

基于RSM的废石—全尾砂充填料浆流变特性试验研究

梁栋¹, 陈寅^{1,2}, 王恩祁¹, 姚俊辉^{1*}

1. 新疆大学地质与矿业工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047;
2. 新疆喀拉通克矿业有限责任公司, 新疆 阿勒泰 831607



摘要:新疆某铁矿的开采方式从空场法转变为充填法,为研究充填料浆质量分数(A)、砂灰比(B)和废石粒径(C)及交互作用对废石—全尾砂充填料浆流变特性的影响规律,基于响应面法(RSM)设计L型管道相似模拟试验,开展了充填料浆屈服应力和黏度系数测试。试验结果表明:屈服应力和黏度系数随质量分数的增大均呈上升趋势、随砂灰比和废石粒径的增大均呈下降趋势。对于充填料浆的屈服应力和黏度系数,各影响因素的显著性顺序为 $A>C>B>AC>BC>AB$,其中交互作用AB对屈服应力的影响较弱。随着充填料浆质量分数的减小,废石粒径对屈服应力和黏度系数的影响逐渐减弱,砂灰比对黏度系数的影响逐渐减弱;当废石粒径较小时,砂灰比对屈服应力和黏度系数的影响较小;当砂灰比较小时,废石粒径对屈服应力和黏度系数的影响较弱。对充填料浆配比寻优后的配比参数为:质量分数为86%,砂灰比为6~8,废石粒径为-5 mm。推荐配比下的充填料浆兼具抗离析稳定性与良好的流动性能,研究结果对矿山废石—全尾砂充填料浆配比优化具有一定的指导意义。

关键词:废石尾砂胶结充填;响应面分析法;L管模拟试验;流变特性;交互作用

中图分类号:TD853 文献标志码:A 文章编号:1005-2518(2025)06-1209-12 DOI:10.11872/j.issn.1005-2518.2025.06.158

引用格式:梁栋,陈寅,王恩祁,等.基于RSM的废石—全尾砂充填料浆流变特性试验研究[J].黄金科学技术,2025,33(6):1209-1220. LIANG Dong, CHEN Yin, WANG Enqi, et al. Experimental Study on Rheological Properties of Waste Rock-Unclassified Tailings Backfilling Slurry Based on RSM[J]. Gold Science and Technology, 2025, 33(6): 1209-1220.

近年来,国家高度重视并积极推广充填采矿法,相继出台了《国务院办公厅关于进一步加强矿山安全生产工作的意见》等诸多环保和安全生产法规,以促进充填法在矿山开采中的应用。充填开采通过固废回填提高资源回采率,解决了尾矿堆积的环保问题,并通过控制地压来减少地表塌陷风险,保障深部矿体安全开采(郭利杰等,2022)。胶结充

填工艺通过将胶凝材料与尾砂等固废混合形成充填体,可以显著提升地下采空区的结构强度与稳定性,从而有效控制岩层移动和地表沉降。充填料浆流变特性研究是胶结充填工艺设计的科学基础,流变参数决定了料浆在管道中的流动行为,已成为矿山充填领域的核心攻关方向。

近年来,国内外学者对充填料浆流变特性开展

收稿日期:2025-05-09;修订日期:2025-09-10

基金项目:新疆维吾尔自治区重点研发计划项目“萤石矿岩体质量分级数字云模型与钻进法可截割性测试与技术开发”(编号:2024B03014-1)、新疆“天山英才”第二批优秀工程师(陈寅)培养计划、新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目“含水低渗透煤的微波注热—增透机制”(编号:2024D01C245)和新疆大学国家级大学生创新创业训练计划项目“微波辐射下硬煤动—静态破坏的能量转换机制”(编号:202410755014)联合资助

作者简介:梁栋(1996—),男,黑龙江齐齐哈尔人,硕士研究生,从事金属矿山充填等方面的研究工作。E-mail:XJU_LiangDong@163.com

*通信作者:姚俊辉(1989—),男,新疆阿克苏人,副教授,从事金属矿山地下安全开采和非爆物理破岩技术方面的研究工作。E-mail:rock-man@xju.edu.cn

© Editorial Department of Gold Science and Technology (CC BY-NC-ND)

了大量研究。在流变测试与建模方面,基于静力平衡原理,采用L型管道试验装置对流变参数进行了计算研究(齐兆军等,2018;杜加法等,2020)。同时,系统梳理了全尾砂膏体流变学研究现状,建立了从概念、特性到模型的完整理论框架,并指出流变测量技术标准化的发展方向(吴爱祥等,2020,2021)。充填料浆流变特性受多种因素的影响,孙京阁等(2021)研究了温度对高浓度全尾砂充填料浆流变性能的影响规律,张美道等(2021)通过试验研究了料浆质量浓度和灰砂比对料浆流动性能的影响。在复合骨料体系方面,研究指出含粗骨料(废石、棒磨砂等)的尾砂膏体仍符合宾汉流体特征,其流变参数主要受质量浓度、粗骨料含量、灰砂比和尾废比等因素控制(尹升华等,2023;王小林等,2024)。此外,研究发现粗骨料膏体的流变参数具有显著的时间依赖性和触变特性,屈服应力与剪切时间呈负指数关系,黏度系数的时变特征可用高斯分布函数描述(Yang et al, 2024)。这些研究为理解复合骨料充填体系的流变机理和优化管道输送参数提供了重要的理论基础。响应面法(RSM)作为一种高效的统计优化方法,在充填料浆流变特性研究中得到了广泛应用。该方法通过多项式拟合建立多变量非线性系统的数学模型,有效解决了多变量非线性系统的参数优化问题(尹升华等,2020;于恩毅等,2020;杨升旺等,2021;张修香等,2023;李广波等,2024)。研究人员采用响应面法建立了煤矸石充填料浆流变参数的回归模型,揭示了质量分数、粉煤灰掺量及细矸石比例的交互影响规律(Zhu et al, 2021)。随着研究工作的深入,研究人员发现充填料浆流变特性具有显著的时间依赖性。部分学者进一步采用响应面法研究了含羟丙基甲基纤维素(HPMC)的细粒煤矸石充填料浆在不同养护时间下的流动性和流变特性演化规律(Gu et al, 2024)。综上所述,现有研究虽然在充填料浆流变特性方面取得了显著进展,但仍存在以下局限:多数研究聚焦于单一骨料体系,对废石—全尾砂复合骨料体系中质量浓度、砂灰比和废石粒径三因素及其交互作用的系统研究尚不充分。此外,现有研究对多因素交互作用的物理机理阐释不足,其规律在充填料浆配比优化中的实践应用也缺乏系统指导,亟需深入探究以提升工程应用价值。

为响应国家政策,新疆某铁矿的开采方式从空场法转变为充填法,并采用废石—全尾砂复合骨料作为充填骨料。因此,本文采用该矿生产过程中产生的破碎废石与全尾砂作为充填骨料,基于响应面法(RSM)开展L管相似模拟试验,系统研究废石—全尾砂充填料浆质量分数、砂灰比和废石粒径及三者交互作用对废石—全尾砂充填料浆屈服应力和黏度系数的影响规律。通过构建多因素回归预测模型,揭示各因素的主效应和交互效应,确定充填材料的最佳配比参数,为矿山废石—全尾砂稳定高质量充填提供理论依据和技术支撑。

1 试验材料

该铁矿生产过程中产生大量采矿废石和全尾砂,根据矿山生产现状和设计需要,现将废石和全尾砂作为充填集料对井下进行胶结充填。按照相关标准(中华人民共和国住房和城乡建设部,2019)对废石和全尾砂的相对密度进行测定,得到废石和全尾砂的相对密度分别为 2.74 g/cm^3 和 2.92 g/cm^3 。胶凝材料为P.O 42.5普通硅酸盐水泥。全尾砂来源于该铁矿选矿厂排放的浮选尾矿,该尾矿是经过破碎、磨矿和浮选等工艺流程后产生的最终尾矿产品,未经过额外的分级或处理。全尾砂和水泥的粒度分布如图1所示,由图1(a)可以看出,全尾砂粒径相对较粗,主要集中在 $114.862\sim 215.915 \mu\text{m}$ 区间,特征粒径 d_{10} 、 d_{50} 和 d_{90} 分别为 101.755 、 152.591 、 $241.909 \mu\text{m}$ 。全尾砂粒径相对较粗的主要原因是该矿铁矿石嵌布粒度相对较粗,选矿磨矿细度要求不高,为降低磨矿成本,选矿厂采用相对较粗的磨矿细度进行浮选分离。在保证选矿指标的前提下,具有该粒级分布的全尾砂有利于后续充填应用中的脱水和强度发展。根据矿山生产规划和选矿工艺稳定性分析,该粒级分布的全尾砂将是该矿山未来5~10年内充填开采的主要尾砂来源。由图1(b)可以看出,水泥粒度主要分布在 $5.356\sim 20.710 \mu\text{m}$,特征粒径 d_{10} 、 d_{50} 和 d_{90} 分别为 3.942 、 10.654 、 $25.177 \mu\text{m}$ 。

表1为废石与全尾砂的化学成分,废石和全尾砂的化学成分差别不明显,均含有大量的 SiO_2 ,S元素含量均低于4%,符合《金属非金属矿山充填工程技术标准》(GB/T 51450—2022)(中华人民共和国

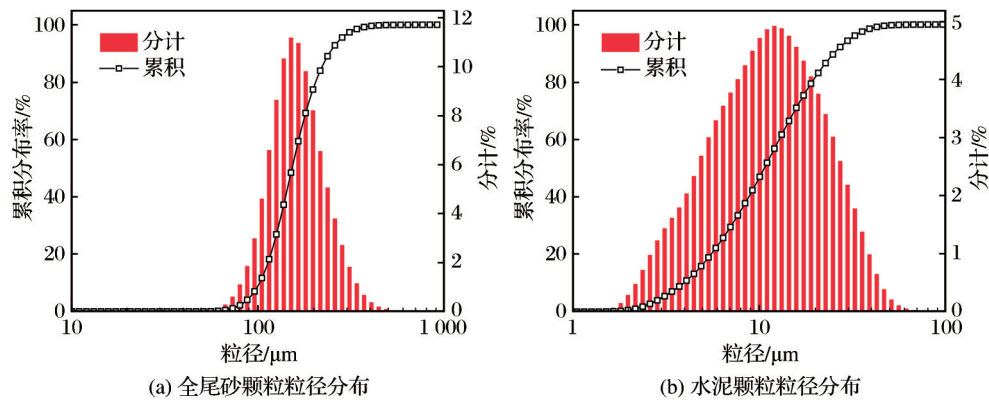


图1 全尾砂和水泥的颗粒粒径分布

Fig. 1 Particle size distribution of unclassified tailings and cement

表1 废石与全尾砂的化学成分

Table 1 Chemical composition of waste rocks and unclassified tailings

材料名称	化学成分含量/%						
	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	S	其他
废石	26.12	33.53	2.11	6.19	29.35	0.77	1.46
全尾砂	26.23	33.58	1.19	5.41	27.24	3.11	2.49

住房和城乡建设部,2022)中的相关规定。

2 复合骨料充填料浆流变特性试验

2.1 响应面Box-Behnken试验设计

响应面法(Response Surface Methodology, RSM)是一种基于试验设计与统计建模的优化方法。该方法基于科学设计的试验方案采集数据,构建因素与响应值之间的非线性关系模型,结合方差分析验证模型显著性及因素交互作用,最终通过数学寻优确定各因素的最优参数组合以实现目标响应值的寻优(杨升旺等,2021;李广波等,2024)。

本研究选取料浆质量分数(A)、砂灰比(B)及废石粒径(C)为影响流变特性的因素。以屈服应力(Y_1)和黏度系数(Y_2)作为响应值。通过参照类似矿山废石—全尾砂胶结充填应用情况和前期充填料浆坍落度测试,将充填料浆的质量分数设置为82%、84%和86%,砂灰比为4、8和12。参照相关标准(中华人民共和国住房和城乡建设部,2011),综合考虑充填管道内径等充填系统工艺参数以及参考类似研究(王建栋等,2016),废石采用粒径范围分别为-5 mm、-10 mm和-15 mm的全粒径破碎废石。

废石与全尾砂的比例为1:1。基于Design-Expert 13软件响应面分析中的Box-Behnken设计,设计三因素三水平共17组试验。各因素水平见表2。

表2 试验因素水平

Table 2 Test factor levels

影响因素	水平		
	-1	0	1
质量分数/%	82	84	86
砂灰比	4	8	12
废石粒径/mm	-5	-10	-15

2.2 L管输送模拟试验

本研究采用L型管道输送模拟试验测试充填料浆的屈服应力 τ_0 和黏度系数 η 。L型管道试验装置的管道倍线为3.13,管道内径为50 mm,几何模型如图2所示。利用该装置对设计好的17组配比的充填料浆流变参数进行测试。

充填料浆的制备过程如下:首先按照试验设计的配比称取全尾砂、废石和水泥。废石采用分批添加方式,先将全尾砂和水泥在搅拌桶中干混60 s,使二者充分混合均匀,然后分3次加入废石,每次间隔30 s加入总量的1/3,边加入边搅拌,避免废石在料浆中分布不均。每组试验的料浆用量为20 L,确保能够充满L型管道系统并有足够的余量进行流变参数测试。

料浆采用强制式砂浆搅拌机进行搅拌,搅拌转速为45 r/min。具体搅拌工艺为:干料混合60 s后,缓慢加入计算好的用水量,加水过程持续30 s,然后继续搅拌300 s,总搅拌时间为390 s。搅拌完成

后立即将料浆倒入上部进料漏斗中进行测试,避免静置时间过长而影响料浆的流变特性。

漏斗中容重为 γ 的料浆浆面的初始高度为 $h+h'$,料浆通过L型管道向下流动,从水平管末端出口流出。管口处料浆流速 V (通过实测获得)随试验装置内料浆浆面高度降低而逐渐减小,随着试验的进行,当料浆自重压力与管道内径为 D 的管壁静摩擦阻力达到平衡时料浆停止流动,此时竖管内料柱停止流动时的高度为 h_0 。此时通过以下计算步骤可确定流变参数:首先基于式(1)由静力平衡关系计算料浆屈服应力 τ_0 ;随后将 τ_0 代入式(2)求得管壁剪切应力 τ ;最终通过式(3)计算出料浆的黏度系数 η (彭亮,2023)。

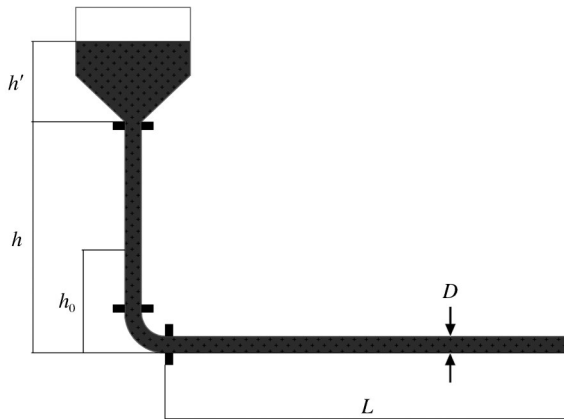


图2 L型管道输送模拟试验装置

Fig. 2 L-shaped pipeline transportation simulation test device

$$\tau_0 = \frac{\gamma \times h_0 D}{4(h_0 + L)} \quad (1)$$

式中: γ 为料浆容重(N/m^3); h_0 为竖管中静止料柱高度(m); D 为管道直径(m); L 为水平管长度(m)。

$$\tau = \frac{4}{3} \tau_0 + 8\eta \frac{V}{D} \quad (2)$$

式中: τ_0 为屈服应力(Pa); η 为黏度系数($\text{Pa}\cdot\text{s}$); V 为料浆流速(m/s)。

$$\eta = \frac{(3\tau - 4\tau_0) \times D}{24V} \quad (3)$$

式中: τ 为管壁剪切应力(Pa)。

2.3 试验结果

基于Design-Expert 13软件设计的17组试验,测定料浆的流变参数。以屈服应力和黏度系数作为响应值,以料浆质量分数、砂灰比和废石粒径作

为影响因素,采用Design-Expert软件对试验数据进行多元非线性回归拟合,得到料浆质量分数(A)、砂灰比(B)和废石粒径(C)与屈服应力(Y_1)和黏度系数(Y_2)的回归方程如式(4)和式(5)所示。17组配比的料浆屈服应力和黏度系数试验值与响应面回归拟合模型的预测值如表3所示。由表3可知,模型预测值与实际测量结果吻合度较高,表明回归模型具有较好的拟合优度。

$$Y_1 = 2\ 664.55684 - 69.10814A + 0.887215B + 13.64223C - 0.164775AC - 0.055925BC + 0.447\ 016A^2 - 0.040\ 949B^2 \quad (4)$$

$$Y_2 = 76.0845 - 2.071A + 0.477531B + 0.9761255C - 0.005719AB - 0.011925AC - 0.004375BC + 0.014A^2 + 0.001453B^2 + 0.00115C^2 \quad (5)$$

式中: Y_1 和 Y_2 分别为屈服应力(Pa)和黏度系数($\text{Pa}\cdot\text{S}$); A 、 B 和 C 依次为料浆质量分数(%)、砂灰比和废石粒径(mm)。

表3 RSM试验方案与结果
Table 3 RSM test scheme and results

试验组号	编码值			屈服应力(Y_1)		黏度系数(Y_2)	
	A	B	C	试验值	预测值	试验值	预测值
1	-1	-1	0	5.18	5.39	0.37	0.38
2	1	-1	0	22.69	22.76	0.93	0.93
3	-1	1	0	2.83	2.77	0.29	0.28
4	1	1	0	19.84	20.15	0.66	0.66
5	-1	0	-1	6.27	6.32	0.41	0.41
6	1	0	-1	27.04	26.99	1.11	1.11
7	-1	0	1	3.37	3.15	0.27	0.27
8	1	0	1	17.55	17.23	0.49	0.49
9	0	-1	-1	14.68	14.40	0.74	0.73
10	0	1	-1	14.28	14.02	0.71	0.72
11	0	-1	1	10.18	10.18	0.54	0.53
12	0	1	1	5.31	5.32	0.16	0.17
13	0	0	0	11.00	11.64	0.47	0.48
14	0	0	0	11.04	11.64	0.50	0.48
15	0	0	0	11.73	11.64	0.46	0.48
16	0	0	0	11.85	11.64	0.50	0.48
17	0	0	0	12.02	11.64	0.48	0.48

图3所示为屈服应力和黏度系数试验值与预测值的对比。由图3可知,预测值与试验值的散点均接近 $y=x$ 基准线,各数据点均匀分布于基准线两侧且无明显系统性偏移,表明模型具有优异的数据吻合度与稳健的预测性能。

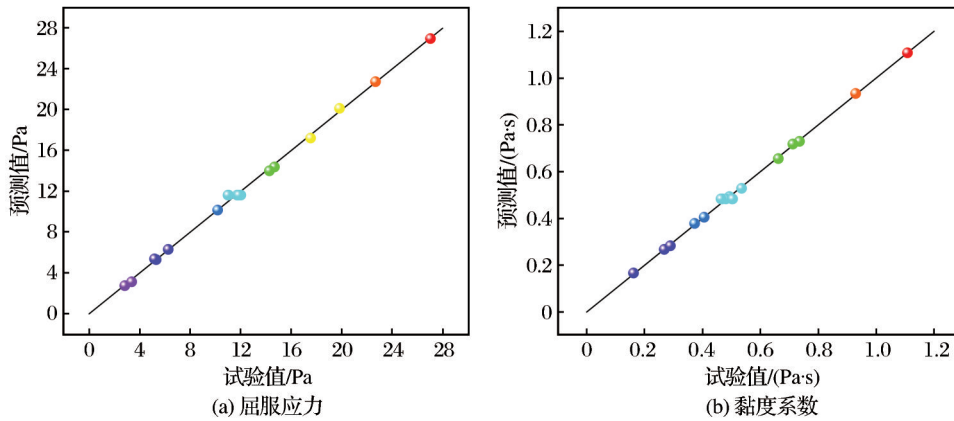


图3 回归模型的预测值与试验值对比

Fig. 3 Comparison of predicted value and test value of regression model

2.4 响应面模型方差分析

为验证模型的可靠性,对响应模型开展方差分析,结果如表4所示。 Y_1 和 Y_2 模型 F 值分别为668.73和433.73, P 值均小于0.0001,回归系数 R^2 均接近1,证明模型预测能力优异且统计意义显著。

屈服应力(Y_1)和黏度系数(Y_2)的变量主效应及交互项显著性排序依次为 $A>C>B>AC>BC>AB$,其

中交互作用 AB 对屈服应力的影响较弱。校正相关系数 R^2_{Adj} 分别为0.9966和0.9959,表明有99.66%和99.59%的充填料浆屈服应力响应值和黏度系数响应值变化可由响应面回归模型解释。变异系数 CV (3.25%和2.84%)均低于10%。信噪比(89.2977和80.7991)远超4,证实模型兼具高精度与强稳健性。

表4 响应面回归模型方差分析

Table 4 Analysis of variance of response surface regression model

误差来源	平方和		均方		F 值		P 值	
	Y_1	Y_2	Y_1	Y_2	Y_1	Y_2	Y_1	Y_2
模型	731.45	0.8994	104.49	0.0999	668.73	433.73	<0.0001	<0.0001
A	603.54	0.4306	603.54	0.4306	3 862.50	1 868.95	<0.0001	<0.0001
B	13.71	0.0698	13.71	0.0698	87.71	302.75	<0.0001	<0.0001
C	83.53	0.2824	83.53	0.2824	534.60	1 225.63	<0.0001	<0.0001
AB		0.0084		0.0084		36.34		0.0005
AC	10.86	0.0569	10.86	0.0569	69.50	246.89	<0.0001	<0.0001
BC	5.00	0.0306	5.00	0.0306	32.03	132.93	0.0003	<0.0001
A^2	13.50	0.0132	13.50	0.0132	86.39	57.31	<0.0001	0.0001
B^2	1.81	0.0023	1.81	0.0023	11.60	9.88	0.0078	0.0163
C^2		0.0035		0.0035		15.11		0.0060
残差	1.41	0.0016	0.156 3	0.0002				

3 响应面分析与配比优化

三维响应曲面可直观表征交互效应与响应值的非线性关联,并揭示因素水平变化对响应值的影响规律,曲面曲率与交互效应强度呈正相关(刘树龙等,2021;陈鑫政等,2022;彭亮,2023;李勇明等,2024)。

3.1 屈服应力响应面分析

根据方差分析,交互作用 AC 和交互作用 BC 对屈服应力具有显著影响,相互作用项 AC 和 BC 对料浆屈服应力的影响见图4。图4(a)的响应曲面曲率大于图4(b),表明交互项 AC 的显著性大于交互项 BC ,这与回归方程的方差分析相一致。

在图4(a)中, B 取中间水平,当 A 从-1水平增大

至+1水平时, C 为-1水平时屈服应力增大20.777 Pa, C 为+1水平时屈服应力增大14.186 Pa, 因素 A 的主效应为+17.4815。可以看出, 当废石粒径一定时, 随着质量分数的提高, 屈服应力显著增大, 且增速随质量分数的升高而加快, 并且废石粒径越小, 随着质量分数的提高, 屈服应力上升速率越快。当 C 从-1水平增大至+1水平时, A 为-1水平时屈服应力减小2.899 Pa, A 为+1水平时屈服应力减小9.49 Pa, 因素 C 的主效应为-6.1945。可以看出, 当质量分数一定时, 随着废石粒径的增大, 屈服应力呈下降趋势, 且质量分数越小, 随着废石粒径的增大, 屈服应力下降速率越慢, 即随着质量分数的降低, 屈服应力对废石粒径的敏感度逐渐减小。因素 A 主效应的绝对值大于因素 C 主效应的绝对值, 表明因素 A 对屈服应力的影响大于因素 C 。

在图4(b)中, A 取中间水平, 当 C 从-1水平增大至+1水平时, B 为-1水平时屈服应力减小4.494 Pa, B 为+1水平时屈服应力减小8.968 Pa, 因素 C 的主效应为-6.731。可以看出, 当砂灰比一定时, 随着废石粒径的增大, 屈服应力呈下降趋势, 且砂灰比越大, 随着废石粒径的增大, 屈服应力下降速率越快, 随着砂灰比的降低, 屈服应力对废石粒径的敏感度逐渐减小。当 B 从-1水平增大到+1水平时, C 为-1水平时屈服应力减小0.395 Pa, C 为+1水平时屈服应力减小4.869 Pa, 因素 B 的主效应为-2.632。可以看出, 当废石粒径一定时, 随着砂灰比的增大, 屈服应力呈下降趋势。随着废石粒径的减小, 屈服应力对砂灰比的敏感度逐渐减小。因素 C 主效应的绝对值大于因素 B 主效应的绝对值, 表明 C 对屈服应力的影响大于 B 。

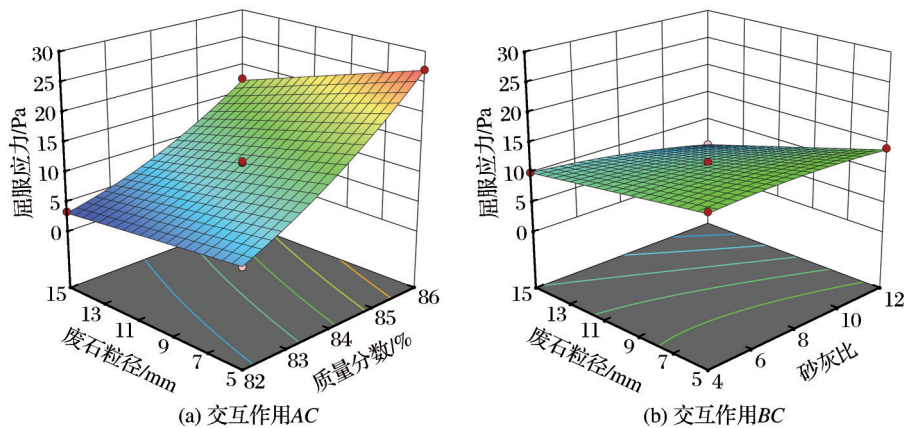


图4 屈服应力响应面分析

Fig. 4 Response surface analysis of yield stress

3.2 黏度系数响应面分析

根据方差分析, 交互作用 AB 、 AC 和 BC 均对黏度系数具有显著影响, 相互作用项 AB 、 AC 和 BC 对料浆黏度系数的影响如图5所示。在图5(a)~5(c)中, 响应曲面曲率最大的是图5(b), 其次是图5(c), 曲率最小的是图5(a), 表明3个交互作用项的显著性顺序为 $AC > BC > AB$, 这与回归方程的方差分析相一致。

在图5(a)中, C 取中间水平, 当 A 从-1水平增大至+1水平时, 黏度系数在 B 为-1水平时增大0.556 Pa·s, 在 B 为+1水平时增大0.373 Pa·s, 因素 A 的主效应为+0.4645。可以看出, 当砂灰比一定时, 随着质量分数的增大, 黏度系数呈上升趋势, 且质

量分数越大, 黏度系数上升速率越快。进一步观察发现, 砂灰比越小, 随着质量分数的增大, 黏度系数上升速率越快。当 B 从-1水平增大至+1水平时, A 为-1水平时黏度系数减小0.084 Pa·s, A 为+1水平时黏度系数减小0.267 Pa·s, 因素 B 的主效应为-0.1755。可以看出, 当质量分数一定时, 随着砂灰比的增大, 黏度系数呈下降趋势, 且质量分数越小, 黏度系数下降速率越慢, 即随着质量分数的降低, 黏度系数对砂灰比的敏感度逐渐减小。因素 A 主效应的绝对值大于因素 B 主效应的绝对值, 表明因素 A 对黏度系数的影响大于因素 B 。

在图5(b)中, B 取中间值, 当 A 从-1水平增大至+1水平时, 在 C 为-1水平时黏度系数增大0.702 Pa·s,

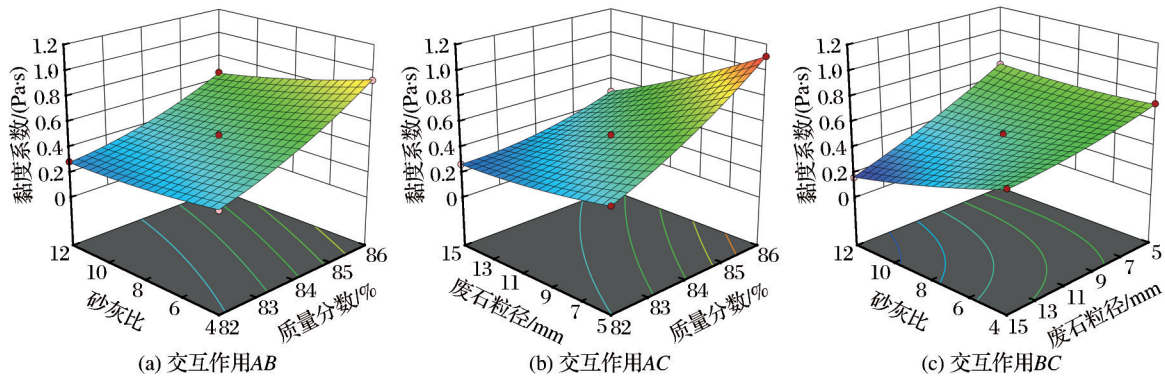


图5 黏度系数响应面分析

Fig. 5 Response surface analysis of viscosity coefficient

C 为+1水平时黏度系数增大 $0.225 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,因素 A 的主效应为 $+0.4635$ 。可以看出,当废石粒径一定时,随着质量分数的增大,黏度系数呈上升趋势,且质量分数越大,黏度系数上升速率越快。进一步观察发现,废石粒径越小,随着质量分数的增大,黏度系数上升速率加快。当 C 从-1水平增大至+1水平时, A 为-1水平时黏度系数减小 $0.138 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, A 为+1水平时黏度系数减小 $0.615 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,因素 C 的主效应为 -0.3765 。可以看出,当质量分数一定时,随着废石粒径的增大,黏度系数呈下降趋势,且质量分数越大,随着废石粒径的增大,黏度系数下降速率越快,即随着质量分数的降低,黏度系数对废石粒径的敏感度逐渐减小。因素 A 主效应的绝对值大于因素 C 主效应的绝对值,表明因素 A 对黏度系数的影响大于因素 C 。

在图5(c)中, A 取中间值,当 C 从-1水平增大至+1水平时, B 为-1水平时黏度系数减小 $0.2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, B 为+1水平时黏度系数减小 $0.55 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,因素 C 的主效应为 -0.375 。可以看出,当砂灰比一定时,随着废石粒径的增大,黏度系数呈下降趋势,且砂灰比越小,随着废石粒径的增大,黏度系数下降速率越慢,即随着砂灰比的降低,黏度系数对废石粒径的敏感度逐渐减小。当 B 从-1水平增大至+1水平时, C 为-1水平时黏度系数减小 $0.023 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, C 为+1水平时黏度系数减小 $0.373 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,因素 B 的主效应为 -0.198 。可以看出,当废石粒径一定时,随着砂灰比的增大,黏度系数呈下降趋势;随着废石粒径的减小,黏度系数对砂灰比的敏感度逐渐减小。因素 C 主效应的绝对值大于因素 B 主效应的绝对值,表

明因素 C 对黏度系数的影响大于因素 B 。

3.3 充填料浆配比优化与验证

各影响因素的显著性顺序具有重要的物理意义和实践指导价值。质量分数(A)的主导效应源于其对料浆中固体颗粒浓度和自由水含量的决定性影响,高浓度显著增加颗粒间的摩擦和内聚力。废石粒径(C)的重要性次之,源于其对料浆中粗骨料级配、比表面积和颗粒间摩擦阻力的影响,粒径减小使骨料比表面积增大,颗粒间距减小,从而显著增强颗粒间作用力。砂灰比(B)影响相对较小,其原因是水泥浆体主要起润滑和胶结作用,在流变特性上其润滑效应相对于固体浓度和粗骨料特性的影响较弱。交互作用 AC (质量分数 \times 废石粒径)最为显著,其物理机制在于:在高浓度条件下,细粒径废石会进一步限制颗粒的自由运动空间,显著增加颗粒间的碰撞频率和摩擦阻力;而在低浓度条件下,这种限制作用相对减弱。交互作用 BC (砂灰比 \times 废石粒径)次之,其机制在于砂灰比(水泥浆含量)对骨料颗粒的润滑作用效果受到骨料粒径的影响;细粒径骨料具有更大的比表面积,需要更多的水泥浆体来充分包裹和润滑,因此在高砂灰比(低水泥含量)条件下,废石粒径减小对流变参数的影响更为显著。交互作用 AB (质量分数 \times 砂灰比)影响最弱,表明水泥浆体润滑效应对料浆整体流变行为的影响在高低浓度下变化相对平缓。这一显著性顺序明确指导实际充填料浆制备过程:控制料浆质量分数和废石粒径是优化流变性能、保障管道输送稳定性的关键所在;在设计和调整配比时,应特别关注质量分数与废石粒径这二者的联动效应(AC

交互),避免高浓度下使用粗粒径废石导致流变性急剧恶化;砂灰比在满足强度要求的基础上,依据流变特性进行次要调整。

屈服应力表征料浆静态抗剪切变形特性,反映其抑制离析与沉降倾向的能力,黏度系数则表征运动状态下的料浆抵抗剪切变形的能力(徐文彬等,2019;杨纪光,2020;姚宣成等,2023;盛宇航等,2024;杨柳华等,2024)。一定的料浆屈服应力与黏度系数有利于保证料浆不离析(温震江等,2020;范永亮等,2022;孙凯华等,2024),为使充填料浆具有较好的抗离析沉淀的能力,借助 Design-Expert 13 软件中的 Numerical 功能对充填料浆配比进行优化,2个响应值的优化目标均为望大,得到模型推荐的充填料浆配比参数如下:质量分数为86%,砂灰比为7.427,废石粒径为-5 mm。在此条件下屈服应力和黏度系数分别为27.002 Pa和1.116 Pa·s,此结果的可信度为0.999(最大值为1)。通过5次平行试验对响应面优化模型的准确性进行验证,结果如表5所示,屈服应力和黏度系数的实测值与模型预测值的相对偏差分别为1.16%和4.69%(均小于5%),证实模型具有较高的预测精度,为矿用废石—全尾砂充填料浆配比优化提供了一定参考。

表5 响应面预测模型验证试验结果

Table 5 Verification test results of response surface prediction model

响应变量	屈服应力/Pa	黏度系数/(Pa·s)
预测值	27.002	1.116
	26.569	1.097
	26.876	1.067
试验值	26.827	1.059
	26.639	1.024
	26.554	1.083
平均值	26.693	1.066
误差/%	1.16	4.69

借助抗离析性能试验测试模型推荐配比下的充填料浆抗离析性能。抗离析性能试验步骤如下:取搅拌均匀的料浆盛满于盛料器中,放置在水平位置上加盖静置15 min;将筛孔公称直径为5 mm的金属方孔筛固定在托盘上,然后用小铲将盛料器上节料浆移入方孔筛,称量倒入试验筛中的料浆质量 m_c ;静置2 min后将筛及筛上的料浆移走,称量通过

筛孔流到托盘上的浆体质量 m_m 。按照式(6)计算推荐配比下的充填料浆离析率,3次平行试验测得的离析率分别为12.13%、12.77%和13.86%,均小于15%,说明优化配比下的充填料浆具有良好的抗离析性能。

$$SR = \frac{m_m}{m_c} \times 100 \quad (6)$$

式中:SR为料浆离析率(%); m_m 为通过标准筛的料浆质量(g); m_c 为倒入标准筛料浆质量(g)。

考虑到砂灰比对充填体强度的影响较大,由响应面分析可知,随着废石粒径的减小,屈服应力和黏度系数对砂灰比的敏感度逐渐减小,当废石粒径取最低水平-5 mm时,砂灰比的变化对流变参数的影响较小。因此,砂灰比分别取6、7、8、9和10,固定料浆质量分数为86%,废石粒径为-5 mm,并运用回归预测模型对5组配比的流变参数进行回归预测,预测结果如表6所示。对5组配比的塌落度及3 d、7 d、28 d充填体强度进行测试,结果如表7所示。由表6可知,5组配比的充填料浆流变参数预测值与模型推荐配比下的充填料浆流变参数预测值的偏差均小于5%,说明5组配比下的充填料浆抗离析沉淀性能与模型推荐配比下的充填料浆抗离析沉淀性能接近,5组配比的充填料浆均具有较好的抗离析沉淀性能。由表7中的塌落度测试数据可知,5组配比的充填料浆均具有良好的流动性。该铁矿对充填体单轴抗压强度的要求为 $R_3 \geq 1.5$ MPa, $R_7 \geq 2.5$ MPa, $R_{28} \geq 5$ MPa。由表7中的充填体单轴抗压强度数据可知,砂灰比为6、7和8时的充填体单轴抗压强度均满足要求,因此,推荐砂灰比取6~8。

不同管径和流速下的管道单位长度料浆的流动阻力*i*的计算公式如式(7)所示,料浆流速*V*的计算如式(8)所示。根据式(7)和式(8)计算管径为120 mm和流量为120 m³/h时推荐配比下的充填料浆流动阻力,结果如表8所示。由表8可知,推荐配比下的充填料浆流动阻力均处于较低水平,有利于矿山充填系统设计与降低泵送能耗。

$$i = \frac{16\sigma_0}{3D} + \frac{32\eta V}{D^2} \quad (7)$$

式中:*i*为管道单位长度流动阻力(Pa/m)。

$$V = \frac{Q}{3600 \times \frac{\pi}{4} D^2} \quad (8)$$

表6 推荐配比下的充填料浆流变参数预测值

Table 6 Predicted value of rheological parameters of backfill slurry under recommended mix ratio

质量分数/%	废石粒径/mm	砂灰比	屈服应力预测值/Pa	黏度系数预测值/(Pa·s)	屈服应力预测值与最优预测值的偏差/%	黏度系数预测值与最优预测值的偏差/%
86	-5	6	26.920	1.139	0.30	2.06
		7	26.995	1.122	0.03	0.54
		8	26.988	1.108	0.05	0.72
		9	26.900	1.096	0.38	1.79
		10	26.729	1.088	1.01	2.51

表7 推荐配比下的充填料浆塌落度与充填体强度

Table 7 Slump and strength of backfill slurry under recommended mix ratio

质量分数/%	废石粒径/mm	砂灰比	塌落度/mm	充填体强度/MPa		
				3 d	7 d	28 d
86	-5	6	200	2.09	2.89	6.12
		7	228	1.95	2.71	5.86
		8	253	1.64	2.55	5.44
		9	257	1.51	2.21	4.63
		10	260	1.36	2.03	3.92

表8 推荐配比下的充填料浆流动阻力

Table 8 Flow resistance of backfill slurry under recommended mix ratio

质量分数/%	废石粒径/mm	砂灰比	流动阻力/(Pa·m ⁻¹)
86	-5	6	8 660
		7	8 552
		8	8 460

式中: Q 为料浆流量(m³/h)。

4 结论

(1)通过回归分析构建了充填料浆流变参数与质量分数(A)、砂灰比(B)和废石粒径(C)的预测模型;对于充填料浆的流变参数(屈服应力和黏度系数),各影响因素的显著性顺序为 $A>C>B>AC>BC>AB$,其中交互作用 AB 对屈服应力的影响较弱。

(2)充填料浆的流变参数(屈服应力和黏度系数)与质量分数呈显著正相关,且增速随质量分数的增加呈上升规律。随着砂灰比和废石粒径的增大,屈服应力和黏度系数均呈下降趋势。

(3)随着废石粒径的减小,屈服应力对砂灰比的敏感度逐渐减小;当质量分数和砂灰比较小时,废石粒径对屈服应力和黏度系数的影响较弱;随着质量分数和废石粒径的减小,砂灰比对黏度系数的

影响逐渐减弱。

(4)基于响应面模型优化并结合实际工程要求,推荐的最佳充填料浆配比参数如下:质量分数为86%,砂灰比为6~8,废石粒径为-5 mm。推荐配比下的充填料浆兼具优异的抗离析稳定性与良好的流动性能,研究结果对矿山废石—全尾砂充填料浆配比优化具有明确的指导意义。

参考文献(References):

- Gu C J, Yang B G, Yang F G, et al, 2024. Fluidity and rheological properties with time-dependence of cemented fine-grained coal gangue backfill containing HPMC using response surface method[J]. Construction and Building Materials, 451: 138691.
- Yang T Y, Wang J, Qiao D P, et al, 2024. The thixotropic characteristics of rheological parameters of waste stone-tailings cemented paste backfill and the time effect of pipeline resistance[J]. Construction and Building Materials, 423:135858.
- Zhu L L, Jin Z H, Zhao Y, et al, 2021. Rheological properties of cemented coal gangue backfill based on response surface methodology [J]. Construction and Building Materials, 306:124836.
- 陈鑫政, 蒋合国, 郭利杰, 等, 2022. 基于RSM的复合骨料充填料浆流变特性试验[J]. 有色金属工程, 12(9): 107-114. Chen Xinzhen, Jiang Heguo, Guo Lijie, et al, 2022.

- Experimental on rheological properties of composite aggregate filling slurry based on response surface methodology [J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 12(9):107-114.
- 杜加法, 刘晓光, 王京生, 等, 2020. 基于L管实验的全尾砂膏体流变特性研究[J]. *金属矿山*, 49(8):20-24. Du Jiafa, Liu Xiaoguang, Wang Jingsheng, et al, 2020. Rheological properties of unclassified tailings paste slurry based on L-tube pipeline test[J]. *Metal Mine*, 49(8):20-24.
- 范永亮, 崔继强, 张元坤, 等, 2022. 混合粗骨料对比对充填体强度及浆体流动性能的影响规律[J]. *黄金科学技术*, 30(2):263-271. Fan Yongliang, Cui Jiqiang, Zhang Yunkun, et al, 2022. Influence of mixed coarse aggregate ratio on strength and fluidity of filling slurry[J]. *Gold Science and Technology*, 30(2):263-271.
- 郭利杰, 刘光生, 马青海, 等, 2022. 金属矿山充填采矿技术应用研究进展[J]. *煤炭学报*, 47(12):4182-4200. Guo Lijie, Liu Guangsheng, Ma Qinghai, et al, 2022. Research progress on mining with backfill technology of underground metalliferous mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 47(12):4182-4200.
- 李广波, 吴再海, 盛宇航, 等, 2024. 基于响应面法的废石—细尾砂充填性能优化试验[J]. *有色金属工程*, 14(4):140-149. Li Guangbo, Wu Zaihai, Sheng Yuhang, et al, 2024. Optimization test of waste rock fine tailings filling performance based on response surface methodology [J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 14(4):140-149.
- 李勇明, 乔登攀, 杨天雨, 等, 2024. 基于响应面法的全尾砂浆絮凝沉降多因素交互影响及参数优化研究[J]. *有色金属科学与工程*, 15(6):901-910. Li Yongming, Qiao Dengpan, Yang Tianyu, et al, 2024. Study on multiple factor interaction and parameter optimization of flocculation sedimentation of unclassified tailings slurry based on response surface method [J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 15(6):901-910.
- 刘树龙, 王发刚, 李公成, 等, 2021. 基于响应面法的复合充填料浆配比优化及微观结构影响机制[J]. *复合材料学报*, 38(8):2724-2736. Liu Shulong, Wang Fagang, Li Gongcheng, et al, 2021. Optimization of mixture ratio and microstructure influence mechanism of composite filling slurry based on response surface method [J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 38(8):2724-2736.
- 彭亮, 2023. 全尾砂充填料浆输送特性及输送参数优化研究[J]. *矿业研究与开发*, 43(12):65-69. Peng Liang, 2023. Study on conveying characteristics and conveying parameter optimization of full tailings filling slurry [J]. *Mining Research and Development*, 43(12):65-69.
- 齐兆军, 宋泽普, 寇云鹏, 等, 2018. 某矿山全尾砂似膏体料浆L管试验研究[J]. *中国矿业*, 27(10):161-164. Qi Zhaojun, Song Zepu, Kou Yunpeng, et al, 2018. Experimental study on crude tailings paste-like slurry by L-pipe in a mine [J]. *China Mining Magazine*, 27(10):161-164.
- 盛宇航, 裴佃飞, 齐兆军, 等, 2024. 尾砂粒级组成对胶结充填料流变特性与强度的影响[J]. *黄金科学技术*, 32(4):631-639. Sheng Yuhang, Pei Dianfei, Qi Zhaojun, et al, 2024. Influence of particle size composition of tailings on rheological characteristics and strength of cemented tailings backfill [J]. *Gold Science and Technology*, 32(4):631-639.
- 孙京阁, 关鑫磊, 刘杰, 等, 2021. 充填料浆流动温变性研究[J]. *黄金科学技术*, 29(1):147-154. Sun Jingge, Guan Xinlei, Liu Jie, et al, 2021. Study on flow temperature denaturation of filling slurry [J]. *Gold Science and Technology*, 29(1):147-154.
- 孙凯华, 胡彦飞, 赵旭, 2024. 基于响应面法的煤矸石充填料浆流变特性实验研究[J]. *矿产保护与利用*, 44(2):11-21. Sun Kaihua, Hu Yanfei, Zhao Xu, 2024. Experimental study on rheological properties of coal gangue slurry based on response surface method [J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 44(2):11-21.
- 王建栋, 吴爱祥, 王贻明, 等, 2016. 粗骨料膏体抗离析性能评价模型与实验研究[J]. *中国矿业大学学报*, 45(5):866-872. Wang Jiandong, Wu Aixiang, Wang Yiming, et al, 2016. Evaluation model and experimental study for segregation resistance of paste with coarse aggregate [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 45(5):866-872.
- 王小林, 严庆文, 王洪江, 等, 2024. 含粗骨料尾砂膏体长距离管输流变特性及阻力预测[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 45(3):535-542. Wang Xiaolin, Yan Qingwen, Wang Hongjiang, et al, 2024. Rheological properties and pipe resistance prediction of tailing paste containing coarse aggregate in long-distance transportation [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 45(3):535-542.
- 温震江, 高谦, 王永定, 等, 2020. 不同浓度料浆流变特性与混合骨料级配相关性试验[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 41(5):642-648. Wen Zhenjiang, Gao Qian, Wang Yongding, et al, 2020. Experiment on correlation between rheological properties of filling slurry with different mass concentration and mixed aggregate gradation [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 41(5):

- 642-648.
- 吴爱祥,李红,程海勇,等,2020.全尾砂膏体流变学研究现状与展望(上):概念、特性与模型[J].工程科学学报,42(7):803-813. Wu Aixiang, Li Hong, Cheng Haiyong, et al, 2020. Status and prospects of researches on rheology of paste backfill using unclassified tailings (Part 1): concepts, characteristics and models[J]. Chinese Journal of Engineering, 42(7):803-813.
- 吴爱祥,李红,程海勇,等,2021.全尾砂膏体流变学研究现状与展望(下):流变测量与展望[J].工程科学学报,43(4):451-459. Wu Aixiang, Li Hong, Cheng Haiyong, et al, 2021. Status and prospects of research on the rheology of paste backfill using unclassified tailings (Part 2): rheological measurement and prospects[J]. Chinese Journal of Engineering, 43(4):451-459.
- 徐文彬,李乾龙,田明明,2019.聚丙烯纤维加筋固化尾砂强度及变形特性[J].工程科学学报,41(12):1618-1626. Xu Wenbin, Li Qianlong, Tian Mingming, 2019. Strength and deformation properties of polypropylene fiber-reinforced cemented tailings backfill [J]. Chinese Journal of Engineering, 41(12):1618-1626.
- 杨纪光,2020.某金矿尾砂合理级配及其膏体料浆流变性质试验研究[J].矿业研究与开发,40(1):49-53. Yang Jiguang, 2020. Experimental study on reasonable gradation of tailings and rheological properties of paste slurry in a gold mine [J]. Mining Research and Development, 40(1):49-53.
- 杨柳华,李金仓,尹升华,等,2024.充填料浆中气泡作用机理及其流变特性演变规律[J].煤炭学报,49(4):1894-1905. Yang Liuhua, Li Jincang, Yin Shenghua, et al, 2024. Mechanism of bubble action in backfill slurry and the evolution of its rheological properties [J]. Journal of China Coal Society, 49(4):1894-1905.
- 杨升旺,刘殿文,庄故章,等,2021.响应曲面法优化细粒氧化铜矿浸出工艺[J].中国矿业,30(10):128-133. Yang Shengwang, Liu Dianwen, Zhuang Guzhang, et al, 2021. Acid leaching technology of fine-grained copper oxide optimized by RSM [J]. China Mining Magazine, 30(10):128-133.
- 姚宣成,刘中柱,罗平框,等,2023.奥尔托喀纳什锰粗骨料胶结充填体试验研究及配比优化[J].金属矿山,52(4):37-44. Yao Xuancheng, Liu Zhongzhu, Luo Pingkuang, et al, 2023. Experimental study on coarse aggregate cemented backfill of ortokanesh manganese ore [J]. Metal Mine, 52(4):37-44.
- 尹升华,郝硕,邹龙,等,2020.基于RSM的胶结充填体强度回归及料浆寻优研究[J].中南大学学报(自然科学版),51(6):1595-1605. Yin Shenghua, Hao Shuo, Zou Long, et al, 2020. Research on strength regression and slurry optimization of cemented backfill based on response surface method [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 51(6):1595-1605.
- 尹升华,闫泽鹏,严荣富,等,2023.全尾砂—废石膏体流变特性及阻力演化[J].工程科学学报,45(1):9-18. Yin Shenghua, Yan Zepeng, Yan Rongfu, et al, 2023. Rheological properties and resistance evolution of cemented unclassified tailings-waste rock paste backfill [J]. Chinese Journal of Engineering, 45(1):9-18.
- 于恩毅,黄旭东,龚甲桂,2020.基于RSM-BBD的废石—全尾砂胶结充填体强度试验研究[J].矿业研究与开发,40(7):75-80. Yu Enyi, Huang Xudong, Gong Jiagui, 2020. Experimental research on uniaxial compressive strength of cemented backfill with waste rock and full tailings based on RSM-BBD [J]. Mining Research and Development, 40(7):75-80.
- 张美道,饶运章,徐文峰,等,2021.全尾砂膏体充填配比优化正交试验[J].黄金科学技术,29(5):740-748. Zhang Meidao, Rao Yunzhang, Xu Wenfeng, et al, 2021. Orthogonal experiment on optimization of filling ratio of full tailings paste [J]. Gold Science and Technology, 29(5):740-748.
- 张修香,乔登攀,霍亮,等,2023.基于RSM的戈壁砂—棒磨砂高浓度充填料浆流变特性研究[J].有色金属工程,13(3):93-101. Zhang Xiuxiang, Qiao Dengpan, Huo Liang, et al, 2023. Research on the rheological properties of high-density filling slurry added with Gobi sand-rod-mill tailings based on RSM [J]. Nonferrous Metals Engineering, 13(3):93-101.
- 中华人民共和国住房和城乡建设部,2011.普通混凝土配合比设计规程:JGJ 55—2011[S].北京:中国建筑工业出版社. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, 2011. Specification for mix proportion design of ordinary concrete: JGJ 55—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press.
- 中华人民共和国住房和城乡建设部,2019.土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S].北京:中国计划出版社. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, 2019. Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019 [S]. Beijing: China Planning Press.
- 中华人民共和国住房和城乡建设部,2022.金属非金属矿山

充填工程技术标准:GB/T 51450—2022[S].北京:中国计划出版社. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, 2022. Technolo-

gy standard for backfill engineering in metallic and non-metallic mines; GB/T 51450—2022 [S]. Beijing: China Planning Press.

Experimental Study on Rheological Properties of Waste Rock–Unclassified Tailings Backfilling Slurry Based on RSM

LIANG Dong¹, CHEN Yin^{1,2}, WANG Enqi¹, YAO Junhui¹

1.School of Geology and Mining Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, Xinjiang, China;

2.Xinjiang Kalatongke Mining Co., Ltd., Altai 831607, Xinjiang, China

Abstract: A mining operation in Xinjiang is transitioning its extraction technique from open-stope to backfill mining. This study aims to examine the effects of mass fraction (A), sand-to-cement ratio (B), waste rock particle size (C), and their interactions on the rheological properties of waste rock-unclassified tailings backfill slurry. To achieve this, response surface methodology (RSM) was utilized in conjunction with a Box-Behnken experimental design to quantitatively assess rheological parameters through L-shaped pipeline simulation tests. Seventeen experimental groups were established based on a three-factor, three-level design, employing an L-shaped pipeline apparatus with an inner diameter of 50 mm and a bend line ratio of 3.13. Yield stress and viscosity coefficient were determined using static equilibrium and shear stress equations. A quadratic regression model was constructed and analyzed for variance using Design-Expert 13 software. The experimental findings demonstrated a significant positive correlation between yield stress/viscosity coefficient and mass fraction. Variance analysis revealed that the primary effects were ranked in the order of $A > C > B$, corresponding to mass fraction > waste rock particle size > sand-to-binder ratio. The interaction effects were ranked as $AC > BC > AB$, with the AB interaction having no significant impact on yield stress. Dynamic sensitivity analysis showed that a decrease in mass fraction led to a gradual weakening of the influence of waste rock particle size on yield stress and the viscosity coefficient. Similarly, the effect of the sand-to-binder ratio on the viscosity coefficient also diminished. When the waste rock particle size was small, the influence of the sand-to-binder ratio on viscosity coefficient was reduced. Likewise, at lower sand-to-binder ratios, the impact of waste rock particle size on yield stress and the viscosity coefficient became less significant. Response surface methodology (RSM) optimization identified the optimal mix ratio as a mass fraction of 86%, a sand-to-binder ratio of 7.427, and a waste rock particle size of -5 mm. Under these conditions, the relative error between the predicted rheological parameters and the average values from five validation tests was less than 5%, confirming the model's high predictive accuracy. This study offers significant insights into optimizing the mix ratios of mine waste rock-tailings cemented fill slurry, thereby providing a solid theoretical basis for achieving low-resistance and high-stability backfill in practical engineering applications.

Key words: waste rock-tailings cemented backfill; response surface methodology; L-pipe simulation test; rheological properties; interaction effect