



废石全尾砂充填料浆的水平衡模型及成本寻优

尹升华^{1,2}, 郝 硕^{1,2}, 张海胜³, 严荣富^{1,2}

- (1. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083;
2. 北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育国家重点实验室, 北京 100083;
3. 中国恩菲工程技术有限公司 矿山事业部, 北京 100038)

摘 要: 针对矿山充填料浆高浓度易堵管、低浓度采场积水问题, 开展废石尾砂充填料浆的强度特性和流动特性试验研究。基于不同充填配比的强度、塌落度、扩展度和流变参数, 构建了强度参数、流动参数和充填材料成本数学模型。结果表明: 充填体强度、料浆塌落度和扩展度随含水量增大而增大, 料浆屈服应力和塑性黏度随含水量增大而减小。强度模型求解的达标含水量为20.5%~26.0%, 3 d、7 d和28 d的最小强度分别为1.58 MPa、2.50 MPa和5.20 MPa; 流动模型求解的达标含水量为22.0%~26.0%, 塌落度和扩展度的最小值分别为25.64 cm和44.37 cm, 屈服应力和塑性黏度的最大值分别为206.7853 Pa和0.7894 Pa·s。优化的材料成本为244.84元/m³, 充填体中的废石、全尾砂、水泥和水用量分别为0.6535 t/m³、0.6535 t/m³、0.3268 t/m³和0.5663 t/m³, 建议充填输送料浆含水量为25.74%。

关键词: 废石全尾砂; 强度特性; 流动特性; 水平衡; 成本优化

文章编号: 1004-0609(2022)-06-1821-12

中图分类号: TD853.343

文献标志码: A

引文格式: 尹升华, 郝 硕, 张海胜, 等. 废石全尾砂充填料浆的水平衡模型及成本寻优[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(6): 1821-1832. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-40190

YIN Sheng-hua, HAO Shuo, ZHANG Hai-sheng, et al. Water balance model and cost optimization of waste rock-unclassified pastes slurry[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(6): 1821-1832. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-40190

充填料浆一般由选厂浓密机浓密后的尾砂与胶结剂按比例均匀混合后经管道泵送或自流至充填采场, 是一种复杂的多相分散体系^[1-2], 该体系的流变特性是充填料浆最为重要的本质属性^[3]。充填料浆流变特性受充填材料的理化性质影响, 在矿山充填实际应用过程中, 应用材料不同或所选配比参数不同均会造成充填料浆流变特性产生巨大差异, 料浆质量浓度越大, 则料浆含水量越小, 料浆质量浓度和含水量决定着输送难度和采场积水程度^[4-6]。

近年来, 人们针对充填料浆“输送需水”和“强度疏水”的问题提出了许多研究方法, 集中表现在料浆质量浓度与外加剂等手段对管输过程或充填体强度的影响^[7]。

张钦礼等^[8]考虑材料性质与料浆含水量等因素, 借助BP神经网络和主成分分析法搭建了充填膏体料浆的流变参数优化预测模型, 流变参数预测结果误差限制于5%之内。杨志强等^[9]开展全尾砂与棒磨砂混合料的充填试验, 研究结果表明, 龄期

基金项目: 山东省重大科技创新工程项目(2019SDZY05); 国家自然科学基金资助项目(52034001)

收稿日期: 2021-04-30; 修订日期: 2021-08-03

通信作者: 尹升华, 教授, 博士; 电话: 13811668481; E-mail: 357664177@qq.com

为7 d和28 d的充填体强度、砂浆泌水率和沉降损失率效果较单一棒磨砂骨料更好。温振江等^[10]测定了不同料浆质量浓度混合骨料料浆的流变特性,发现流变参数随料浆质量浓度增大而增大,同时,建立了力学模型求解得出混合骨料不沉降、不离析的粒径取值区间为13.8~21.6 mm。刘树龙等^[11]设计关于充填体塌落度与抗压强度的正交试验,结果表明,影响早期强度的因素敏感性排序为:水泥量>灰砂比>料浆质量浓度,水泥量为30%、料浆质量浓度为70%~72%时,既能保证料浆流动性,又可保证充填体强度。杨仕教等^[12]通过分析某铅锌矿全尾砂胶结充填体的抗压强度,探明了料浆质量浓度与充填体强度之间存在指数函数关系,随料浆质量浓度增加,充填体强度增长趋势越缓慢。张修香等^[13]模拟了废石尾砂充填料浆在输送弯管处输送阻力效应,发现料浆质量浓度和输送速度是影响自流状态的核心因素,能够满足管道自流输送的料浆质量浓度为83%~84%。朱庚杰等^[14]采用特定胶结剂对某黄金矿山分级细尾砂开展了充填强度与料浆流变试验,结果表明,在充填体强度达标的前提下,料浆流变曲线符合 Herschel-Bulkley 模型,质量浓度对料浆屈服应力的影响大于对塑性黏度的影响。盛宇航等^[15]在保证强度的前提下,为了提升料浆和易性,对比分析了多种减水剂对全尾砂胶结料浆屈服应力和塑性黏度的影响规律,确定了适量的聚羧酸减水剂作用,能够兼顾充填体强度指标及料浆和易指标。薛振林等^[16]开展了添加泵送剂的料浆塌落度试验、流变试验和充填体强度试验,优化了料浆的管道输送阻力。张修香等^[13]针对料浆流动速度速度、质量浓度对自流输送特性的影响,开展了废石尾砂高浓度自流充填过程模拟,针对不同性质的管路确定了适合的料浆质量浓度。温振江等^[17]为了降低充填成本开发了粉煤灰10%、熟料8%、脱硫石膏14%、矿渣微粉68%的新型复合胶凝材料,应用结

果表明充填体强度、料浆稳定性和料浆流动性均能达到该矿山要求。大量的研究成果表明,考虑充填体强度的前提下,添加减水剂、降低料浆质量浓度均是改善料浆本身、优化输送过程的主要手段^[18-19]。目前,国内外研究成果仍存在以下不足:对于无外加剂的废石全尾砂充填料浆,兼顾管输要求、强度要求与成本要求的最优配比研究相对较少。

因此,针对以上不足,本文针对掺有废石的全尾砂充填料浆,开展了充填体强度试验和料浆流变特性试验,分别搭建了不同龄期下充填体强度数学模型、多参数管控下料浆流动性模型,求解两组数学模型以获取料浆含水的平衡范围,据此优化废石全尾砂胶结充填成本,为废石全尾砂胶结充填输送技术发展提供理论参考。

1 实验

试验骨料由废石和全尾砂混合制备,取自甘肃某镍矿。废石为矿山基建、开拓过程中产出的块石废料,经颚式破碎机分散成充填所需的粗骨料;全尾砂取自浓密池,为选厂产出的细骨料。废石和全尾砂经加热烘干处理后,测定其密度、容重、不均匀系数、表观形态等物理性质,结果如表1所示。借助X射线荧光光谱分析(X Ray Fluorescence, XRF)测定废石和尾砂的有效化学元素,结果如表2所示。由表2可知,废石和全尾砂的主要成分种类大致相同。两种材料中,对强度有劣化作用的S元素和对料浆有缓凝作用的Zn元素含量极少,对充填强度有增益作用的CaO、潜在的胶凝成分 Al_2O_3 和惰性“骨架”材料 SiO_2 在废石中的含量高于全尾砂含量,均属于合理的惰性充填材料。试验用水泥为在市场购买的普通硅酸盐水泥,密度为 1.3 t/m^3 ,凝结时间不大于600 min,28 d静态固结抗压强度值不低于42.5 MPa。

表1 骨料的基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of aggregates

Aggregate type	Density/ ($\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$)	Bulk density/ ($\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$)	Porosity/%	Non-uniformity coefficient	Curvature coefficient	Apparent state
Full tail sand	2.78	1.22	56.29	0.087	1.237	Layered
Waste rock	2.88	1.68	41.76	25.038	7.727	Lumpy

表2 废石和尾砂的化学性质

Table 2 Chemical constituents of waste rock and tail sand

Aggragate type	w(SiO ₂)/%	w(CaO)/%	w(MgO)/%	w(Al ₂ O ₃)/%	w(Fe ₂ O ₃)/%	Remaining content/%
Full tail sand	42.20	3.73	32.71	4.04	12.14	4.94
Waste rock	47.71	16.39	15.22	7.81	7.17	5.58

废石和全尾砂充填料浆是一个复杂的体系,料浆中的废石、尾砂等固体物料级配分布域广、颗粒的形状多样化,固液多相间不断进行着分散悬浮作用以及化学反应。测定固体材料的粒径分布情况和料间的堆积密实度,能够量化表征物料间的嵌锁水平,堆积密实度越大,物料间的填隙效果越充分。因此,通过分析光子相关光谱测定了颗粒的迁移速率,从而获取全尾砂粒径分布情况。废石和全尾砂粒径的质量占比曲线如图1和2所示。由图1和2可知,废石的粒级分布范围0.10~12.00 mm,尾砂的粒级分布范围0.28~447.74 μm,主要占比粒径为

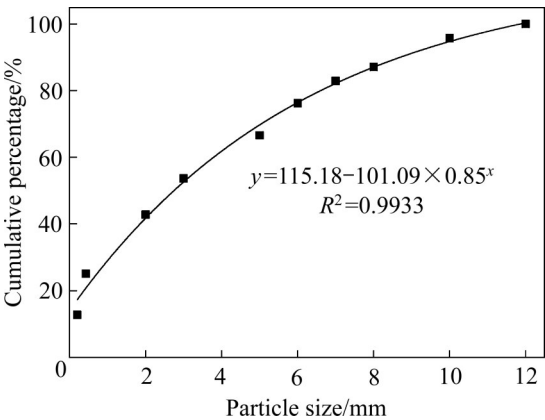


图1 废石粒径的质量占比

Fig. 1 Mass cumulative percentage of waste rock particle size

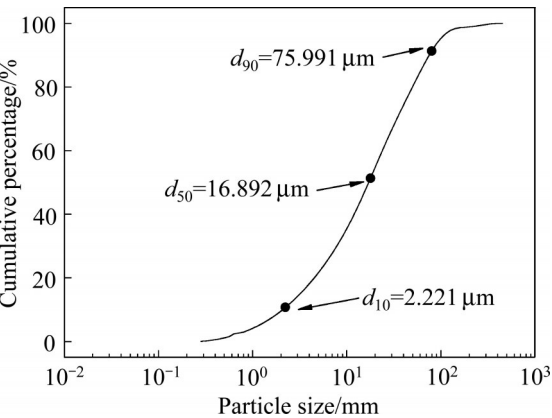


图2 全尾砂粒径的质量占比

Fig. 2 Mass cumulative percentage of unclassified tailings

10~80 μm。结合实测堆积密实度曲线,采用二维度下的混合材料堆积密实度模型(见式(1))^[20],预测堆积密实度随废尾比(废石固体与尾砂固体的质量比值,下同)的变化趋势,如图3所示。

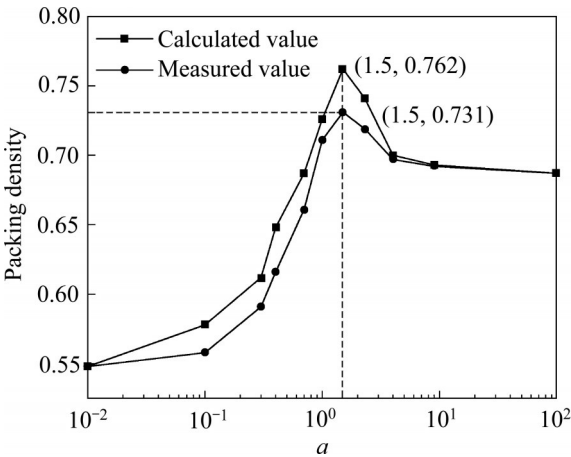


图3 密实度的预测值和实际值

Fig. 3 Predicted and actual values of packing density

预测值计算模型认为废石和全尾砂为绝对刚性材料,混合过程中两骨料嵌锁充分,因此预测值与实际值存在误差,相对于实际值的误差为4.24%,计算结果准确。

$$\phi = \begin{cases} \frac{1}{\rho} \rho_1 (w/\rho_1 + (1-w)/\rho_2 \phi_2)^{-1}, & w \leq \frac{\rho_1 \phi_1}{\rho} \\ \frac{1}{\rho} \left(\frac{w}{\rho_1 (\phi_1 + 1 - w\rho/\rho_1)} + \frac{1-w}{\rho_2 \phi_2} \right)^{-1}, & w > \frac{\rho_2 \phi_1}{\rho} \end{cases} \quad (1)$$

式中: ρ_1 为废石容重, t/m³; ρ_2 为全尾砂容重, t/m³; ρ 为混合容重, t/m³, $\rho = [w/\rho_1 + (1-w)/\rho_2]^{-1}$, 其中 $0 < w < 1$; ϕ_1 为废石堆积密实度; ϕ_2 为全尾砂堆积密实度; w 为废石占骨料的质量分数, %。

分析可知,废尾比小于6:4时,废石间的空隙被过量的细粒级尾砂填满,尾砂仍有存余,随废石增加,堆积密实度增大;废尾比为6:4时,废石间的空隙被尾砂充分填满,尾砂无存余,此时堆积密实度最大;废尾比大于6:4时,尾砂的量不足以充

分填充废石间的空隙,堆积密实度出现下降现象。因此,以废尾比等于6:4为中心,设计充填体强度试验和料浆流变试验。

2 废石尾砂充填体强度特性分析

为了探讨各因素对充填体强度的影响作用,基于堆积密实度分析结果,考虑料浆的输送可行性,设计胶砂比为1:4固定值,废尾比(a)为5:5、6:4和7:3,料浆质量浓度(b)为75%、76%和77%的强度配比试验,分别测定龄期为3 d、7 d和28 d的充填体抗压强度 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 。

胶砂比为1:4,废石粗骨料含量处于50%~70%时,充填料浆的泌水率和扩散度均符合砂浆搅拌机作业和管道输送保护的标准。参照《建筑砂浆基本性能试验方法标准》开展充填强度试验。采用边长为7.07 cm的标准正方体三联可拆试模制块,经温度(20±3)℃、湿度80%~90%的标准养护箱养护至所需龄期,采用WEW-600D型液压万能试验机对养护至3 d、7 d和28 d的合格试块进行抗压试验,设定压缩速率0.5 kN/s,试验结果如表3所示。

表3 充填体强度试验结果

Table 3 Filling body strength test results

Sample No.	a	$b/\%$	σ_1/MPa	σ_2/MPa	σ_3/MPa
1	5:5	75	1.91	2.83	5.21
2	6:4	75	2.12	3.02	5.47
3	7:3	75	1.85	2.78	5.09
4	5:5	76	2.17	3.31	5.59
5	6:4	76	2.44	3.43	5.83
6	7:3	76	2.1	3.22	5.38
7	5:5	77	2.33	3.85	6.61
8	6:4	77	2.58	4.18	6.76
9	7:3	77	2.28	3.74	6.37

根据表3,构建3 d、7 d和28 d龄期的充填体抗压强度 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 与废尾比、料浆质量浓度之间的多元非线性回归关系,结果见式(2)~(4)。各模型的回归效果评价参数包括:均方根误差(Root of mean square error, RMSE)、平方误差总和(Sum of square error, SSE)、复相关系数 R^2 和测定系数(Determination coefficient, DC),各影响因素的敏感性量化指标包括单一因素废尾比的敏感性 a_1 和单一

因素质量浓度的敏感性 b_1 ,如表4所示。

$$\sigma_1 = -352.61 + 1.97a + 908.25b - 0.64a^2 - 583.33b^2 + 0.155ab, R^2 = 0.9966 \quad (2)$$

$$\sigma_2 = 420.30 + 4.37a - 10.47b - 0.596a^2 + 5.52b^2 - 3.25ab, R^2 = 0.9954 \quad (3)$$

$$\sigma_3 = 1787.49 + 5.30a - 4765.87b - 0.69a^2 + 3183.33b^2 - 4.12ab, R^2 = 0.9991 \quad (4)$$

式中: σ_1 、 σ_2 和 σ_3 分别为3 d、7 d和28 d龄期的充填体抗压强度,MPa; a 为废尾比; b 为料浆的质量浓度,%。

表4 回归模型评价指标及敏感性

Table 4 Evaluation index and sensitivity of regression model

Curing age	RMSE	SSE	DC	$a_1/\%$	$b_1/\%$
3 d	0.0131	0.0015	0.9965	6.07	44.27
7 d	0.0433	0.0168	0.9908	8.03	21.10
28 d	0.0209	0.0039	0.9987	8.08	98.30

由表4可知, RMSE是根据数据的离散程度对回归值与实际值之间的误差进行评价,三个龄期回归模型的均方根误差(RMSE)最大值为0.0433,最大误差占 σ_2 最小值的1.56%,说明回归模型准确;此外,复相关系数是度量因变量与多组自变量间复相关程度的指标,三组参数方程的回归复相关系数值均逼近理想系数1,说明回归结果表征的因素间线型相关程度好,拟合程度高,模型可靠。为了后期优化含水量模型,采用强度结果指标逆向表征含水量,构建含水量与充填体抗压强度结果之间的数学关系模型。通过上述分析可知,在废尾比为6:4的条件下,废石全尾砂充填体的抗压强度值最大,因此,3 d、7 d和28 d龄期的含水模型可由式(2)~(4)推演为式(5)~(7)。

$$\sigma_1 = -583.33t^2 + 257.76t - 26.20 \quad (5)$$

$$\sigma_2 = 5.52t^2 + 2.58t - 2.47 \quad (6)$$

$$\sigma_3 = 3183.33t^2 - 1594.48t + 204.57 \quad (7)$$

式中: σ_1 、 σ_2 和 σ_3 分别为3 d、7 d和28 d龄期的充填体抗压强度,MPa; t 为料浆的含水量,即料浆中水的质量分数,%。通过调整两种影响因素的水平值,对比回归模型的计算结果,从而确定各因素的敏感性。各龄期的强度最敏感单一因素均为料浆质量浓度。随着龄期的增加,废尾比对充填体抗压强度的激励作用缓慢增长,而料浆质量浓度的敏感性随龄期增大呈先缓降后陡升的状态。这是由于充

充填体后期抗压强度以骨料的“骨架支承”作用为主要依靠,料浆中骨料的质量分数对抗压强度的影响最显著。

充填体抗压强度随废尾比和料浆质量浓度变化而变化的趋势如图4~6所示。由图4~6可见,在胶砂比和废尾比相同条件下,同一龄期的固结强度(σ_1 、 σ_2 和 σ_3)与料浆质量浓度之间存在正相关关系;在胶砂比和料浆质量浓度相同条件下,同一龄期的抗压强度随废尾比增大呈先增大后减小的关系。

由图4可知,龄期为3 d时,随料浆质量浓度增大,充填体抗压强度增大,但在提升相同质量浓度梯度的条件下,充填体抗压强度增长值降低。这是由于该阶段为充填体内部水化的初级阶段,水是水泥水化过程的反应物和载体,随质量浓度增大,料浆中用于水化反应的自由水含量越低,化学平衡作用下硅酸钙凝胶的生成速度越缓慢。此时,3 d最优抗压强度值为2.58 MPa,废尾比为6:4,料浆

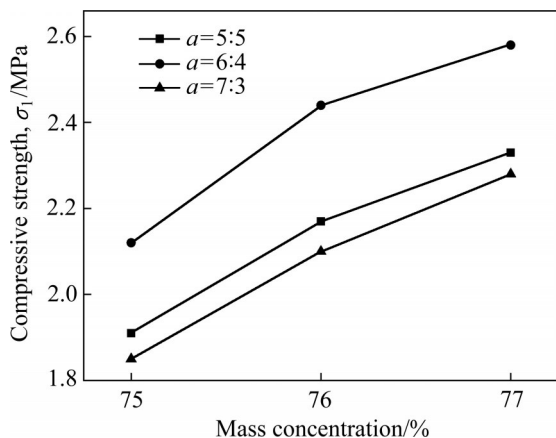


图4 养护3 d的试块抗压强度

Fig. 4 Compressive strength of samples cured for 3 d

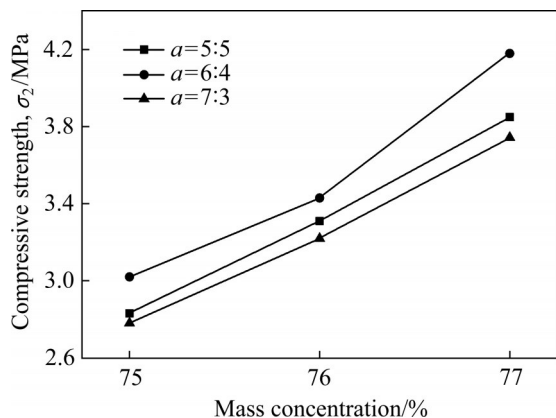


图5 养护7 d的试块抗压强度

Fig. 5 Compressive strength of samples cured for 7 d

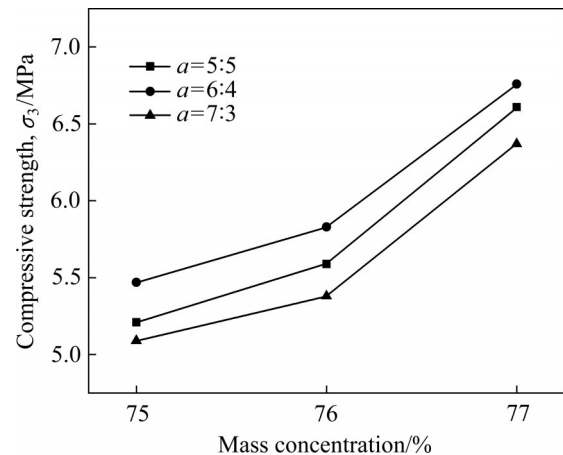


图6 养护28 d的试块抗压强度

Fig. 6 Compressive strength of samples cured for 28 d

质量浓度为77%;3 d最低抗压强度值为1.85 MPa,废尾比为7:3,料浆质量浓度为75%。

由图5可知,龄期为7 d时,在三种废尾比条件下,充填体抗压强度随料浆质量浓度增大均呈现非负速率增长的趋势,说明养护试块内部正在发生较剧烈的水化作用,水对反应进程的推动作用较3 d龄期时减弱。此时,7 d最优抗压强度值为4.18 MPa,废尾比为6:4,料浆质量浓度为77%;7 d最低抗压强度值为2.78 MPa,废尾比为7:3,料浆质量浓度为75%。

由图6可知,随着龄期增长,试块内部的水化反应逐渐完成,水对强度的影响作用逐渐降低;当龄期为28 d时,充填体内部已含有大量的硅酸钙凝胶等产物。这些化学产物能否与固体骨料充分嵌锁成为影响充填体抗压强度的关键因素,因此,随料浆质量浓度提升,充填强度大幅提升。此时,28 d最优抗压强度值为6.76 MPa,废尾比为6:4,料浆质量浓度为77%;28 d最低抗压强度值为5.09 MPa,废尾比为7:3,料浆质量浓度为75%。

料浆质量浓度为77%时,3 d、7 d和28 d龄期的充填体中水化产物发育情况如图7~9所示。由图7可知,3 d龄期的充填体内部C-S-H凝胶发育处于“起步阶段”。这是因为该阶段处于养护箱的标准养护条件下,充填体内部的硅酸三钙($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$)遇水发生快速的水化反应,产物为结晶小的硅酸钙沉淀(C-S-H固体凝胶),此时,固相材料间的空隙量远远大于水化产物的生成量。该过程的化学方程式



图7 养护3 d的试块中水化产物发育情况

Fig. 7 Development of hydration products in sample cured for 3 d

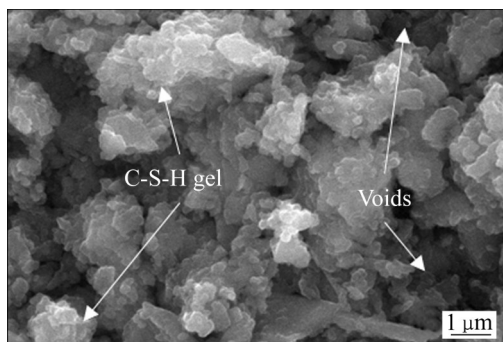


图8 养护7 d的试块中水化产物发育情况

Fig. 8 Development of hydration products in sample cured for 7 d

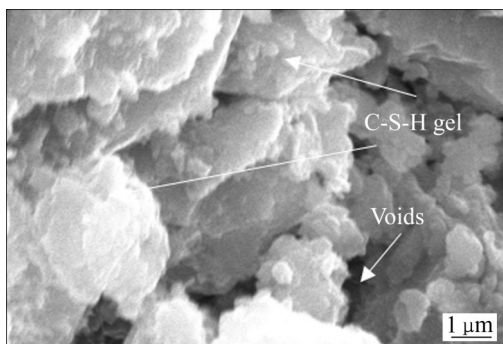
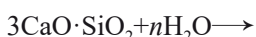


图9 养护28 d的试块中水化产物发育情况

Fig. 9 Development of hydration products in sample cured for 28 d

通用表达为:



由图8可知, 7 d龄期的充填体内部C-S-H凝胶发育维度和数量明显高于3 d龄期的充填体内部C-S-H凝胶发育情况, 空隙量明显降低。该阶段的主导因素是硅酸二钙($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, $\beta\text{-}2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)遇水

发生慢速的水化反应, 产物为大结晶的硅酸钙沉淀(C-S-H固体凝胶)。该过程生成的C-S-H固体凝胶量较 $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 的水化产物少, 其化学方程式通用表达为:



由图9可知, 龄期为28 d时, 充填体内部水化产物已经完全发育, 大量C-S-H凝胶介于废石、全尾砂等惰性材料之间, 与充填骨料达到物理上的嵌锁效果, 起到充填体抗压强度的支承作用。该阶段的主要反应为铝酸三钙($3\text{CaO} \cdot \text{AlO}$)遇水迅速水化产生大量的热, 首先产出介稳态的水化铝酸钙, 最后生成无色晶体六水铝酸三钙, 在常温下呈固体状态。该过程水化产物的物相组成直接受液相温度和CaO含量的控制。因此, 试块内部起支承作用的水化产物的发育情况与固相材料间空隙的缩减情况, 均对胶结充填体的抗压强度有增益作用。

3 废石全尾砂充填料浆流动性分析

3.1 料浆塌落度试验

塌落度是由料浆自重引起的一种熵增效应, 其取值受物料配比、运动状态和受力情况影响, 可从宏观层面表征料浆的流动性能。塌落度取值越大, 对应的料浆的和易性越好; 扩展度是基于二维空间的流动性量化指标, 扩展度取值越大, 料浆流动性越好。通过铺设塌落度桶、注浆、搅拌、排气、匀速提升塌落度桶和测量, 在胶砂比1:4条件下, 获取废尾比为5:5、6:4和7:3, 料浆质量浓度为75%、76%和77%的塌落度与扩展度, 如表5所示。

表5 料浆的塌落度与扩展度

Table 5 Slump and expansion of slurry

Sample No.	a	b/%	Slump/cm	Expansion/cm
1	5:5	75	26.5	78.2
2	6:4	75	27.6	105.1
3	7:3	75	28.4	122.9
4	5:5	76	25.8	65.4
5	6:4	76	26.9	86.7
6	7:3	76	28.0	106.1
7	5:5	77	25.4	57.0
8	6:4	77	26.3	74.5
9	7:3	77	27.7	94.3

根据表5数据结果,调用matlab函数库的gridgata函数,绘制不同废尾比和质量浓度条件下的料浆塌落度和扩展度云图,插值结果如图10和11所示。

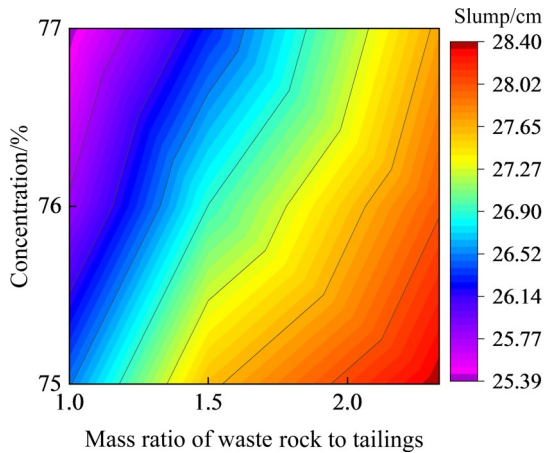


图10 塌落度变化的插值结果

Fig. 10 Interpolation result of slump change

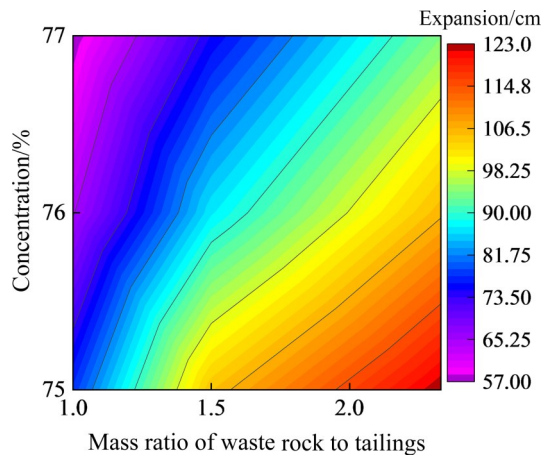


图11 扩展度变化的插值结果

Fig. 11 Interpolation result of expansion change

由图10和11可知,当废尾比为5:5、质量浓度为77%时,塌落度最小值为25.4 cm,扩展度最小值为57.0 cm。料浆的塌落度和扩展度均随废尾比增大而增大,随质量浓度增大而降低。依据极差值,在料浆质量浓度为75%~77%范围内,质量浓度对塌落度的影响极差值为0.93 cm,对扩展度的影响极差值为22.87 cm;在废尾比为1.00~2.33范围内,废尾比对塌落度的影响极差值为2.13 cm,对扩展度的影响极差值为40.90 cm。废尾比对塌落度和扩展度的极差值大于质量浓度,废尾比对料浆的塌落度和扩展度的影响显著,说明废石粗骨料对

料浆和易性有改善作用。

3.2 流变特性试验

按照充填强度试验方案的变量条件,每组样本试验值3次取平均值,开展废石全尾砂料浆流变试验。根据流变曲线可知,试验废石全尾砂料浆流变曲线分布符合Buckingham塑性体特征。因此,借助线型回归模型量化表征了充填料浆剪切应力与剪切速率的关系,结合Buckingham方程,确定各因素水平下的屈服应力和塑性黏度,如表6所示。表6中, τ_b 为料浆的屈服应力, μ_b 为塑性黏度, R^2 为复相关系数。绘制 τ_b 、 μ_b 与废尾比和料浆质量浓度的关系曲线如图12~13所示。

在相同废尾比条件下,屈服应力和塑性黏度随料浆质量浓度增大而增大;在相同料浆质量浓度条

表6 料浆的屈服应力和塑性黏度

Table 6 Yield stress and plastic viscosity of slurry

Sample No.	a	$b/\%$	τ_b/Pa	$\mu_b/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	R^2
1	5:5	75	138.0741	0.7509	0.9993
2	6:4	75	85.8522	0.6476	0.9977
3	7:3	75	72.1795	0.6058	0.9574
4	5:5	76	166.5468	0.7895	0.9489
5	6:4	76	141.2365	0.6921	0.9523
6	7:3	76	124.3658	0.6491	0.9394
7	5:5	77	206.5693	0.8278	0.9743
8	6:4	77	184.3155	0.7424	0.9971
9	7:3	77	169.8819	0.6929	0.9448

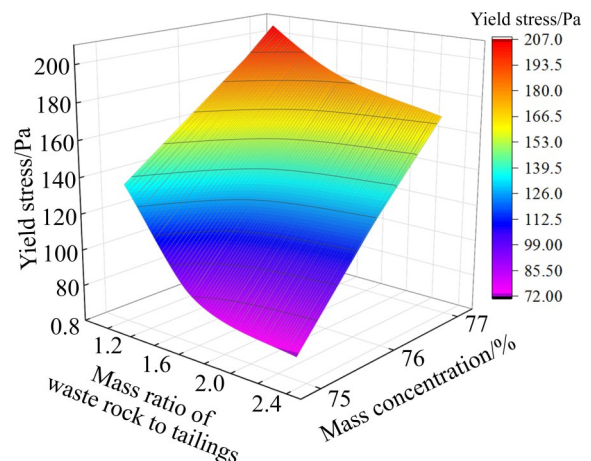


图12 屈服应力变化曲线

Fig. 12 Change curves of yield stress

件下, 屈服应力和塑性黏度随废尾比增大而减小。由图12可知, 绘制曲面与质量浓度-屈服应力平面的交线斜率的绝对值高于其与废尾比-屈服应力曲面的交线斜率的绝对值, 说明屈服应力的影响因素中, 料浆质量浓度的敏感性较废尾比高。随废尾比增大, 屈服应力呈先陡降后缓降的现象。这是由于随着废石含量的增加, 改善了物料间的级配, 但粗骨料间的物理堆叠作用对屈服应力的降低起到了一定的阻碍作用。

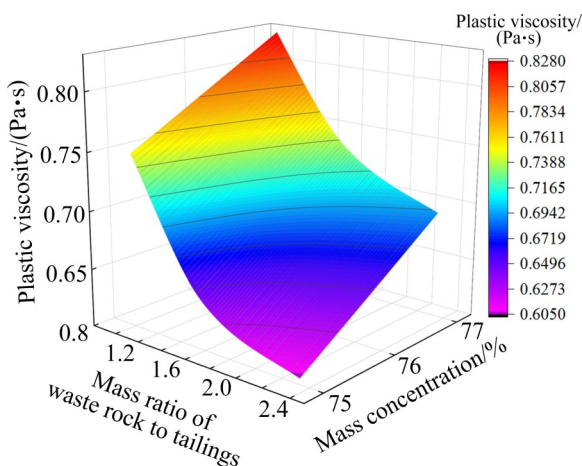


图13 塑性黏度变化曲线

Fig. 13 Change curves of plastic viscosity

由图13可知, 绘制曲面与质量浓度-塑性黏度平面的交线斜率的绝对值大于其与废尾比-塑性黏度平面的交线斜率的绝对值, 说明塑性黏度的影响因素中, 废尾比的敏感性较料浆质量浓度高。当料浆的屈服应力和塑性黏度最小时, 此时废尾比为7:3, 其含水量为25%; 当料浆的屈服应力和塑性黏度最大时, 此时废尾比为5:5, 含水量为23%。

3.3 料浆流动性的含水量表征

料浆的屈服应力不低于225MPa时可视为理想型料浆^[21], 满足该条件的配比方案有质量浓度为77%、废尾比为6:4和质量浓度为77%、废尾比为7:3的两种方案。为了兼顾强度需求, 结合强度分析结果, 控制废尾比恒为6:4, 构建料浆流动性的含水量表征参数方程。料浆塌落度、料浆扩展度、料浆的屈服应力和料浆的塑性黏度与含水量之间的数学关系见式(10)。

$$\begin{cases} S = 833.33t^2 - 348.34t + 61.94 & R^2 = 0.9886 \\ T = 260.00t^2 - 114.27t + 56.9 & R^2 = 0.9932 \\ \tau_b = 244.16t^2 - 2311.10t + 263.41 & R^2 = 0.9890 \\ \mu_b = 16.67t^2 - 12.17t + 2.66 & R^2 = 0.9989 \end{cases} \quad (10)$$

式中: S 为料浆的塌落度, cm; T 为料浆的扩展度, cm; τ_b 为料浆的屈服应力, Pa; μ_b 为料浆的塑性黏度, Pa·s; t 为料浆的含水量, %。

4 料浆的含水量寻优

4.1 充填体强度与流动性的归一化处理

在同一个坐标系中构建强度函数与流变函数的数据曲线, 为了保证量纲相同, 将强度数据和流变参数进行归一化处理, 分别以最大强度值、最大塌落度值、最大扩展度值、最大屈服应力值和最大塑性黏度值为归一指标, 对数据进行无量纲化处理, 归一化后的数据代表在该含水量条件下对应参数在本组数据样本中的取值水平, 当 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 和塌落度 S 、扩展度 T 数值接近1, 屈服应力 τ_b 和黏度系数 μ_b 接近0时, 认为此时料浆接近平衡状态。数据处理结果如表7所示。

基于表7的数据, 绘制胶砂比为1:4、废尾比为6:4条件下的不同含水量对充填体强度参数及流动性参数、流变参数的影响规律曲线, 如图14-15所示。由图14可知, 随料浆含水量增大, 3 d和7 d的充填体抗压强度呈先增大后减小的趋势, 当含水量 $\geq 22\%$ 时, 充填体强度降低速率逐步增大; 28 d龄期的归一化模型给出强度参数随含水量增大呈先降低后上升的趋势, 含水量为25%时强度参数达到最小值0.3773, 说明不利于充填体抗压强度提升。因此, 考虑 σ_1 和 σ_3 的含水指标, 当含水量 $t \in [20.4\%, 26.8\%]$ 区间时, 为两者同水平取优; 对于 σ_1 和 σ_3 的含水指标, 当含水量 $t \in [20.5\%, 26.0\%]$ 区间时, 为三者同水平取优。结合强度回归参数方程, 当含水量 $t \in [20.5\%, 26.0\%]$, 按照胶砂比为1:4、废尾比为6:4的要求, 制作含水量为20.5%、22%、24%和26%共四组充填体试块, 采用与上述相同的充填体抗压强度试验手段获取强度结果, 对应的3 d、7 d和28 d龄期的充填体强度最小值分别为1.58 MPa、2.50 MPa和5.20 MPa, 均满足现场要求。

表 7 充填体质量归一化指标

Table 7 Normalized index of filling body quality

$t/\%$	σ_{1N}	σ_{2N}	σ_{3N}	S_N	T_N	τ_{bN}	μ_{bN}
20	0.8878	0.8076	1.0000	0.8610	0.9814	1.0000	1.0000
21	0.9695	0.9447	0.7776	0.8588	0.9797	0.9900	0.9402
22	1.0000	1.0000	0.6041	0.8621	0.9792	0.9802	0.8842
23	0.9792	0.9734	0.4796	0.8711	0.9798	0.9707	0.8319
24	0.9070	0.8650	0.4040	0.8857	0.9815	0.9614	0.7834
25	0.7836	0.6747	0.3773	0.9059	0.9844	0.9523	0.7385
26	0.6088	0.4026	0.3996	0.9316	0.9885	0.9435	0.6975
27	0.3828	0.0486	0.4709	0.9630	0.9937	0.9348	0.6601
28	0.1054	0	0.5911	1.0000	1.0000	0.9265	0.6265

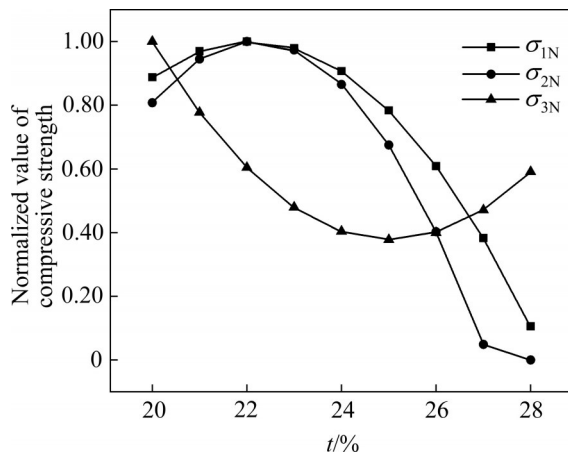


图 14 充填体强度的归一化表征

Fig. 14 Normalized characterization of infill strength

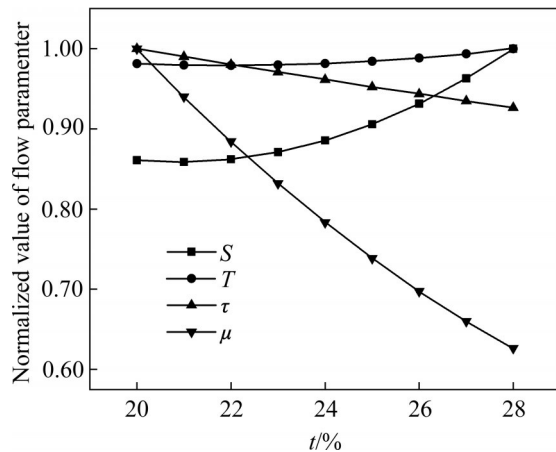


图 15 料浆流动性的归一化表征

Fig. 15 Normalized characterization of slurry fluidity

由图 15 可知, 随料浆含水量增大, 塌落度和扩展度均呈先减小后增大的趋势, 且后期的流动参数增长速率逐渐增大。当含水量为 21% 时, 塌落度 S 的水平参数取最小值 0.8588, 此时塌落度的真实

值为 25.5 cm; 当含水量为 22% 时, 扩展度 T 的水平参数取最小值 0.9792, 此时扩展度的真实值为 44.4 cm, 均能满足现场需求。因此, 要满足料浆流动性要求, 需保证料浆含水量高于 22%。综合考虑充填体强度和料浆流动性, 控制含水量 $t \in [22.0\%, 26.0\%]$ 时能够保证料浆的质量。

4.2 料浆成本的目标规划寻优

根据上述分析结果, 控制含水量 $t \in [22.0\%, 26.0\%]$ 时能够保证充填体强度与料浆流动性, 满足矿山现场工作需要。为了兼顾料浆的充填效果和充填成本, 采用多目标规划的方法 (Goal programming, GP) 实现料浆用水平衡的决策。GP 用于寻求多个自变量控制下的因变量最优值, 其原理是, 结合实际情况为每一组自变量赋予一个合理的权重系数, 将多个目标模型通过数学方法转化为单一目标的数学模型进行求解。根据该矿山充填要求优化单位体积的料浆成本, 模型以材料最低成本为优化目标, 以 $\sigma_1 \geq 1.5 \text{ MPa}$ 、 $\sigma_2 \geq 2.5 \text{ MPa}$ 、 $\sigma_3 \geq 5 \text{ MPa}$ 、 $0.23 \text{ m} \leq S \leq 0.28 \text{ m}$ 、 $0.6 \text{ m} \leq T \leq 1.6 \text{ m}$ 为约束条件, 结合上述研究结果 $22\% \leq t \leq 26\%$ 进行优化。自变量包括废石质量 (M_f)、全尾砂质量 (M_q)、水泥质量 (M_j) 和水质量 (M_w), 因变量为料浆的材料成本。经调研, 该矿山生产废石的成本价为 15.3 元/t, 全尾砂处理成本 4.11 元/t, 水泥的市售价为 300 元/t, 充填用水以中水 1 元/t。料浆成本的寻优模型见式(11)。

$$\begin{aligned}
\min(g) &= 15.3M_f + 4.11M_q + 300M_j + M_w \\
\text{S.t.} \quad & \begin{cases} -352.61 + 1.97 \frac{M_f}{M_q} + 908.25(1-t) - 0.64 \left(\frac{M_f}{M_q}\right)^2 \\ -583.33(1-t)^2 + 0.155(1-t) \frac{M_f}{M_q} - 1.5 \geq 0 \\ 420.30 + 4.37 \frac{M_f}{M_q} - 10.47(1-t) - 0.596 \left(\frac{M_f}{M_q}\right)^2 \\ + 5.52(1-t)^2 - 3.25(1-t) \frac{M_f}{M_q} - 2.5 \geq 0 \\ 1787.49 + 5.30 \frac{M_f}{M_q} - 4765.87(1-t) - 0.69 \left(\frac{M_f}{M_q}\right)^2 \\ + 3183.33(1-t)^2 - 4.12(1-t) \frac{M_f}{M_q} - 5 \geq 0 \\ 0.23 \leq 833.33t^2 - 348.34t + 61.94 \leq 0.28 \\ 0.6 \leq 260.00t^2 - 114.27t + 56.9 \leq 1.6 \\ 0.22 \leq t \leq 0.26 \\ M_f + M_q + M_j = (1-t)(M_f + M_q + M_j + M_w) \\ M_f + M_q = 4M_j \\ 1 \leq \frac{M_f}{M_q} \leq \frac{7}{3} \\ M_f, M_j, M_w \geq 0, M_q > 0 \end{cases}
\end{aligned} \quad (11)$$

式中： g 为综合考虑充填体强度、塌落度、扩展度、屈服应力和塑性黏度前提下的材料充填成本，元/ m^3 ； M_f 为废石质量， t ； M_q 为全尾砂质量， t ； M_j 为水泥质量， t ； M_w 为水的质量， t 。借助matlab中内置定义的fgoalattain函数求解数学模型(11)，代入求解结果反向验算，兼顾废石全尾砂充填体强度和流动性的前提下，含水平衡模型的最低成本求解结果为：充填材料成本为244.84元/ m^3 ， $M_f=M_q=0.6535 \text{ t/m}^3$ ， $M_j=0.3268 \text{ t/m}^3$ ， $M_w=0.5663 \text{ t/m}^3$ 。该条件下，胶砂比为0.25，废尾比为1，料浆质量浓度为74.26%。

5 结论

1) 废石粗骨料级配良好，全尾砂细骨料级配不良，废石与尾砂的质量比为1.5时，二者混堆积实度预测值和实际值达到最大，分别为0.762和0.731。由于预测值结果表明废石骨料和全尾砂骨料间的嵌锁水平为理想状态，故存在误差，相对于实际值的误差为4.24%，预测结果可靠。

2) 三个龄期的抗压强度变化均随料浆质量浓度

增大而增大，废尾比为7:3、龄期为3 d的强度 σ_1 最小值为1.85 MPa，龄期为7 d的强度 σ_2 最小值为2.78 MPa，龄期为28 d的强度 σ_3 最小值为5.09 MPa；同时，构建了强度与因素间的二次多项式回归模型，探明了养护龄期为3 d和7 d时，抗压强度对料浆质量浓度因素最敏感；养护龄期为28 d时，抗压强度对废尾比因素最敏感。

3) 料浆的塌落度和扩展度均随废尾比增大而增大，随质量浓度的增大而减小，料浆的屈服强度对废尾比的敏感性高于对质量浓度的敏感性；量化表征了料浆塌落度、扩展度、屈服应力和塑性黏度与含水量之间的数学关系，模型复相关系数最小值为0.9890，模型可靠。

4) 基于含水量表征的强度模型和流动模型，对 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 、 S 、 T 、 τ 和 μ 进行归一化处理，分析发现：综合考虑充填体强度和料浆流动性，当含水量 t 处于22%~26%时，料浆质量指标处于最优阶段；在料浆质量优化基础之上，借助多目标规划法构建了充填材料成本模型，模型最优解为：材料成本244.84元/ m^3 。该条件下的胶砂比为0.25，废尾比为1，料浆质量浓度为74.26%。

REFERENCES

- [1] 杨柳华, 王洪江, 吴爱祥, 等. 全尾砂膏体搅拌剪切过程的触变性[J]. 工程科学学报, 2016, 38(10): 1343-1349.
YANG Liu-hua, WANG Hong-jiang, WU Ai-xiang, et al. Thixotropy of unclassified pastes in the process of stirring and shearing[J]. Chinese Journal of Engineering, 2016, 38(10): 1343-1349.
- [2] 甘德清, 薛娜, 刘志义, 等. 全尾砂充填料浆管道阻力损失探究及优化[J]. 金属矿山, 2019(7): 32-40.
GAN De-qing, XUE Na, LIU Zhi-yi, et al. Investigation and optimization of pipeline resistance loss of full tailings slurry[J]. Metal Mine, 2019(7): 32-40.
- [3] BOGER D V. Rheology and the resource industries[J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64(22): 4525-4536.
- [4] JIANG H Q, FALL M, LIANG C. Yield stress of cemented paste backfill in sub-zero environments: Experimental results[J]. Minerals Engineering, 2016, 92: 141-150.
- [5] ZHAO Jian-wen, WANG Xin-min, PENG Kang, et al. Utilization of foaming technology in cemented paste backfill of high-mud superfine unclassified tailings[J]. Advances in

- Materials Science and Engineering, 2017, 2017: 1-7.
- [6] 杨志强, 高 谦, 王永前, 等. 金川高应力矿床充填采矿技术研究进展与亟待解决的技术难题[J]. 中国工程科学, 2015, 17(1): 42-50.
- YANG Zhi-qiang, GAO Qian, WANG Yong-qian, et al. Research development of filling mining technique and technical problems to solve in Jinchuan Nickel Mine with high stress[J]. Engineering Sciences, 2015, 17(1): 42-50.
- [7] 刘 浪. 矿山充填膏体配比优化与流动特性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- LIU Lang. Research on proportion and flow characteristics of backfill paste in mine sites[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [8] 张钦礼, 刘伟军, 王新民, 等. 充填膏体流变参数优化预测模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(1): 124-130.
- ZHANG Qin-li, LIU Wei-jun, WANG Xin-min, et al. Optimal prediction model of backfill paste rheological parameters[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(1): 124-130.
- [9] 杨志强, 高 谦, 王永前, 等. 金川全尾砂-棒磨砂混合充填料胶砂强度与料浆流变特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S2): 3985-3991.
- YANG Zhi-qiang, GAO Qian, WANG Yong-qian, et al. Research on filling body strength and rheological properties of mixed filling mortar with unclassified tailings and rod milling sand in Jinchuan mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S2): 3985-3991.
- [10] 温震江, 高 谦, 王永定, 等. 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), 2020, 41(5): 642-648.
- WEN Zhen-jiang, GAO Qian, WANG Yong-ding, et al. Experiment on correlation between rheological properties of filling slurry with different mass concentration and mixed aggregate gradation [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2020, 41(5): 642-648.
- [11] 刘树龙, 刘国磊, 李公成, 等. 基于正交设计的全尾砂膏体料浆流动性及充填体强度特性研究[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(12): 33-37.
- LIU Shu-long, LIU Guo-lei, LI Gong-cheng, et al. Study on fluidity of paste slurry and strength of backfill based on orthogonal design[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(12): 33-37.
- [12] 杨仕教, 苏 帅, 王富林. 高浓度全尾砂胶结充填体强度规律分析[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(3): 847-852.
- YANG Shi-jiao, SU Shuai, WANG Fu-lin. Analysis of strength regularity of high concentration tailings cemented backfill[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(3): 847-852.
- [13] 张修香, 乔登攀, 孙宏生. 废石-尾砂高浓度料浆管道输送特性模拟[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(5): 1092-1101.
- ZHANG Xiu-xiang, QIAO Deng-pan, SUN Hong-sheng. Simulation on conveying characteristics in pipe about high-density slurry with waste rock-tailing[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(5): 1092-1101.
- [14] 朱庚杰, 齐兆军, 寇云鹏, 等. 分级细尾砂胶结充填强度和料浆流变性能试验研究[J]. 矿冶工程, 2020, 40(4): 18-22.
- ZHU Geng-jie, QI Zhao-jun, KOU Yun-peng, et al. Experimental study on cemented backfill strength and slurry rheological properties of graded fine tailings[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020, 40(4): 18-22.
- [15] 盛宇航, 齐兆军, 寇云鹏, 等. 减水剂对全尾砂胶结充填料浆流变性的影响[J]. 有色金属工程, 2020, 10(4): 94-99.
- SHENG Yu-hang, QI Zhao-jun, KOU Yun-peng, et al. Influence of superplasticizers on rheology of cemented tailings backfill[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020, 10(4): 94-99.
- [16] 薛振林, 张友志, 甘德清, 等. 泵送剂掺量对充填料浆流动性能及充填体力学性能的影响[J]. 金属矿山, 2020(11): 25-30.
- XUE Zhen-lin, ZHANG You-zhi, GAN De-qing, et al. Effect of pumping agent on fluidity of filling slurry and mechanical properties of filling body [J]. Metal Mine, 2020(11): 25-30.
- [17] 温震江, 高 谦, 王永定, 等. 基于模糊综合评判的复合胶凝材料开发及料浆配比优化[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(3): 698-707.
- WEN Zhen-jiang, GAO Qian, WANG Yong-ding, et al. Development of composite cementitious material and optimization of slurry proportion based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(3): 698-707.
- [18] 兰文涛, 吴爱祥, 王贻明, 等. 基于正交试验的半水磷石膏充填配比优化[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(5): 1083-1091.
- LAN Wen-tao, WU Ai-xiang, WANG Yi-ming, et al. Optimization of filling ratio of hemihydrate phosphogypsum based on orthogonal test [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(5): 1083-1091.
- [19] 王洪江, 王小林, 吴爱祥, 等. 减水剂对全尾砂膏体屈服应力影响的时间效应[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(2): 529-534.
- WANG Hong-jiang, WANG Xiao-lin, WU Ai-xiang, et al. Time effect of water reducer on yield stress of full tailings paste[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(2): 529-534.

- [20] 姚维信. 矿山粗骨料高浓度充填理论研究与应用[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2011.
YAO Wei-xin. Research and application of high concentration filling of coarse aggregate in mine[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2011.
- 尾砂级配优化研究[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(10): 98–101.
CAO Shi-kai, WANG Shi-bo, ZHAO Jin-tian. Optimization of paste filling tailings grading based on rheological analysis[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(10): 98–101.
- [21] 曹士凯, 王世博, 赵金田. 基于流变特性分析的膏体充填

Water balance model and cost optimization of waste rock-unclassified pastes slurry

YIN Sheng-hua^{1,2}, HAO Shuo^{1,2}, ZHANG Hai-sheng³, YAN Rong-fu^{1,2}

- (1. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
2. Key Laboratory of Ministry of Education for Efficient Mining and Safety of Metal Mines, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
3. Mine Division, China ENFI Engineering Corp., Beijing 100038, China)

Abstract: For the problem of "high-concentration slurry is prone to blockage accidents, and high-water-content slurry is prone to segregation accidents", the strength characteristics test and slurry flow characteristics test of waste rock and unclassified tailings backfill were carried out. Based on the strength, slump, expansion and rheological parameters of different filling ratios, the mathematical models of strength parameters, flow parameters and filling material cost were constructed. The results show that the strength of the filling body, the degree of slump and the degree of expansion of the slurry increase with the increase of the water content, and the yield stress and the plastic viscosity of the slurry decrease with the increase of the water. The suitable water content range for the solution of the strength model is 20.5%–26.0%, and the intensity minimums for 3 d is 1.58 MPa, those for 7 d and 28 d are 2.50 MPa and 5.20 MPa, respectively. The reasonable range of water content is 22%–26%, the slump values are all greater than 25.64 cm, the expansion values are all greater than 44.37 cm, the yield stress values are all less than 206.7853 Pa, and the plastic viscosity values are all less than 0.7894 Pa·s at the time. The optimized material cost is 244.84 yuan/m³. The contents of waste rock, unclassified tailings, cement and water inside the backfill are 0.6535 t/m³, 0.6535 t/m³, 0.3268 t/m³, and 0.5663 t/m³. The recommended water content in the slurry is 25.74%.

Key words: waste rock and unclassified tailings; strength properties; flow properties; water balance; cost optimization

Foundation item: Project(2019SDZY05) supported by the Shandong Provincial Major Science and Technology Innovation Project, China; Project(52034001) supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China

Received date: 2021-04-30; **Accepted date:** 2021-08-03

Corresponding author: YIN Sheng-hua; Tel: +86-13811668481; E-mail: 357664177@qq.com

(编辑 何学锋)