的变化规律。具体来看,工况1时,值为1.87 mm,增加量为1.87 mm。工况2时,值为3.28 mm,增加量为1.41 mm。工况3时,值为6.87 mm,增加量为3.59 mm。工况4时,值为7.82 mm,增加量为0.95 mm。工况5时,值为8.53 mm,增加量为0.71 mm。工况6时,值为8.81 mm,增加量为0.28 mm。比较可知,工况3时地下连续墙A位移增加量最大,增加量为3.59 mm。由图5(b)可以看出,地下连续墙B最大位移总体上呈现出“逐渐增加”的变化规律。具体来看,工况1时,值为-2.12 mm,增加量为2.12 mm。工况2时,值为-3.93 mm,增加量为1.81 mm。工况3时,值为-6.84 mm,增加量为2.91 mm。工况4时,值为-7.31 mm,增加量为0.47 mm。工况5时,值为-

7.21 mm,增加量为-0.1 mm。工况6时,值为8.14 mm,增加量为0.93 mm。比较可知,工况3时地下连续墙B位移增加量最大,增加量为2.91 mm。通过比较可以看出,工况3时,地下连续墙A和B的最大位移增加量都最大。其主要原因为,在工况3时,开挖深度为4 m,且这个阶段没有设置新的内支撑进行支护。值得注意的是,不同开挖阶段,地下连续墙A和B的位移最大值不同,这也说明了临近高架桥桩确实对开挖造成了一定影响。另外,开挖完成时,地下连续墙A的最大位移比B大。这主要是因为,高架桥桩承受了竖向荷载,在竖向荷载作用下,桩有竖向变形和位移,进而会挤压下部和附近土体,在力的相互作用下,土体会对临近地下连续墙产生力的作用,进而表现出地下连续墙A的最大位移更大。

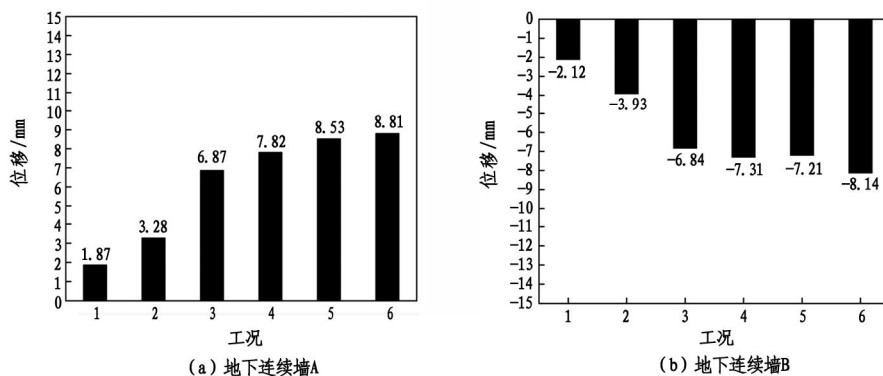


图5 地下连续墙在Y方向位移最大值对比图

综上所述,工况 3 时地下连续墙 A 和 B 的位移增加量最大。因此,工况 3 为基坑开挖的关键,需要重视工况 3 的设计和施工,确保基坑处于安全稳定状态。此外,开挖完成时,地下连续墙 A 的最大位移比 B 大。因此,在临近高架桥基坑施工时,要注意临近地下连续墙的施工设计、施工,以及监测工作。必要时,可采取相关措施(例如:增加地下连续墙厚度,减小开挖深度等),减小临近高架桥对基坑开挖造成的不利影响。

4.2 地下连续墙在 XX 方向轴力

图 6 为地下连续墙在 XX 方向轴力云图。由图 6 可以看出,开挖阶段不同,地下连续墙在 XX 方向轴力云图也不同。应力最大值有不断下移的趋势。这说明开挖深度对地下连续墙轴力产生了一定影响。具体来看,工况 1 时,最大值为 $-524 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。工况 2 时,最大值为 $-237.9 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。工况 6 时,最大值为 $-658.5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

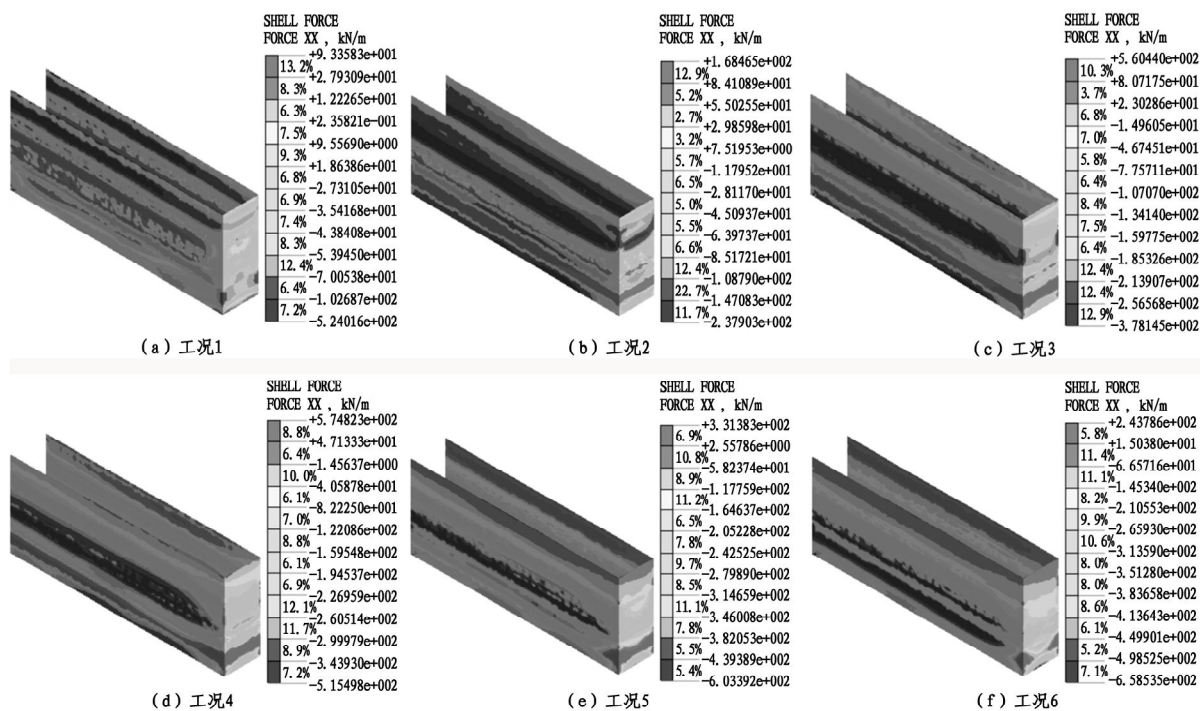


图 6 地下连续墙在 XX 方向轴力云图

图 7 为地下连续墙在 XX 方向轴力对比图。由图 7(a) 可以看出,最大压力呈现出“先快速增加,后快速减小,再缓慢增加”的变化规律。具体来看,工况 1 时,值为 $-524 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,增加量为 $524 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。工况 2 时,值为 $-237.9 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,增加量为 $-286 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。工况 3 时,值为 $-378.1 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,增加量为 $140.1 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。工况 4 时,值为 $-515.5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,增加量为 $138 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。工况 5 时,值为 $-603.4 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,增加量为 $87 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。工况 6 时,值为 $-658.5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,增加量为 $56 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。比较可知,工况 1 时轴力增加量最大,增加量为 $524 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。这可能是因为工况 1 时,开挖了 4 m 的土体,土体开挖卸荷导致地下连续墙产生朝向基坑内部的变形,尽管设置了内支撑,但是,内支撑的位置位于地表以下 2 m 处,进而导致开挖 1 时轴力增加量最大。

由图 7(b) 可以看出,最大拉力总体上呈现出

“先增加,后稳定,再减小”的变化规律。具体来看,工况 1 时,值为 $93.4 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,增加量为 $93.4 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。工况 2 时,值为 $168.5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,增加量为 $75.6 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。工况 3 时,值为 $560.4 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,增加量为 $391 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。工况 4 时,值为 $574.8 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,增加量为 $14 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。工况 5 时,值为 $331.4 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,增加量为 $-244 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。工况 6 时,值为 $243.8 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,增加量为 $-88 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。比较可知,工况 3 时地下连续墙轴力增加量最大,增加量为 $391 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。原因可能是,在工况 3 时,开挖深度为 4 m ,且这个阶段没有设置新的内支撑进行支护,进而导致工况 3 时轴力增加量最大。

综上所述,工况 1 和工况 3 时地下连续墙轴力增加量最大。因此,工况 1 和工况 3 为基坑开挖的关键施工步骤,需要重视这两个阶段的设计和施工,确保基坑处于安全稳定状态。

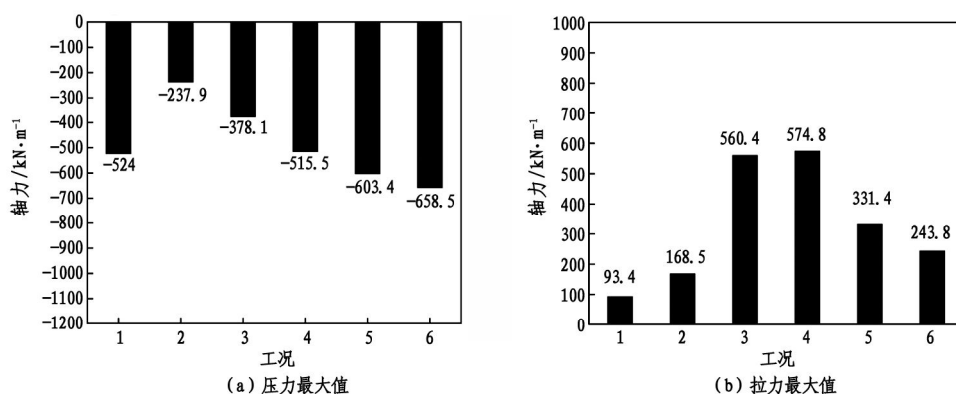


图7 地下连续墙在XX方向轴力对比图

4.3 地下连续墙在YY方向弯矩

图8为地下连续墙在YY方向弯矩云图。由图8可以看出,开挖阶段不同,地下连续墙在YY方向弯矩云图也不同。弯矩最大值有不断下移的趋势。

这说明开挖深度对地下连续墙弯矩产生了一定影响。具体来看,工况1时,最大值为 $-109.08 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot \text{m}^{-1}$ 。工况2时,最大值为 $-181.4 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot \text{m}^{-1}$ 。工况6时,最大值为 $-473.02 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

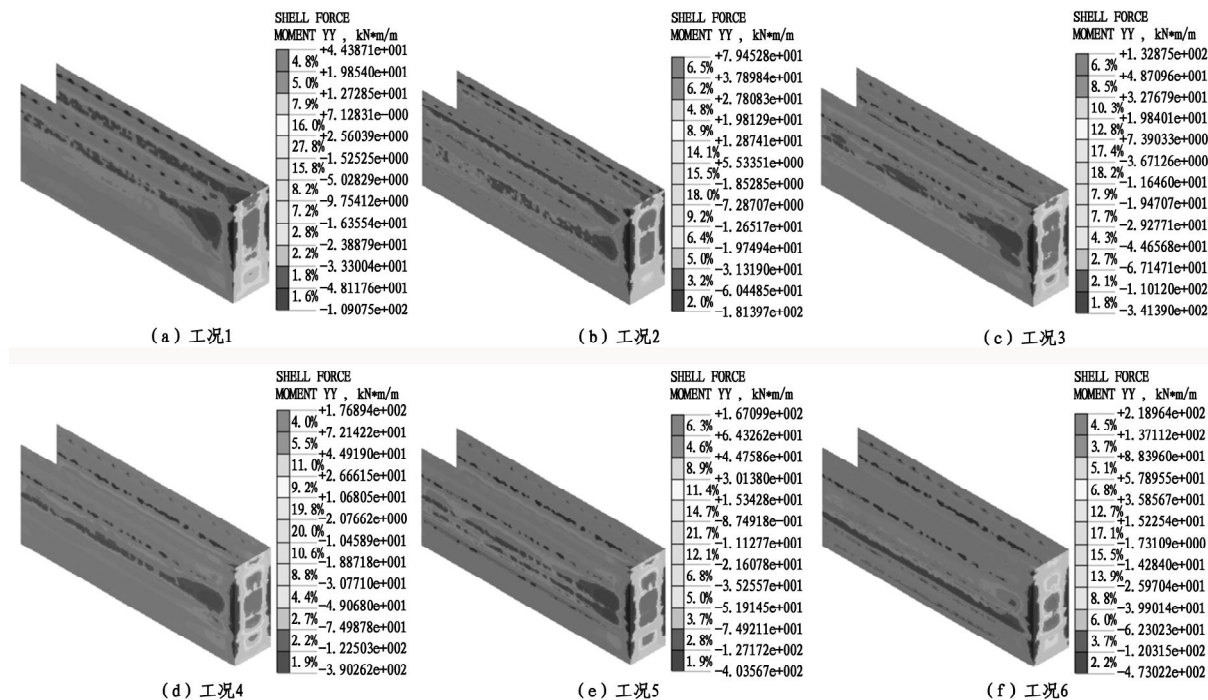


图8 地下连续墙在YY方向弯矩云图

图9为地下连续墙在YY方向弯矩对比图。可以看出,最大弯矩总体上呈现出“不断增加”的变化规律。具体来看,工况1时,值为 $-109.08 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot \text{m}^{-1}$,增加量为 $109.08 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot \text{m}^{-1}$ 。工况2时,值为 $-181.4 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot \text{m}^{-1}$,增加量为 $71.4 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot \text{m}^{-1}$ 。工况3时,值为 $-341.39 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot \text{m}^{-1}$,增加量为 $160 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot \text{m}^{-1}$ 。工况4时,值为 $-390.26 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot \text{m}^{-1}$,增加量为 $49 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot \text{m}^{-1}$ 。工况5

时,值为 $-403.57 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot \text{m}^{-1}$,增加量为 $14 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot \text{m}^{-1}$ 。工况6时,值为 $-473.02 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot \text{m}^{-1}$,增加量为 $70 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot \text{m}^{-1}$ 。比较可知,工况3时地下连续墙弯矩增加量最大,增加量为 $160 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot \text{m}^{-1}$ 。原因可能是,在工况3时,开挖深度为4 m,且这个阶段没有设置新的内支撑进行支护,进而导致工况3时地下连续墙弯矩增加量最大。

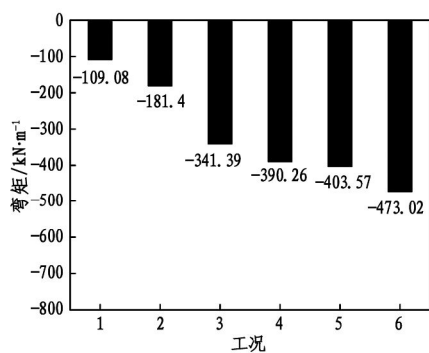


图 9 地下连续墙在 YY 方向弯矩最大值对比图

综上所述,工况 3 时地下连续墙应力增加量最

大。因此,工况 3 为基坑开挖的关键,需要重视工况 3 的设计、施工以及监测,确保基坑处于安全稳定状态。

4.4 地下连续墙在 XZ 方向剪力

图 10 为地下连续墙在 XZ 方向剪力云图。由图 10 可以看出,开挖阶段不同,地下连续墙在 XZ 方向剪力云图也不同。剪力最大值有不断下移的趋势。这说明开挖深度对地下连续墙应力产生了一定影响。具体来看,工况 1 时,最大值为 $110.8 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。工况 2 时,最大值为 $167.5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。工况 6 时,最大值为 $-376 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

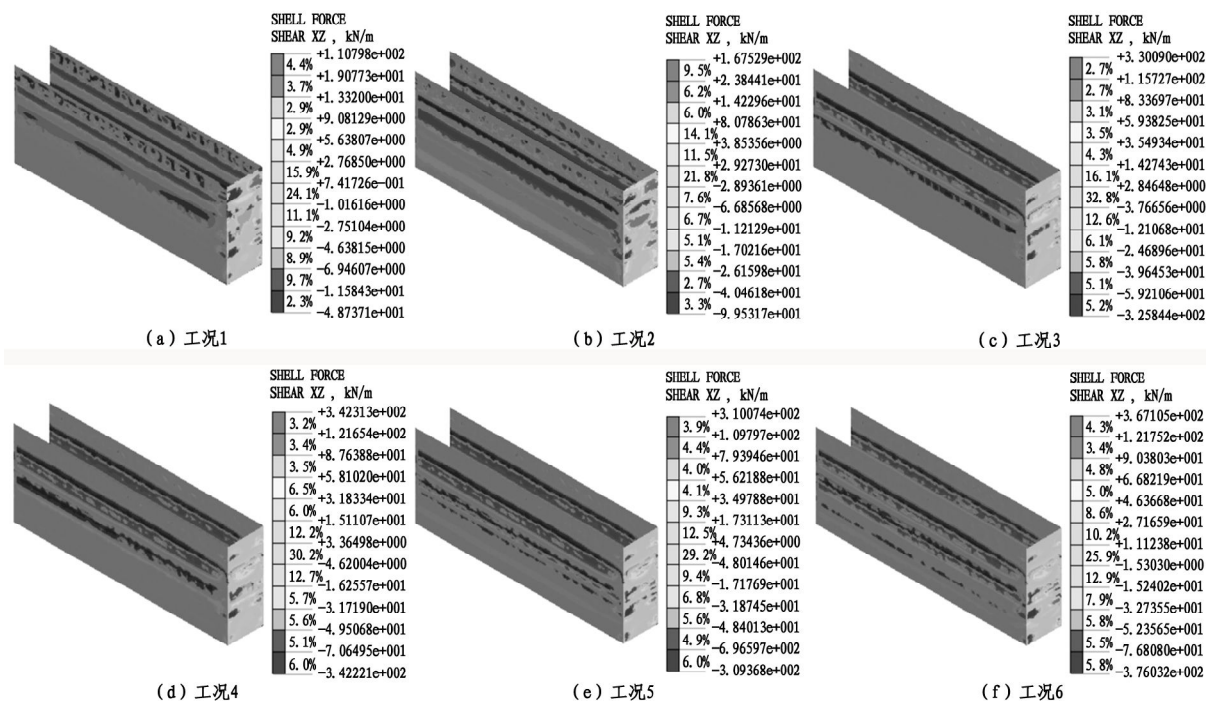


图 10 地下连续墙在 XZ 方向剪力云图

图 11 为地下连续墙在 XZ 方向剪力对比图。由图 11(a)可以看出,地下连续墙最大负剪力呈现出“先缓慢增加,后快速增加,再波动变化”的变化规律。具体来看,工况 1 时,值为 $-48.7 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,增加量为 $48.7 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。工况 2 时,值为 $-99.5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,增加量为 $51 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。工况 3 时,值为 $-325.8 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,增加量为 $226 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。工况 4 时,值为 $-342.2 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,增加量为 $16 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。工况 5 时,值为 $-309.4 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,增加量为 $-33 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。工况 6 时,值为 $-376 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,增加量为 $66.6 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。比较可知,工况 3 时剪力增加量最大,增加量为 $-325.8 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。这可能是因为在工况 3 时,开挖深度为 4 m ,且这个阶段没有设置新的内支撑进行支护,进而导致地下连续墙剪力增加

量最大。

由图 11(b)可以看出,地下连续墙最大正剪力总体上呈现出“先缓慢增加,后快速增加,再波动变化”的变化规律。具体来看,工况 1 时,值为 $110.8 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,增加量为 $110.8 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。工况 2 时,值为 $167.5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,增加量为 $56.7 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。工况 3 时,值为 $330 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,增加量为 $162.5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。工况 4 时,值为 $342.3 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,增加量为 $12.3 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。工况 5 时,值为 $310.1 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,增加量为 $-32 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。工况 6 时,值为 $367.1 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,增加量为 $57.1 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。比较可知,工况 3 时剪力增加量最大,增加量为 $162.5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。原因可能是,在这个阶段,开挖深度为 4 m ,且这个阶段没有设置新的内支撑进行支护。

综上所述,工况 3 时地下连续墙剪力增加量最大。因此,工况 3 为基坑开挖的关键,需要重视工况

3 的设计和施工,确保基坑处于安全稳定状态。

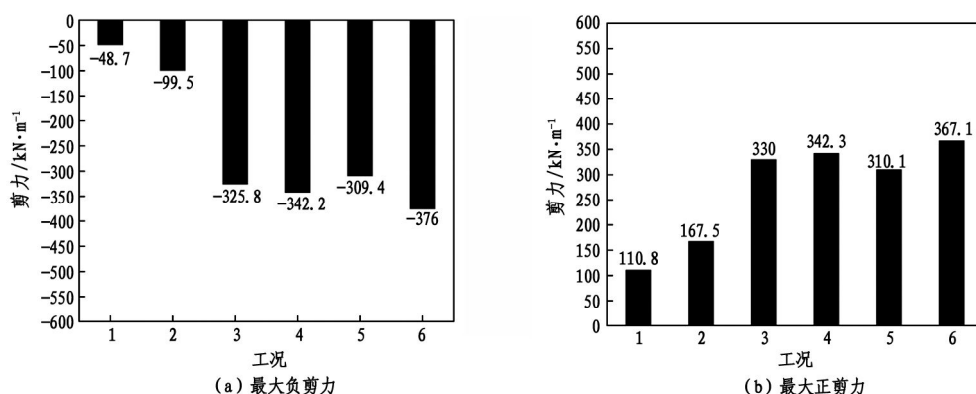


图 11 地下连续墙在 XZ 方向剪力云图

5 结论

本研究以某近接群桩深基坑开挖工程为例建立了三维有限元模型。开展了近接群桩深基坑支护结构受力及变形特性研究。主要研究结果如下:

(1) 地下连续墙的变形呈现出非对称图形的特征。随着开挖深度的不断增加,地下连续墙 Y 方向的位移总体上呈现出不断增大的趋势。开挖完成时,地下连续墙 A 和 B 的最大位移分别为 8.81 mm、-8.14 mm,且地下连续墙 A 的位移更大。

(2) 地下连续墙最大拉力出现在开挖完成时,值为 $-658.5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,最大压力出现在工况 4 时,值为 $574.8 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。随着开挖深度的不断增加,地下连续墙在 YY 方向的最大弯矩值也在不断增加。开挖完成时,最大弯矩为 $-473.02 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot \text{m}^{-1}$ 。剪力最大值都出现在开挖完成时,最大负剪力为 $-376 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,最大正剪力为 $367.1 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

(3) 工况 1 和工况 3 为基坑开挖的关键施工步骤,需要重视这两个阶段的设计、施工以及监测,确保基坑处于安全稳定状态。

参考文献:

- [1] GUO P P, GONG X N, WANG Y X, et al. Minimum cover depth estimation for underwater shield tunnels[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2021, 115.
- [2] GUO P P, GONG X N, WANG Y X, et al. Analysis of observed performance of a deep excavation straddled by shallowly buried pressurized pipelines and underneath traversed by planned tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 132.
- [3] GUO P P, GONG X N, WANG Y X, et al. Displacement

and force analyses of braced structure of deep excavation considering unsymmetrical surcharge effect[J]. Computers and Geotechnics, 2019, 113.

- [4] WANG Y X, GUO S M, GUO P P. Stability and failure probability analysis of super-large irregularly shaped deep excavation in coastal area considering spatial variability in soil properties [J]. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2024; 1 - 17.
- [5] ZHAO P, QIU Y Q, WANG Z Q, et al. Mechanical response of elevated bridge piles to adjacent deep excavation [J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 1 - 20.
- [6] 宋博文, 秦会来, 王蓉, 等. 南京地区基于地铁隧道保护要求的基坑变形控制指标[J]. 同济大学学报, 2025, 53(4): 548 - 556.
- [7] ZHAO P, QIU Y Q, WANG Z Q, et al. Influence of horizontal distance between earthmoving vehicle load and deep excavation on support structure response [J]. Buildings, 2024, 14(11): 3604.
- [8] ZHAO P, SUN Y, WANG Z Q, et al. Mechanical characteristics of deep excavation support structure with asymmetric load on ground surface [J]. Symmetry, 2024; 16(10): 1309.
- [9] 薛秀丽, 刘治珩, 曾超峰, 等. 开挖前抽水条件下基坑围挡两侧非极限土压力计算模型[J]. 岩土力学, 2024, 45(6): 1699 - 1708, 1719.
- [10] 郭景琢, 李昕昊, 程雪松, 等. 基坑斜直组合倾斜桩支护结构设计计算方法研究[J]. 土木工程学报, 2023, 56(8): 153 - 163.
- [11] 应宏伟, 熊一帆, 李冰河, 等. 软黏土基坑开挖诱发坑外地表沉降的时效解[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(10): 2041 - 2050.
- [12] 马伟亮, 李顺群, 叶茂松, 等. 基坑开挖对邻近隧道变形影响的解析方法研究[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(2): 446 - 455.

(下转 97 页)

侏罗白垩系岩层冻结孔偏斜对冻结温度场的影响分析

黄俊博¹, 荣传新^{1*}, 王彬², 吴冬²

(1. 安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001;

2. 安徽理工大学 矿山地下工程教育部工程研究中心, 安徽 淮南 232001)

摘要:以侏罗系-白垩系复合地层为研究对象,重点探讨了冻结孔偏斜对温度场分布的影响规律及其随冻结深度变化的特征。基于现场实测数据,使用 COMSOL Multiphysics 有限元软件构建了二维冻结温度场的数值模拟模型,系统分析了不同冻结深度条件下,冻结管偏斜角度和偏斜方向对冻结交圈时间的综合影响。研究表明:随着冻结层位的加深,冻结孔偏斜引起的孔位偏差逐渐累积,导致最大孔间距显著增大,进而使冻结交圈时间延长1-3周。具体而言,冻结管间距每增加0.1 m,交圈时间将推迟1-3天。此外,冻结孔间距的增大会显著改变交圈区域温度场的分布特征,导致冻结锋面发展不均匀,可能引发局部冻结壁厚度变薄或冻结不连续等问题,从而对冻结壁的整体稳定性和密封性产生不利影响。

关键词:人工地层冻结法; 水热耦合; 冻结温度场; 数值计算; 冻结壁

中图分类号: TD265.3

文献标识码: A

文章编号: 2095-297X(2025)05-0080-07

Analysis of Influence of Freezing Hole Deflection on Temperature Field in Jurassic Cretaceous Strata

HUANG Junbo¹, RONG Chuanxin^{1*}, WANG Bin², WU Dong²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan, 232001, Anhui;

2. Engineering Research Center of Mine Underground Engineering, Ministry of Education,
Anhui University of Science and Technology, Huainan, 232001, Anhui)

Abstract: It focuses on the Jurassic-Cretaceous composite strata in this study, aiming to investigate the influence of freezing hole deviation on the distribution characteristics of the temperature field and its variation with freezing depth. Based on field-measured data, a two-dimensional numerical model of the freezing temperature field was established by using COMSOL Multiphysics finite element software. The model systematically analyzed the comprehensive effects of freezing pipe deviation angles and deviation directions on the closure time of the freezing circle under different freezing depths. The research results indicated that as the freezing depth increases, the cumulative deviation of freezing hole positions leads to a significant increase in the maximum hole spacing, thereby extending the closure time of the freezing circle by 1-3 weeks. Specifically, for every 0.1 m increase in freezing pipe spacing, the closure time is delayed by 1-3 days. Furthermore, the increase in freezing hole spacing significantly alters the temperature field distribution characteristics in the closure region, resulting in uneven development of the freezing front. This may cause localized thinning or discontinuity of the frozen wall, adversely affecting its overall stability and sealing performance.

收稿日期: 2025-04-23 * 通讯联系人

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878005)。

作者简介: 黄俊博(2001-), 男, 安徽宣城人, 硕士研究生; 荣传新(1968-), 男, 安徽六安人, 教授, 博士, 博士生导师。E-mail: chxiong@ aust. edu. cn

Key words: artificial ground freezing method; hydrothermal coupling; freezing temperature field; numerical calculation; freezing wall

人工地层冻结法^[1-3]是一种广泛应用于隧道工程、矿井建设、地铁施工及地下空间开发中的临时支护技术。其基本原理是通过埋设冷冻管并循环低温冷媒(如液氮或低温盐水),使周围土体中的孔隙水冻结,形成具有一定强度和密封性的冻土帷幕,从而提供稳定的支护结构并阻隔地下水渗流。该技术因其适应性强、环境影响小、支护效果可靠等优势,在复杂地质条件下的深基坑、盾构始发与接收、富水地层加固等工程中得到了广泛应用。然而,在冻结法施工过程中,冻结管的布设精度直接影响冻结温度场的分布特征。由于地质条件的不均匀性、钻孔施工误差或设备因素,冻结孔的实际轨迹往往与设计位置存在偏差,即发生冻结孔偏斜^[4-5]。这种偏斜可能导致冻结管间距不均,局部冷量分布失衡,进而影响冻结温度场的扩展规律,甚至导致冻土帷幕交圈时间延迟、局部未冻区或薄弱带形成,严重时可能引发突水涌砂等工程事故。冻结温度场的分布规律是人工冻结技术的核心问题,自20世纪50年代以来,国内外学者基于热传导理论、数值模拟和实验方法,对冻结温度场的解析解、数值解及工程应用进行了广泛研究。早期研究多基于稳态或准稳态假设,采用 Stefan 方程描述相变界面的移动规律,随着计算技术的发展,有限元法(FEM)、有限差分法(FDM)及边界元法(BEM)被广泛应用于冻结温度场模拟。近年来,部分学者开始关注冻结孔偏斜对冻结效果的影响,主要集中在以下几个方面:杨青等^[6]通过数值模拟分析了不同偏斜角度对冻结壁交圈时间和温度分布的影响;孙冠东等^[7]结合现场数据与 COMSOL 模拟,研究了群孔偏斜对温度场的不均匀性影响;崔会鹏^[8]提出了基于偏斜监测的动态调整方法,优化冻结管布置;王申杰^[9]针对深土冻结工程,分析了偏斜导致的冻结壁厚度差异;孙钦帅^[10]讨论了冻结孔施工误差(包括偏斜)对冻结效果的影响;王衍森等^[11]结合淮北矿区-800 m 深冻结工程,建立了偏斜-温度场量化关系模型。冻结温度场的均匀性和扩展速度直接关系到冻土帷幕的强度、厚度及封闭性,是评估冻结工程效果的关键指标。本研究基于热力学理论^[12],结合数值模拟^[13]与实验研究,探讨冻结孔偏斜角度^[14]、偏斜方向及土层特性对冻结温度场时空演化规律的影响,旨在揭示偏斜条件下温度场的畸变特征及其对冻土帷幕形成的不利效应,为工程中的冻结孔纠偏设计和施

工控制提供理论依据,进而提升人工冻结技术的可靠性与安全性。

1 工程背景

1.1 工程概况

泊江海子矿井位于内蒙古自治区鄂尔多斯市东胜区泊尔江海子镇,其新建西风井井筒位于井田西部的西风井工业场地内。井筒深度为 703.5 m,井筒冻结深度为 610.0 m,井筒净直径为 6.0 m。

1.2 地层概况

根据井筒检查孔钻探得到的数据,井筒所穿越的地层自上而下分为第四系、白垩系、侏罗系中统以及侏罗系中下统的延安组。其中侏罗系中下统延安组地层为含煤层地层,厚度为 134.55 m。主要岩性为深灰色泥岩、砂质泥岩、炭质泥岩和中、粗、细、粉粒砂岩,中间夹黑色薄层煤线,揭露岩层厚度为 8.97 m。

1.3 水文地质概况

根据井筒检查孔钻孔资料可知,白垩系含水岩组(I含)虽然富水性较弱,但其厚度较大,整体厚度达到 308 m,并且与上部的第四系含水层之间没有隔水层。侏罗系中统含水岩组(II含)同样富水性较弱,其含水层主要集中在 473-614 m 之间,厚度较大且岩性较差,与白垩系之间存在一定的砂质泥岩隔水层,具备一定的隔水作用。侏罗系延安组含水岩组(III含)也表现出富水性弱的特征,并且与上部中统之间有一层相对稳定的隔水层。井筒主要技术特征表如表 1 所示。

表 1 井筒主要技术特征表 m

项目	西翼回风井
井口标高	+1417
井筒深度	702.5
井筒净直径	6.0
冻结深度	615
最大掘进荒直径	8.6

2 冻结方案设计

2.1 冻结孔、水文孔、测温孔设计

为确保井筒冻结壁具备足够的强度和厚度,保障井筒安全顺利开挖,本工程将积极冻结期的盐水

温度严格控制在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内。泊江海子西风井在水流上游正对水流方向 45° 范围内增设 5 个辅助冻结孔,以增强冻结效果并优化冻结壁的均匀性。水文孔 S1、S2 布置深度分别为 150 m、265 m,根据现场测量数据,其中 S1 水文孔在冻结第 25 d 开始冒水,S2 水文孔在第 27 d 开始冒水。150 m 水文孔冒水时,C1 测温孔温度为 $-0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,C2 测温孔温度为 $-1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,盐水温度为 $-31.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。265 m 水文孔冒水时,C1 测温孔温度为 $-1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,C2 测温孔温度为 $-0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,盐水温度为 $-31.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。冻结孔的主要设计参数见表 2,冻结孔平面布置图见图 1。

表 2 冻结孔设计参数

冻结孔类型	孔深/m	圈径/m	孔数/个	开孔间距/m
主排孔	615.0	13.8	32	1.35
辅助孔	240.0	17.2	5	1.69
防偏帮孔	40.0	10.4	28	1.16

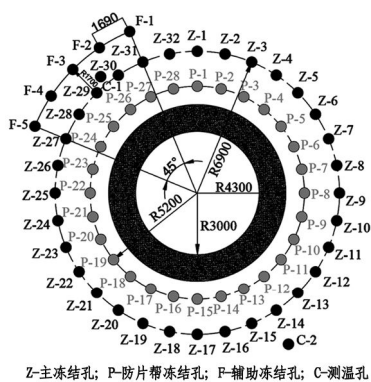


图 1 冻结孔平面布置图

2.2 各层位冻结孔最大间距

基于冻结孔偏斜实测数据,按不同深度分段统计并计算相邻冻结孔的实际成孔间距。其中,主排孔与辅助孔的间距分布情况详见表 3、表 4。

表 3 主排孔各冻结层位最大孔间距位置表

层位/m	最大孔间距/m	孔间距编号
60	1.975	Z15 ~ Z16
120	2.213	Z7 ~ Z8
180	2.382	Z7 ~ Z8
240	2.177	Z32 ~ Z1
300	2.571	Z22 ~ Z23
360	2.427	Z5 ~ Z6
420	2.277	Z23 ~ Z24
480	2.593	Z23 ~ Z24
540	2.625	Z21 ~ Z22

600	3.053	Z1 ~ Z2
-----	-------	---------

表 4 辅助孔各冻结层位最大孔间距位置表

层位/m	最大孔间距/m	孔间距编号
60	2.107	F3 ~ F2
120	2.522	F3 ~ F2
180	2.567	F3 ~ F2
240	2.536	F5 ~ F4
300	2.353	F5 ~ F4
360	2.326	F3 ~ F2
420	2.493	F3 ~ F2
480	2.836	F3 ~ F2
540	2.969	F3 ~ F2
600	3.187	F3 ~ F2

3 温度场数值模拟

本研究依托 COMSOL Multiphysics 平台开展冻结温度场^[15-17]数值模拟研究。该软件的多场耦合求解器支持热传导、对流换热与渗流过程的同步解析,通过参数化建模可精确表征相变过程中多物理场的非线性耦合关系。研究整合冻结孔空间定位参数与现场实测温度数据,构建了井筒冻结壁二维热-流耦合数值计算模型,有效揭示了冻结壁温度场的时空演化特征及其发展动力学行为,为工程实践提供了可靠的量化预测工具。

3.1 冻结壁温度场基本理论

人工地层冻结技术涉及具有复杂边界条件的不稳定传热过程,其温度场解析需综合考量相变潜热释放、动态相变界面迁移及内部热源效应等多重耦合机制。鉴于冻结壁水平向特征尺度远小于垂向延伸维度,且轴向热传导贡献度相对有限,工程实践中常将该三维传热问题简化为二维平面模型进行数值求解。本研究通过构建超静定计算域,设定岩土介质为各向同性均质体,并基于多物理场耦合理论,建立渗流场-温度场^[18-21]相互作用下的多孔介质传热控制方程,其数学描述如下:

$$C_{ef} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_i L \frac{\partial \theta_l}{\partial t} + \nabla [-K_{ef} \nabla T + \rho_i] \quad (1)$$

式中: T 为温度; t 为时间; ρ 为密度; C 为比热; i, l 分别代表固体冰和水; L 为相变潜热; C_{ef} 为等效比热; K_{ef} 为等效导热系数。

根据 Darcy 定律,空隙中的渗流速度可表示为:

$$\vec{V} = \frac{k}{\eta} \nabla (p + \rho_i gH) \quad (2)$$

式中: $\vec{V}$ 为多孔介质中的水流速度; k 为渗透率; η 为

水的粘滞系数; p 为渗透压力; g 为重力加速度, H 为重力水头高度。

在饱和多孔介质冻结过程中,渗透率可以表示为关于温度的函数:

$$k_r = \sqrt{w(T)} [1 - (1 - w(T)^{1/m})^m]^2 \quad (3)$$

式中: m 为材料常数。

3.2 边界条件

水流入口的温度边界设定为上游流入的温度;冻结管壁的温度边界为冻结管外壁的实测温度;水流出口的温度边界设定为对流通量。边界条件可表示为:

$$n_d \cdot (-k \nabla T)|_{x=a_2} = 0 \quad (4)$$

式中: a_2 表示出口边界处的横坐标, n_d 表示水流出口处的内法线方向矢量。

在不考虑其他边界的传热效应时,其余边界可设定为绝热边界,边界条件表示为:

$$-n \cdot (-k \nabla T)|_{y=b_1 b_2} = 0 \quad (5)$$

式中: b_1, b_2 表示边界的纵坐标, n 表示边界的内法线方向矢量。

若考虑其他边界的传热效应,则可将其设定为温度边界:

$$T = T_i \quad (6)$$

式中: T_i 表示随时间变化的温度。

为了在初始状态下形成稳定的定向流速,初始条件设定为:

$$p|_{t=0} = p_0 \quad (7)$$

式中: p_0 表示土体的初始压力分布,可通过渗流速度公式求得。

出入口均设置为固定压力边界,按初始压力分布对应取值,其余边界设置为无流动边界:

$$-n \cdot (up)|_{dse} = 0 \quad (8)$$

式中: n 表示边界的内法线方向矢量。

3.3 热物理计算参数取值

泊江海子西风井土体深度20~97 m为细粒、中粒砂岩,120~190 m为含砾粗砂岩,200~300 m为砾岩,320~415 m为泥岩,430~500 m为粉砂岩,526~607 m为细、粗粒砂岩。根据冻土物理力学试验报告,可以得到土体热物理参数如表5所示。

表5 土体热物理参数

土体深度 /m	密度 /kg · m ⁻³	导热系数/W · m ⁻¹ · K ⁻¹		比热容 /kJ · kg ⁻¹ · K ⁻¹	冻结温度 /℃	相变潜热 /kJ · kg ⁻¹
		常温(20℃)	低温(-10℃)			
20.13~97.36	1.957	1.91	2.11	1.26	-0.9	42.5
120.54~190.62	2.233	1.81	2.23	1.30	-1.0	32.1
200.13~300.74	2.035	1.75	2.21	1.34	-1.1	36.8
320.86~415.40	2.118	1.87	2.17	1.28	-1.0	34.2
430.54~500.68	2.035	1.83	2.01	1.25	-0.8	37.9
526.18~607.10	2.156	1.95	2.34	1.35	-1.1	32.8

3.4 冻结温度场的计算模型

选取边长为34 m的正方形区域作为模型的计算域,并采用三角网格离散化处理。为提高局部计算精度,对冻结管周边土体进行了网格加密处理;同时,为平衡计算效率与精度需求,在远离冻结管且温度梯度平缓的区域采用稀疏网格划分策略。最终模型共生成9512个三角单元,包含156个顶点单元与252个边界单元,网格最大尺寸为2000 mm,最小尺寸为136 mm。图2直观展示了该模型的网格分布特征及疏密过渡规律。

3.5 数值模型合理性验证

结合图3所示的三维温度变化云图(数据来源于西风井7~615 m深部土层中布设的两组测温孔),可观察到监测点温度响应曲线平滑连续,降温速率及幅度均处于工程设计允许的阈值内。

图4对比了180 m、360 m、540 m三个层位中2个测温孔的模拟数据与实测数据。结果显示,模拟值与实测值之间的偏差均在2.5℃以内,两者吻合度较高。这表明所建立的数值模型能够准确反映泊江海子矿西风井冻结温度场的分布规律,验证了模型的有效性和适用性^[22]。

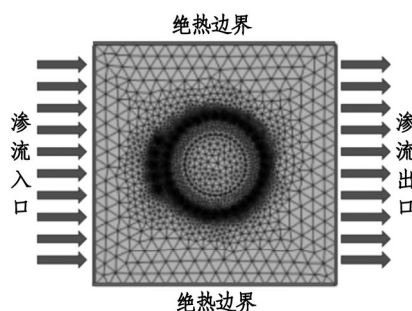


图2 模型网格划分(俯视图)

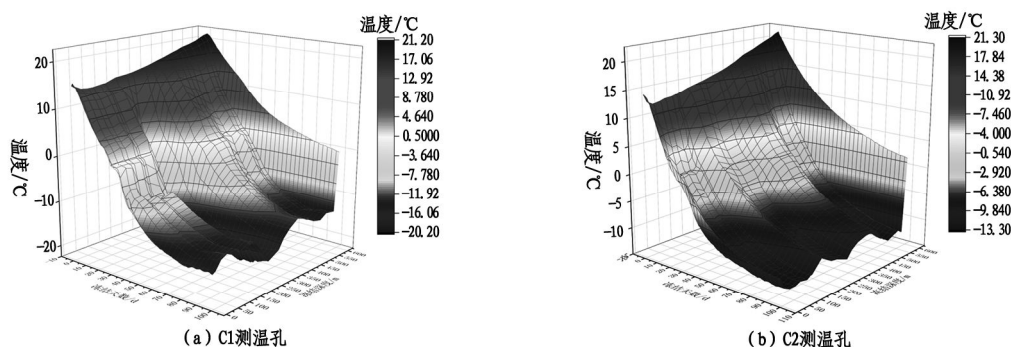


图 3 测温孔实测温度变化图

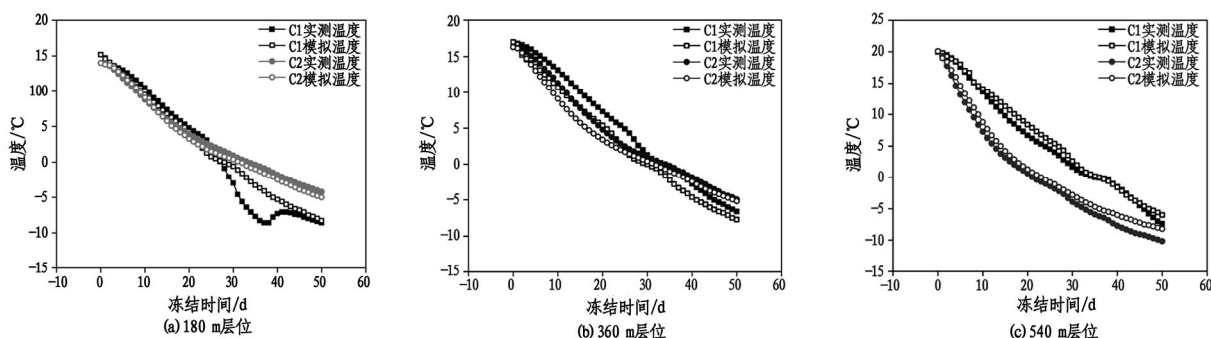


图 4 实测模拟温度数据对比

4 冻结壁交圈时间分析

冻结壁交圈时间是冻结温度场分析的关键控制参数,其标志着土体中初步形成连续封闭的冻结止水帷幕体系。从热力学角度而言,交圈现象主要表现为相邻冻结管形成的低温柱状体在径向扩展过程中相互连接,形成稳定的冻结环状结构。本研究采用 COMSOL Multiphysics 多物理场耦合数值模拟软件,对井筒 60~600 m 深度范围内的冻结温度场进行二维数值计算,其详细数值计算结果如图 5 和图 6 所示。通过建立热-流-固耦合模型,精确模拟冻结壁交圈过程中的温度场演化规律及相变特征。

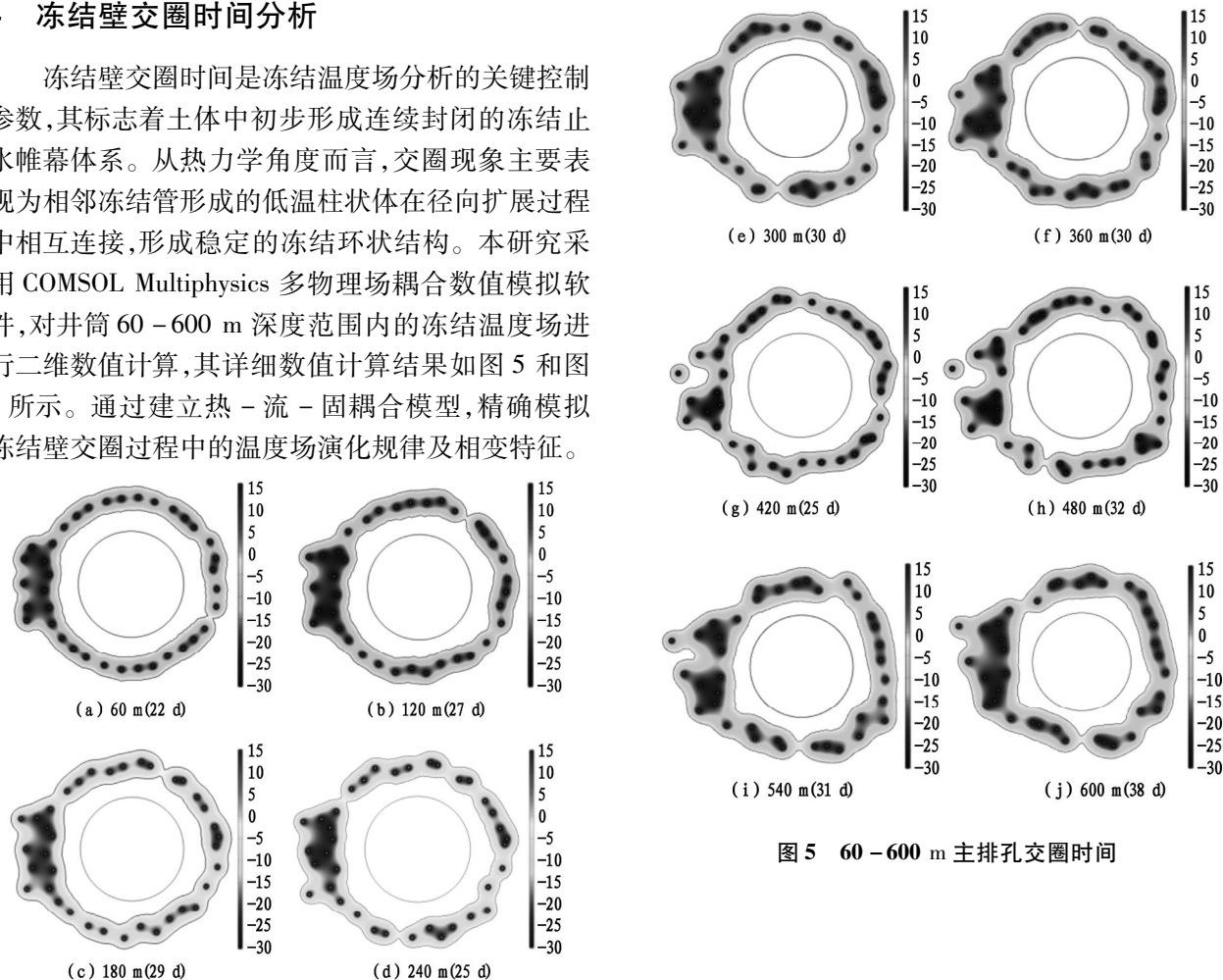


图 5 60~600 m 主排孔交圈时间

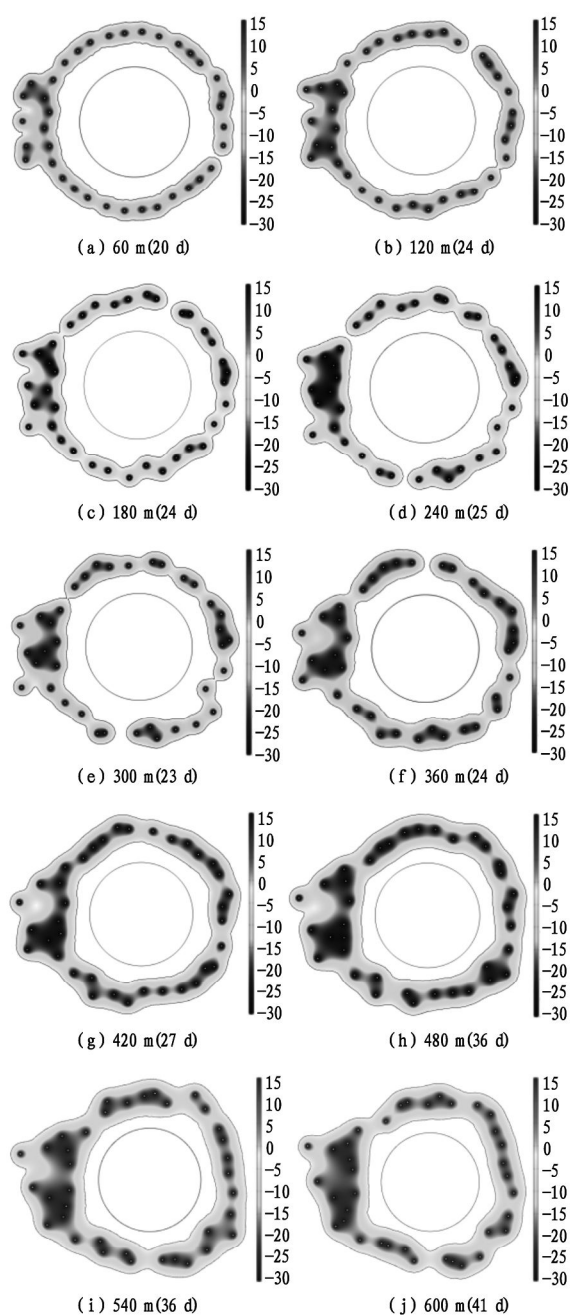


图6 60~600 m辅助孔交圈时间

由图5和图6可知,在冻结管发生偏斜的情况下,冻结壁温度场的形成过程呈现出显著的紊乱特征,其扩展方向表现出明显的非规则性。究其原因,冻结管的偏斜直接改变了冷量在土层中的传递路径,导致冷量无法实现均匀的径向扩散,进而引发冻结壁发育的空间不对称性。这种不对称性在冻结初期阶段尤为突出,具体表现为:在偏斜方向上的局部区域因冷量集中而形成快速冻结区,其冻结速度可达正常区域的1.5~2倍;而在背向偏斜区域则因冷量衰减而形成滞后冻结区,这种差异性导致冻结壁厚度分布的标准偏差增大至25%~35%。

从热力学传递机制来看,间距较近的冻结管

(≤ 1.3 m)由于冷量传递路径较短,热流密度集中,可实现冻结锋面的快速交圈,若岩性为细粒、中粒砂岩,其冻结壁扩展速率可达35~50 mm/d。相比之下,间距较远(≥ 1.8 m)的相邻冻结管因冷量传递路径延长,热流密度呈指数衰减,若岩性为砾岩、粉砂岩,其冻结锋面扩展速率降至15~30 mm/d,交圈时间延长。这种冻结交圈时间的显著差异导致冻结壁整体发育呈现明显的时空不均衡性,局部区域已形成强度稳定的冻结壁,而滞后区域仍处于冻结初期阶段,这种强度差异可能引发冻结壁的应力集中现象,增加工程风险。冻结壁交圈时间如表6所示。

表6 冻结壁交圈时间

冻结层位/m	主排孔交圈时间/d	辅助孔交圈时间/d
60	22	20
120	27	24
180	29	24
240	25	25
300	30	23
360	30	24
420	25	27
480	32	36
540	31	36
600	38	41

在泊江海子西风井冻结过程中,随着开挖层位的加深,冻结孔偏斜现象逐渐加剧。由于偏斜累积效应,深部冻结孔的实际间距较设计间距明显增大,这种偏差不仅改变了冻结管的空间分布,还直接影响了冻结壁的温度场特性和冻结过程的整体进度。

具体而言,主排孔的设计间距为1.35 m,但在深部冻结区域,受偏斜影响,其实际间距增大至3.053 m,导致冻结壁的交圈时间显著延长,最短交圈时间为22 d,最长则达到了38 d。同样,辅助孔的设计间距为1.16 m,而深部实际间距增大至3.187 m,相应的交圈时间范围也有所拉长,最短为20 d,最长可达41 d。

进一步分析发现,随着冻结深度的增加,冻结管间距的扩大对交圈时间产生了明显的延迟效应。数据表明,冻结管间距每增加0.1 m,交圈时间通常会推迟1~3 d。这一趋势表明,冻结孔偏斜不仅影响冻结壁的均匀性,还可能导致冻结壁局部薄弱区域的形成,进而影响施工安全和后续掘进工作的顺利进行。因此,在深部冻结施工中,如何有效控制冻结

孔偏斜、优化孔间距布置及调整冻结参数,成为确保冻结壁按期交圈、提高冻结效果的关键技术问题。

5 结论

以泊江海子矿西风井冻结实测数据为基础,借助有限元软件 COMSOL Multi-physics 构建考虑冻结管偏斜的模型,分析了井筒 60 – 600 m 二维地层的冻结温度场交圈时间发展规律,得到以下结论:

当冻结管发生偏斜时,由于冻结管间距不均匀,相邻冻结管的冻结锋面接触时间存在差异,且偏斜率越大,管间距越大,交圈时间相应延迟。

为减小冻结管偏斜及其对孔间距和交圈时间的影响,可优化冻结管的布置方式,调整孔间距,或采用加固措施(如导向装置或增强管体刚度)来提升施工精度。由于孔间距的增大,冻结管间的热交换效率降低,使得冻结壁的交圈时间推迟,这可能影响工程进度,并增加施工成本。

随着冻结深度的增大,冻结管间距相较于标准开孔间距增大 0.6 – 2.0 m,交圈时间随着冻结管间距增大而推迟,冻结管间距每增加 0.1 m,交圈时间通常会推迟 1 – 3 d。

参考文献:

- [1] 梁沈伟. 富水砂层斜井三维冻结温度场时空演化规律[D]. 淮南:安徽理工大学,2024.
- [2] 鲁先龙,陈湘生,陈曦. 人工地层冻结法风险预控[J]. 岩土工程学报,2021,43(12):2308 – 2314.
- [3] 龙伟,荣传新,段寅,等. 拱北隧道管幕冻结法温度场数值计算[J]. 煤田地质与勘探,2020,48(3):160 – 168.
- [4] 王鹏,高铭,骆方圆,等. 冻结管偏斜对煤矿井冻结温度场发展影响[J]. 蚌埠学院学报,2024,13(5):90 – 94.
- [5] 李培涛,李典庆,牛会峰,等. 考虑冻结管偏斜与土体导热系数不确定性的隧道人工冻结法数值模拟[J]. 武汉大学学报(工学版),2022,55(5):435 – 442.
- [6] 杨青,荣传新,黎明镜,等. 深厚砂黏分界处不同工况下多圈管冻结温度场特性[J]. 煤田地质与勘探,2020,48(6):224 – 232.
- [7] 焦华喆,孙冠东,陈新明,等. 深厚冲积层多圈孔冻结壁温度场发展研究[J]. 煤炭学报,2018,43(S2):443 – 449.
- [8] 崔会鹏. 冻结钻孔偏斜预防及控斜处理措施[J]. 矿业装备,2021(6):138 – 139.
- [9] 王申杰. 深立井冻结管偏斜对温度场及冻结压力的影响研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2017.
- [10] 孙钦帅. 冻结管偏斜作用下的冻结效果分析[J]. 建井技术,2023,44(1):73 – 76.
- [11] 王衍森,文凯. 深厚表土中冻结壁与井壁相互作用的数值分析[J]. 岩土工程学报,2014,36(6):1142 – 1146.
- [12] 雷大伟. 土体冻结水热力耦合理论研究及应用[D]. 徐州:中国矿业大学,2021.
- [13] 徐刘逊,蔡海兵,曹广勇,等. 白垩系地层深立井冻结壁形成规律数值模拟[J]. 煤炭技术,2019,38(3):20 – 23.
- [14] 郭伟,王亚,王小刚,等. 冻结管倾斜角度对温度场变化规律的影响分析[J]. 交通节能与环保,2021,17(6):147 – 154.
- [15] 荣隽锋,王彬,梁沈伟. 富水砂层斜井明挖段三维冻结温度场时空演化规律研究[J]. 煤炭工程,2024,56(8):204 – 212.
- [16] 张潮潮,崔猛. 复杂地质条件下地铁联络通道冻结工程冻土温度场变化规律[J]. 城市轨道交通研究,2023,26(9):150 – 154,159.
- [17] 夏才初,方杭楠,赵昊楠,等. 富水软土地层联络通道冻结温度场分布规律[J]. 地下空间与工程学报,2023,19(4):1339 – 1350.
- [18] 程桦,王彬,赵久良,等. 富水砂卵石地层冻结壁缺口成因及弥合技术研究[J]. 煤炭工程,2021,53(10):1 – 8.
- [19] 杨哲,蔡海兵,王彬,等. 高流速富水砂层地铁隧道液氮冻结温度场演化规律研究[J]. 铁道科学与工程学报,2025,22(1):307 – 319.
- [20] 程桦,林键,王彬,等. 饱和砂层渗流冻结水热耦合模型与试验验证[J]. 科学技术与工程,2018,18(12):38 – 44.
- [21] 刘政. 地铁隧道水平冻结施工期渗流地层冻胀规律研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2020.
- [22] 吴冬,荣传新,龙伟,等. 基于差异冻结技术的深厚冲积层三维冻结温度场数值计算分析[J]. 冰川冻土,2024,46(4):1423 – 1439.

责任编辑:刘娟

热传导方程数值解的高精度计算及可视化

陈大伟*, 斯小琴

(合肥城市学院 教务处, 安徽 合肥 238076)

摘要:基于有限差分法结合加权六点隐式格式,从数值精度和计算效率的角度出发,对热传导方程进行高精度数值求解。通过对比不同步长比和加权因子下的数值解与精确解的误差,系统分析了误差变化规律,并借助 Origin 软件对结果进行可视化处理,从而显著增强了结果的直观性和可解释性。研究结果表明,减小步长比和优化加权因子能够显著提高数值解的精度,而可视化技术则有效提升了结果的呈现效果。研究不仅为热传导方程的高精度数值求解提供了新的方法和视角,也为相关领域的实际应用提供了高效、便捷的工具。

关键词:热传导方程;数值解;差分法;误差值

中图分类号:O241.82

文献标识码:A

文章编号:2095-297X(2025)05-0087-05

High Precision Calculation and Visualization of Numerical Solutions for Heat Conduction Equations

CHEN Dawei*, SI Xiaoqin

(Academic Affairs Office, City University of Hefei, Hefei, 238076, Anhui)

Abstract: Based on the finite difference method in conjunction with the weighted six-point implicit scheme, it performs high-precision numerical solving of the heat conduction equation from the perspective of numerical accuracy and computational efficiency. It systematically evaluates the changing rules of error by comparing the error of numerical solutions with exact solutions across various step ratios and weighting factors. Additionally, visualization techniques implemented using Origin software significantly improve the intuitiveness and interpretability of the results. The findings demonstrate that reducing the step ratio and optimizing the weighting factor markedly enhance the accuracy of numerical solutions, while visualization techniques effectively elevate the presentation quality. The study not only introduces novel approaches and perspectives for high-precision numerical solutions of the heat conduction equation but also provides efficient and convenient tools for applications in related fields.

Key words: heat conduction equation; numerical solution; difference method; error value

热传导是指热量从温度较高的部分沿着物体传递到温度较低的部分,或是从系统的一部分传递到另一部分的现象。其本质是由于大量物质分子的热运动互相碰撞,导致系统内存在温度差,从而使能量从高温区域传递到低温区域,或从高温物体传递到低温物体^[1-2]。

热传导过程通常通过偏微分方程来描述,借助

数学模型可以表征一个区域内的温度分布以及温度随时间的变化规律^[3-4]。这些数学模型在实际应用中极为广泛,其研究不仅有助于深入理解热传导现象及其基本规律,还能为实际应用提供理论支持。例如,将图像修复类比为热传导过程,可以实现低计算复杂度下的有效图像结构层修复^[5];通过求解泊松热传导方程重构图像,生成矢量化的彩色图

收稿日期:2025-01-15 * 通讯联系人

基金项目:安徽省高校优秀青年人才支持计划一般项目(gxyq2022186);安徽省高校自然科学研究重点项目(2023AH053238)。

作者简介:陈大伟(1985-),男,安徽巢湖人,副教授,硕士。E-mail:sxq0796@163.com

像^[6];利用一维稳态传热模型确定假人皮肤外侧的温度变化^[7];以及通过热传导方程减少散斑条纹图中的噪声^[8]等。

为了高效求解热传导方程,科研工作者进行了大量研究,特别是针对各种定解条件下热传导方程的求解。相关方法包括利用人工神经网络获得偏微分方程的解析形式解^[9];采用半离散方法求解热传导方程^[10];以及通过数值求解代替积分求解,获得二维平面内各点的稳定温度^[11]等。针对热传导方程的求解,研究者们提出了多种解析解^[12-13]和数值解^[14-16]的方法。其中,解析解方法仅适用于少数简单问题,而数值解方法则适用于大量具有实际意义的热传导问题。

本研究基于 Crank-Nicolson 算法,结合基本办公软件 Excel 进行迭代计算^[17-18],并利用 Origin 软件进行图形拟合,实现了热传导方程的高精度数值求解及其可视化。Crank-Nicolson 算法对隐式格式

$$(1+2r\theta)u_j^{k+1} = r(1-\theta)(u_{j-1}^k + u_{j+1}^k) + r\theta(u_{j-1}^{k+1} + u_{j+1}^{k+1}) + [1-2r(1-\theta)]u_j^k \quad (1)$$

其中 $r = \frac{\tau}{h^2}$ 为步长比(或网格比), τ 为时间步长, h 为空间步长; θ 为加权因子,且 $0 \leq \theta \leq 1$ 。当 $0 \leq \theta < \frac{1}{2}$ 时为条件稳定,即 $R \leq \frac{1}{2(1-2\theta)}$,而当 $\frac{1}{2} \leq \theta \leq 1$ 时为无条件稳定,此时 $r < \infty$ 。

当 $\theta = 0$ 时,加权六点格式为古典显式格式,即

$$u_j^{k+1} = ru_{j-1}^k + (1-2r)u_j^k + ru_{j+1}^k \quad (2)$$

古典显式格式计算简单、快捷,但其稳定性受限于步长比,要求满足特定条件 $r \leq \frac{1}{2}$,其截断误差

$$(1+r)u_j^{k+1} - \frac{1}{2}r(u_{j-1}^{k+1} + u_{j+1}^{k+1}) = (1-r)u_j^k + \frac{1}{2}r(u_{j-1}^k + u_{j+1}^k) \quad (4)$$

Crank-Nicolson 隐式格式对步长比无限制,无条件稳定。因此,在计算时可适当增大步长以减少计算量,但在每一时间层需求解一线性代数方程组,截断误差阶^[19]为 $O(\tau^2 + h^2)$ 。

对差分格式(1)的截断误差进行分析可知,其时间方向的截断误差为二阶,空间方向的截断误差为四阶。因此,当特定条件满足 $\theta = \frac{1}{2} - \frac{1}{12r}$ 时,截断误差的阶为 $O(\tau^2 + h^2)$ ^[26]。

2 数值模拟结果及分析

2.1 数值实例及离散化

考虑长度为 1 m 的匀质导热体,其两端温度恒定为 0 °C,初始时刻的温度分布为 $u(x,0) = \sin \pi x$,本研究旨在考察该导热体上温度的分布情况。其热

进行了改进和优化,与 Excel 的迭代功能相结合,避免了复杂的计算机编程和繁琐的热传导方程求解过程,为实际问题的解决提供了便利。通过 Origin 软件将数值结果模拟成图形,使结果更加直观、形象和清晰。

1 思想与方法

求解热传导方程数值解的常用方法是有限差分法^[19-21]。该方法通过将求解域离散划为差分网格,以有限个网格节点代替连续的求解域。具体而言,利用 Taylor 级数展开等方法,以离散网格节点上的函数值的差商代替控制方程中的导数,从而建立以网格节点值为未知数的代数方程组。

加权六点隐式格式^[22-25]是一种特殊的差分格式。以一维常系数热传导方程为例(取 $a=1$),其差分方程为:

$$\text{阶}^{[19]} \text{为 } O(\tau + h^2)。$$

当 $\theta = 1$ 时,加权六点格式为古典隐式格式,即

$$-ru_{j-1}^{k+1} + (1+2r)u_j^{k+1} - ru_{j+1}^{k+1} = u_j^k \quad (3)$$

古典隐式差分格式的计算复杂度高于显式格式,但其稳定性条件对步长比的限制较为宽松,且格式本身绝对稳定,其截断误差阶^[19]与古典显式格式相同,也为 $O(\tau + h^2)$ 。

当加权因子取特定值 $\theta = \frac{1}{2}$ 时,加权六点格式

即为 Crank-Nicolson 隐式差分格式,其表达式为:

传导方程可表示为下列一维的定解问题:

$$\begin{cases} \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2}, (0 < x \leq 1, 0 < t \leq 0.5) \\ u(x,0) = \sin \pi x, (0 \leq x \leq 1) \\ u(0,t) = u(1,t) = 0, (0 \leq t \leq 0.5) \end{cases} \quad (5)$$

其中 $u(x,t)$ 表示导热体上 t 时刻 x 处的温度,该热传导方程的精确解为

$$u(x,t) = e^{-\pi^2 t} \sin \pi x$$

选取空间步长 $h = \frac{1}{m}$ 和时间步长 $\tau = \frac{0.5}{n}$ (m 和

n 均为正整数),即用 2 族平行直线 $x_j = jh$ ($j=0,1,\dots,m$ 和 $t_k = k\tau$ ($k=0,1,\dots,n$)) 将空间区间 $[0,1]$ 和时间区间 $[0,0.5]$ 划分成一个 $m \times n$ 的矩形网格,网格节点记为 (x_j, t_k) 。记 $u_j^k = u(x_j, t_k)$ 表示导热体在

节点 (j, k) 处的温度。由初始条件和边界条件可得:
 $u_j^0 = u(x_j, 0) = \sin x_j, u_0^k = u_1^k = 0$ 。

引入误差 $e = |\text{精确解} - \text{数值解}| = |u - U|$, 其均方根误差为 $\|e^k\|_2 = \|u^k - U^k\|_2 = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m [u(x_j, t_k) - U(x_j, t_k)]^2}$ 。本研究考察了不同网格比下各种差分格式的误差变化情况, 并在相同网格比下寻找最优的加权因子值, 以实现高精度数值解。

2.2 模拟结果及分析

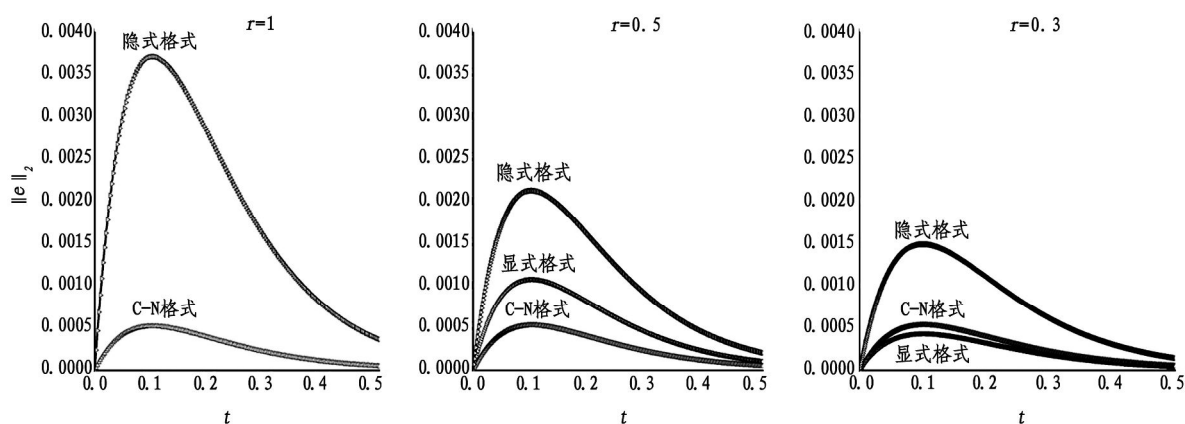


图1 不同网格比下($h=0.05$)各种差分格式的误差 $\|e\|_2$

从图1可以看出, 步长比 r 越小, 数值解的精度越高, 误差 $\|e\|_2$ 越小。其中, 隐式格式的误差 $\|e\|_2$ 最大, 而 Crank-Nicolson 差分格式的误差受步长比 r 的影响最小。显式格式在步长比 $r \leq \frac{1}{2}$ 的稳定条件下, 误差 $\|e\|_2$ 的变化较为显著。

其次, 固定步长比 r 不变, 改变公式(1)中的加权因子 θ , 观察不同加权因子下的数值解与精确解的误差 $\|e\|_2$ 。模拟计算结果表明, 随着加权因子的增大, 误差 $\|e\|_2$ 先减小再增大。当加权因子取

利用基本办公软件 Excel 的循环引用及迭代计算功能, 旨在提高计算结果的精确性。为此, 设置 Excel 中的“最多迭代次数”为 1000, “最大误差”为 0.000 000 01。首先, 固定空间步长 $h=0.05$, 改变时间步长 τ , 以获得不同步长比 r 下的数值解。这些数值解反映了导热体在各个时刻和位置的温度分布, 并与精确解进行对比, 计算不同网格比下各种差分方法的误差 $\|e\|_2$ 的变化规律, 结果如图1所示。

特定值 $\theta = \frac{1}{2} - \frac{1}{12r}$ 时, 误差值最小, 数值解与精确解最为接近。图2展示了步长比 $r=0.5$ 时, 空间步长 $h=0.05$ 下不同加权因子的误差分布。从图中可以看出, 当加权因子 θ 取 0.5、0.6、0.7、0.8、0.9 和 1 时, 误差值逐渐增大(见图2右图); 而当加权因子 θ 取 0、0.1、0.2、0.3、1/3、0.4 和 0.5 时, 误差值先减小后增大, 在加权因子 $\theta = \frac{1}{2} - \frac{1}{12r} = \frac{1}{3}$ 时误差达到最小, 几乎为零(见图2左图)。

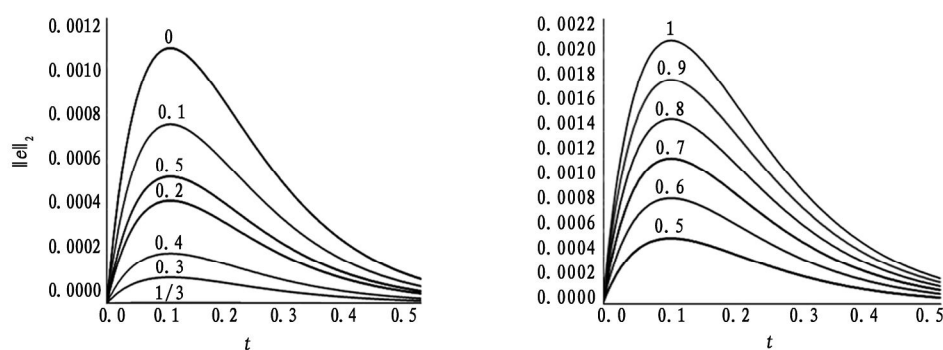


图2 网格比 $r=0.5$ 时不同 θ 差分格式的误差 $\|e\|_2$

进一步考察数值解与精确解的误差 e , 发现误差 e 随加权因子 θ 的变化而变化。当加权因子满足 $\theta = \frac{1}{2} - \frac{1}{12r}$ 时, 数值解与精确解最为接近, 误差 e 达到最小值。图 3 为固定网格比 $r = 0.3$ 时, 不同加权因子 θ 的差分格式误差 e 的变化图。左图为 $x = 0.5$

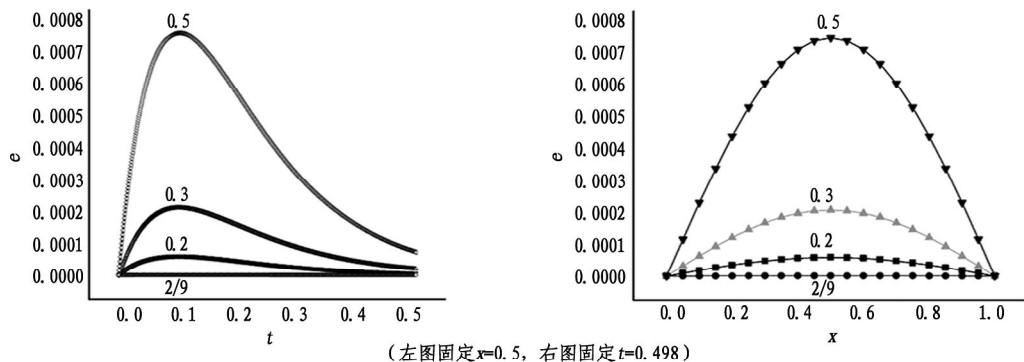


图 3 网格比 $r = 0.3$ 时不同 θ 差分格式的误差 e

为了更直观地呈现导热体上的热量分布, 借助 Origin 软件将计算结果拟合成空间三维图。从拟合图中可以清晰地观察到热量随时间和空间的分布规律。图 4 展示了空间步长 $h = 0.05$ 、时间步长 $\tau = 0.00075$, 即网格比 $r = 0.3$ 时, 基于 Crank-Nicolson 隐式差分格式得到的数值解分布图的剖面图, 考察

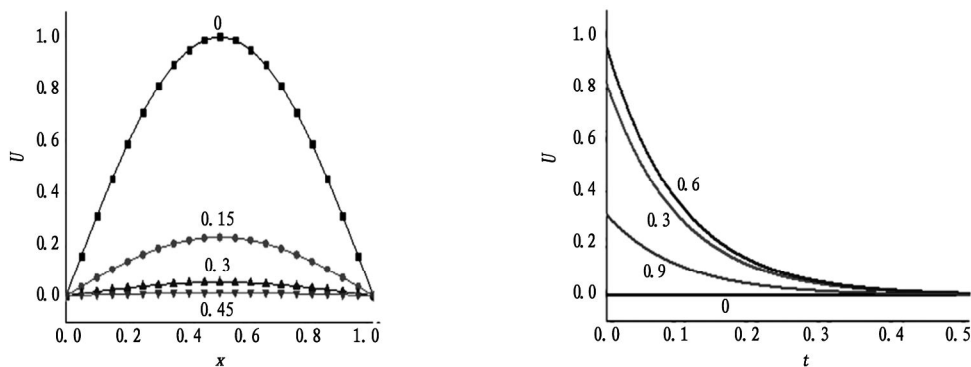


图 4 导热体上温度分别随空间(左图)和时间(右图)变化的分布图

3 结论

本研究引入 Crank-Nicolson 隐式格式结合加权六点差分法, 显著提高了热传导方程数值解的精度与稳定性。与传统显式方法相比, Crank-Nicolson 格式不仅无条件稳定, 还通过优化加权因子进一步降低了数值误差。此外, 通过对比不同步长比和加权因子的数值结果, 明确了优化参数对提高计算精度的关键作用, 为实际应用中的参数选择提供了理论依据。在保证数值解高精度的同时, 合理选择步长比和加权因子有效减少了计算工作量。Crank-Nicolson 隐式格式允许采用更大的时间步长, 显著降

低了迭代次数, 提高了计算效率。结合 Excel 的迭代功能, 进一步简化了编程复杂度, 降低了计算成本, 使高精度数值解法在实际工程问题中更具应用价值。借助 Origin 软件实现了热传导过程的可视化, 显著提升了数值结果的可解释性。将复杂的数值数据转化为直观的图形, 能够更清晰地观察温度场的时空变化规律, 从而更准确地理解热传导过程的物理本质。

参考文献:

- [1] 许亚端, 董晓芬, 庞明勇. 一种热传导过程的计算机仿真及可视化方法[J]. 系统仿真学报, 2014, 6(5): 1064

- 1070.
- [2] 斯小琴, 陈大伟, 岳生伟. 一维热传导方程数值解的计算机仿真与研究[J]. 青岛理工大学学报, 2023, 44(5): 174 - 179.
- [3] 王羽, 谢焕田, 王硕, 等. 基于径向基函数的线方法求解热传导方程[J]. 应用数学进展, 2019, 8(1): 64 - 70.
- [4] 顾鑫, 章青, ERDOGAN M. 基于近场动力学微分算子的热传导模型[C]. 全国固体力学学术会议, 2018.
- [5] 王朔中, 克达尔, 秦川, 等. 应用热传导模型的偏微分方程图像修复[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2007, 13(4): 331 - 336.
- [6] 杨勇, 汪继文. 基于求解泊松方程和梯度的图像修复的研究[J]. 计算机技术与发展, 2008, 19(2): 98 - 100, 103.
- [7] 秦文宁, 孔前进, 尹天宇, 等. 基于热传导方程的高温服装模型设计[J]. 无线互联科技, 2019, 12(8): 55 - 57.
- [8] 张芳, 刘文耀, 李磊, 等. 热传导方程在散斑条纹图相位提取中的应用[J]. 光学学报, 2008, 28(8): 1475 - 1479.
- [9] 周欣, 刘伯安, 石秉学. 神经网络的空间分解方法求解热传导方程[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45(1): 130 - 132.
- [10] 开依沙尔·热合曼. 求解一维热传导方程的一种半离散差分格式[J]. 新疆师范大学学报(自然科学版), 2007, 26(3): 35 - 39.
- [11] 丁小勇, 郑滨红. 利用 Python 求解拉普拉斯椭圆方程中热传导问题[J]. 数字通信世界, 2023(11): 76 - 78.
- [12] 全睿, 付浩, 宋二祥. 一维热传导方程瞬态问题解析解及其应用[J]. 工程力学, 2022, 39(8): 10 - 18.
- [13] 林府标, 张千宏, 张俊, 等. 一维广义热传导方程的精确解[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2018, 35(4): 88 - 92.
- [14] 高忠社. 一类非线性热传导方程的数值解法[J]. 苏州科技学院学报(自然科学版), 2021, 38(3): 12 - 17.
- [15] 闵涛, 臧顺全. 无限域上一维热传导方程的 Gauss-Laguerre 数值解[J]. 大学数学, 2018, 34(1): 25 - 30.
- [16] 高忠社. 基于 Crank-Nicolson 差分与 Newton 迭代法的非线性热传导方程数值解法[J]. 高师理科学刊, 2020, 40(11): 9 - 13.
- [17] 王治云, 王嘉仪, 杨荣. Excel 在热传导问题数值解法教学中的应用探讨[J]. 电脑与信息技术, 2018, 26(1): 10 - 12.
- [18] 杨明波, 卢建立, 杨敏. 利用 Excel 的循环引用自动完成迭代计算[J]. 计算机应用与软件, 2008, 25(12): 103 - 105.
- [19] 冯立伟. 热传导方程几种差分格式的 MATLAB 数值解法比较[J]. 沈阳化工大学学报, 2011, 25(2): 179 - 182, 191.
- [20] 史策. 热传导方程有限差分法的 MATLAB 实现[J]. 理论物理与应用物理学研究, 2009, 24(4): 27 - 29, 36.
- [21] 张继红, 栾舒含, 梁波. 具非线性对流项热传导方程的有限差分法[J]. 大连交通大学学报, 2022, 26(5): 115 - 117.
- [22] 詹涌强. 解抛物型方程的一族六点隐式差分格式[J]. 安徽大学学报(自然科学版), 2012, 36(4): 26 - 29.
- [23] 陈跃辉. 分数阶扩散方程的加权隐式差分格式[J]. 闽南师范大学学报(自然科学版), 2015, 28(3): 1 - 5.
- [24] 冯新龙, 王焕焕, 阿不都热西提. 求解一维热传导方程数值解的高精度方法[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2000, 17(3): 13 - 18.
- [25] 戴嘉尊, 邱建贤. 微分方程数值解法[M]. 南京: 东南大学出版社, 2012.
- [26] 刘春霞, 陈红斌. 热传导方程的一种高精度 $O(\tau^2 + h^4)$ 阶差分格式[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2000, 17(3): 13 - 18.

责任编辑: 刘娟

基于随机机会约束规划的工业遗产更新动态关键路径优化

李娜

(安徽艺术学院 设计学院,安徽 合肥 230009)

摘要:工业遗产更新是城市更新的重要组成部分,涵盖评估、修复、改造等多个环节,具体实施时因遗产年代的不同、修复技术的差异、审批流程复杂性等诸多因素导致工期具有不确定特征。如何在不确定工期下对工业遗产更新流程进行分析和优化是亟待解决的问题。由于传统关键路径分析因确定性假设难以适应随机场景,将随机关键路径分析框架系统地引入工业遗产更新项目管理领域,构建了随机机会约束规划模型,并将其等价转化为可求解的确定性二阶锥规划模型。对实际案例进行分析,为工业遗产更新管理提供辅助决策支持。

关键词:工业遗产更新;有向网络图;随机关键路径;机会约束;二阶锥规划

中图分类号:TU984.114

文献标识码:A

文章编号:2095-297X(2025)05-0092-06

Research on Dynamic Critical Path Optimization for Industrial Heritage Renovation Based on Stochastic Chance-Constraint Programming

LI Na

(School of Design, Anhui University of Arts, Hefei, 230009, Anhui)

Abstract: Industrial heritage renovation constitutes a vital component of urban renewal, encompassing multiple stages such as assessment, restoration, and adaptive reuse. During implementation, uncertainties in project duration arise due to various factors, including the varying age of heritage structures, differences in restoration techniques, and the complexity of approval processes. Effectively analyzing and optimizing the industrial heritage renovation workflow under such uncertain durations presents a significant challenge. Traditional critical path analysis, reliant on deterministic assumptions, struggles to adapt to stochastic scenarios. To address this, the framework of stochastic critical path analysis was systematically introduced into the domain of industrial heritage renovation project management in the study for the first time. A stochastic chance-constraint programming model was constructed, which was equivalently transformed into a solvable deterministic second-order cone programming model. The approach was validated through a practical case study, providing auxiliary decision support for industrial heritage renovation management.

Key words: industrial heritage renovation; directed network diagram; stochastic critical path; chance - constraint; second-order cone programming

随着城市化进程的加速及产业结构的深刻转型,传统工业区域逐渐衰落,城市发展策略由过去的增量开发,转变为存量更新与资源再利用^[1]。工业遗产由于其独有的特色历史资源和标识,是城市文化传承的重要组成部分^[2],在城市更新过程中发挥

着重要作用。对其更新所涉及到的不仅是工业建筑的物质空间,更涉及项目开发管理机制、更新工作流程优化等综合性、动态性的复杂问题^[3]。

在管理实践中,工业遗产更新流程涉及评估、修复、改造等多个环节,各环节的协同效率往往受到多

收稿日期:2025-05-04

基金项目:安徽省高等学校科学研究项目(2023AH052149)。

作者简介:李娜(1988-),女,安徽淮南人,讲师,博士。E-mail:114372672@qq.com

重因素的制约,导致项目各环节的完成工期具有不确定性^[4]。杨超提出由于遗产修复技术要求高,特殊构件保护需特殊工艺,或者对结构测试较耗时等因素导致延长工期^[5];陈畅等在研究中发现缺乏全生命周期管理,导致工业遗产更新过程中施工与设计脱节^[6];龙嫵如认为政策与法规的变动(如新环保标准)所带来的停工、调整方案将延长工作周期^[7]。马仁锋认为是“地方元素的感性认可→资本要素和关系力量的理性约束→地方元素、资本要素和关系力量协同→关系力量的反馈”的多角色路径,激活了工业遗产的更新与演化^[8],仲丹丹等在研究中深入剖析了各个时期政策对划拨工业用地使用权处理方式的持续演变,以及由此带来的工业遗产更新效率的差异^[9]。2023年,工业和信息化部发布《国家工业遗产管理办法》,提供了工业遗产更新的相关管理规范^[10]。然而在具体实践中,工业遗产更新涉及的参与主体较多,利益错综复杂,需考虑更有针对性的实施策略与管理方法。

关键路径分析(Critical Path Analysis)是一种经典的项目进度优化工具,通过识别项目中耗时最长、依赖关系最紧密的任务序列,为管理者提供优先级决策依据。被广泛应用于工程开发、建设管理、城市更新等多个领域,尤其是较为复杂的多任务项目中。将关键路径分析(Critical Path Analysis)与有向无环图模型(Directed Acyclic Graph)结合可用于描述和分析工业遗产更新流程。有向无环图能够将更新流程中各环节以顺序和依赖关系的形式展示。图中每一个节点代表一个具体的更新环节。通过模型项目管理者可清楚看到某个任务的完成与否如何影响其他任务。关键路径分析则用于识别模型中时间最长的连续路径,在路径上的延迟将导致项目整体延期。因此,关键路径分析在工业遗产更新管理中能够帮助管理者识别关键任务和路径,及早发现和解决潜在的工期延迟风险。高祥冠曾在研究中利用关键路径分析方法,使用三种不同时间,即乐观时间、最可能时间、悲观时间,对工业遗产更新各环节活动用时进行估计^[11]。王辉以沈阳东茂库改造设计为例,回顾改造过程的多个关键路径,剖析仓储建筑类型工业遗产设计决策的方法^[12]。然而,传统的关键路径分析假设项目各任务处理时间是确定且可获取的,这种假设与工业遗产更新的管理现实明显脱节。因此,如何优化关键路径分析方法以应对不确定时间成为一个亟待解决的问题。

针对上述问题,本研究首次引入一种考虑随机因素的关键路径分析框架,建立基于机会约束规划

模型。基于机会约束规划的分析方法在电力系统工程、金融风险管理、生产调度等领域广泛应用。Charnes等提出的机会约束规划方法为应对不确定性提供了理论基础。这种方法通过引入置信水平,将随机变量的约束转化为确定性的约束,从而简化了模型求解^[13]。Zhang等考虑了不确定最优能源流优化问题,引入了机会约束规划方法建立问题模型并分析了问题计算复杂度,设计了基于线性近似的策略方法求解该问题^[14]。Farina等对机会约束模型在项目管理中的应用进行了系统的总结,并指出该模型在处理不确定时间约束时的优势^[15]。Zhang等研究了两阶段随机批次问题,建立了基于机会约束的两阶段随机模型。通过设计分支定界算法并进行数值实验,验证了方法的有效性^[16]。Kim等探讨了电力能源扩张问题,设计了机会约束规划模型。作者设计了一个基于采样的求解方法解决该问题^[17]。Touqueer等针对能源调度问题建立了机会约束规划方法。其中,基于区间值的约束被引入到该模型^[18]。Zhang等研究人力资源限制的不确定拆解线平衡问题,建立机会约束规划方法,并设计了混合启发式方法^[19]。Dadaneh等研究了有限容量的批次问题,为了最小化总生产成本,建立了基于机会约束的方法,并通过数值实验呈现了管理启示^[20]。尽管这些研究在一般的项目管理场景中取得了显著进展,但针对工业遗产更新不确定性关键路径的系统分析仍属空白。

综上所述,虽然工业遗产更新环节时间的不确定性在管理实践中广泛存在,但没有针对该问题建立随机关键路径分析模型。同时,虽然机会约束规划模型方法已在项目管理中大量应用,但尚未在不确定环境下的工业遗产更新环节的路径分析和建模中使用。因此,本研究试图利用随机机会约束规划方法构建全新的随机关键路径模型,确保关键路径在一定的置信水平下得到最优解,以应对更新工期不确定性问题。

1 问题描述

工业遗产更新流程的环节往往是相互依赖的。实际操作中,由于各种不确定因素的存在,各个环节的作业时间常常无法准确预估。因此,如何在这种不确定时间条件下优化更新流程,并确保项目能够按时完成,是项目管理中的一个重要挑战。有向网络图是常用的项目流程建模工具,可以将项目中的各个环节及其依赖关系用图的形式表示。因此,在该问题中,工业遗产更新流程由存在先后次序的 n

个环节组成,所有环节完成遗产才能得到再利用。以重庆某钢铁厂改造为例,其流程需依次完成“遗产价值评估→修复方案设计→施工招标→结构加固”等 15 个核心环节,且前序环节的延误会通过依赖关系逐级放大^[21]。基于实际,假设更新环节不能被中断。通常,有向网络图(Directed Acyclic Graph)可以对工业遗产更新环节进行关键路径分析,其中节点(Node)表示工业遗产更新环节,弧(Arc)表示各更新环节之间的依赖关系。有向网络图结构 $G = (\mathcal{N}, \mathcal{A})$, $\mathcal{N}$ 表示所有工业遗产更新环节的集合, $\mathcal{A}$ 表示更新环节之间的依赖关系。在有向网络图中,设置虚节点(Dummy Node)0 和 $n+1$ 作为额外的节点,分别表示工业遗产更新开始和工业遗产更新结束,目的是用于辅助建模以解决问题。因此 $\mathcal{N} = \{0, 1, \dots, n+1\}$ 。每个弧 $(i, j) \in \mathcal{A}$ 表示更新环节 i 必须在更新环节 j 之前完成。权重 t_{ij} 表示弧 (i, j) 的权重,表示从更新环节 i 结束到更新环节 j 结束的持续时间。为了处理各环节时间的不确定性,假设每个环节的持续时间服从正态分布,通过这种建模方式,可以更好地描述实际项目中的复杂性和不确定性。具体而言,工业遗产更新各环节的权重 t_{ij} 是随机变量。因此,假设权重 t_{ij} 服从正态分布 $t_{ij} \sim \Phi(\bar{t}_{ij}, \sigma_{ij}^2)$, 其中, $\bar{t}_{ij}$ 表示 t_{ij} 的均值, σ_{ij}^2 表示 t_{ij} 的方差。通过上述构建的具有随机权重的有向网络结构,本研究将建立随机关键路径模型,来确定工业遗产更新环节中的关键活动和关键路径。通过此模型,工业遗产管理决策者可以识别出需要优化和关注的活动,合理分配资源,制定风险管理计划,并优化整个工业遗产更新流程,以确保更新各环节的高效执行和更新后的准时运营。

综上所述,主要假设包括:(1)各工业遗产更新环节均能够正常完成,即不存在某一环节出现重大问题致使环节无限延期的极端情况;(2)各工业遗产更新环节的处理时间是不确定的,并符合正态分布。

2 随机机会约束规划模型的构建

本节构建了随机机会约束规划模型。模型的主要目的是在不确定时间条件下,优化工业遗产更新流程的关键路径。

问题参数如下:

i, j :工业遗产更新环节索引;

n :工业遗产更新环节的总数量;

$\mathcal{N}$:节点集合,即工业遗产更新环节的集合, $\mathcal{N} = \{0, 1, \dots, n+1\}$;

$\mathcal{A}$:有向弧,表示工业遗产更新环节的前后次序关系;

t_{ij} :弧 $(i, j) \in \mathcal{A}$ 的权重,表示更新环节时间,随机变量,服从正态分布 $t_{ij} \sim \Phi(\bar{t}_{ij}, \sigma_{ij}^2)$, 其中, $\bar{t}_{ij}$ 表示 t_{ij} 的均值, σ_{ij}^2 表示 t_{ij} 的方差;

α :置信水平;

$\text{Prob}(\cdot)$:括号内约束成立的概率值;当 $\text{Prob}(\cdot) \geq \alpha$ 时,表示括号内约束成立的概率值要大于置信水平 α 。

决策变量如下:

x_{ij} : $x_{ij} = 1$ 表示弧 $(i, j) \in \mathcal{A}$ 被选择, $x_{ij} = 0$ 表示弧 $(i, j) \in \mathcal{A}$ 没有被选择;

D :连续辅助变量,表征随机关键路径时间。

依据以上定义的参数和变量,随机机会约束规划模型 $[\mathcal{T}_1]$ 构建如下:

$$[\mathcal{T}_1]: \min D \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j=0}^{n+1} x_{0,j} = 1 \quad (2)$$

$$\sum_{j=0}^{n+1} x_{0,j} = \sum_{k=0}^{n+1} x_{k,i}, \forall i \in \{1, \dots, n\} \quad (3)$$

$$\sum_{k=0}^{n+1} x_{k,n+1} = 1 \quad (4)$$

$$\text{Prob}(D \geq \sum_{i=0}^{n+1} \sum_{j=0}^{n+1} t_{i,j} \cdot x_{ij}) \geq \alpha \quad (5)$$

$$D \geq 0, x_{ij} \in \{0, 1\}, \forall (i, j) \in \mathcal{A} \quad (6)$$

目标函数(1)表示获得关键路径时间,即最小化辅助变量;约束(2)保证最初节点 0 只有一个出度;约束(3)保证有入度的节点必然有出度,并且出度和入度相等;约束(4)保证最后一个节点 $n+1$ 只有一个入度;约束(5)为机会约束,意指随机关键路径要大于置信水平 α ;约束(6)界定决策变量空间。

模型 $[\mathcal{T}_1]$ 通过机会约束的方式,确保各个环节的作业时间在一定的置信水平下满足时间要求。通常,由于机会约束(5)的存在,随机机会约束规划模型难以直接通过商业求解器进行求解,需要通过等价转化才能进行求解。因此,本研究将提出针对该模型的求解方法。

3 基于二阶锥规划的求解方法

现有文献处理机会约束的方法根据问题的性质和模型特征而有所不同,主要包括:(1)机会约束转换,将机会约束转化为等价的确定性约束;(2)随机规划,使用随机规划方法来处理机会约束;(3)仿真和采样,使用仿真和采样方法来评估机会约束的满足程度等。求解机会约束规划模型的难点在于如何有效处理不确定性。

本研究采用机会约束转换方法,机会约束转换

的优势在于能够将复杂的随机规划问题简化为可通过商业软件直接求解的二阶锥规划问题。通过这种方法,模型不仅能够处理较大规模的工业遗产更新项目,还能为项目管理者提供更加精准的时间估算和关键路径分析。由于机会约束很难求解。因此,需要对模型进行转化,首先引入如下额外问题参数。

额外问题参数:

$\|\cdot\|_2$:表示欧式距离;

$\Phi^{-1}(\alpha)$:在一定置信水平 α 下,正态分布反函数的值。

在上述问题描述中,假设随机变量 t_{ij} 符合正态分布 $t_{ij} \sim \Phi(\bar{t}_{ij}, \sigma_{ij}^2)$ 。根据文献[11],在上述假设下,机会约束可以转化为二次锥约束:

$$\text{Prob}(D \geq \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ij} \cdot x_{ij}) = \Phi\left(\frac{D - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \bar{t}_{ij} \cdot x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sigma_{ij}^2 x_{ij}}}\right)$$

$$\text{然后, } D - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \bar{t}_{ij} \cdot x_{ij} \geq \Phi^{-1}(\alpha) \|\sigma_{ij} x_{ij}\|_2 \quad (7)$$

因此,通过上述机会约束转化方式,本研究建立了一个新的确定性二阶锥规划模型 $[\mathcal{P}_2]$,如下:

$$[\mathcal{P}_2]: \min(1)$$

$$\text{s. t. (2) - (4), (6) - (7)}$$

相较于随机机会约束规划模型 $[\mathcal{P}_1]$,二阶锥规划模型 $[\mathcal{P}_2]$ 具有可直接求解的优良特征。因此,在后续分析中,本研究直接使用先进商业求解器 Gurobi 对模型进行编程求解。

4 案例分析

为验证模型的有效性,本研究实验利用 Matlab2020 编程调用先进商业求解器 Gurobi 求解模型 $[\mathcal{P}_2]$,在 Win 个人电脑(CPU i7 2.4 GHz,内存 8 GB)上进行精确求解。其中,最大求解时间阈值设置为 3600 s。

根据工业和信息化部关于印发《国家工业遗产管理办法》^[22],本研究总结了一种可能的工业遗产更新流程系统,如图 1 所示。遵照关键路径方法,使用有向网络图将整个流程的多个子环节以顺序和依赖关系的形式展示,共有 $n = 16$ 个实际更新环节。为配适模型 $[\mathcal{P}_2]$,设定两个虚拟节点,分别表示项目的开始和结束,也即是 0 和 17。因此, $\mathcal{N} = \{0, 1, 2, \dots, 17\}$ 。其中有如下节点:0,工业遗产更新开始;1,遗产识别与注册;2,初步评估;3,法律和政策审查;4,详细文物勘查;5,遗产价值评估;6,风险评估;7,修复计划设计;8,环境影响评估;9,项目招标与选择承包商;10,资金筹措与审批;11,选择监督第

三方;12,进度协调;13,进度监控;14,进度调整;15,遗产修复;16,修复质量验收;17,工业遗产更新结束。其中,节点 0 和 17 为虚设节点(具体解释可参见第 1 节)。有向弧表示更新环节之间的依赖关系,例如图 1,只有当所有更新环节完成后,工业遗产更新才能结束。

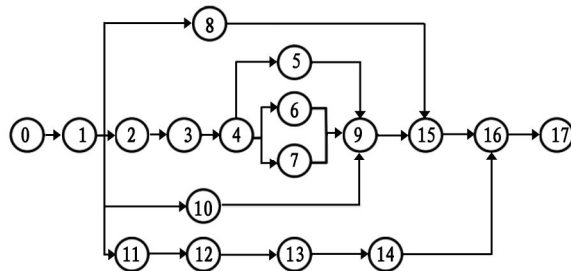


图 1 工业遗产更新服务环节流程

在工业遗产更新过程中各环节的完成时间不确定。通常,现实中的不确定因素服从正态分布^[22],也就是,在有向图模型中权重 t_{ij} 服从正态分布 $t_{ij} \sim \Phi(\bar{t}_{ij}, \sigma_{ij}^2)$ 。在本案例研究中,采用无量纲数值,基于案例合理生成可能正态分布的参数值,其中, $\bar{t}_{ij} \in [20, 50]$ 和 $\sigma_{ij}^2 \in [100, 160]$ 。例如图 1, $t_{0,1}$ 表示从工业遗产更新开始到遗产识别与注册结束的持续时间; $t_{16,17}$ 表示从修复质量验收结束到工业遗产更新结束并再利用的持续时间。此外,由于各环节时间的随机性,随机关键路径也是不确定的,置信水平是指随机关键路径在不同不确定环境下估计的可靠性。根据文献[13],本研究设定置信水平 $\alpha = 0.95$,通过统计学知识^[6],查表可知 $\Phi^{-1}(\alpha) = 1.96$ 。

在置信水平 $\alpha = 0.95$ 下,求解模型 $[\mathcal{P}_2]$,获得随机关键路径总时间 $D = 636.11$ 。如图 2 所示,置信水平 $\alpha = 0.95$ 下的随机关键路径为 $0 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 7 \rightarrow 9 \rightarrow 15 \rightarrow 16 \rightarrow 17$ 。

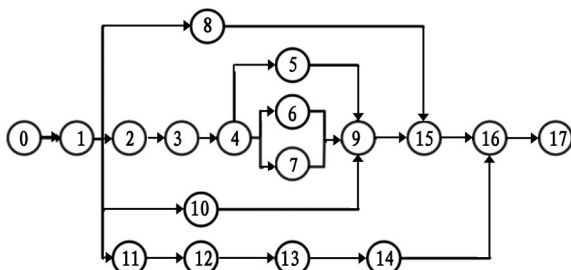


图 2 置信水平 $\alpha = 0.95$ 下的工业遗产更新流程随机关键路径

通过调整置信水平 α , 可以得到不同的关键路径总时间 D 和相应的随机关键路径。例如, 如图 3 所示, 当置信水平降低至 $\alpha = 0.90$ 时, 总时间减少至 620.5, 随机关键路径为 $0 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 6 \rightarrow 9 \rightarrow 15 \rightarrow 16 \rightarrow 17$ 。这表明, 提出的模型能够很好地应对不确定性。针对保守型工业遗产管理者, 可以通过提升置信水平 α 的取值, 实现基于风险规避的决策支持。针对激进型管理者, 可以通过降低置信水平 α 取值, 实现基于风险偏好的决策支持。此外, 本方法还充分考虑不同场景下的关键路径变化情况, 以验证模型在不同不确定性条件下的鲁棒性。

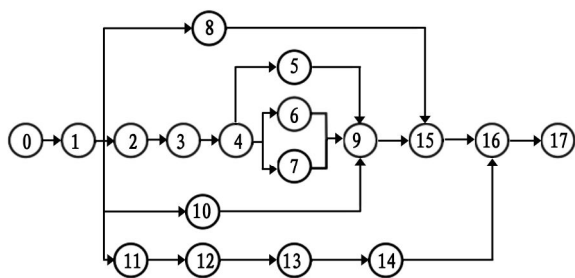


图 3 置信水平 $\alpha = 0.90$ 下的工业遗产更新流程随机关键路径

通过上述分析方法可以得到管理启示。首先, 在机会约束优化框架下, 工业遗产管理者可以根据实际情况设定合理的风险容忍度阐述, 即允许一定范围的风险容忍度, 实现对不确定环境下更新流程的优化。其次, 这种随机管理方式能够确保在面对不确定性时, 保持项目进程的韧性和柔性。最后, 面对突发事件时, 基于提出的分析方法, 管理者能确保遗产更新时根据外部条件的变化进行调整, 降低项目停滞或失败的风险。

5 研究结论与展望

本文针对工业遗产更新流程中的关键路径优化问题展开深入探讨, 核心在于解决作业时间不确定性带来的挑战。为此, 创新性地引入随机机会约束模型, 旨在优化关键路径并确保项目在时间参数波动条件下仍能高效推进。该模型有效弥补了传统关键路径法在处理不确定性问题时的固有局限。通过等价变换, 将难以处理的机会约束转化为确定性约束, 并构建了该随机模型的等价确定性模型。为辅助决策支持, 设计并实施了算例分析。实证结果表明, 所提出的随机机会约束模型能够有效应对工业遗产更新流程中的时间不确定性, 精准识别出关键路径, 提升更新过程的管理效率。这一研究成果为

相关管理者应对复杂多变的项目环境、制定更具合理性的决策提供了参考。未来的研究方向主要有:

(1) 融入行政区划特征与服务时间窗: 不同行政区划的工业遗产更新特征具有异质性, 显著影响项目决策。未来研究可探索将区域特性与服务时间窗约束相结合, 构建基于数据驱动的分布鲁棒优化模型, 以提升模型的鲁棒性。

(2) 随机环境下设施资源效率优化: 设施资源的合理配置与高效利用是项目进度的关键制约因素。面对资源的有限性与更新过程的随机性, 如何在有限资源约束下优化项目决策是亟待解决的现实难题。未来研究可考虑引入多目标优化框架, 以增强模型解决实际资源冲突的能力。

(3) 开发高效求解算法: 虽然本文模型基于高效商业求解器求解, 但在处理更大规模或结构更复杂的项目时, 可以进一步设计基于问题的算法。未来研究可探索开发高效的启发式算法或开发精确算法与启发式相结合的混合策略, 以实现在可接受时间内获得高质量解, 为大规模工业遗产项目管理提供辅助决策支持。

参考文献:

- [1] 彭飞. 我国工业遗产再利用现状及发展研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- [2] 王富海, 阳建强, 王世福, 等. 如何理解推进城市更新行动[J]. 城市规划, 2022, 46(2): 20-24.
- [3] 王晶, 李浩, 王辉. 城市工业遗产保护更新——一种构建创意城市的重要途径[J]. 国际城市规划, 2012, 27(3): 60-64.
- [4] 徐苏宁, 王国庆, 李世芬, 等. 工业遗产保护与城市更新[J]. 城市规划, 2017, 41(2): 81-84, 101.
- [5] 杨超. 工业遗产在“临时性使用”过程中多角度规划研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2017.
- [6] 陈畅, 陈洪, 李司东. 上海工业遗产保护的难点与对策[J]. 科学发展, 2018(4): 97-107.
- [7] 龙嫵如. 基于全生命周期管理的工业遗产保护更新研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2023.
- [8] 马仁锋, 王腾飞, 候勃, 等. 创意修复视域老工业区空间生产理论透视——以创意 1956 产业园为例[J]. 现代城市研究, 2019(1): 94-102.
- [9] 仲丹丹. 我国工业遗产保护再利用与文化产业结合发展之动因研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [10] 黎启国, 储石韦, 帅新元. 我国工业遗产保护与利用地方法律法规及政策比较研究[J]. 工业建筑, 2022, 52(11): 120-124, 156.
- [11] 高祥冠. 工业遗产再利用开发的关键路径研究[J]. 生产力研究, 2021(8): 86-90.

- [12] 王辉. 传承 1950 年代第一代仓储建筑的五条关键路径——沈阳东贸库改造设计[J]. 建筑技艺, 2022, 28(3): 26–35.
- [13] CHARNES A, COOPER W W. Chance-constrained programming[J]. Management Science, 1959, 6(1): 73–79.
- [14] ZHANG H, LI P. Chance constrained programming for optimal power flow under uncertainty[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 2417–2424.
- [15] FARINA M, GIULIONI L, SCATTOLINI R. Stochastic linear model predictive control with chance constraints-A review[J]. Journal of Process Control, 2016, 44: 53–67.
- [16] ZHANG Z, GAO C, AHMED S. Two-stage stochastic lot-sizing problem with chance-constrained condition in the second stage[J]. arXiv: Optimization and Control, 2019. DOI:10.48550/arXiv.1906.05016.
- [17] KIM H, MIN D, CHOI D G. A sampling-based solution approach for electricity capacity expansion planning with chance constraint[J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 162: 107710.
- [18] TOUQEER M, UMER R, AHMADIAN A, et al. An optimal solution of energy scheduling problem based on chance-constraint programming model using interval-valued neutrosophic constraints [J]. Optimization and Engineering, 2021: 1–29.
- [19] ZHANG X, TIAN G, FATHOLLAHI-FARD A M, et al. A chance-constraint programming approach for a disassembly line balancing problem under uncertainty [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2024, 74: 346–366.
- [20] DADANEH D Z, MORADI S, ALIZADEH B. A stochastic chance-constraint framework for poultry planning and egg inventory management [J]. Operations Management Research, 2024: 1–17.
- [21] 杨文. 旧工业区更新项目的制约因素及关键制约路径研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- [22] 工业和信息化部. 国家工业遗产管理办法[Z]. 工信部政法〔2023〕228 号, 2023–11–30. 责任编辑: 汤庆国

(上接第 79 页)

- [13] 郭延辉, 马蕊, 毛石林, 等. 圆砾地层深大基坑开挖支护对临近既有道路的影响[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(1): 94–102.
- [14] 谢强, 马媛婕, 吴俊, 等. 基坑开挖引起下穿交叉隧道变形效应分析[J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20(5): 1695–1705.
- [15] 喻莹, 王忠凯, 王翠英. 不同工况下地下连续墙内支撑支护结构的土压力[J]. 安全与环境工程, 2024, 31(6): 57–66.
- [16] 刘长红, 朱斌, 蒋楠, 等. 地铁车站基坑爆破邻近框架结构动力响应特征及安全性评价[J]. 安全与环境工程, 2023, 30(2): 35–43.
- [17] 胡指南, 毛洪涛, 刘志春, 等. 基坑施工对运营地铁隧道变形影响及分区研究[J]. 现代隧道技术, 2025, 62(1): 66–73, 82.
- [18] 吴楷, 陈仁朋, 孟凡衍, 等. 基坑开挖坑底土拱效应离心模型试验及数值分析[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(9): 1936–1944.
- [19] 亓源水, 岳祖润, 孙铁成, 等. 富水软土基坑组合式冻结加固模型试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20(2): 535–545.
- [20] 程雪松, 张润泽, 郑刚, 等. 局部超挖或超载作用下桩锚支护基坑连续垮塌试验研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(10): 2078–2088.
- [21] 宋博文, 秦会来, 王蓉, 等. 南京地区基于地铁隧道保护要求的基坑变形控制指标[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2025, 53(4): 548–556.
- [22] 魏纲, 周焯波, 王哲, 等. 盾构隧道内堆载对基坑开挖引起的隧道上浮量的控制效果研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024, 55(7): 2727–2736.
- [23] 陈仁朋, 高天惠, 吴怀娜, 等. 旁侧基坑开挖对超大直径盾构隧道变形影响分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(9): 230–240.
- [24] 吴怀娜, 冯东林, 刘源, 等. 基于门式抗浮框架的基坑开挖下卧隧道变形控制[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(9): 1227–1237. 责任编辑: 汤庆国

非线性脉冲比例延迟微分方程 Runge-Kutta 方法的收敛性

杨传影^{1*}, 刘娟¹, 余越昕², 鲍宏伟¹, 周廷慰¹

(1. 蚌埠学院 数理学院, 安徽 蚌埠 233030; 2. 湘潭大学 数学与计算科学学院, 湖南 湘潭 411105)

摘要:就一类非线性脉冲比例延迟微分方程(NIPDDEs), 分析了 Runge-Kutta 方法对于非刚性及刚性情况的收敛性。首先, 给出了 NIPDDEs 的 Runge-Kutta 方法数值格式。然后, 对于非刚性情况, 证明了 Runge-Kutta 方法在求解 NIPDDEs 时具有经典 r 阶收敛; 对于刚性情况, 证明了 Runge-Kutta 方法在求解 NIPDDEs 时具有 r 阶 B-收敛。最后, 数值试验证实了理论分析的正确性。

关键词:脉冲比例延迟微分方程; 刚性; Runge-Kutta 法; 收敛性

中图分类号: O241.8

文献标识码: A

文章编号: 2095-297X(2025)05-0080-06

Convergence of Runge-Kutta Method for Nonlinear Impulsive Pantograph Delay Differential Equations

YANG Chuanying^{1*}, LIU Juan¹, YU Yuexin², BAO Hongwei¹, ZHOU Tingwei¹

(1. School of Mathematics and Physics, Bengbu University, Bengbu, 233030, Anhui;

2. School of Mathematics and Computational Science, Xiangtan University, Xiangtan, 411105, Hunan)

Abstract: For a class of nonlinear impulsive pantograph delay differential equations(NIPDDEs), the convergence of Runge-Kutta method for non-stiff and stiff cases was analyzed. Firstly, the Runge-Kutta numerical scheme of NIPDDEs was constructed. Secondly, for the non-stiff case, it was proved that the Runge-Kutta method for solving NIPDDEs is classically convergent with order r , and for the stiff case, it was proved that the Runge-Kutta method for solving NIPDDEs is B-convergent of order r . Finally, numerical experiments confirmed the correctness of the theoretical analysis.

Key words: impulsive pantograph delay differential equations; stiffness; Runge-Kutta method; convergence

延迟微分方程的数值方法研究自 20 世纪 80 年代趋于成熟^[1-2], 而脉冲微分方程的数值分析体系则在 20 世纪 90 年代后逐步完善^[3-4], 两者的理论与应用至今仍在不断发展。尤其是两者的结合形式——脉冲延迟微分方程, 自 21 世纪初以来持续成为研究热点, 可参见文献[5]至文献[9]等。然而, 在微分方程初值问题中, 非刚性(Non-stiffness)与刚性(Stiffness)是两类重要的特性分类。刚性问题通常表现为: 主要解是慢变过程, 但存在快速衰减的干扰分量, 即系统中包含多个相互作用且变化速率悬

殊的子过程, 尽管如此, 整体解仍保持良态性^[10]。与之相比, 非刚性问题的解分量变化较为平缓。由于脉冲延迟微分方程的解析解通常难以获得, 因而研究其数值方法显得尤为重要, 而其在非刚性与刚性问题的收敛性理论研究方面仍较为匮乏。为此, 分别针对 Non-stiffness 与 Stiffness, 研究一类非线性脉冲比例延迟微分方程(NIPDDEs) Runge-Kutta 方法的收敛性。

收稿日期: 2025-03-31 * 通讯联系人

基金项目: 安徽省教育厅教育教学研究一般项目(2022jyxx967); 蚌埠学院数学模型与数学实验教学创新团队(2023extd3); 蚌埠学院校级自然科学研究一般项目(2024ZR05)。

作者简介: 杨传影(1993-), 女, 安徽蚌埠人, 助教, 硕士。E-mail: 1923612571@qq.com

1 求解一类 NIPDDEs 的 Runge-Kutta 方法

给定一个空间 C^d 及其上的内积 $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 和相

$$\begin{cases} y'(t) = f(t, y(t), y(pt)), t \neq \tau_k, t \in (0, T], k = 1, 2, \dots, N & (1a) \\ \Delta y|_{t=\tau_k} = y(\tau_k^+) - y(\tau_k) = I_k(y(\tau_k)), t = \tau_k & (1b) \\ y(0^+) = y_0 & (1c) \end{cases} \quad (1)$$

此处常数 $p \in (0, 1)$, 函数 $f: (0, T] \times C^d \times C^d \rightarrow C^d$ 和 $I_k (k = 1, 2, \dots, N): C^d \rightarrow C^d$ 是所给的连续映射, 脉冲时刻 τ_k 满足于条件 $\tau_{k+1} - \tau_k = \tau > 0$ 或 $\tau_k = \tau_0 + k\tau$, 即常延迟的情形, 且 $0 = \tau_0 < \tau_1 < \dots < \tau_N < T$

$$\|u + I_k(u) - (v + I_k(v))\| \leq \gamma_k \|u - v\|, \forall u, v \in C^d \quad (2)$$

此处的实常数 $\gamma_k \geq 0$ 取值适度。

(2) 初值问题(1)在每个区间 $(\tau_k, \tau_{k+1}]$ 上有唯一解析解 $y_k(t)$, 且 $y_k(t)$ 充分光滑, 具有各阶连续导数, 满足

$$\left\| \frac{d^i y_k(t)}{dt^i} \right\| \leq M_i, t \in (\tau_k, \tau_{k+1}]$$

这里诸 M_i 是仅具有适度大小的常数。

(3) 右端函数 f 的各阶偏导数连续且有界, 满足

$$\left\| \frac{\partial^{i+j} f(t, u_k(t), v(t))}{\partial t^i \partial u_k^j} \right\| \leq \kappa_{ij}, t \in (\tau_k, \tau_{k+1}]$$

为了方便进一步分析问题(1), 首先给出其解的定义。

定义 1^[3] 函数 $y: (0, T] \rightarrow C^d$ 被定义为问题(1)的解, 如果

$$(1) \lim_{t \rightarrow 0^+} y(t) = y_0 = y(0^+);$$

(2) 对于 $\forall t \in (0, T], t \neq \tau_k (k = 1, 2, \dots, N)$, 有 $y(t)$ 可微且 $y'(t) = f(t, y(t), y(pt))$;

(3) $y(t)$ 在区间 $(0, T]$ 左连续, 且当 $t = \tau_k (k = 1, 2, \dots, N)$, 有 $y(\tau_k^+) = y(\tau_k) + I_k(y(\tau_k))$ 。

$$\begin{cases} Y_i^{k,l+1} = y_{k,l} + h \sum_{j=1}^S a_{ij} f(t_{k,l} + c_j h, Y_j^{k,l+1}, \bar{Y}_j^{k,l+1}), i = 1, 2, \dots, S \\ y_{k,l+1} = y_{k,l} + h \sum_{j=0}^S b_j f(t_{k,l} + c_j h, Y_j^{k,l+1}, \bar{Y}_j^{k,l+1}), l = 0, 1, \dots, m-1; k = 0, 1, \dots, N \\ y_{k+1,0} = y_{k,m} + I_k(y_{k,m}) \\ y_{0,0} = y_0 \end{cases} \quad (5)$$

其中 $h = \frac{\tau_{k+1} - \tau_k}{m}$, $t_{k,l} = \tau_k + lh$, $m \in \mathbb{Z}^+$, 实系数 a_{ij} ,

b_j, c_j 以及矩阵 $A = (a_{ij})_{S \times S}$ 均满足与方法(4)相同的条件。这里 $Y_j^{k,l}, y_{k,0}, y_{k,l} (l \neq 0)$ 和 $\bar{Y}_j^{k,l}$ 分别是 $y(t_{k,l} + c_j h), y(t_{k,0}^+), y(t_{k,l})$ 和 $y(p(t_{k,l} + c_j h))$ 的逼近。

参考 Li^[11] 的插值算子满足正则性条件, 这里同

$$\|f(t, u_1, v_1) - f(t, u_2, v_2)\| \leq \alpha \|u_1 - u_2\| + \beta \|v_1 - v_2\|, \forall u_1, u_2, v_1, v_2 \in C^d \quad (6)$$

其中 $\alpha, \beta \geq 0$ 是适度大小的经典 Lipschitz 常数。

应的范数 $\|\cdot\|$, 分析下面初值问题

$= y_{N+1}, y(\tau_k^+)$ 是 $y(t)$ 在 τ_k 处的右极限。

另外, 对于初值问题(1), 还需假设如下条件:

(1) 给定的脉冲映射 $I_k: C^d \rightarrow C^d (k = 1, 2, \dots, N)$

满足

接下来, 我们考虑采用 Runge-Kutta 方法求解问题(1)。

为了构造问题(1)的一种 Runge-Kutta 的数值格式, 参考满足经典 Lipschitz 条件的常微分方程 (ODEs) 初值问题

$$\begin{cases} y'(t) = f(t, y(t)), t \geq 0 \\ y(0) = y_0 \end{cases} \quad (3)$$

其使用的 S 级 Runge-Kutta 方法

$$\begin{cases} Y_i = y_n + h \sum_{j=1}^S a_{ij} f(t_n + c_j h, Y_j), i = 1, 2, \dots, S \\ y_{n+1} = y_n + h \sum_{j=1}^S b_j f(t_n + c_j h, Y_j), n = 0, 1, \dots, N \end{cases} \quad (4)$$

这里 a_{ij}, b_j, c_j 为实系数, 且满足 $\sum_{j=1}^S a_{ij} = c_i, i = 1, 2, \dots, S, A = (a_{ij})_{S \times S}, b = (b_1, b_2, \dots, b_S)^T, \sum_{i=1}^S b_i = 1, c = (c_1, c_2, \dots, c_S)^T, 0 \leq c_1 \leq \dots \leq c_S \leq 1$ 。

将方法(4)应用到问题(1), 构造出下面关于问题(1)的 Runge-Kutta 方法数值格式

样假设通过插值得到的解 $\bar{Y}_j^{k,l+1}$ 满足正则性条件, 且插值算子的阶与方法(4)的收敛阶相同。

2 非刚性问题 Runge-Kutta 方法的收敛性

对于非刚性初值问题(1), 假设右端函数 f 满足经典 Lipschitz 条件:

$$\|f(t, u_1, v_1) - f(t, u_2, v_2)\| \leq \alpha \|u_1 - u_2\| + \beta \|v_1 - v_2\|, \forall u_1, u_2, v_1, v_2 \in C^d \quad (6)$$

对于满足经典 Lipschitz 条件的 ODEs 初值问题

(3),其构造的 Runge-Kutta 方法(4)的经典收敛阶已被定义^[12],以及 Zhang^[13]提到的脉冲延迟微分方程收敛阶。基于此,我们类似地给出用于求解问题(1)的 Runge-Kutta 方法(5)的经典收敛阶定义。

定义2 方法(5)被定义为具有 r 阶收敛($r > 0$),如果应用此方法求解满足经典 Lipschitz 条件(6)的初值问题(1), f 充分光滑,脉冲函数 $I_k(y)$, ($k = 1, 2, \dots, N$)关于 y 满足(2),则有

$$\max_{0 \leq k \leq N} \|y(t_{k,l}) - y_{k,l}\| \leq O(h^r), \text{ 当 } h \rightarrow 0 \text{ 时}$$

定理1 如果求解在满足经典 Lipschitz 条件下的 ODEs 初值问题(3)的 Runge-Kutta 方法(4)是 r 阶

$$\|y(t_{k,l}) - y_{k,l}\| \leq \exp(c(t_{k,l} - t_{k,0})) \|y(t_{k,0}) - y_{k,0}\| + d(t_{k,l} - t_{k,0}) \exp(c(t_{k,l} - t_{k,0})) h^r \quad (7)$$

这里的常数 c, d 仅依赖 Runge-Kutta 方法,经典 Lipschitz 常数 α, β 及 M_i, κ_{ij} 。

$$\|y(t_{0,l}) - y_{0,l}\| \leq \exp(c(t_{0,l} - t_{0,0})) \|y(t_{0,0}) - y_{0,0}\| + d(t_{0,l} - t_{0,0}) \exp(c(t_{0,l} - t_{0,0})) h^r = d(t_{0,l}) \exp(c(t_{0,l})) h^r$$

第二步, $\forall t_{1,l} \in (\tau_1, \tau_2], l = 1, 2, \dots, m$, 推出

$$\|y(t_{1,l}) - y_{1,l}\| \leq \exp(c(t_{1,l} - t_{1,0})) \|y(t_{1,0}) - y_{1,0}\| + d(t_{1,l} - t_{1,0}) \exp(c(t_{1,l} - t_{1,0})) h^r$$

基于公式(1b)可知

$$\|y(t_{1,0}) - y_{1,0}\| = \|y(t_{0,m}) + I_1(y(t_{0,m})) - y_{0,m} - I_1(y_{0,m})\| \leq \gamma_1 \|y(t_{0,m}) - y_{0,m}\| = \gamma_1 d(t_{0,m}) \exp(c(t_{0,m})) h^r$$

据此, $\forall t_{1,l} \in (\tau_1, \tau_2]$ 有

$$\begin{aligned} \|y(t_{1,l}) - y_{1,l}\| &\leq \exp(c(t_{1,l} - t_{1,0})) \gamma_1 d(t_{0,m}) \exp(c(t_{0,m})) h^r + d(t_{1,l} - t_{1,0}) \exp(c(t_{1,l} - t_{1,0})) h^r \\ &= \exp(c(t_{1,l} - t_{1,0})) [\gamma_1 d(t_{0,m}) \exp(c(t_{0,m})) + d(t_{1,l} - t_{1,0})] h^r \end{aligned}$$

第三步, $\forall t_{2,l} \in (\tau_2, \tau_3], l = 1, 2, \dots, m$, 类似推出

$$\|y(t_{2,l}) - y_{2,l}\| \leq \exp(c(t_{2,l} - t_{2,0})) \|y(t_{2,0}) - y_{2,0}\| + d(t_{2,l} - t_{2,0}) \exp(c(t_{2,l} - t_{2,0})) h^r \quad (8)$$

再基于公式(1b)有

$$\|y(t_{2,0}) - y_{2,0}\| = \|y(t_{1,m}) + I_2(y(t_{1,m})) - y_{1,m} - I_2(y_{1,m})\| \leq \gamma_2 \gamma_1 d(t_{0,m}) \exp(c(t_{1,m} - t_{1,0})) \exp(c(t_{0,m})) h^r + \gamma_2 d(t_{1,m} - t_{1,0}) \exp(c(t_{1,m} - t_{1,0})) h^r$$

代入(8)式得

$$\begin{aligned} \|y(t_{2,l}) - y_{2,l}\| &\leq \exp(c(t_{2,l} - t_{2,0})) \|y(t_{2,0}) - y_{2,0}\| + d(t_{2,l} - t_{2,0}) \exp(c(t_{2,l} - t_{2,0})) h^r = \gamma_2 \gamma_1 d(t_{0,m}) \\ &\exp(c(t_{2,l} - t_{2,0})) \exp(c(t_{1,m} - t_{1,0})) \exp(c(t_{0,m})) h^r + \gamma_2 d(t_{1,m} - t_{1,0}) \exp(c(t_{2,l} - t_{2,0})) \exp(c(t_{1,m} - t_{1,0})) h^r + \\ &d(t_{2,l} - t_{2,0}) \exp(c(t_{2,l} - t_{2,0})) h^r \end{aligned}$$

最后, $\forall t_{k,l} \in (\tau_k, \tau_{k+1}], k = 0, \dots, N, l = 1, 2, \dots, m$, 按照前面证明思路递推得

$$\|y(t_{k,l}) - y_{k,l}\| = \exp(c(t_{k,l} - t_{k,0})) \{d(t_{k,l} - t_{k,0}) + \sum_{i=0}^{k-1} (\prod_{j=i+1}^k \gamma_j) d(t_{i,m} - t_{i,0}) \exp[\sum_{j=i}^{k-1} c(t_{j,m} - t_{j,0})]\} h^r$$

可知存在函数 $C(t)$ 依赖于 $\alpha, \beta, M_i, \kappa_{ij}, \gamma_k$ ($k = 1, \dots, N$) 及 Runge-Kutta 方法, 且

$$C(t_{k,l}) = \exp(c(t_{k,l} - t_{k,0})) \{d(t_{k,l} - t_{k,0}) + \sum_{i=0}^{k-1} (\prod_{j=i+1}^k \gamma_j) d(t_{i,m} - t_{i,0}) \exp[\sum_{j=i}^{k-1} c(t_{j,m} - t_{j,0})]\}$$

使得

$$\|y(t_{k,l}) - y_{k,l}\| = C(t_{k,l}) h^r$$

成立,由此完成定理1的证明。

3 刚性问题 Runge-Kutta 方法的收敛性

对于刚性问题,经典 Lipschitz 常数取值很大,上

$$\text{Re} \langle u_1 - u_2, f(t, u_1, v) - f(t, u_2, v) \rangle \leq \hat{\alpha} \|u_1 - u_2\|^2, t \in (0, T], \forall u_1, u_2, v \in C^d \quad (9)$$

(2) f 关于第三个变元满足经典 Lipschitz 条件

收敛,那么用于求解满足条件(2)和(6)的初值问题(1)的 Runge-Kutta 方法(5)同样是 r 阶收敛,且有整体误差估计

$$\|y(t_{k,l}) - y_{k,l}\| \leq C(t_{k,l}) h^r, 0 < h \leq \bar{h}$$

这里 $C(t)$ 是依赖于 $\alpha, \beta, M_i, \kappa_{ij}, \gamma_k$ ($k = 1, \dots, N$) 及 Runge-Kutta 方法的函数,最大容许步长 $\bar{h}$ 由 α, β 及方法共同决定。

证明 对于满足非刚性条件的泛函微分方程,考虑具有 r 阶收敛的 Runge-Kutta 方法离散格式,其整体误差估计式^[11]表明, $\forall t_{k,l} \in (\tau_k, \tau_{k+1}], k = 0, \dots, N, l = 1, 2, \dots, m$, 则

第一步, $\forall t_{0,l} \in (0, \tau_1], l = 1, 2, \dots, m$, 基于公式(7)推出

第二步, $\forall t_{1,l} \in (\tau_1, \tau_2], l = 1, 2, \dots, m$, 推出

第三步, $\forall t_{2,l} \in (\tau_2, \tau_3], l = 1, 2, \dots, m$, 类似推出

再基于公式(1b)有

据此, $\forall t_{1,l} \in (\tau_1, \tau_2]$ 有

最后, $\forall t_{k,l} \in (\tau_k, \tau_{k+1}], k = 0, \dots, N, l = 1, 2, \dots, m$, 按照前面证明思路递推得

可知存在函数 $C(t)$ 依赖于 $\alpha, \beta, M_i, \kappa_{ij}, \gamma_k$ ($k = 1, \dots, N$) 及 Runge-Kutta 方法, 且

使得

成立,由此完成定理1的证明。

述收敛定理1在处理刚性问题时失效。为研究此类问题的 Runge-Kutta 方法的收敛性,针对问题(1),假设其右端函数 $f: (0, T] \times C^d \times C^d \rightarrow C^d$ 满足下面条件:

(1) f 关于第二个变元满足单边 Lipschitz 条件

$$\|f(t, u, v_1) - f(t, u, v_2)\| \leq \hat{\beta} \|v_1 - v_2\|, t \in (0, T], \forall u, v_1, v_2 \in C^d \quad (10)$$

这里 $\hat{\alpha}, \hat{\beta}$ 是适度大小的实常数, 其中 $\hat{\alpha}$ 是单边 Lipschitz 常数, $\hat{\beta}$ 是经典 Lipschitz 常数。

定义 3^[14-15] 方法(5)被定义为具有 r 阶 B-收敛 ($r > 0$), 如果应用此方法求解同时满足(9)和(10)的初值问题(1)时, f 充分光滑, 脉冲函数 $I_k(y)$, ($k = 1, 2, \dots, N$) 关于 y 满足条件(2) Lipschitz 连续, 则有

$$\max_{0 \leq k \leq N} \|y(t_{k,l}) - y_{k,l}\| \leq O(h^r), \text{ 当 } h \rightarrow 0 \text{ 时}$$

定理 2 如果求解 ODEs 初值问题(3)的 Runge-Kutta 方法(4)是 r 阶 B-收敛的, 那么用于求解满足条件(2)和(9) - (10)的初值问题(1)的 Runge-

$$\|y(t_{k,l}) - y_{k,l}\| \leq \bar{C}_k(t_{k,l} - t_{k,0}) \|y(t_{k,0}) - y_{k,0}\| + \bar{C}_k(t_{k,l} - t_{k,0}) h^r \quad (11)$$

第一步, $\forall t_{0,l} \in (0, \tau_1]$, 基于公式(11)推出

$$\|y(t_{0,l}) - y_{0,l}\| \leq \bar{C}_0(t_{0,l} - t_{0,0}) \|y(t_{0,0}) - y_{0,0}\| + \bar{C}_0(t_{0,l} - t_{0,0}) h^r = \bar{C}_0(t_{0,l} - t_{0,0}) h^r = C_0(t_{0,l}) h^r$$

其中 $C_0(t_{0,l}) = \bar{C}_0(t_{0,l} - t_{0,0})$ 。

然后, 对于 $\forall t_{1,l} \in (\tau_1, \tau_2]$, 同样由公式(11)推得

$$\|y(t_{1,l}) - y_{1,l}\| \leq \bar{C}_1(t_{1,l} - t_{1,0}) \|y(t_{1,0}) - y_{1,0}\| + \bar{C}_1(t_{1,l} - t_{1,0}) h^r$$

由于脉冲函数满足条件(1b)和(2), 得

$$\|y(t_{1,0}) - y_{1,0}\| = \|y(t_{0,m}) + I_1(y(t_{0,m})) - y_{0,m} - I_1(y_{0,m})\| \leq \gamma_1 \|y(t_{0,m}) - y_{0,m}\| \leq \gamma_1 C_0(t_{0,m}) h^r$$

$$\text{则有 } \|y(t_{1,l}) - y_{1,l}\| \leq \bar{C}_1(t_{1,l} - t_{1,0}) \gamma_1 C_0(t_{0,m}) h^r + \bar{C}_1(t_{1,l} - t_{1,0}) h^r = [\gamma_1 \bar{C}_1(t_{1,l} - t_{1,0}) C_0(t_{0,m}) + \bar{C}_1(t_{1,l} - t_{1,0})] h^r = C_1(t_{1,l}) h^r$$

其中 $C_1(t_{1,l}) = \gamma_1 \bar{C}_1(t_{1,l} - t_{1,0}) C_0(t_{0,m}) + \bar{C}_1(t_{1,l} - t_{1,0})$ 。

最后, 对于 $\forall t_{k,l} \in (\tau_k, \tau_{k+1}]$, 按照上面思路类似给出

$$\|y(t_{k,l}) - y_{k,l}\| \leq \bar{C}_k(t_{k,l} - t_{k,0}) \|y(t_{k,0}) - y_{k,0}\| + \bar{C}_k(t_{k,l} - t_{k,0}) h^r = \bar{C}_k(t_{k,l} - t_{k,0}) \|y(t_{k-1,m}) + I_k(y(t_{k-1,m})) - y_{k-1,m} - I_k(y_{k-1,m})\| + \bar{C}_k(t_{k,l} - t_{k,0}) h^r \leq \bar{C}_k(t_{k,l} - t_{k,0}) \gamma_k \|y(t_{k-1,m}) - y_{k-1,m}\| + \bar{C}_k(t_{k,l} - t_{k,0}) h^r \leq \gamma_k \bar{C}_k(t_{k,l} - t_{k,0}) C_{k-1}(t_{k-1,m}) h^r + \bar{C}_k(t_{k,l} - t_{k,0}) h^r = C_k(t_{k,l}) h^r$$

其中 $C_k(t_{k,l}) = \gamma_k \bar{C}_k(t_{k,l} - t_{k,0}) C_{k-1}(t_{k-1,m}) + \bar{C}_k(t_{k,l} - t_{k,0})$ 。

由此可见, 存在 $C_k(t)$ 依赖于 $\hat{\alpha}, \hat{\beta}, \gamma_k$ 及方法的函数, 使得数值解序列的整体误差估计满足

$$\|y(t_{k,l}) - y_{k,l}\| \leq C_k(t_{k,l}) h^r, 0 < h \leq \bar{h}$$

故定理 2 得证。

$$\begin{cases} Y' = -AY(t) + \frac{2}{5} \sin(\frac{t}{2}) BY(\frac{t}{2}), 0 < t \leq 3, t \neq k, k = 1, 2, 3 \\ \Delta Y = -\frac{1}{2} Y(k^-), t = k, k = 1, 2, 3 \\ Y(0^+) = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \end{cases} \quad (12)$$

其中向量 $Y(t)$ 以及矩阵 A, B 假设如下

$$Y(t) = \begin{pmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{pmatrix}, A = \begin{pmatrix} 8 \times 10^9 + 2 & 4 \times 10^9 - 4 \\ 4 \times 10^9 - 4 & 2 \times 10^9 + 8 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} -1 & 2 \\ 2 & -4 \end{pmatrix} \quad (13)$$

Kutta 方法(5)同样是 r 阶 B-收敛, 且有整体误差估计

$$\|y(t_{k,l}) - y_{k,l}\| \leq C_k(t_{k,l}) h^r, 0 < h \leq \bar{h}$$

其中最大容许步长 $\bar{h}$ 由 $\hat{\alpha}, \hat{\beta}$ 及方法共同决定, 而函数 $C_k(t)$ 由 $\hat{\alpha}, \hat{\beta}, \gamma$ 及方法决定。

证明 考虑在 $(\tau_k, \tau_{k+1}]$ 上, 将刚性脉冲延迟微分方程转化为刚性泛函微分方程。基于满足刚性条件的泛函微分方程, 考虑具有 r 阶 B-收敛的 Runge-Kutta 方法离散格式, 其整体误差估计式^[14]表明, 对于 $\forall t_{k,l} \in (\tau_k, \tau_{k+1}]$ 有

4 数值试验

参考 Li^[11] 比例延迟微分方程问题, 构造如下 NIPDDEs 初值问题

这里的脉冲时刻 $\tau^k = k, k = 1, 2, 3, q$ 为常数。

由于脉冲延迟微分方程的解析解较难求解,本算例用极小步长的数值解代替解析解,误差考虑全局绝对误差 $AE(h)$,其中范数统一采用 ∞ -范数,则 $AE(h) = \max_{0 \leq l \leq m} \|y(t_{k,l}) - y_{k,l}\|$,观测阶记为 $order$,

其中 $order = \log_2(AE(h)/AE(\frac{h}{2}))$ 。

下面分别讨论当条件(13)中 $q = -1$ (非刚性问题)与 $q = 7$ (刚性问题)时,初值问题(12)采用 *Runge-Kutta* 方法(5)的收敛性。

(1)当 $q = -1$ 时,验证问题为非刚性,计算得 $\alpha \approx 9.61, \beta = 2, \max\{\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3\} = 0.5$,均符合条件。取步长 $h = 10^{-2}$ 的数值解作为解析解,问题(12)采用二级 *Heun* 方法,取步长 $h = 1/80$ 的数值解模拟图像(见图1),以及取不同步长 $h = [1/10, 1/20, 1/$

$40, 1/80]$ 的全局绝对误差图像(见图2)。

由于非刚性问题,采用较大步长的显式 *Runge-Kutta* 可快速计算且保证收敛性,故分别采用 2 阶 *Heun*、2 阶中点法与 3 阶 *Heun* 法求解问题(12)的全局绝对误差与观测阶,得到观测阶与理论阶保持一致(见表1)。

(2)当 $q = 7$ 时,刚性比约为 10^7 ,验证问题为刚性,计算得 $\hat{\alpha} \approx -10, \hat{\beta} = 2, \max\{\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3\} = 0.5$,均符合条件。在 $t \in (0, 10^{-7}]$ 时,问题(12)是快变阶段,采用显式 *Runge-Kutta*,这里分别采用一级向前 *Euler* 方法(1 阶)和 2 级 *Heun* 方法(2 阶),取步长 $h = [8 \times 10^{-10}, 4 \times 10^{-10}, 2 \times 10^{-10}, 1 \times 10^{-10}]$ 的全局绝对误差及观测阶(见表2)。

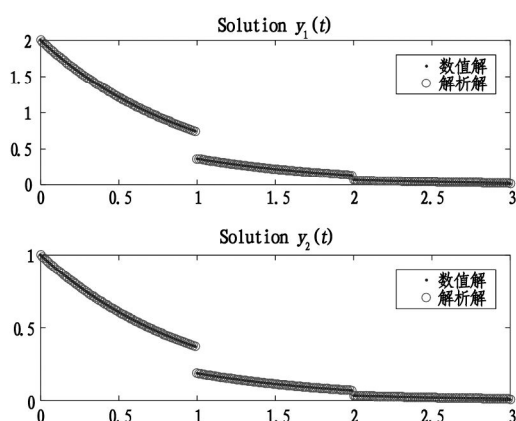


图1 2 阶 Heun 方法求解 $q = -1$ 的非刚性问题(12)的数值模拟

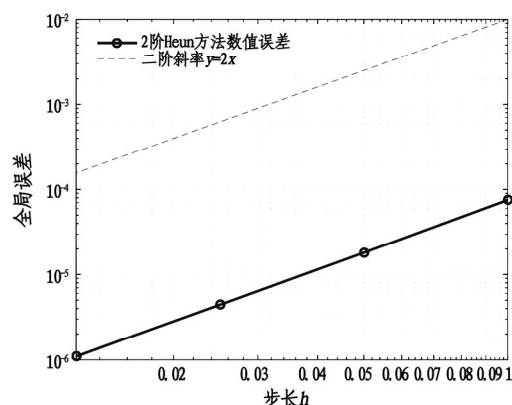


图2 2 阶 Heun 方法求解 $q = -1$ 的非刚性问题(12)的全局绝对误差

表1 $q = -1$ 时非刚性问题(12)的全局绝对误差(AE)与观测阶 order

步长 h	2 阶 Heun		2 阶中点法		3 阶 Heun	
	AE	order	AE	order	AE	order
0.1	$1.3158e-03$	*	$1.3158e-03$	*	$3.3036e-05$	*
0.05	$3.1792e-04$	2.0492	$3.1782e-04$	2.0497	$3.9834e-06$	3.0520
0.025	$7.8065e-05$	2.0259	$7.7949e-05$	2.0276	$4.8850e-07$	3.0276
0.0125	$1.9338e-05$	2.0132	$1.9212e-05$	2.0205	$6.0443e-08$	3.0147

表 2 $q=7$ 时刚性问题 (12) 在 $t \in (0, 10^{-7}]$ 的全局绝对误差 (AE) 与观测阶 order

步长 h	1 级 Euler		2 级 Heun	
	AE	order	AE	order
8×10^{-10}	$7.9112e-08$	*	$7.8954e-06$	*
4×10^{-10}	$3.9504e-08$	1.0020	$1.9679e-06$	2.0044
2×10^{-10}	$1.9701e-08$	1.0037	$4.9124e-07$	2.0010
1×10^{-10}	$9.8023e-09$	1.0070	$1.2272e-07$	2.0022

在 $t \in [10^{-7}, 3]$ 时, 问题 (12) 越出快变阶段, 适合隐式 Runge-Kutta, 采用 2 级 Lobatto III C (2 阶), 取步长 $h = 10^{-4}$ 的数值解代替解析解, 计算不同步长下的全局绝对误差及观测阶 (见表 3)。

表 3 $q=7$ 时刚性问题 (12) 在 $t \in [10^{-7}, 3]$ 的全局绝对误差 (AE) 与观测阶 order

步长 h	2 级 Lobatto III C	
	AE	order
$\frac{1}{2} \times 10^{-3}$	$4.5344e-09$	*
$\frac{1}{4} \times 10^{-3}$	$1.0881e-09$	2.0591
$\frac{1}{8} \times 10^{-3}$	$2.7131e-10$	2.0039
$\frac{1}{16} \times 10^{-3}$	$4.5218e-11$	2.5850

上述数值试验验证了本文理论的正确性。

5 结论

分别从非刚性和刚性两种情形, 研究了一类 NIPDDEs 的 Runge-Kutta 方法的收敛性, 在非刚性情形下获得了经典收敛性结果, 在刚性情形下建立了 B-收敛理论, 这在一定程度上补充了脉冲延迟微分方程数值分析的理论体系。

参考文献:

[1] ZENNARO M. Asymptotic stability analysis of Runge-Kutta methods for nonlinear systems of delay differential equations[J]. Numerische Mathematik, 1997, 77(4): 549 – 563.

[2] BELLEN A, ZENNARO M. Numerical Methods for Delay Differential Equations[M]. Oxford University Press, 2003.

[3] BAINOV D D, SIMEONOV P S. Systems with Impulse Effect: Stability, Theory and Applications[M]. Chichester: Ellis Horwood, 1989.

[4] 傅希林, 闫宝强, 刘衍胜. 脉冲微分系统引论[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

[5] 张贵来. 几类脉冲延迟微分方程及其数值解的稳定性[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.

[6] 赵延飞. 时滞微分系统的脉冲控制研究及应用[D]. 济南: 山东师范大学, 2014.

[7] 杨传影. 脉冲微分方程 Runge-Kutta 方法的收敛性分析[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2019.

[8] 林雨森. 具有时滞和脉冲的神经网络系统的动力学研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.

[9] 林文贤. 带脉冲的多时滞分数阶阻尼偏微分方程解的强迫振动性[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2024(2): 33 – 41.

[10] 肖爱国, 符鸿源. 非线性刚性微分方程算法理论的发展[J]. 自然科学进展: 国家重点实验室通讯, 1999.

[11] LI Shoufu. Classical theory of Runge-Kutta methods for Volterra functional differential equations [J]. Applied Mathematics and Computation, 2014, 230: 78 – 95.

[12] 李寿佛. 刚性常微分方程及刚性泛函微分方程数值分析[M]. 湘潭: 湘潭大学出版社, 2010.

[13] ZHANG Guilai. High order Runge-Kutta methods for impulsive delay differential equations[J]. Applied Mathematics and Computation, 2017, 313: 12 – 23.

[14] 李寿佛. 刚性 Volterra 泛函微分方程算法理论及高效算法[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(3): 581 – 586.

[15] 李寿佛. B-Theory of Runge-Kutta methods for stiff Volterra functional differential equations[J]. Science in China (Series A), 2003, 46(5): 662 – 674.

责任编辑: 李云

运动干预对智力障碍儿童基本运动技能影响的 Meta 分析

鲍月玲,王 聪,国 风,漆 巍,孙明运*

(安庆师范大学 体育学院,安徽 安庆 246133)

摘 要:运动干预对智力障碍儿童基本运动技能的改善已有研究证明,然而对于采用何种运动干预手段能够有效改善基本运动技能、位移与物体控制技能尚未给出统一的标准。为了探讨运动干预对智力障碍儿童基本运动技能的影响,并进一步分析影响基本运动技能干预方案的因素,及针对改善其不同子功能效果显著的运动项目,通过 PubMed、中国知网(CNKI)、EMBASE、中国生物医学文献服务(CBM)等平台,检索运动干预对智力障碍儿童基本运动技能影响的随机对照实验,检索时限为建库至2024年5月15日。通过亚组分析探讨各研究间异质性,结果表明,运动频率和智力障碍程度可能是异质性来源。每周4次左右、运动时间每次35至60分钟、为期8-16周的运动干预可显著改善智力障碍儿童的基本运动技能,且各项球类运动,在改善包括位移技能、物体控制技能方面有显著作用,空间、核心及小肌肉群训练则更多改善动、静态平衡能力。鉴于研究数量相对较少及其局限性,需要谨慎解释本研究结果,并需要进一步进行严格的研究。

关键词:运动干预;智力障碍儿童;基本运动技能;Meta 分析

中图分类号:R455

文献标识码:A

文章编号:2095-297X(2025)05-0104-08

Meta-analysis on Effect of Exercise Interventions on Basic Motor Skills of Children with Intellectual Disabilities

BAO Yueling, WANG Cong, GUO Feng, QI Wei, SUN Mingyun*

(School of Physical Education, Anqing Normal University, Anqing, 246133, Anhui)

Abstract: Although it has been shown that motor intervention can improve fundamental motor abilities in children with intellectual disabilities, there is currently no accepted standard for determining the type of motor intervention that works best for enhancing basic motor skills, displacement, and object control. In order to investigate how exercise intervention affects the basic motor skills of children with intellectual disabilities and to further examine the variables influencing the basic motor skills intervention program and the exercise regimens that are most successful in enhancing their various subfunctions. PubMed, China Knowledge Network (CNKI), EMBASE, and the China Biomedical Literature Service (CBM) were searched for randomized controlled trials examining the impact of exercise therapies on fundamental motor skills in children with intellectual disabilities. The retrieval time limit is from the establishment of the database to May 15, 2024. The frequency of exercise and the degree of intellectual disability may be causes of variation, according to subgroup analyses used to examine heterogeneity among research. Children with intellectual disabilities greatly improve their basic motor abilities after an 8 to 16 week exercise program consisting of 35-60 minutes of exercise approximately four times a week, and that playing ball games has a big impact on developing abilities like object handling and displacement, training for the small muscles, core,

收稿日期:2025-02-27 * 通讯联系人

基金项目:安徽省质量工程项目(240002007);安庆师范大学教授科研基金(81902307)。

作者简介:鲍月玲(1999-),女,安徽合肥人,硕士研究生;孙明运(1972-),男,陕西蓝田人,教授,博士。E-mail:2576167833@qq.com

and space is mainly about enhancing both static and dynamic balance. It is important to interpret the findings of this study cautiously and conduct more thorough research because of the limited number of studies and their limitations.

Key words: exercise intervention; children with intellectual disabilities; fundamental motor skills; meta-analysis

智力障碍 (Intellectual Disability, ID) 儿童在运动、认知等方面普遍存在发展迟缓问题^[1], 这不仅限制了他们日常身体活动的参与度, 还进一步加剧了健康风险^[2]。通过走访调研特教学校得知, 智力障碍学生大多以久坐为主, 相较于正常同龄学生, ID 儿童的身体活动 (PA) 水平显著低于正常同龄儿童。由于长期久坐导致运动能力匮乏, 而运动能力不足又限制了他们参与课外体育运动的机会, 形成恶性循环。

基本运动技能 (Fundamental Movement Skills, FMS), 是人体完成多种运动项目、身体活动及体育游戏等复杂运动技能的基础, 通常包括位移技能 (如跑步、跳跃、攀爬等)、物体控制技能 (如接球、投掷、滚动等) 和动静态平衡能力 (如保持平衡、单脚站立等)^[3]。但 ID 儿童在这些方面存在明显滞后, 导致跌倒风险增加、独立能力受限^[4]。

尽管已有研究探讨运动干预对 ID 儿童有氧耐力、体成分、心理健康的积极影响^[5-7], 以及 ID 儿童的元分析也表明, 运动技能干预在改善 FMS 方面是有效的^[8]。然而, 采用何种运动干预手段能够有效改善基本运动技能、位移与物体控制技能尚未给出统一的标准。此类研究可以为专业人员提供有价值的信息, 帮助他们设计有效的运动技能干预措施, 对改善智力障碍儿童的 FMS 至关重要。本研究旨在通过对实验研究进行系统综述, 以了解运动干预对 6-12 岁智力障碍儿童的 FMS 综合影响。

1 资料与方法

1.1 文献检索

本研究在中国知网 (CNKI)、中国科技期刊数据库 (VIP) 数据库、万方数据库、中国生物医学文献数据库 (CBM)、The Cochrane Library、PubMed、Web of Science、Embase 等 8 个数据库中检索相关文献, 检索时限从各数据库建库至 2024 年 5 月 15 日。每个主要术语的关键字都是根据之前与运动干预、基本运动技能和智力障碍儿童相关的综述搜索而定, 并通过 CBM 和 Pubmed 数据库确定相关领域的中英文主题词与自由词。其中英文数据库检索词包括 “Intellectual Disability” “Exercise” “Physical Activity”

“Child” “Children” 等。中文检索词包括 “智力障碍” “智力低下” “儿童” “运动干预” “身体活动” “体育运动” 等, 检索时采用主题词与自由词结合的方式。

1.2 纳入及排除标准

纳入标准包括:

研究设计: 纳入的研究必须为随机对照试验;

研究对象: 智力障碍儿童, 性别与障碍程度不限;

干预措施: 试验组智力障碍儿童以任何运动训练的方式作为试验方案, 对照组智力障碍儿童采用常规体育活动或空白对照;

结局指标: 基本运动技能 (及其子功能包括位移技能、控制技能) 平衡能力 (包括静态平衡、动态平衡)。

排除标准包括:

患有特定的智力障碍 (如脑瘫、唐氏等) 的儿童; 未描述具体干预方案的文献; 实验数据不充分; 综述文章、会议报告和 Meta 分析; 研究类型为非随机对照实验; 重复的文献。

1.3 数据提取

将数据库相关文献导入 Endnote, 剔除重复文献。两名研究人员通过独立双盲审查法筛选并提取研究数据。首先通过文献标题和摘要排除无关研究, 然后根据既定纳入和排除标准深入分析全文。如出现分歧, 由第 3 名研究者介入以确保评估的客观性和准确性。从选定的研究中提取以下数据:

文献来源: 第一作者信息、发表年限;

实验组与对照组基本信息: 样本量、年龄、障碍程度、运动周期、运动时长、运动频率;

结果指标: 采用大肌肉动作发展量表 (Test of Gross Motor Development-2, TGMD-2), Berg 平衡量表, 单腿 (闭眼) 站姿测试, BOT-2, BESS 平衡误差评分系统, Y-Balance。

1.4 文献质量评估

由 2 名研究人员依据 Cochrane 风险偏倚评估工具对纳入的文献进行质量评估。包括以下 7 个条目: 随机序列生成 (选择性偏倚)、分配隐藏 (选择性偏倚)、受试者研究人员盲法 (实施偏倚)、结局评估

盲法(测量偏倚)、结局数据不完整(随访偏倚)、选择性报告(报告偏倚)和其他偏倚。根据标准按照低偏倚风险、高偏倚风险和偏倚风险不详 3 个等级对纳入文献进行质量评价。若 2 名研究人员评估结果不一致,则由第 3 名研究人员参与判定。

1.5 统计学分析

Meta 分析由 RevMan5.3 软件完成。本研究所纳入的文献结局指标均为连续性变量数据,选用 SMD 作为效应指标,并以 95% 置信区间(CI)计算。异质性检验采用 I^2 检验(检验水准 $P=0.05$),并计算 I^2 和 P 值评估各研究间异质性的程度,若 $I^2 < 50\%$ 且 $P \geq 0.1$,说明纳入的研究异质性较小,故采用固定效应模型;反之,异质性较大则采用随机效应模型($I^2 \geq 50\%$ 且 $P < 0.1$),并进一步查找异质性的来源。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。当纳入文献样本量少于 10 时,因样本量小和检验效能过低,不进行发表偏倚检验。

2 结果

2.1 文献筛选流程及结果

初始检索中英文数据库共获取相关文献 4123 篇,通过 Endnote 软件进行处理,剔除重复文献和无关文献后,进一步阅读文章标题和摘要后进行筛查,最终纳入 10 篇文献^[1,9-17]。文献筛选流程如图 1 所示。

文献中共计 333 名智力障碍儿童(实验组为 193 名,对照组为 140 名),平均年龄为 9.22 岁。

2.2 纳入文献基本信息

纳入的 10 篇文献中包括 6 篇中文文献,4 篇英文文献,共 333 名智力障碍儿童。针对文献的结局指标,其中 3 篇文献^[9-11]采用 TGMD-2 测试工具

报告了基本运动技能,3 篇文献^[12-14]采用单腿站立测试工具报告了静态平衡能力,2 篇文献采用 Berg 平衡量表报告了动态平衡能力^[15-16],1 篇文献^[1]采用 BOT-2 评估了运动技能,1 篇文献^[17]采用 BESS 平衡误差评分系统和 Y-Balance 测试评估了平衡能力。

纳入的文献中,实验组为有氧运动干预、平衡训练、核心训练、球类训练等;对照组为常规生活方式或者常规体育运动。运动干预措施主要包括运动周期、运动时间和运动频率,干预周期为 8-16 周,时长为 45-80 min/次,频率为 2-4 次/周,测量类型为基本运动技能、动静平衡。测试方法有:大肌肉动作发展量表,得分越高基本运动技能越好;Berg 平衡量表,得分越高表明动态平衡能力越好;计时测试,单腿站立时间越长,表明静态平衡能力越好。纳入文献的基本特征如表 1 所示。

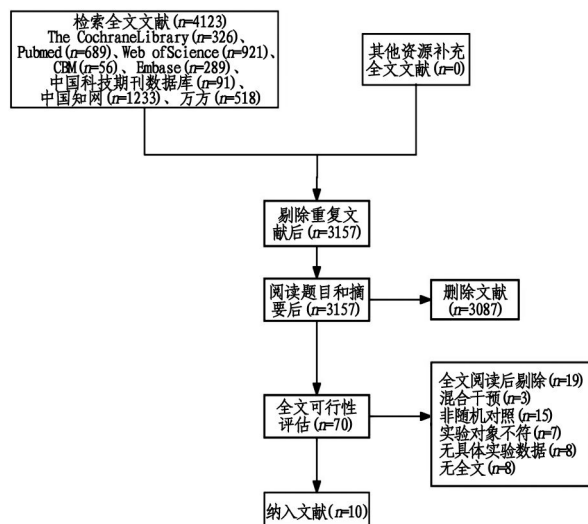


图 1 文献筛选流程

表 1 纳入文献的基本特征($n=10$)

文献来源	样本量 (实验组/对照组)	运动干预特征			干预措施 (实验组/对照组)	年龄 /岁	智力障 碍程度	结局 指标
		运动周期 /周	运动时长 /(min/次)	运动频率 (次/周)				
张博谦 ^[9]	16(8/8)	12	60	2	羽毛球运动干预 /常规体育课程	9-12	轻度	①
张磊等 ^[10]	26(14/12)	16	45	2	软式曲棍球训练 /常规的体育课	9-12	中重度	①
张宇浩 ^[11]	32(16/16)	10	35	2	足球活动课 /常规体育课	9-11	轻度	①
郭立亚等 ^[12]	44(23/21)	8	80	2	足球运动 /常规体育课	11-15	轻中度	②

续表
表 1 纳入文献的基本特征 (n = 10)

文献来源	样本量 (实验组 /对照组)	运动干预特征			干预措施 (实验组/对照组)	年龄 /岁	智力障 碍程度	结局 指标
		运动周期 /周	运动时长 /(min/次)	运动频率 (次/周)				
李远良 ^[13]	36(27/9)*	12	60	4	核心、有氧、综合 /常规体育课	9-13	中度	②
Zhaowei Kong 等 ^[14]	53(34/19)#	12	60	2	太极、有氧 /等常规体育课	11-15	轻度	②
章裕含 ^[15]	20(10/10)	15	40	3	适应性八式太拳 /常规体育课	10-12	未说明	③
Peiting Zhao 等 ^[16]	42(28/14)#	12	60	3	水上运动、地板冰壶 /常规身体活动	9-12	未说明	③
Zekiye Ozkan 等 ^[1]	34(18/16)	14	60-70	2	体育活动 /无任何干预	9-12	未说明	④
Esmail Balayi 等 ^[17]	30(15/15)	8	60	3	体能球联合训练 /常规体育课	6-13	轻度	⑤⑥

注：* 表示实验组等分为 3 组，对照组 1 组；#表示实验组等分为 2 组，对照组 1 组；①TGMD-2；②闭眼单腿站立 (OLS)；③Berg 平衡量表；④BOT-2 测试；⑤Y-Balance 测试；⑥BESS 平衡误差评分系统。

2.3 纳入研究方法学质量评价结果

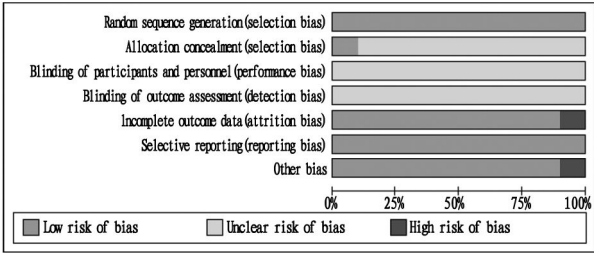
采用改良的 Jadad 量表对纳入文献的 7 个方面进行质量方法学评估。在随机分配方法方面,10 篇文献^[1,9-17]描述了产生随机分配序列的方法,非随机分配为高风险,未描述为不清楚;在分配方案隐藏方面,1 篇文献^[16]严格执行随机分配的结果,反之为高风险,无充足信息判定为不清楚;在盲法方面,由于干预研究的特殊性,无法对受试者和研究者同时做到双盲法,纳入 10 篇文献^[1,9-17]的风险均为不清楚;在结果数据的完整性方面,9 篇文献^[9-17]完整地报告各指标的数据,结局指标的缺失不影响干预效应,反之为高风险,未明确报道为不清楚;在选择性研究报告结果方面,10 篇文献^[1,9-17]可获得研究方案或发表的报告报道了所期望的结果,描述为低风险,反之为高风险,无充足信息判定为不清楚;其他偏倚风险方面,1 篇文献^[9]样本量较小,描述为高风险。具体的风险偏倚评估如图 2 所示。

2.4 Meta 分析结果

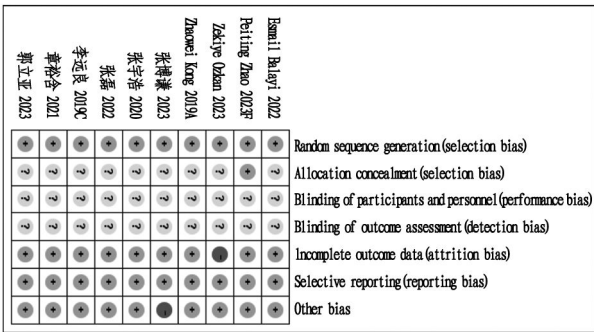
2.4.1 运动干预对智力障碍儿童基本运动技能的影响

在纳入的 10 篇文献中,有 4 篇文献^[1,9-11]对 108 名被试进行基本运动技能影响的比较研究。其中 3 篇对基本运动技能及其子功能进行了测量^[9-11],研究间的异质性较高 ($I^2 = 82\%$, $P < 0.000$

01),采用随机效应模型进行 Meta 分析,结果显示,与对照组相比,运动干预能够有效改善智力障碍儿童的基本运动技能 [$SMD = 2.71$, 95% CI 为 (1.79, 3.63)], $P < 0.000 01$],如图 3 所示。



(a) 纳入文献偏倚风险比例图



(b) 纳入文献偏倚风险总结图

图 2 纳入文献偏倚风险

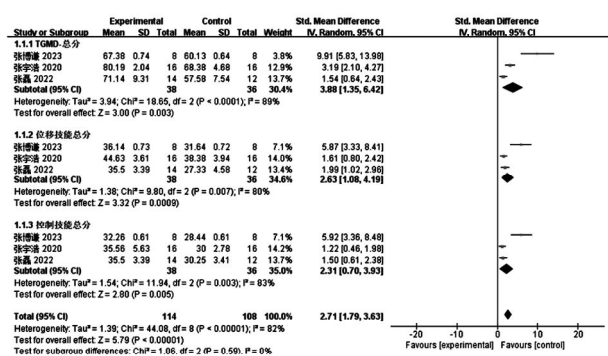
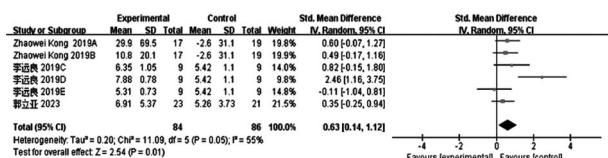


图3 运动干预对智力障碍儿童基本运动技能影响的森林图

由于 Zekiye Ozkan 与其他 3 篇测量指标不同, 不进行合并分析, 对结果进行定性描述发现体育运动对智力障碍儿童基本运动技能有明显的改善作用^[1]。

2.4.2 运动干预对智力障碍儿童静态平衡能力的影响

在纳入的 10 篇文献中, 有 3 篇文献^[12-14] 对 133 名被试进行静态平衡能力影响的比较研究。各研究间存在较高的异质性 ($I^2 = 55\%$, $P = 0.05$), 采用随机效应模型进行 Meta 分析, 结果显示, 与对照组相比, 运动干预能够有效改善智力障碍儿童的静态平衡能力 [SMD = 0.63, 95% CI 为 (0.14, 1.12)], $P = 0.01$, 如图 4 所示。

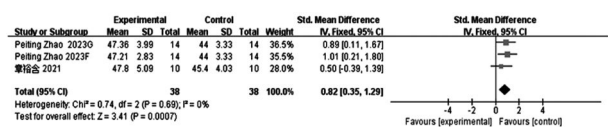


A 为太极拳组; B 为有氧运动组; C 为核心、有氧综合组; D 为核心训练组; E 为有氧训练组

图4 静态平衡能力的 Meta 分析结果

2.4.3 运动干预对智力障碍儿童动态平衡能力的影响

在纳入的 10 篇文献中, 有 2 篇文献^[15-16] 对 62 名被试进行动态平衡能力影响的比较研究。研究间的异质性较低 ($I^2 = 0$, $P = 0.69$), 采用固定效应模型进行 Meta 分析, 结果显示, 与对照组相比, 运动干预能够有效改善智力障碍儿童的动态平衡能力 [SMD = 0.82, 95% CI 为 (0.35, 1.29)], $P = 0.0007$, 如图 5 所示。



G 为自由冰壶运动实验组; F 为水上运动实验组

图5 动态平衡能力的 Meta 分析结果

采用 BESS 平衡误差评分系统、Y-Balance 评估运动对智障儿童基本运动技能的影响为: 有 1 篇文献, 仅对结果定性分析。Esmail Balayi 等研究发现, 8 周的体能球联合训练对智力障碍患者战胜发育协调障碍后的姿势控制、平衡、双侧协调和上肢协调有显著的改善^[17]。

2.5 亚组分析

为了进一步探究研究间的异质性来源, 将可能引起异质性的因素如研究对象的障碍程度、运动干预类型、周期、时长、频率等进行亚组分析。

2.5.1 基本运动技能

对研究文献按照智力障碍程度分为轻度 and 中重度 2 个亚组, 运动周期分为 <12 周、 ≥ 12 周 2 个亚组, 运动时长分为 ≤ 45 min/次、 > 45 min/次 2 个亚组, 样本量分为 ≤ 30 人、 > 30 人两个亚组。通过对 3 篇文献进行亚组分析, 结果发现智力障碍程度可能是导致各研究间异质性的影响因素 [SMD = 1.39, 95% CI 为 (0.88, 1.90)], $P = 0.36$, $I^2 = 3\%$, 如图 6 所示。

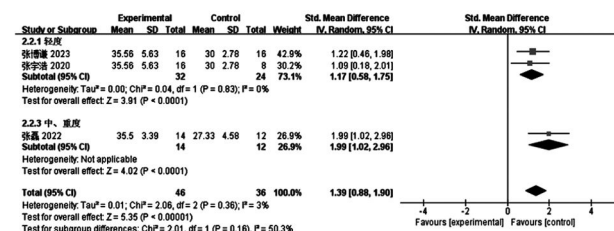


图6 智力障碍程度对基本运动技能影响的亚组分析

2.5.2 静态平衡能力

对研究文献按照运动频率分为 ≤ 3 次/周、 > 3 次/周两个亚组; 按照智力障碍程度分为轻度、中度、轻中度三个亚组; 通过对 3 篇文献进行亚组分析, 结果发现以运动频率分组时, 每周 2 次 (≤ 3 次/周) 的运动干预对智力障碍儿童静态平衡能力影响方面没有显著性差异 [SMD = 0.47, 95% CI 为 (0.10, 0.84)], $P = 0.85$, $I^2 = 0.00\%$, 每周 4 次的运动干预对智力障碍儿童静态平衡能力影响方面有显著性差异 [SMD = 0.99, 95% CI 为 (-0.37, 2.35)], $P = 0.007$, $I^2 = 80\%$, 如图 7 所示。

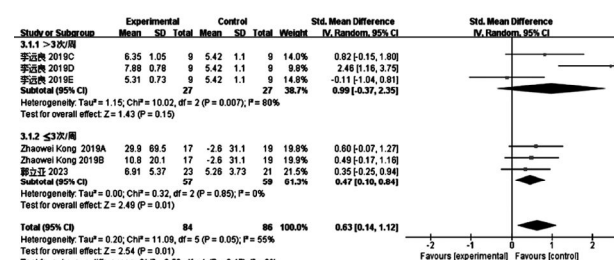


图7 运动频率对静态平衡能力影响的亚组分析

当以智力障碍程度进行分组时,结果发现,对于轻度智力障碍患儿,运动干预对其静态平衡能力影响方面没有显著性变化[$SMD = 0.55$, 95% CI 为 $(0.08, 1.02)$, $P = 0.82$, $I^2 = 0.00\%$],对于中度智力障碍患儿运动干预对其静态平衡能力影响方面具有显著性差异[$SMD = 0.99$, 95% CI 为 $(-0.37, 2.35)$, $P = 0.007$, $I^2 = 80\%$],如图 8 所示。

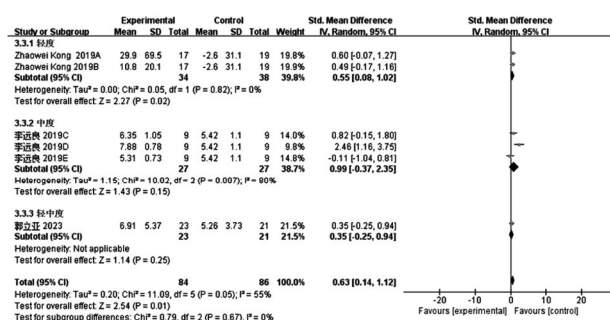
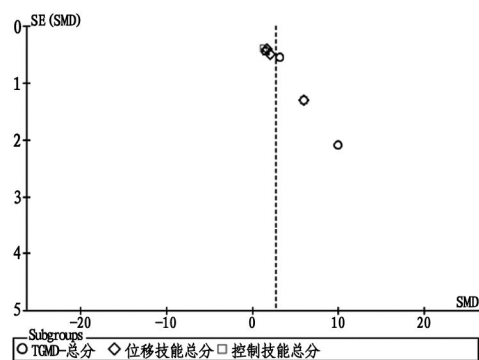


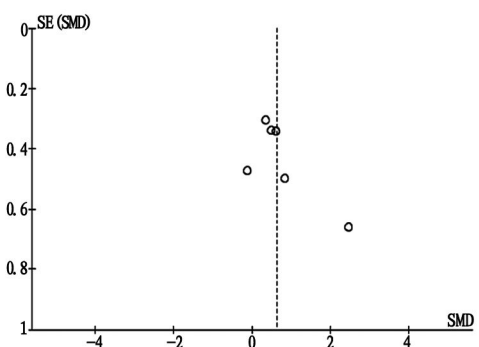
图 8 智力障碍程度对静态平衡能力影响的亚组分析

2.6 发表偏倚分析

由于纳入文献较少,仅对包含基本运动技能、平衡能力的文献绘制漏斗图,如图 9 所示。结果显示,基本运动技能存在一定的发表偏倚,其来源可能是由于样本量较小造成的;静态平衡存在一定的发表偏倚,可能是采取方法不同而呈现的偏差;动态平衡不存在发表偏倚。



A 为基本运动技能发表偏倚漏斗图



B 为静态平衡发表偏倚漏斗图

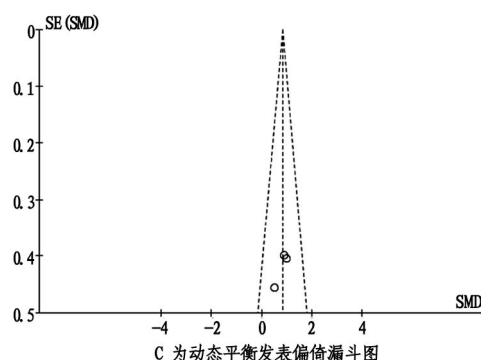


图 9 不同结局指标的漏斗图

3 讨论

3.1 运动干预对智力障碍儿童基本运动技能的影响

运动问题在智障人士中很常见,因为 ID 是一种影响认知和运动功能的疾病^[18-19],被诊断患有 ID 的个体通常都有久坐不动的生活方式^[20]和低体力活动水平^[21]。研究表明基本运动技能和平衡在不活跃的 ID 患者中最为明显^[22]。这进一步限制了患者在日常生活活动中的自主性^[23]。事实上,先前的研究表明,在各种干预方案之后, ID 患者的运动技能表现可以得到显著改善^[24]。因此,需要进一步的研究来开发和测试干预措施,以鼓励有 ID 的个人发起和维持体育活动。

本系统分析了 10 项研究结果,这些研究探讨了运动干预对患有智力障碍的儿童 FMS 的影响。其中大多数研究都关注于智力障碍儿童位移技能、物体控制技能或平衡能力。结果表明,合理科学的运动干预能够显著改善 FMS,运动干预为智力障碍儿童基本功能的改善和生活质量的提高提供了科学支持。

3.1.1 运动干预对智力障碍儿童位移技能、物体控制技能的影响

本研究显示,只有 3 项研究探讨了运动干预对整体 FMS 及其子功能的影响。研究发现,球类运动训练在改善智力障碍儿童的 FMS 方面具有显著效果。这些发现与已有研究结果一致^[25]。经研究,干预措施在持续时间为 10 至 16 周有效,训练课程每周举行 2 次,持续时间为 35 - 60 分钟。这可能与球类训练在位移技能和物体控制技能上有针对性的作用,例如,针对位移技能,强调机体跑步、跳跃、攀爬等技能,而在进行球类运动时,其突出特征就是包含大量的走、跑、跳等动作。而物体控制技能强调的接球、投掷等动作更是球类运动的核心。因此,今后康复专业及特殊教育机构的人员可以为不同类型智力

障碍儿童制定针对性的康复计划,球类运动则可以作为提高智力障碍儿童基本运动的干预计划的首选。

3.1.2 运动干预对智力障碍儿童动、静态平衡能力的影响

Meta 分析结果显示,运动干预能够改善智力障碍儿童动、静态平衡能力。平衡是一种基本的身体能力,几乎与一个人可能执行的所有运动任务有关,而智力障碍儿童在平衡能力上的缺陷,直接限制了他们的运动发育和基本功能的发展。感官信息摄入的减少和刺激处理的困难是解释患者难以保持平衡的关键因素。此外,有限的运动机会和缺乏运动激励导致不活动和久坐的生活方式^[26]。智力障碍儿童的身体活动水平不仅比非智力残疾同龄人低得多,而且他们也更加依赖学校系统来积累身体活动。与放学后相比,智力障碍儿童在上学期期间多以久坐为主,从而导致下肢肌肉力量退化,运动能力及协调性下降^[27]。有氧、平衡训练以及核心力量训练等不同运动类型的运动干预能够显著改善智力障碍儿童的动、静态平衡能力^[28]。运动参与引起的感觉运动系统的具体变化是多方面的,一些间接证据表明,运动训练后检测关节位置(本体感觉)变化的可能性有所提高,改善神经肌肉协调、关节力量训练也可能是改善平衡的机制^[29]。更具体地说,智力障碍患儿在进行运动活动时,包括在不稳定的表面和不同的位置(单脚,双脚)站立和行走,单脚或双脚跳跃,以不同的节奏走或跑,从而产生被认为会影响 ID 个体的深层敏感性本体感觉刺激,进而改善动、静态平衡能力^[26]。最后,参与体育锻炼项目的智力障碍儿童和不参加体育锻炼的智力障碍儿童在身体健康方面存在差异,参加锻炼计划的 ID 儿童的所有测试结果都有所改善。尽管结果仍然不如那些没有参与运动的正常发育儿童,但纵向监测显示,被测能力的发展有所改善。所以,一个有计划的体育锻炼项目有助于发展成功完成运动任务的能力,最重要的是力量、上肢和下肢的协调、运动控制、肌肉张力和空间方向的平衡和调节^[30]。同时,参与者在训练过程中不断探索、创造他们心中的新事物,从而产生愉悦感。

3.2 运动干预对智力障碍儿童基本运动技能影响的亚组分析

经过对相关影响因素进行各研究间亚组分析,结果显示,智力障碍程度、运动频率可能是产生异质性的原因。

3.2.1 智力障碍程度的亚组分析

不同程度智力障碍的亚组分析发现,与轻度智

力障碍儿童相比,运动干预对中度智力障碍儿童的效果更佳。这与国外已有研究证据一致,Capio 等^[31]的研究发现,这可能是由于中度 ID 儿童肌张力低下和关节松弛导致他们的基础运动缺陷更严重、平衡问题进一步加剧,使得中度 ID 儿童的运动干预效果更加显著。本研究结果与 Tsimaras^[32]的不一致,相较于中度 ID 患者,轻度 ID 患者的平衡能力表现更好,这可能是轻度 ID 患者认知执行功能、大脑前额叶激活能力以及自身健康水平较高的缘故,也可能与干预计划制定的差异有关。因此,今后的研究应参考实验设计更加严谨、质量更高的文献,分析智力障碍程度对基本运动能力的影响。

3.2.2 运动频率的亚组分析

在一定运动干预周期内,每周相对高频的运动对智力障碍儿童的神经肌肉系统产生的刺激,神经与肌肉的联系使得机体的基本能力与认知执行功能得以发展。郭立亚等研究^[12]发现,每周 2 次的足球运动干预后,静态平衡测试成绩虽有提高但无显著性差异,这可能一方面与足球技能本身的特征相关,足球运动通常是在动态中进行,更多是利用髋关节与膝关节策略来维持,而静态平衡能力则是需要利用踝关节与足底感受来提高,但为期 8 周、每周 2 次的训练后的平衡能力无显著性变化,对比已有大部分研究表明每周 3-5 次的运动干预效果往往更佳^[33],这与本文运动频率为每周 4 次的结果一致。因此,改善 ID 儿童静态平衡能力需要制定更加细致全面的训练计划,且持续时间最好为 8-16 周、每周 4 次左右,每次 30-60 分钟。人体平衡能力的增强则需要更长时间的干预,针对提高机体力量的发展、改善平衡能力,短期且干预频率较低的方式产生效果的机制尚需进一步探索。

3.3 局限性

本综述存在几个局限性。首先,现有研究中实验设计、干预措施和结果测量的可变性限制了数据的定量合成,我们的研究专注于对基本运动技能及其子功能的定量检查,纳入的文献较少,对研究结果的普遍性有一定影响。此外,纳入的研究尚未调查运动训练的依从性,缺乏跟踪研究,未对运动干预的延时效应进行探讨。

4 结论

通过 Meta 分析发现,每周 4 次左右、运动时间每次 35 至 60 分钟、为期 8 到 16 周的运动干预能够有效改善智力障碍儿童的基本运动技能,包括位移技能、物体控制技能以及动静态平衡能力,其中采用

球类运动,可以作为改善位移技能、物体控制技能干预计划的首选,改善动静平衡能力则多以核心、空间等训练为主。运动频率和智力障碍程度可能是影响干预有效性的因素,运动对轻中度智力障碍儿童技能改善效果最佳。值得注意的是,在纳入文献的运动项目中,很少有后续研究。此外,由于大多数研究都集中在有氧运动或综合训练上,提高智力障碍儿童预后基本运动技能的最佳方法仍存在争议。因此,为了获得更多的结论性发现,未来的研究应该着眼于不同的锻炼方式如何影响智力障碍儿童的基本运动技能,以及运动如何影响不同程度智力障碍儿童运动能力的研究需要在未来加以考虑。

参考文献:

- [1] ÖZKAN Z, KALE R. Investigation of the effects of physical education activities on motor skills and quality of life in children with intellectual disability [J]. *International Journal of Developmental Disabilities*, 2023, 69 (4) : 578 – 592.
- [2] JANSSEN I, LEBLANC A G. Systematic review of the health benefits of physical activity and fitness in school-aged children and youth [J]. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*, 2010, 7 : 1 – 16.
- [3] 孟杰, 吴雪萍. 轻度智障儿童基本运动技能与体力活动水平的关系 [J]. *上海体育学院学报*, 2020, 44 (5) : 81 – 88, 94.
- [4] 张磊, 王丹丹, 吴雪萍. 基本动作技能对智力障碍儿童中高强度身体活动的影响: 障碍程度的差异 [J]. *中国体育科技*, 2023, 59 (4) : 27 – 35.
- [5] MILANOVIĆ Z, PANTELIĆ S, SPORIŠG, et al. Health-related physical fitness in healthy untrained men: Effects on VO_2 max, jump performance and flexibility of soccer and moderate-intensity continuous running [J]. *PloS One*, 2015, 10 (8) : 0135319.
- [6] 罗魁. 10 周足球运动干预对初中生体质健康影响的实验研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2016.
- [7] DARONGKAMAS J, SCOTT H, TAYLOR E. Kick-starting men's mental health: An evaluation of the effect of playing football on mental health service users' well-being [J]. *International Journal of Mental Health Promotion*, 2011, 13 (3) : 14 – 21.
- [8] ENGEL A C, BRODERICK C R, VAN DOORN N, et al. Exploring the relationship between fundamental motor skill interventions and physical activity levels in children: A systematic review and meta-analysis [J]. *Sports Medicine*, 2018, 48 : 1845 – 1857.
- [9] 张博谦. 羽毛球运动对智力障碍儿童粗大动作发展的干预研究 [D]. 南京: 南京体育学院, 2023.
- [10] 张磊, 王丹丹, 吴雪萍. 软式曲棍球干预对中重度智力障碍男生基本动作技能的影响 [J]. *中国体育科技*, 2022, 58 (3) : 19 – 26.
- [11] 张宇浩. 10 周足球活动课对轻度智力障碍男生健康体适能和基本动作技能的影响 [D]. 上海: 上海体育学院, 2020.
- [12] 郭立亚, 许翀, 赵婉谷, 等. 中等强度足球运动干预对轻中度智力障碍儿童平衡能力影响研究 [J]. *武汉体育学院学报*, 2023, 57 (11) : 84 – 92.
- [13] 李远良. 核心力量加有氧耐力训练对中度智力障碍学生平衡能力影响的研究 [D]. 广州: 广州体育学院, 2019.
- [14] KONG Z W, SZE T M, YU J J, et al. Tai Chi as an alternative exercise to improve physical fitness for children and adolescents with intellectual disability [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16 (7) : 1152.
- [15] 章裕含. 适应性八式太极拳对智障学生身体运动功能的影响实证研究 [D]. 济南: 山东体育学院, 2021.
- [16] ZHAO P T, ZHU G H, CHEN S, et al. Effects of aquatic exercise and floor curling on balance ability and lower limb muscle strength in children with intellectual disabilities: A pilot study in China [J]. *Children*, 2024, 11 (1) : 85.
- [17] BALAYI E, SEDAGHATI P, AHMADABADI S. Effects of neuromuscular training on postural control of children with intellectual disability and developmental coordination disorders: Neuromuscular training and postural control [J]. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 2022, 23 (1) : 631.
- [18] CLEAVER S, HUNTER D, OUELLETTE-KUNTZ H. Physical mobility limitations in adults with intellectual disabilities: A systematic review [J]. *Journal of Intellectual Disability Research*, 2009, 53 (2) : 93 – 105.
- [19] HARTMAN E, HOUWEN S, SCHERDER E, et al. On the relationship between motor performance and executive functioning in children with intellectual disabilities [J]. *Journal of Intellectual Disability Research*, 2010, 54 (5) : 468 – 477.
- [20] BOSSINK L W M, VAN DER PUTTEN A A J, VLASKAMP C. Understanding low levels of physical activity in people with intellectual disabilities: A systematic review to identify barriers and facilitators [J]. *Research in Developmental Disabilities*, 2017, 68 : 95 – 110.
- [21] COLLINS K, STAPLES K. The role of physical activity in improving physical fitness in children with intellectual and developmental disabilities [J]. *Research in Developmental Disabilities*, 2017, 69 : 49 – 60.
- [22] CARMELI E, BAR-YOSSEF T, ARIAV C, et al. Perceptual-motor coordination in persons with mild intellectual disability [J]. *Disability and Rehabilitation*, 2008, 30 (5) : 323 – 329.

理工科高校复合人才培养与数字化教材建设的互动研究 ——以长沙理工大学为例

郑咏梅

(长沙理工大学 继续教育学院, 湖南 长沙 410000)

摘要:以长沙理工大学为例,采用案例分析法,研究理工科高校复合人才培养与数字化教材建设的互动关系。研究发现,长沙理工大学在复合人才培养方面已取得一定成效,但在资源和课程整合方面仍面临挑战;数字化教材的应用能够提升教学效率、丰富学习资源,但技术更新和教师培训问题亟待解决。据此,提出相应改进策略,旨在为同类高校的复合型人才培养及数字化教材建设提供参考,推动二者协同发展,以适应教育高质量发展的新需求。

关键词:理工科高校;复合人才培养;数字化教材建设;互动研究

中图分类号:G642.0

文献标识码:A

文章编号:2095-297X(2025)05-0112-06

Interactive Research on Interdisciplinary Talent Cultivation and Digital Textbook Development in Science and Engineering Universities —A Case Study of Changsha University of Science and Technology

ZHENG Yongmei

(School of Continuing Education, Changsha University of Science and Technology, Changsha, 410000, Hunan)

Abstract: It examined the interactive relationship between interdisciplinary talent cultivation and digital textbook development in science and engineering universities in the paper, using Changsha University of Science and Technology as a case study and adopting the case analysis method. The findings revealed that while the university has achieved initial success in fostering interdisciplinary talents, challenges persist in resource integration and curriculum optimization. The application of digital textbooks has demonstrated potential in enhancing teaching efficiency and diversifying learning resources; however, issues such as technological updates and faculty training require urgent resolution. Based on these insights, it proposed targeted improvement strategies to provide references for interdisciplinary talent development and digital textbook construction in similar institutions. The goal is to promote synergistic growth between the two domains and address the evolving demands of high-quality education.

Key words: science and engineering universities; interdisciplinary talent cultivation; digital textbook development; interactive research

在当今社会飞速发展的背景下,复合型人才的需求日益增长,这促使高等教育机构必须紧跟时代步伐,致力于培养能够适应社会快速变革的人才。教育领域的数字化转型已然成为大势所趋,党的二

十大报告中明确提出“推进教育数字化”这一重大战略部署^[1],2024年政府工作报告也着重强调了“大力发展数字教育”的重要性,其中教材数字化更是被视为实现教育数字化的关键一环^[2]。对于理

收稿日期:2025-03-25

基金项目:教育部2024学习型社会建设重点任务(56号)。

作者简介:郑咏梅(1969-),女,湖南永州人,副研究员,硕士。E-mail:345877631@qq.com

工科高校而言,数字教材建设已然成为推进教育数字化转型的关键着力点^[3]。

回溯教育数字化与数字教材建设的研究历程,众多学者已从不同角度展开深入探讨。部分学者聚焦于数字教材的技术架构与开发模式,深入分析如何借助先进的信息技术提升教材的互动性与可扩展性^[4];另一些学者则从教学应用层面入手,研究数字教材在不同学科教学中的融合策略与效果评估^[5]。然而,现有研究多集中于宏观层面的理论构建或个别高校的成功案例剖析,对于理工科高校在数字教材建设过程中所面临的特殊挑战与应对策略,尤其是教师在教材数字化转型中的角色与能力提升方面的系统性研究相对不足。

高质量数字教材的建设,既是服务教育数字化战略行动的重要内容,也是培养符合数字时代需求的复合型人才的关键举措。在理工科高校中,数字教材建设的实践探索正逐步推进。本研究以长沙理工大学为案例,深入分析其数字教材建设的实践路径与成果,同时关注教师在教材数字化转型中的适应力与创造力提升,探讨其成功经验及存在的问题,旨在为其他理工科高校提供参考和借鉴,共同推动教育数字化转型和复合人才培养,助力高等教育更好地适应社会发展需求。

1 理工科高校复合人才培养的需求与挑战

在科技革命和产业变革加速的背景下,理工科高校在复合人才培养上面临新的需求与挑战。高素质工程技术人才的培养,已成为教育改革的重要议题,尤其是在人工智能、大数据、新能源等前沿领域,对复合型人才的需求最为迫切。

1.1 专业发展与市场需求对复合型人才的要求

1.1.1 社会经济发展对复合型人才需求日益增长

随着全球化和数字化的推进,行业发展趋势显示,学科交叉融合、多元化技能、创新精神、国际化视野和法律法规意识的需求不断上升。例如,在人工智能领域,跨学科研究已成为推动技术进步的关键;在金融科技行业,对具备跨界能力、数字化技能和风险管理能力的人才需求激增。同时,金融人才需具备创新精神和市场洞察力,以适应市场变化。国际化视野和跨文化交流能力也日益重要,以推动金融开放和合作。法律法规意识和合规管理能力对于确保金融机构合规运营至关重要。产学研协同创新成为培养高水平复合型人才的关键路径,要求高校与行业共享创新资源,共建研究平台。人才流动趋势和出海就业情况表明,对国际化就业机会的兴趣显

著增强,特别是年轻一代。

1.1.2 跨学科知识和技能在复合人才培养中至关重要

跨学科探索往往带来新的认识和突破,如DNA双螺旋结构的发现。产业融合要求人才适应跨界创新,教育改革和人才培养模式创新强调整合不同学科知识和方法,培养学生的复合知识结构和跨界能力。国际竞争力的提升需要跨学科知识和技能,以促进国际合作与交流。例如,斯坦福大学的Bio-X项目就是一个成功的跨学科教育案例。斯坦福大学通过实施Bio-X计划,构建了便于跨学科交流合作的科研平台,形成了完善的科研成果转化机制、高效的团队组织运行机制及资金良性运转机制。Bio-X计划整合了生物学、工程学、计算机科学等多个学科,培养了一大批在生物技术领域具有创新能力的复合型人才^[6]。此外,太原科技大学外国语学院在专业建设中持续践行新文科理念,坚持“以学生为中心,以能力培养为核心”,不断深化教育教学改革,优化课程体系,强化实践教学,推动英语、日语等外语专业与理工科等其他学科的交叉融合^[7]。因此,跨学科知识和技能不仅是教育改革的方向,也是国家战略的一部分,对于培养适应未来挑战的复合型人才至关重要。

1.2 理工科高校在复合人才培养方面的现状

理工科高校在复合人才培养方面正进行着积极的探索和实践,通过课程设置、教学模式、师资建设、产教融合等多方面的改革,以适应社会经济发展对复合型人才的需求。

1.2.1 课程设置和教学模式

理工科高校正积极改革课程设置和教学模式,以培养符合社会需求的复合型人才。课程体系正被重构,如云南大学制药工程专业的“三层次、四模块”体系,强化工程设计和实践课程,并融入信息技术等新课程。教学内容更注重实际应用,通过项目设计和实际案例提升学生的实践能力。高校还开设跨学科课程,如天水师范学院的大类平台课程以及强化实践教学的平台建设如苏州科技大学的创新创业学院平台。教学模式不断创新,差异化人才培养体系如“一体两翼”模式,用于强化学科交融。国际化视野也是培养学生的重点,通过国际合作项目和交流机会,让学生了解国际规则,具备国际交流能力。

1.2.2 实践教学环节

在实践教学环节,高校探索新的教学模式,如华东理工大学的“一核两翼、双轮驱动”模式,以及跨

学科实践平台的构建,整合不同学科资源,提供多元化学习环境。产教融合模式强化与企业的合作,共同培养复合型人才,如东莞理工学院的“产学研融合创新”模式。实践教学体系采取递进式培养,包括基础实践、专业实践和综合实践等阶段。数字化时代的教学改革利用 MOOC 等在线资源和工具增强学生的实践能力和创新思维。高校还在完善质量保障监控体系,确保实践教学质量,同时构建创新能力培养体系,如太原科技大学的“产、学、研、教、创”一体化模式,以适应社会对复合型人才的需求。

1.3 复合人才培养面临的挑战

高校在复合人才培养中推动学科融合,需要克服来自思维方式、组织结构、评价体系、资源配置、教师培养、学生学业负担、科研与教学矛盾、导师指导、课程设计以及社会认可度等多方面的挑战。

1.3.1 学生综合素质提升的瓶颈

高校在培养复合型人才中面临多重挑战,包括思维方式、组织结构、评价体系等问题。学生综合素质提升的瓶颈主要体现在:传统评价体系过于侧重学业成绩,忽视综合素质;教育资源分配不均;教学内容与市场需求脱节;实践教学环节薄弱;学科交叉融合不足;学生自我发展动力不足;教育改革缺乏深度和广度;社会对复合型人才认可度不够。为突破这些瓶颈,高校需深化教育改革,推动评价体系多元化,加强实践教学,促进学科交叉融合,激发学生动力,加强社会联系,提高复合型人才的社会认可度。

1.3.2 学科融合的挑战

在快速变化的时代背景下,理工科高校承担着培养复合型人才的使命,但这一过程充满挑战。学科融合是关键,却遭遇思维方式转变、组织结构调整、评价体系完善、资源配置优化、教师培养模式改革、学生学业负担、科研与教学平衡、导师指导质量、跨学科课程设计以及社会认可度等多重困难。这些挑战要求高校在组织结构、评价机制、资源配置、教师发展、学生教育等方面进行深刻改革,以促进学科间的有效合作和知识融合,进而提高教育质量和科研水平,最终培养出能够适应未来挑战的高素质工程技术人才。

1.3.3 与企业需求对接的困难

在与企业需求对接方面,高校存在与企业接壤不足、课程内容滞后、评价机制不完善、缺乏有效的校企合作机制、产业化视角不足、政府政策支持不足和信息沟通不畅等问题。这些问题导致高校培养的人才难以满足企业实际需求,影响人才培养效果。具体表现包括:高校课程设置未能及时反映行业需

求变化,导致学生所学知识与实际工作脱节;缺乏有效的校企合作,企业难以参与到人才培养过程中;信息沟通不畅使得高校与企业之间的需求无法有效对接。为解决这些问题,高校可以加强与企业的联系,建立校企合作平台,定期进行行业需求调研,调整课程设置,确保培养的人才能够适应市场需求。同时,政府也应加大对校企合作的政策支持,促进信息共享和资源整合。

2 数字化教材在复合人才培养中的作用

2.1 数字化教材的特性和优势

数字化转型是探索教育空间未来可能性的关键机遇期,也是推动教育治理现代化的新契机^[8]。随着数字技术的快速发展和学习方式的多元化,传统形式的基础技术课教材形式已经不能很好适应当今形势^[9]。数字化教材在复合人才培养中具有重要作用,其特点和优势包括互动性、集成度高、更新性强、易于个性化学习、智能性、拓展性强、易于修订和完善、提高教学效率、兼容性和跨平台应用、安全性和规范性、促进教育公平和支持教师专业发展。数字化教材通过提供互动学习体验、集成多种媒体元素、快速更新内容、个性化学习路径、智能化管理和评估、拓展学习过程、便捷修订和更新、优化教学流程、提高兼容性、确保安全性和规范性、促进教育公平和教师专业发展,为教育领域带来革命性变化。

根据搜索结果,数字化教材的优势得到了具体案例的支持。例如,“云创”数字教材平台通过智能感知学生的学习行为,根据学生的学习进度、兴趣和能力智能规划个性化学习路径^[3]。此外,数字化教材的集成化、智能化与国际化理念,支持教师创造性地教和学生个性化地学。这些特点不仅提高了教学效率,而且通过智能化手段优化了学习体验,增强了教学的针对性和互动性。

2.2 数字化教材在复合人才培养中的功能与价值

产业数字化转型迫切需要高水平复合型人才^[10]。反过来,数字化教材在促进教育数字化转型、提高教育资源共享性、支持个性化和差异化教学、增强教学互动性、提升教师和学生的数字素养、教育评价创新以及推动教育内容创新等方面起到重要作用,又为复合人才培养提供了强有力的支持。

2.2.1 数字化教材推动了教育的数字化转型

高质量是中国式教材治理现代化综合改革的目标愿景^[11]。数字化教材不仅仅是教材形式的简单变化,而是涉及到教育全要素、全流程、全业的数字化变革。通过动态更新的内容和互动性强的学习材

料,数字化教材有助于培养学生适应数字时代的知识和技能,构建智慧教育新生态。

2.2.2 数字化教材提高了教育资源的共享性

数字化教材能够跨越时间和空间的限制,使得优质教育资源得到更广泛的共享,这对于缩小城乡教育差距、促进教育公平具有重要意义。通过国家和省级平台的建设,可以实现教育资源的优化配置和高效利用。

2.2.3 数字化教材满足了不同学生的需求

数字化教材具有富媒体性、关联性、交互性、开放性、便携性等特点^[12]。其支持个性化和差异化教学,能够根据学生的学习进度和兴趣提供个性化的学习路径,促进每个学生的发展^[13]。数字化教材的互动性也不容忽视,它可以集成视频、音频、动画等多种媒体元素,提供丰富的互动体验,提高学生的学习兴趣,促进学生主动学习和探索。

2.2.4 数字化教材培养了学生的信息素养

提高学生的信息意识和信息检索、鉴别、选择能力,增强学生数字化学习与创新能力,以及利用信息技术解决实际问题的能力,这对于培养复合型人才至关重要^[14]。数字化教材还可以结合大数据和人工智能技术,为教育评价提供新的工具和方法,实现对学生学习情况的全过程评价,更好地指导教学和学习。根据《提升全民数字素养与技能行动纲要》,数字素养框架不仅须包括数字获取、制作、使用、评价、交互、分享、创新、安全保障、伦理道德等内容,还应包括知识、技能、态度、情感、价值观等维度^[15]。这表明数字化教材在培养学生的信息素养方面发挥着重要作用,帮助学生适应数字化时代的要求。

3 复合型人才培育与教育数字化转型互动的理论与政策

3.1 理论基础:复合人才培养的理论框架

3.1.1 复合人才培养理论

复合人才培养理论强调学生在多学科知识和技能的综合与应用,以适应复杂多变的社会需求。该理论认为,单一学科的知识与技能已不足以应对现代社会的复杂问题,需要培养具备跨学科知识和综合应用能力的人才。

长沙理工大学通过“13445”培养模式和专创融合新模式,实现了知识结构的复合化,培养了学生的创新能力和实践能力。这种模式不仅符合复合人才培养理论,还通过校企合作和实践教学平台搭建,进一步强化了学生的实际应用能力。例如,法学院的工程法专业方向通过设置专门的选修课程和实践

环节,培养了学生法律与工程知识的综合应用能力。

3.1.2 教育数字化转型理论

教育数字化转型理论强调利用现代信息技术手段提升教育质量和效率。该理论认为,数字化技术可为教育提供更加丰富的资源、更加灵活的学习方式和更加高效的管理手段,从而实现教育的现代化。

长沙理工大学通过数字化教材建设、在线教学平台和数字化教学资源库的构建,实现了教学资源的数字化管理和应用,提升了教学的现代化水平。例如,学校利用 THEOL 在线教育综合平台,为师生提供了便捷的在线教育和学习环境,实现了教学和管理现代化。此外,学校还通过数字孪生可视化智慧校园平台,提升了校园生活的便捷性和高效性。

3.2 政策支持:教育数字化转型的政策导向与建议

3.2.1 加强政策支持

政策支持是推动高校教育改革和创新的重要保障。政府通过制定和实施相关政策,可以为高校提供必要的资源和支持,促进高校与企业的合作,推动教育数字化转型。

一是财政支持:政府应设立专项基金,支持高校与企业联合开展科研项目和人才培养项目。例如,可以设立“校企合作专项基金”,用于支持高校与企业在复合人才培养和数字化教材建设方面的合作。二是税收优惠:对参与校企合作的企业给予税收优惠,鼓励企业积极参与高校的人才培养和科研项目。例如,对与高校合作开展科研项目的企业,减免一定比例的企业所得税。三是激励机制:建立校企合作的激励机制,对表现突出的高校和企业给予表彰和奖励。例如,设立“校企合作优秀奖”,对在复合人才培养和数字化教材建设方面取得显著成效的高校和企业进行表彰。

3.2.2 优化课程设置

课程设置是人才培养的关键环节。优化课程设置,增加实践教学环节,引入企业实际案例和项目,可以提高学生的实践能力和创新意识,更好地适应社会需求。

一是动态调整:高校应根据企业需求和社会发展动态,及时调整和优化课程设置。例如,长沙理工大学通过“13445”培养模式,定期评估和调整课程内容,确保课程设置与企业需求和社会发展同步。二是实践教学:增加实践教学环节,引入企业实际案例和项目,提高学生的实践能力和创新意识。例如,学校将课堂搬进工地,让学生深入了解施工规范和工艺流程,提升专业认知和工程素养。三是专创融合:开设创新创业课程,编写专创融合教材,构建校

企互补的双创教育教师队伍。例如,长沙理工大学通过专创融合新模式,培养学生的创新创业能力,提升学生的综合素质。

3.2.3 深化校企合作

校企合作是实现高校人才培养与企业实际需求对接的重要途径。通过校企合作可以共建实践教学基地,开展科研项目,实现资源共享和优势互补。

一是长期合作:高校应与企业建立长期稳定的合作关系,共同制定人才培养方案,共建实践教学基地。例如,长沙理工大学与中国交建、中国铁建、国家电网等企业合作,开办校企联培班,丰富了社会实践渠道和内容。二是项目合作:共同开展科研项目,解决企业实际问题,提升高校的科研水平和学生的实践能力。例如,学校与企业合作开展科研项目,让学生参与实际项目,提升学生的科研素质和创新能力。

4 案例研究:长沙理工大学复合人才培养与数字化教材建设的互动模式

4.1 长沙理工大学的背景和发展定位

长沙理工大学是一所以工科为主,多学科发展的大学,致力于培养高素质复合型人才。学校秉承习近平新时代中国特色社会主义思想,坚持立德树人,服务国家战略需求。办学定位强调工科特色,多学科协调发展,推动科技进步,建设创新型大学。学校是国家“中西部高校基础能力建设工程”高校、湖南省“国内一流大学建设高校”(A类)高校。学校设有84个本科专业,涵盖工、理、管、经、文、法等多个学科,通过广泛的专业设置,培养适应社会发展需求的复合型人才。长沙理工大学在教育教学改革上成果突出,获得国家级教学成果奖2项、省级教学成果奖47项,学生获得国家级各类学科竞赛和科技成果奖1700余项。此外,学校还与马来西亚沙巴大学合作共建孔子学院,展现了其国际化教育的特色。

4.2 长沙理工大学复合人才培养与数字化教材建设互动的实践探索

长沙理工大学致力于培养高素质复合型人才,通过改革与创新复合人才培养模式,以适应新时代教育需求。

4.2.1 课程体系优化

学校实施“13445”培养模式,整合创新教育,强化双创教育基础。该模式涵盖一个目标、三条路径、四项要求、四种支撑和五大能力,旨在提升人才培养质量,培养拔尖创新人才。学校还创建专创融合新模式,开设创新创业课程,编写专创融合教材,构建

校企互补的双创教育教师队伍。同时,学校构建创新教育融合平台,整合校内外资源,深化校企地多元协同,建设多维度双创实践平台体系。

4.2.2 教学方法改进

长沙理工大学改进教学方法,包括实施“13445”培养模式,创建专创融合新模式,构建创新教育融合平台,以及课程思政教学改革。学校将思政元素融入专业课程,立项建设“课程思政”精品示范课程。实践教学改革方面,学校将课堂搬进工地,让学生深入了解施工规范和工艺流程,提升专业认知和工程素养。校企合作方面,学校与中国交建、中国铁建、国家电网等企业合作,开办校企联培班,丰富社会实践渠道和内容。

4.2.3 实践教学平台搭建

长沙理工大学积极搭建实践教学平台,实行“三三四”人才培养模式综合改革,利用企业实践实训条件,打造实践教学平台,提升学生科研素质与创新实践能力。学校还深入开展日常生活劳动教育实践,鼓励学院展开专业生产劳动实践,融入校园生活和专业学习。

4.3 数字化教材建设的举措和成果

长沙理工大学积极推进数字化教材建设,取得显著成果,主要体现在以下几个方面:

4.3.1 数字化教材的开发与应用

学校通过举办数字教材建设应用座谈会和新形态数字教材开发及出版建设工作研讨会,深入探讨数字教材的重要性和建设方法,推动本科教育优质教学资源的数字化转型。同时,学校图书馆提供丰富的数字资源,如电子图书和中外数据库,支持教学资源的数字化管理和应用。此外,学校利用THEOL在线教育综合平台,为师生提供便捷的在线教育和学习环境,实现教学和管理现代化。

4.3.2 在线教学平台的建设

长沙理工大学建设了数字化百兆校园网网络环境,打造信息化的教学与学习环境,实现易工作、易学习、易管理^[16]。学校还搭建了数字孪生可视化智慧校园平台,提供精准定位、路线规划、信息查询等功能,提升校园生活的便捷性和高效性。

4.3.3 数字化教学资源库的构建

学校重视数字化教学资源库的建设,购买了电子图书,引进中外数据库50余种,为师生提供了丰富、高质量的数字化教学资源^[16]。同时,学校为全校师生提供了网络教学空间,满足辅助教学活动的功能,如在线学习、互动交流、批改作业和资源积累等。学校还整合和收录了各类教育资源,包括

教学视频、教学 PPT、教材、练习题库等,并通过信息技术手段进行管理、维护和分享。

通过这些举措,长沙理工大学在数字化教材建设方面取得了显著进展,为提升教学质量和推动教育数字化转型做出了积极贡献。学校获得的国家级教学成果奖,其中包括面向公路交通高质量发展的高素质复合型人才“三化四通”培养模式创新实践,进一步证明了学校在数字化教材建设方面的努力已获得国家级认可。

5 结论:实践案例的分析与普适性启示

理工科高校在培养复合型人才和数字化教材建设方面面临新的机遇,也存在技术因素层面中数字鸿沟仍需弥合的挑战^[17]。长沙理工大学的实践表明,通过创新人才培养模式和数字化教材建设,可以有效提升教育质量和学生能力。科技和产业的快速发展增加了对高素质复合型人才的需求,高校必须创新人才培养模式以适应这一需求。数字化教材凭借其多样化的媒体形式、互动性和快速更新能力,为学生提供了更灵活和个性化的学习体验,使教师能够便捷地更新教学内容,满足行业发展的新要求。长沙理工大学等高校在这方面进行了积极探索,通过“13445”培养模式强化学生的实践和创新能力,推动数字化教材的开发与应用。

长沙理工大学的实践对其他高校的启示和借鉴意义在于,高校应将创新教育贯穿人才培养全过程,构建有效的创新创业教育支撑体系,并积极探索数字技术赋能教育的新路径。例如,长沙理工大学通过构建“13445”培养模式,强化了学生的实践和创新能力,这一模式可被其他高校借鉴,以培养适应新时代要求的高素质复合型人才。未来研究方向可包括对数字化教材的长期效果评估,探究数字化教材对学生学习成效的持续影响,以及如何根据评估结果进一步优化教材内容和教学方法。此外,研究如何在更多高校推广长沙理工大学的实践,特别是数字化教材的开发与应用,以及如何通过政策引导和教师培训,促进数字化教材在更广泛范围内的使用 and 效果提升,也是未来研究的重要方向。通过这些研究,可以为高等教育领域提供更多关于数字化教材建设和复合人才培养的实证数据和策略建议。

参考文献:

[1] 高举中国特色社会主义伟大旗帜 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗——在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告[EB/OL]. [2022-10-25]. ht-

tps://www.gov.cn/zhuanti/zggcdescqgdbdh/sybgqw.htm?eqid=c07d66f9001d4dea0000000364856a7d.

- [2] 政府工作报告——2024年3月5日在第十四届全国人民代表大会第二次会议上[EB/OL]. [2024-03-12]. https://www.gov.cn/gongbao/2024/issue_11246/202403/content_6941846.html.
- [3] 王天平,闫君子. 新课标下数字教材建设的逻辑、体系及策略[J]. 现代远程教育研究,2023,35(4):47-55.
- [4] 李锋,盛洁,黄炜. 教育数字化转型的突破点:智能教材的设计与实现[J]. 华东师范大学学报(教育科学版),2023,41(3):101-109.
- [5] 张雅楠. 教育数字化转型中的数字教材开发与应用:机遇、挑战与实践探索[J]. 中国职业技术教育,2024,(20):19-24.
- [6] 任探琛,朱旸. 斯坦福大学生物交叉学科项目的研究生培养模式——对医学专业研究生交叉培养的思考[J]. 全科医学临床与教育,2022,20(8):673-675.
- [7] 迎评促建|创新实践双轮驱动培育科大外语英才学科交叉跨界融合彰显语言服务特色[EB/OL]. [2024-09-04]. https://www.tyust.edu.cn/info/1096/11073.htm.
- [8] 王兴宇. 数字化转型对教育空间的塑造逻辑[J]. 高等工程教育研究,2023(3):108-113.
- [9] 陶文铨,何雅玲,王秋旺,等. 试论改革开放后我国高等理工科教学教材改革的三个高潮——结合热学教材进行分析讨论[J]. 高等工程教育研究,2023(S1):1-3,6.
- [10] 丁烈云. 面向数字经济的复合型人才探讨[J]. 高等工程教育研究,2022(6):1-4,24.
- [11] 张振,刘学智. 综合改革:中国式教材治理现代化的实践智慧[J]. 中国教育科学(中英文),2023,6(5):39-49.
- [12] 杨万里. 基于探究、合作、创新教育理念的电子教材研发[J]. 课程·教材·教法,2012,32(12):41-46.
- [13] 周筠,陈慧. 新媒体对计算机教育改革的促进作用分析[J]. 中国多媒体与网络教学学报(上旬刊),2024(1):54-58.
- [14] 沈方玖,刘河. 中小学生在在线教育环境的守护[J]. 今日教育,2022(11):26-29.
- [15] 钱冬明,周雨萌,廖白舸,等. 大学生信息素养评价标准研究——以上海市为例[J]. 中国高教研究,2022(9):53-59.
- [16] 谭怀芝,王志鹏. 信息化助力智慧校园建设——以长沙理工大学为例[J]. 教育现代化,2019,6(62):169-172.
- [17] 白彦,柏林童,张一傲. 数字教材建设的理论建构、现实困境与优化路径——基于TOE模型的分析[J]. 中国高等教育,2024(7):45-48.

责任编辑:李壮

智媒时代高校意识形态安全的风险解构与治理路径

张祖仁^{1*}, 何玉影²

(1. 安徽大学 纪委办公室, 安徽 合肥 230601; 2. 安徽大学 新闻传播学院, 安徽 合肥 230601)

摘要:以传播政治经济学为研究视角,对智能媒体时代高校意识形态安全面临的多重风险进行分析。研究发现,高校意识形态风险主要表现为技术媒介发展带来的传播风险、西方价值观渗透导致的认知风险,以及高校教育体系内部存在的制度性风险。由此可知,建立系统化的风险识别机制,并从教育内容创新、师资队伍建设、宣传机制优化和制度执行等方面构建多维治理路径,是提升高校意识形态防控能力、实现意识形态安全治理现代化的关键。

关键词:智媒时代;高校意识形态安全;风险与治理

中图分类号:G641

文献标识码:A

文章编号:2095-297X(2025)05-0118-06

Risk Deconstruction and Governance Pathways of Ideological Security in Universities in the Era of Intelligent Media

ZHANG Zuren^{1*}, HE Yuying²

(1. Office of Discipline Inspection Commission, Anhui University, Hefei, 230601, Anhui;

2. School of Journalism and Communication, Anhui University, Hefei, 230601, Anhui)

Abstract: From the perspective of the political economy of communication, it analyzed the multiple risks to ideological security faced by universities in the era of intelligent media in this paper. The findings reveal that ideological risks in higher education primarily manifest as: communication risks brought about by the development of technological media, cognitive risks resulting from the infiltration of western values, and institutional risks inherent within the university education system. It can thus be concluded that establishing a systematic risk identification mechanism and constructing a multi-dimensional governance path, from innovating educational content and strengthening faculty development to optimizing publicity mechanisms and ensuring institutional implementation, are key to enhancing the ideological security management capacity of universities and promoting the modernization of ideological governance.

Key words: intelligent media era; universities ideological security; risk and governance

在数字化浪潮席卷全球的今天,智能媒体技术的迅猛发展正在深刻重塑人类社会的传播格局和信息生态。马克思曾深刻指出:“任何一个时代的统治思想始终都不过是统治阶级的思想”^[1],这一论断在智媒时代展现出新的内涵。我国的主流意识形态是以马克思主义为指导的社会主义意识形态,而高校作为为党育人、为国育才的主要场所,长期是西

方敌对势力同我们进行意识形态斗争的前沿阵地。

在信息传播迅速且广泛的智能媒体时代,深入分析研判高校意识形态安全风险,并结合实际提出有效应对策略,切实维护好高校意识形态安全,是当前高校党建和思想政治工作的重要课题。这不仅关系到高校的办学方向和教育质量,更直接关系到国家的长治久安和民族的未来发展。本研究从传播政

收稿日期:2025-05-22 * 通讯联系人

基金项目:安徽省高校科学研究重点项目(2023AH050004)。

作者简介:张祖仁(1988-),男,安徽凤阳人,一级监察官,硕士;何玉影(1994-),女,安徽铜陵人,讲师,博士。E-mail: misliyue@126.com

治经济学的理论视角出发,系统分析当前高校意识形态安全面临的主要风险,并尝试构建系统化的治理路径,为新时代高校意识形态安全工作提供理论参考和实践指导。

1 智媒时代语境与传播政治经济学视角

新时代以来,以习近平同志为核心的党中央立足于中华民族伟大复兴战略全局和世界百年未有之大变局,明确意识形态工作是为国家立心、为民族立魂的工作,关系到中国特色社会主义事业能否兴旺发达。高校作为培养社会主义事业建设者和可靠接班人的重要阵地,是各种社会思潮最为活跃的地方。特别是在当前智能媒体的时代背景下,互联网和各种社交媒体的广泛运用,使得各种信息内容的传播速度和影响范围的全球性特征日趋明显。西方消费主义、实用主义、个人主义、历史虚无主义等错误思想的涌入引起了一系列负面效应,使得高校意识形态安全风险日益凸显。2021年十九届中央第七轮巡视开展对教育部和31所中管高校党组织常规巡视反馈问题指出,“有的做好新时代意识形态工作有不足,不同程度存在风险隐患”^[2],这一警示凸显了问题的紧迫性。

智能媒体时代的到来,使得信息传播呈现出前所未有的开放性、即时性和交互性特征。算法推荐、大数据分析、人工智能等新技术的广泛应用,一方面极大地提升了信息传播的效率,另一方面也带来了信息茧房、认知偏差、价值冲突等新的社会问题。中国互联网络信息中心(CNNIC)发布的第54次《中国互联网络发展状况统计报告》显示,截至2024年6月,我国网民规模近11亿人(10.9967亿人),较2023年12月增长742万人,互联网普及率达78.0%。其中20-29岁网民占比17.2%,大学生群体构成了网络空间最活跃的用户群体之一^[3]。这一群体的信息获取方式和认知习惯正在发生深刻变化,传统意识形态教育模式面临着严峻的转型压力。党的二十届三中全会进一步强调要加强舆论引导,有效防范化解意识形态风险,为我们在新时代维护高校意识形态安全指明了方向。

传播政治经济学作为批判传播研究的重要流派,为我们理解智能媒体时代的意识形态安全问题提供了独特的理论视角。该理论强调传播技术与政治经济权力之间的辩证关系,关注传播资源的不平等分配以及传播过程中的权力运作。传播政治经济学起源于20世纪中叶北美批判传播研究的学术传统,其理论根基可追溯至马克思主义政治经济学。

作为该学派的奠基人,达拉斯·斯迈思在1977年提出的“受众商品论”彻底改变了人们对传播本质的理解。斯迈思通过对商业广播电视系统的分析,揭示了传媒产业将受众注意力打包出售给广告商的运作机制,这一洞见为理解数字时代的平台经济提供了关键视角^[4]。赫伯特·席勒则进一步发展了“文化帝国主义”理论,指出发达国家通过传媒产品输出其价值观念和生活方式,这一理论框架对于分析当前跨国数字平台的意识形态渗透具有重要的启示意义^[5]。

进入21世纪,文森特·莫斯科系统整合了传播政治经济学的理论成果,提出“商品化、空间化、结构化”三大核心分析维度^[6]。在数字资本主义时代,这三大维度呈现出新的特征:商品化过程从有形的文化产品扩展到用户数据、社交关系等无形资源;空间化表现为全球数字平台的领土扩张;结构化则体现为算法权力对社会关系的重塑。这些理论发展为分析智能媒体时代的意识形态问题提供了系统的概念工具。

传播政治经济学理论体系包含三个相互关联的核心命题,这些命题与高校意识形态安全研究具有高度的理论适配性,能够系统揭示智能媒体时代高校意识形态安全的风险结构,并为治理路径的构建提供理论基础。传播政治经济学的首要命题指出,传播系统本质上是政治经济权力的延伸。这一理论视角适用于分析高校意识形态安全面临的技术风险。第二个命题强调传播内容的生产与分配遵循资本积累的逻辑,这一理论维度精准解释了高校意识形态安全面临的认知风险。第三个命题则关于受众注意力的商品化,为理解高校意识形态安全的主体风险提供了关键视角。

2 智媒时代高校意识形态安全的风险解构

当前,我国经济已由高速增长阶段转向高质量发展阶段,多样化的社会存在必然产生多样化的社会意识,使得我国意识形态领域出现多样化的现实状况。而网络信息技术的迅猛发展,智能媒体时代的到来,使信息传播不受时空限制,加速了各种非主流意识和错误思想观念的传播,造成对信息传播内容监管难度的不断增大,从而增加了高校主流意识形态教育的复杂性,给高校意识形态安全带来短时间内难以解决的新的风险挑战,严重影响了高校主流意识形态的逻辑建构。从传播政治经济学视角来看,这些风险不仅是技术与内容的问题,更是信息权力结构、平台规则与资本逻辑重塑意识形态生态的

结果。

2.1 社会转型期的“失范”现象加剧学生价值观困境

从全球范围看,当代资本主义出现的新变化,使之与社会主义的博弈仍在进行,人类文明的“精神家园”在现代性崩溃后还在重塑中,西方意识形态和不良社会思潮逐步向我国渗透,主流意识形态传播面临巨大挑战。从国内看,全面深化改革持续推进,人民内部矛盾处于调整过程,社会成员的思想观念、行为模式呈现出多样化态势,对象化到现实社会中,使得各种社会现象更加错综复杂,导致传统的价值标准出现偏差甚至遭到不同程度的否定。这对于高校学生而言,更易感到困惑迷茫,对他们形成正确的世界观、人生观、价值观、扣好人生第一粒扣子产生不良影响。此外,社会中“富二代”“官二代”与所谓“房奴”“蚁族”的强烈反差,以及“读书无用”的论调、最难就业季的报道等导致的悲观消极情绪,更对高校学生造成巨大的心理冲击,这些都严重影响了高校马克思主义意识形态教育的效果,干扰高校学生树立正确的“三观”。

传播政治经济学认为,意识形态在社会结构的基础上通过媒介机构进行再生产。当前高校学生在结构性不平等与信息过载中形成的价值观混乱,不仅是社会转型期的必然产物,也与主流媒介在新媒体时代失去传播主导权密切相关。资本控制下的内容平台不断推送“情绪性”“消费性”内容,使青年的情感表达取代了理性认知,导致主流意识形态教育在“意见市场”中难以形成有效供给。

2.2 西方意识形态渗透侵蚀青年认同结构

当今世界,全球化日趋明显,国际关系以及各国利益的实现呈现相互依存的局面。然而全球化犹如一枚硬币的两面,在给我们带来资本、信息、科技的同时,也将西方资本主义国家的不良社会思潮和腐朽价值观念带了过来,使得理想信念“总开关”尚在拧紧过程中的高校学生很难辨明是非。进入新时代,我国综合国力强劲上升,全球影响力持续增强,但西方发达国家凭借其综合优势,利用全球化极力宣扬普世价值,在加紧资本扩张力图把包括我国在内的社会主义国家纳入西方资本主义世界体系的同时,加强了对我国的文化渗透和意识形态分化。

正如西方学者阿兰·伯努瓦指出:“一件有利于理解文化全球化性质的新奇事物,即资本主义卖的不仅仅只是商品和货物,它还卖标识、声音、图像、软件和联系。不仅仅将房间塞满,而且还统治着想象领域,占据着交流空间。”^[7]他们采用各种手段对

我国公民特别是高校学生,输出其思想价值观念,企图影响和动摇高校学生对社会主义的信念以及对马克思主义意识形态的认同。此外,西方国家还通过互联网炒作、放大社会热点问题,激化民众的不满情绪^[8],妄图消解我国经济社会健康稳定发展的思想根基,这对我国高校意识形态教育造成潜在的巨大风险。

传播政治经济学强调,媒介传播内容背后往往隐藏着结构性的权力关系。在全球媒介资本体系中,西方平台和内容生产者掌握着舆论引导的技术和话语主权,借助社交媒体、算法推荐等工具,增强其意识形态“软输出”的隐蔽性和持续性。高校学生在网络空间接触频繁的西方信息内容,看似中性,实则嵌入了西方制度与价值判断的偏向,逐步淡化其对本国主流意识形态的认知与认同。

2.3 市场逻辑对主流价值形成“反向塑造”

改革开放以来四十多年的经济实践,我国社会主义市场经济体制逐步建立,有力地推进着我国经济社会的高质量发展。但不可忽视的是我国市场经济体制尚不够完善,由此带来的负外部效应冲击着社会主义、集体主义的道德观念。一方面,市场失灵和市场缺陷对社会产生负面影响。比如从市场经济的主体看,其主观目的是追求利润最大化,这种趋利性容易导致拜金主义、利己主义等腐朽价值观念的泛起和蔓延。在这种情况下,理想信念的教育、诚信法治的恪守、公平正义的追求都变得苍白无力。另一方面,我国社会主义市场经济体制发育不充分不完善的方面,给权力寻租人利用制度和政策的漏洞留下暗箱操作的空间,从而产生腐败现象。

在市场经济语境中,媒介内容的生产与分发受到点击率、关注度、流量等指标的极大影响。这种“流量为王”的机制使主流意识形态在传播平台中逐渐边缘化,转而由娱乐化、消费化、情绪化内容占据主导。例如,短视频平台中诸如“炫富文化”“颜值至上”“情绪控诉”等内容因其易于传播、激发情绪而获得高推荐频率,但其背后反映的恰恰是对主流价值观的反向冲击。

传播政治经济学认为,在资本主导的信息产业结构中,意识形态内容被转化为商品,其存在的前提是能带来商业收益。在此逻辑下,主流意识形态面临“商品化悖论”——不具商业吸引力的教育性、价值性内容难以获得流量扶持,导致其在信息传播结构中处于弱势。这种“平台嵌入结构”使主流意识形态的公共性功能退化,而青年群体则被平台推荐逻辑推向情绪消费与价值漂移。

2.4 高校意识形态教育方式滞后,话语体系脱节

高校意识形态教育教学理念和内容滞后于实践发展需要,教学方式方法不够创新,造成了意识形态教育的效果不够理想。首先,在教学分工上,课程思政未能真正融入课堂,存在“硬融入”“表面化”等现象,客观上造成了专业课程教育和意识形态教育相分离的情况,形成意识形态教育就是思想政治理论课老师的事的片面认识。其次,总体而言高校意识形态教育方法和手段僵化呆板,经常采用大水漫灌式的“灌输型”,而没有重视潜移默化式的“滋润型”,既不能提起大学生的兴趣,也没有点滴浸润大学生的内心,导致教师和学生上课都出现应付的现象,难以取得实质性效果。

从传播政治经济学视角来看,意识形态的有效传播必须嵌入到日常生活的语境与语言系统中。当前高校教育体系中的意识形态传播还未形成“话语适应机制”,即未能将宏大叙事与个体经验、理论体系与生活实践有效联结,导致教育内容对学生缺乏吸引力与感染力。此外,传播载体与媒介表达方式未能与新媒体平台结构匹配,也使主流意识形态在“表达效率”上遭遇瓶颈。

2.5 平台权力结构对高校意识形态传播主导权的制约

在智能媒体时代,信息平台已成为意识形态传播的重要阵地。然而,我国在关键平台基础设施上的主导权存在提升空间,尤其在社交平台、搜索引擎、内容分发网络等领域,仍受到部分境外技术标准、平台规则及协议的影响,导致主流意识形态内容在信息传播中可能会被“算法边缘化”,其应有的传播影响力可能会遭遇弱化。

从传播路径演进来看,传统的意识形态宣传主要依托广播、电视、报纸、书籍等线性媒介完成。然而在当前网络社交媒体高度普及的背景下,信息传播方式更为去中心化与互动化。高校学生作为互联网原住民,更倾向于通过微信、抖音、小红书、微博等社交平台获取信息、表达观点。这种趋势一方面拓宽了表达渠道,但另一方面也带来了内容复杂性和价值多元化的挑战。面对庞杂的信息生态,部分高校学生尚未具备足够的媒介素养和价值辨别能力,容易受到错误思想的干扰甚至误导。

更为严峻的是,西方国家凭借其在全球互联网基础设施中的主导地位,通过掌控如 ICANN(互联网名称与数字地址分配机构)等核心资源,实施对我国网络空间的技术渗透与信息操控。一些境外平台诱导国内用户“翻墙”浏览西方社交媒体,并借助

算法推送、舆论操纵等方式持续向高校学生灌输带有意识形态偏向的信息,抹黑中国发展成就,刻意放大社会矛盾,美化西方制度,进而冲击我国主流意识形态的凝聚力与引导力^[9]。新自由主义、历史虚无主义、民粹主义等思潮借助智能平台的传播机制渗透校园舆论场^[10],与社会主义核心价值观形成冲突,给高校意识形态安全带来严峻挑战。

传播政治经济学视角指出,平台已成为意识形态斗争的新主战场,信息流控制即意识形态主导权的控制。在当前算法主导信息可见度、传播路径与话语权配置的格局中,主流意识形态在技术逻辑下可能处于传播“弱势”,被淹没在庞大的“信息瀑布”中。因此,提升平台治理能力、增强技术自主权、优化主流价值的算法推荐机制,是高校意识形态安全治理亟需关注的核心问题。

3 智媒时代高校意识形态安全的治理路径

在智能媒体迅速发展的时代背景下,高校意识形态安全风险表现出传播机制的复杂化、价值体系的多元化与治理结构的碎片化特征。传播政治经济学强调,意识形态并非中立,它深嵌于媒体制度、权力结构与经济资本之中。因此,新时代高校意识形态治理必须超越传统“灌输式”策略,构建一种政治立场坚定、传播机制合理、制度执行有效的综合治理路径,形成内容、渠道、组织、制度四维协同的风险应对体系。

3.1 注重高校马克思主义意识形态教育内容和形式的创新,使其科学化

马克思恩格斯一再强调:“我们的理论是发展着的理论,而不是必须背得烂熟并机械地加以重复的教条。”^[11]与时俱进是马克思主义最宝贵的理论品质,也是创新马克思主义意识形态教育的现实需要。

教育内容的创新。邓小平同志曾指出,“我们讲了一辈子马克思主义,其实马克思主义并不玄奥。马克思主义是很朴实的东西,很朴实的道理”^[12]。因此,我们对待马克思主义,不能采取教条主义和实用主义的态度,向大学生宣传讲授马克思主义理论时不能照本宣科将其搞得晦涩难懂,而是要积极推动当代中国马克思主义大众化,坚持不懈推进习近平新时代中国特色社会主义思想进教材、进课堂、进头脑,高校纪检监察机构要加强政治监督,推动促进党的创新理论入脑入心。同时,马克思主义意识形态教育面向大学生应当要“接地气”,结合大学生每个阶段的认知特点,选择大学生感到困惑迷茫的问

题和关心关注的话题,用马克思主义的立场、观点和方法分析说理,将马克思主义的思想魅力、理论魅力和科学体系展示给学生,这样才能达到富有吸引力和感染力的教育效果,引发大学生思想上的共鸣,从而激发出主动学习马克思主义理论的内生动力。

教育形式的创新。要达到马克思主义意识形态教育的预期效果,使大学生成为党的创新理论的笃信笃行者,就应当学用结合、学以致用,摒弃空谈的学究式教育。用朴实的语言、通俗的文字、生活化的形式来阐释马克思主义深刻的道理,在大学生当中推进党的创新理论“天天见”“天天新”“天天深”,用“大白话”讲明“真道理”,体现马克思主义意识形态的指导性、权威性。具体来说,马克思主义意识形态教育并不仅仅要把马克思主义理论“灌输”给大学生,应改变那种“填鸭式”教学方式,运用创设问题情景进行启发式、研讨式教学,让大学生主动参与、勤于思考、勇于实践,自觉成为马克思主义理论学习的主体。

3.2 建设高水平的马克思主义意识形态教育队伍,使其专业化

持续巩固马克思主义在高校意识形态领域的指导地位,就要努力打造一支政治过硬、专业精通、作风优良的高水平的意识形态教育队伍。选优配强具有强烈政治担当意识的马克思主义意识形态教育者。马克思主义意识形态教育具有鲜明的政治性,这通过国家对教材内容的审定以及教育者的具体教学活动体现出来。列宁曾经指出:“在任何学校里,最重要的是课程的思想政治方向。这个方向由什么来决定呢?完全只能由教学人员来决定。”^[13]毛泽东同志也曾强调,没有正确的政治观点,就等于没有灵魂。因此,高校马克思主义意识形态教育者必须严守党的政治纪律和政治规矩,确保意识形态工作领导权牢牢掌握在坚信马克思主义的人手中^[14]。

加强高校意识形态工作专职队伍建设。高校专职马克思主义意识形态教育者,主要包括思想政治理论课教师、思政辅导员、班主任、党政管理人员等。只有坚持“三全育人”,始终做习近平新时代中国特色社会主义思想的坚定信仰者和忠实实践者,具备坚实理论功底、灵活教学艺术和强大人格魅力的教育者,才能言行一致、表里如一,从而教育和感召大学生进一步坚定理论自信,更加自觉主动学习运用马克思主义理论。

3.3 完善符合高校学生认知特点的宣传教育体系,使其大众化

加强意识形态宣传阵地建设。习近平总书记指

出,“我们的同志一定要增强阵地意识。宣传思想阵地,我们不去占领,人家就会去占领”^[15]。智能媒体时代,互联网信息技术的飞速发展,为宣传巩固马克思主义意识形态提供了新的技术手段。在这种情况下,西方敌对势力利用互联网企图对我国进行意识形态分化瓦解的图谋没有改变,因此必然要求强化高校网络意识形态安全工作。

构建正气充盈的校园文化网络体系。校园文化是一所学校文化积淀和历史底蕴的体现,作为一种精神激励的力量,对广大师生有着“润物细无声”的影响力,是维护高校意识形态安全的重要阵地。应当坚持正面教育宣传为主,做好纪律法律和网络道德教育,组织开展网络法律法规、文明上网等专题学习,让高校学生在党的创新理论指导下提升价值判断和明辨是非的能力,促使他们在理性的思考和“守纪律、讲规矩”的校园文化氛围中稳步提高意识形态安全防范水平。

3.4 严格落实高校马克思主义意识形态工作责任制,使其制度化

坚持把学习贯彻习近平新时代中国特色社会主义思想作为首要政治任务。落实“第一议题”制度,紧紧围绕培养什么人、怎样培养人、为谁培养人开展意识形态工作,建立意识形态领域风险月度会商研判机制,统筹摸排新媒体矩阵建设、课堂教学、教材出版、图书馆、广播站、校报校刊、宣传橱窗、学生社团、信教师生、学术交流、中外合作办学、报告会研讨会等管理情况,组织开展师生思想政治状况滚动调查、筑牢中华民族共同体意识,意识形态工作才能更加规范和牢固。

突出和强化政治监督。《中共中央关于加强党的政治建设的意见》鲜明指出必须严明政治纪律和政治规矩,“决不允许在重大政治原则问题上、大是大非问题上同党中央唱反调,搞自由主义”^[16]。一方面,高校纪检监察机构必须督促高校党委强化党的全面领导,突出政治引领,坚持用习近平新时代中国特色社会主义思想蕴含的立场、观点、方法定期分析研判意识形态形势,研究解决高校意识形态工作存在的问题,及时校准思想偏差,确保始终沿着正确的政治方向前进。另一方面,高校纪检监察机构要督促校内相关职能部门增强政治敏锐性,强化对新闻媒体、网络平台、社科理论、讲座论坛等领域的监管,发现和处置可能发展成为重大或敏感事件的苗头性倾向性问题并妥善解决。

营造风清气正的良好校园政治生态。高校如果出现消极腐败现象,将会严重损害教育公平,影响大

学生的健康成长。为此,必须完善高校反腐制度机制,最大限度减少制度漏洞。通过完善制度规范,强化监督制约的廉政风险防控机制,筑牢拒腐防变的制度防线,坚决铲除高校腐败滋生的土壤和条件。既坚决清除影响校园政治生态的“污染源”,又正本清源、固本培元,倡导和弘扬社会主义核心价值观,让校园正能量充沛,打造风清气正的校园廉政文化氛围和良好育人环境,持续增强高校学生对马克思主义意识形态的自信认同。

4 结论

智媒时代的到来,使信息的生产、分发与消费发生深刻变革,也将高校意识形态安全问题推向一个更加复杂、动态的治理场域。高校不仅是知识传播的核心机构,更是意识形态建构与斗争的关键阵地。面对信息技术加速迭代、全球文化资本扩张、传播平台结构失衡所带来的风险挑战,意识形态工作必须实现由“管理对象”向“治理体系”的跃升。

本研究基于传播政治经济学的理论框架,系统辨析了高校意识形态安全所面临的传播性、认知性与制度性三重风险。通过引入“媒介商品化”“文化帝国主义”“平台结构性不平等”等理论命题,揭示了高校主流意识形态在数字资本逻辑和平台算法权力中不断被边缘化的机制性根源。进一步地,本研究尝试提出从教育内容、教育队伍、宣传机制到制度执行四维协同的治理路径,强调构建具有政治坚定性、传播有效性与制度执行力的整体防控体系,是新时代提升高校意识形态安全水平的根本之道。

当前,西方资本主义国家依托全球数字传播平台,对我国大学生群体进行隐性价值输入与话语操控,传播政治经济学所揭示的“文化商品的软侵略”已渗透至校园文化深处。同时,国内市场逻辑与流量机制在潜移默化中弱化了主流意识形态的表达空间。因此,高校在维护意识形态安全的过程中,不能仅依赖传统的思想政治教育模式,而需主动适应智能传播环境的变化,从内容供给、平台技术、制度监督等多个维度入手,构建符合数字时代传播规律的意识形态治理新范式。

归根结底,意识形态安全不仅是技术问题、话语问题,更是国家发展战略中的核心命题。习近平总书记指出:“意识形态工作是党的一项极端重要的工作,是国家政治安全的重要保障。”在全球传播结

构深刻变革的背景下,必须高度重视高校意识形态安全的系统性、长期性与隐蔽性。未来,应进一步加强跨学科理论的融合应用,将传播政治经济学、平台治理、人工智能伦理等新兴研究视角引入高校意识形态研究中,推动意识形态治理能力的现代化升级。

参考文献:

- [1] 马克思,恩格斯. 马克思恩格斯选集:第1卷[M]. 北京:人民出版社,2012:420.
- [2] 人民网. 十九届中央第七轮巡视完成反馈[EB/OL]. (2021-09-06)[2025-02-04]. [http://paper. people. com. cn/rmrb/html/2021-09/06/nw. D110000renmrb_20210906_6-01. htm](http://paper.people.com.cn/rmrb/html/2021-09/06/nw.D110000renmrb_20210906_6-01.htm).
- [3] 第54次《中国互联网络发展状况统计报告》[R]. 中国互联网络信息中心,2024-08-29.
- [4] SMYTHE D W. Communications: Blindspot of Western Marxism[J]. Canadian Journal of Political and Social Theory, 1977, 1(3): 1-27.
- [5] SCHILLER H I. Mass Communications and American Empire[M]. 2nd ed. Boulder: Westview Press, 1992.
- [6] MOSCO V. The Political Economy of Communication[M]. London: SAGE Publications, 2009.
- [7] 王玉梅. 全球化时代中华文化发展的战略构想[J]. 学习月刊, 2012(6): 10-11.
- [8] 李锦红, 马玉佳. 网络空间主流意识形态认同面临的挑战及对策研究[J]. 新闻研究导刊, 2024, 15(2): 124-126.
- [9] 骆郁廷, 靳文静. 论思想政治理论教育的作用机理[J]. 马克思主义与现实, 2022(4): 103-109.
- [10] 廖丽金. 网络空间主流意识形态认同教育面临的挑战及应对策略[J]. 东华大学学报(社会科学版), 2021, 21(4): 83-88.
- [11] 赵曜, 王伟光, 鲁从明, 等. 马克思列宁主义基本问题[M]. 北京: 中共中央党校出版社, 2001: 361-362.
- [12] 邓小平. 邓小平文选: 第3卷[M]. 北京: 人民出版社, 1993: 382.
- [13] 列宁. 列宁全集: 第45卷[M]. 北京: 人民出版社, 1990: 249.
- [14] 周芳, 任怡. 坚决筑牢高校意识形态阵地的四个维度[J]. 人民论坛, 2021(21): 156-157.
- [15] 杨晨. 全媒体时代高校意识形态安全教育常态化机制研究[J]. 新闻研究导刊, 2024, 15(2): 72-77.
- [16] 中共中央关于加强党的政治建设的意见[M]. 北京: 人民出版社, 2019: 19.

责任编辑: 李云

BOPPPS 教学模式下《食品专业综合实验》课程教学改革

闫利萍*, 满云, 陶志杰, 张斌

(蚌埠学院 食品与生物工程学院, 安徽 蚌埠 233100)

摘要:基于《食品专业综合实验》课程教学现状,分别从课程建设目标、教学内容设计、实验教学实施过程、课程考核评价等方面构建 BOPPPS 教学模式,并将 BOPPPS 教学模式运用于本课程教学过程,实验课堂气氛活跃,显著提升了实验教学效果。

关键词:食品专业综合实验;BOPPPS 教学模式;教学改革;过程性评价

中图分类号:G642.423

文献标识码:A

文章编号:2095-297X(2025)05-0124-05

Teaching Reform of Comprehensive Experiment in Food Major Course under BOPPPS Teaching Mode

YAN Liping*, MAN Yun, TAO Zhijie, ZHANG Bin

(School of Food and Biological Engineering, Bengbu University, Bengbu, 233100, Anhui)

Abstract: The current teaching situation of the Comprehensive Experiment of Food Major course was analyzed in this article. And course construction objective, teaching content design, experimental teaching implementation process and course assessment and evaluation were introduced to construct the BOPPPS teaching model. The BOPPPS teaching model was applied to the teaching process of this course, creating an active atmosphere and significantly improving the effectiveness of experimental teaching.

Key words: comprehensive experiment of food major; BOPPPS teaching mode; teaching reform; process evaluation

《食品专业综合实验》是本科生在完成所有专业基础课和专业课之后、开展毕业论文前的最后一次综合实验课程。该课程主要来源于生产实践,又回归指导生产实践。在教学过程中应强化动手操作,增加感性认识,提高学生的产品设计能力、设备操作能力、原料和成品质量分析与控制能力,训练学生创新思维和科研能力等专业综合素质^[1-2]。然而,目前国内绝大多数地方高校普遍采用“简单加工工艺和验证性实验为主体”的传统教学模式,考核评价方式仍以提交实验报告结合出勤率为主,实验(实践)环节考核少,不利于创新高级人才的培养。虽然国内也不少高校进行一系列探索和改革,

取得一定成效^[3-5],但随着食品行业的发展,对食品人才的能力要求不断提高,本课程的教学不足逐渐凸显出来。这也是国内许多省属地方高校《食品专业综合实验》课程普遍面临的困难和挑战。

BOPPPS 是加拿大教师技能培训中广泛采用的一种教学新模式,主要以教育目标为导向,以学生为中心,构建导入(Bridge-in)、学习目标(Objectives)、前测(Pre-assessment)、参与学习(Participatory Learning)、后测(Post-assessment)、总结(Summary)等确保课堂教学成功的六个环节^[6-7]。BOPPPS 教学模式已被引入国内高校教师培训,并应用于课程教学实践中,在学生深度参与学习方面取得了良好

收稿日期:2025-03-28 * 通讯联系人

基金项目:安徽省质量工程教学研究项目(2023jyxm0832);蚌埠学院校级重点教育教学改革研究项目(2022jyxm4);蚌埠学院第三批党建工作研究课题(2025DJKT04)。

作者简介:闫利萍(1981-),女,河南洛阳人,讲师,硕士。E-mail:yzwzg2000@163.com

效果^[8-10]。基于此,笔者积极转变教学理念,将BOPPPS 教学模式引入至《食品专业综合实验》的教学改革中,取得良好教学效果,为高校食品类专业实验课程教学改革提供参考。

1 《食品专业综合实验》课程教学现状

《食品专业综合实验》是食品科学与工程专业集中实践教学环节的重要课程,一般安排在第6或7学期大实验周(3-5周时间)开展教学,主要内容涉及果蔬制品、焙烤制品、肉制品、乳制品和水产品等方面实验项目。《食品专业综合实验》课程教学环节较多,主要包括实验项目课题选择、理论知识复习、团队分工与协作、实地调研和资料查阅、撰写预习实验报告、讨论和修改实验报告、实验动手操作、实验数据处理和结果分析、撰写实验报告等。目前,《食品专业综合实验》课程教学主要存在以下问题:

实验项目设置简单,缺乏创新性。目前大多数国内院校食品类专业《专业综合实验》项目内容较为简单和陈旧,无法满足现代食品工业对创新型综合人才的需求。如肉制品和乳制品企业急需原料新鲜度判断、掺假辨伪、收购标准、产品质量标准分级、减毒改良生产技术等专业技能人才,而以往教学往往忽视这些项目内容,造成毕业生专业实践能力与企业需求间存在较大差距。

教学模式相对落后,缺乏启发性。目前国内高校《食品专业综合实验》教学主要采用灌输式传统教学模式,即由教师提前准备好实验器材,然后讲解实验目的、基本原理、操作步骤以及注意事项,必要时演示实验操作,最后安排学生依据示范完成实验操作,有的甚至出现由多名学生共同完成情况。这种教学模式容易导致学生照本宣科机械性操作,无法有效提升学生的综合实验实践能力。

考核方式单一,缺乏全面性。目前国内地方高校各类实验实训课程的考核方式主要以实验报告评价为主,平时表现评价为辅。这种单一考核方式不仅不能调动学生的学习积极性,还无法真实反映学生的实验操作水平,更不能全面真实评价学生的综合能力和创新能力提升情况。

2 BOPPPS 教学模式在《食品专业综合实验》课程中的教学设计

2.1 课程建设目标

《食品专业综合实验》课程教学应以创新能力和职业能力培育为目标,以综合设计型和创新型项

目为主,有机融合专业知识、实验技能和综合素质,探索新的教学方法,突出学生主体地位。BOPPPS 教学模式引入到《食品专业综合实验》课程教学中,教师将由知识讲授者转变为课程设计者,学生则由被动接受知识者转变成主动参与者,努力提升学生独立思考和实验动手操作的能力,着力培养学生解决复杂工程问题的能力^[11-12]。

2.2 教学内容设计

以综合设计和创新型实验项目内容为主,着重培养和提高学生的综合创新能力。如将果汁制作实验和含乳饮料制作实验整合为花色酸乳制作与质量分析综合实验项目,主要包括原料乳验收与掺假分析、果汁制备、果汁护色、稳定剂配制、调配、混料调酸、均质、杀菌、冷却、灌装、感官评价和理化指标测定等内容,巩固和强化学生对(乳)饮料工艺流程整体上的认知和把控。

实验项目紧密衔接现代食品行业,大力培养和提高学生的工程能力和职业能力。积极购置 CIP 系统(在线清洗系统)、SIP 系统(在线灭菌系统)、发酵罐、灌装机、超高温瞬时杀菌系统、喷雾干燥机等仪器设备,条件许可下升级为小型生产线规模制作,提升学生实践能力,强化工程意识。

2.3 实验教学实施过程

在《食品专业综合实验》课程教学中应用 BOPPPS 教学模式,以“项目为载体,教师为引导,学生为中心”开展实验环节教学,指导教师引导学生分组讨论实验课题,确定研究项目,查阅相关文献,讨论和设计实验方案,开展实验研究,撰写实验报告。通过设计实验项目来探索和解决科学问题方案,引导和提升学生发现、独立思考和解决问题等能力。下面以花色酸乳制作与质量分析综合实验项目教学为例,介绍 BOPPPS 教学模式的实施情况(见表1)。

2.3.1 导入(Bridge-in)

良好的导入能够显著提高学生的学习兴趣 and 参与度。指导教师在实验教学开场白中通过实物、图片甚至广告宣传等方式导入,引导学生思考如何制作花色酸乳和质量控制。指导教师也可以讲授花色酸乳的科技前沿研究报道和企业需求等科技问题,如某种植物基酸乳冷藏条件下容易出现乳清析出现象,甚至会影响产品质量和保质期等。指导教师鼓励和引导学生查找产品质量缺陷的原因,激发学生的学习兴趣,自主围绕技术难题查阅相关资料,展开讨论,寻求解决方案。

表 1 基于 BOPPPS 教学模式下花色酸乳制作与质量分析实验项目的教学设计

BOPPPS	时间/min	教师角色	学生角色
导入	4	介绍酸乳的概念、生理功能,以及市场上花色酸奶的种类,引出酸奶制作奥秘,激发学生学习兴趣。	了解酸乳相关知识,快速进入角色
目标	3	知识目标:掌握酸乳的生产原理和关键技术;果汁护色关键技术。 技能目标:掌握杀菌、均质、发酵、护色、清洗等工序的规范操作。 情感目标:遵守职业道德和规范,履行责任。	熟记课程各类目标
前测	6	问题 1:原料乳验收与质量要求 问题 2:发酵剂活力 问题 3:灭酶护色 问题 4:稳定剂配制	积极参与互动
参与学习	45	实验操作 1:乳的标准化 实验操作 2:果汁护色处理 实验操作 3:乳的均质 实验操作 4:乳的杀菌 实验操作 5:搅拌、发酵和灌装 实验操作 6:感官评价和酸度测定	先分组讨论,后师生互动
后测	4	根据实验小组汇报和结果分析,结合成员动手操作情况评价成绩。	各组展示产品,汇报实验内容
总结	3	整理和归纳实验中存在的共性问题,提出解决措施。	

2.3.2 学习目标(Objective)

学生明确学习目标后能够更好地把握学习方向,严格要求自己,提高学习成效。“花色酸乳制作与质量分析综合实验项目”学习目标包括三个方面:

知识目标:掌握酸乳的生产原理和生产工艺要点、果汁(肉)的护色原理和技术要点;了解和熟悉不同类型酸乳的质量标准 and 安全性指标的要求;能够对所要求检测指标进行综合分析、评价并能够提出切实可行的控制措施。

能力目标:了解花色酸乳生产工艺流程,掌握超高温瞬时杀菌机、高压均质机、发酵罐、乳成分分析仪等仪器正确操作。

素质目标:激发学习热情,提高课堂参与度和实践操作技能。理解和遵守职业道德和规范,履行责任。

2.3.3 前测(Pre-assessment)

前测不仅能够帮助学生检测和评估自己预(复)习效果,还有助于指导教师及时了解学生对实验基础理论和实验技能的掌握程度,必要时适当调整实验教学内容和进度^[13]。通常在授课前 2-4 周,指导教师通过 QQ 群或线下发布与实验内容相

关的预习作业(或撰写预习实验报告):(1)原料乳验收与品质要求有哪些?如何控制?本题重点考查学生对原料乳质量要求和检测方法的掌握情况;(2)发酵剂活力质量有哪些要求?如何检测?本题重点考查学生对微生物基础理论知识和细菌检测方法的掌握情况;(3)灭酶护色的目的是什么?如何操作?本题重点考查学生对食品化学中灭酶护色的理论知识和实验操作技能的掌握情况;(4)需要添加哪些稳定剂?添加多少?如何添加?本题重点考查学生对食品添加剂相关知识点和食品工艺学中产品品质影响因素等方面理论和实验操作技能。

2.3.4 参与学习(Participatory Learning)

参与学习是 BOPPPS 教学模式中“以学生为中心”的最主要环节。本环节可在线下课外和课中进行,主要采用师生互动、分组讨论、合作协作等方式调动学生学习积极性,自主查阅相关资料,讨论后撰写和形成初步实验方案,指导教师指出错误和需要改进之处,实验小组再进一步补充和完善设计报告,有计划、有步骤地开展实验环节,如实验过程中遇到技术等问題,可采取组内讨论和分析,及时调整和完善实验方案。

实验教学过程中采取分步骤开展教学活动^[14]。

第1步,指导教师讲授:指导教师根据实验室机械设备,讲解花色酸乳生产工艺流程、生产设备构成、工作原理、具体操作、设备清洗和日常维护等内容。第2步,集中实验:对于标准化、护色处理、均质、杀菌、发酵、灌装等自动化程度较高设备,先由指导教师示范操作,然后让学生逐一排队体验操作,满足学生好奇心,激发学生学习热情,提高参与度。第3步,分组实验和个人动手操作相结合:各实验小组成员(一般4~6名学生)相互讨论,分工合作,自主安排和完成实验内容,但实验小组成员必须全程参与并完成实验动手操作内容,且接受相关实验操作考核环节,切实提高实验实训动手操作技能。

2.3.5 后测(Post-assessment)

后测是针对实验教学结束后开展的评估环节。实验过程中或结束后,各实验小组成员及时整理和分析实验数据和结果,形成1份完整的实验报告。各实验小组在指定时间和地点展示产品,汇报实验内容,指导教师根据各实验小组汇报和结果分析,并结合实验过程中成员动手操作情况评价实验成绩。

2.3.6 总结(Summary)

总结环节是由指导老师整理和归纳实验过程中暴露出来的不足和需改进的共性问题及其解决措施,结合实验目标总结实验的经验和教训,撰写并形成1篇实验教学反思,有利于今后不断打磨、继续发扬,形成风格乃至交流和推广应用。

2.4 课程考核评价

考核评价环节是反馈教学效果和学生学习成效的重要途径。以往《食品专业综合实验》课程成绩由30%平时表现(出勤和实验表现)和70%实验报告质量构成,容易导致部分学生参与实验积极性不高,出现“突击写实验报告,互相抄袭”等严重不良学习现象。BOPPPS教学理念引入到《食品专业综合实验》教学过程中,注重多元化考核方式,侧重考查实验全过程中的表现和技能水平,同时兼顾学生在创新设计和团队协作等方面的表现和能力水平。课程总成绩包括4个部分,分别为出勤及课堂表现(10%)、知识水平(30%)、专业能力(30%)、预习报告和正式实验报告撰写(30%)。

评定操作细则:(1)出勤及课堂表现考核:学生无故旷课1次,本次实验项目记为零分;无故旷课超过学校规定次数者,按学校有关规定处理;上课玩手机、吃零食者以及迟到超过30分钟,每次扣5分。(2)知识水平考核:主要通过现场提问和随堂测试相关实验项目基础知识。(3)专业能力考核:对各实验小组所有成员动手操作的规范性和记录数据的

准确性进行评分。(4)预习报告和正式实验报告撰写:实验报告内容包括实验目的、实验原理、实验设备、操作流程、实验步骤、原始数据记录、数据整理与统计、结果分析与讨论、思考题、实验体会和建议等内容。

3 BOPPPS 教学模式在《食品专业综合实验》课程教学中的实施情况

2022-2024年,笔者已连续3年将BOPPPS教学模式分别引入到2019级、2020级和2021级食品科学与工程专业《食品专业综合实验》课程中。与传统教学模式相比,BOPPPS教学模式的引入,大大激发了学生的学习积极性,教学参与度达到100%,课堂教学气氛变得明显活跃,学生独立思考能力和实验动手操作技能明显提高,课程综合考核优良率均达到90%,近50%学生具备科研意识和创新意识,积极主动申请并参与“挑战杯”大学生创业计划大赛、大学生创新创业训练计划、安徽省大学生食品设计创新大赛、大学生科技活动节等相关专业竞赛项目,撰写各类项目申报书能力明显提升。

但《食品专业综合实验》课程项目内容涉及面广,综合设计性强,BOPPPS教学模式不能解决所有技术问题,建议进一步增加自主设计型综合实验的学时数,增加学术论文撰写规范和能力的辅导和答疑活动,大力提高学生的实践创新能力,真正实现创新型人才的培养目标。

4 结论

BOPPPS教学模式以实现教学目标为目的,以参与学习为核心,注重学生的课堂参与度和过程多元化评价,有效提升了学生的综合实践能力和创新能力,为实践型和创新型食品专业工程人才的培养提供了有效途径。

参考文献:

- [1] 伍军,党登峰,敖日嘎,等.强化创新实践能力培养 打造食品科学与工程专业卓越人才[J].高等农业教育,2016,42(4):57-59.
- [2] 刘佳,赵欣.创新人才培养理念下食品专业综合探究性实验教学研究[J].中国食品工业,2024,40(21):156-158.
- [3] 刘丹,陈林,姜燕,等.基于DMAIC模型的实验课程教学质量初探——以食品专业综合实验为例[J].大学教育,2024,14(5):92-95.
- [4] 尹佳.工程教育认证背景下的食品科学与工程专业实验教学改革探索[J].吉林化工学院学报,2020,37(4):

- 39-42.
- [5] 王小媛,栗俊广,李学红,等.工程认证背景下食品科学与工程专业实验教学改革初探[J].轻工科技,2020,36(4):169-170.
- [6] 曹丹平,印兴耀.加拿大 BOPPPS 教学模式及其对高等教育改革的启示[J].实验室研究与探索,2016,44(6):196-200.
- [7] 刘照,翟显,肖晓晖,等.基于 BOPPPS 教学模式的机械专业综合实验教学设计[J].实验科学与技术,2021,19(6):75-78.
- [8] 刘俊杰,梁宝瑞,李婧男,等. BOPPPS 教学模式下环境工程综合实验的教学设计与实践[J].实验室研究与探索,2025,44(2):95-100.
- [9] 罗继景,黄婧,岑卫健.基于 BOPPPS 模式的遗传学线上线下混合教学实践——以“植物雄性不育”教学内容为例[J].基因组学与应用生物学,2025,44(2):201-206.
- [10] 吴瑗,赵汉宁,赵祖国,等.融入 BOPPPS 的混合式教学模式在医学免疫学中的应用[J].中国免疫学杂志,2025,41(3):690-693,697.
- [11] 陈启佳,李雪梅,李丹丹,等. BOPPPS-CDIO 相结合教学模式在“食品专业综合实验”课程中的教学改革与实践[J].食品与发酵工业,2023,49(15):351-356.
- [12] 张宁宁,王睿,郑宝东.基于 BOPPPS 与项目化教学模式相结合的食品酶学课程改革[J].食品工业,2019,40(4):268-270.
- [13] 谢微,段振华,朱东建. BOPPPS + PBL 教学模式在食品检测课程中的应用探究[J].食品工业,2019,40(8):247-249.
- [14] 陈培云,刘合生,张慧恩. BOPPPS 教学模式在“食品质量与安全综合实验”课程中的应用[J].西部素质教育,2024,10(16):173-176.

责任编辑:刘娟

(上接第 111 页)

- [23] PIEK J P, DAWSON L, SMITH L M, et al. The role of early fine and gross motor development on later motor and cognitive ability[J]. Human Movement Science, 2008, 27(5): 668-681.
- [24] FOTIADOU E G, NEOFOTISTOU K H, SIDIROPOULOU M P, et al. The effect of a rhythmic gymnastics program on the dynamic balance ability of individuals with intellectual disability[J]. The Journal of Strength & Conditioning Research, 2009, 23(7): 2102-2106.
- [25] MAÏANO C, HUE O, APRIL J. Effects of motor skill interventions on fundamental movement skills in children and adolescents with intellectual disabilities: A systematic review[J]. Journal of Intellectual Disability Research, 2019, 63(9): 1163-1179.
- [26] FOTIADOU E G, NEOFOTISTOU K H, GIAGAZOGLU P F, et al. The effect of a psychomotor education program on the static balance of children with intellectual disability[J]. The Journal of Strength & Conditioning Research, 2017, 31(6): 1702-1708.
- [27] EINARSSON I T, JÖHANSSON E, DALY D, et al. Physical activity during school and after school among youth with and without intellectual disability[J]. Research in Developmental Disabilities, 2016, 56: 60-70.
- [28] JENG S C, CHANG C W, LIU W Y, et al. Exercise training on skill-related physical fitness in adolescents with intellectual disability: A systematic review and meta-analysis[J]. Disability and Health Journal, 2017, 10(2): 198-206.
- [29] BRESSEL E, YONKER J C, KRAS J, et al. Comparison of static and dynamic balance in female collegiate soccer, basketball, and gymnastics athletes[J]. Journal of Athletic Training, 2007, 42(1): 42-46.
- [30] OLUBOVIĆ Š, MAKSIMOVIĆ J, GOLUBOVIĆ B, et al. Effects of exercise on physical fitness in children with intellectual disability[J]. Research in Developmental Disabilities, 2012, 33(2): 608-614.
- [31] CAPIO C M, MAK T C T, TSE M A, et al. Fundamental movement skills and balance of children with down syndrome[J]. Journal of Intellectual Disability Research, 2018, 62(3): 225-236.
- [32] TSIMARAS V K. Influence of traditional dance training programs on dynamic balance of people with intellectual disability: A short review[J]. Pedagogics, Psychology, Medical-biological Problems of Physical Training and Sports, 2015(5): 71-74.
- [33] 邢玉,柳皓严,吴雪萍.运动干预对智力障碍儿童青少年平衡能力影响的 Meta 分析[J].首都体育学院学报, 2021, 33(4): 420-428.

责任编辑:李云