

超细黄金尾砂充填体力学性能及毒浸试验研究

胡高峰¹,罗才严¹,王玉丁^{2,3},张庆嵩^{2,3*}

(1. 陕西凤县四方金矿有限责任公司; 2. 长沙矿山研究院有限责任公司; 3. 国家金属采矿工程技术研究中心)

摘要:超细黄金尾砂作为充填材料的安全有效应用具有重要的环保和经济意义。以某金矿选矿厂生产的超细黄金尾砂为主要试验材料,开展了一系列试验,分析不同胶凝剂、灰砂比和料浆浓度对充填体力学性能的影响,并结合毒浸试验评估其水质变化。研究结果表明,充填体的单轴抗压强度、泌水率和沉缩率受灰砂比、胶凝剂类型和料浆浓度的显著影响。随着灰砂比的减小,单轴抗压强度降低,而矿渣微粉胶凝剂及较高料浆浓度有助于提高单轴抗压强度。最佳工艺条件为胶凝剂矿渣微粉、灰砂比1:4和料浆浓度68%。泌水率和沉缩率随着灰砂比减小而增大,但提高料浆浓度可有效降低其泌水率和沉缩率。水质检测结果表明:充填体泌水水质符合V类标准,且大部分为II~IV类水质,符合国家污水排放标准,对井下水质的影响较小。

关键词:超细黄金尾砂;单轴抗压强度;力学性能;泌水率;沉缩率;毒浸试验

中图分类号:TD853.34

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)11-0034-06

doi:10.11792/hj20251106

引言

矿山尾矿的堆存不仅占用了大量土地资源,还可能导致其中的有害物质在自然环境中长期滞留,进而对周围生态环境构成潜在威胁^[1-3]。尤其是黄金矿山产生的超细黄金尾砂,其颗粒细小、比表面积大,易受外界环境影响,促使重金属污染物的浸出与扩散。因此,如何有效利用和处置尾矿,防止环境污染,已成为矿业行业亟待解决的关键问题。

目前,超细尾砂作为充填骨料的研究已取得一定进展^[4-6]。杨磊等^[7-8]研究了超细全尾砂作为充填骨料时,充填体强度与灰砂比、料浆浓度及养护龄期之间的定量关系,并对其敏感性进行了分析,结果表明,充填体强度对养护龄期的敏感性最高,其次是灰砂比,料浆浓度对强度的影响最小。梁峰等^[9]针对矿山超细全尾砂,利用多种固废资源开发了低成本固结粉充填胶凝材料,优化了充填体固结粉激发剂的配方,并通过BP神经网络模型预测了最优胶结体强度,从而有效降低了充填成本。王荣林等^[10]通过不同配比方案的试验和水化产物的微观扫描,研发了一种性能调节剂,能有效提升低料浆浓度条件下的抗压强度,改善超细尾砂充填材料的力学性能和工作性能,提高工程效率并降低工程成本。陈金刚等^[11]分别在平原和高原地区开展了超细全尾砂胶结充填体的单轴抗

压强度试验,揭示了在室内标准养护条件和井下低温条件下的强度发展规律,并分析了2种养护条件下强度差异的原因,为高寒高海拔地区充填作业提供了有效指导。

本研究通过对某金矿超细黄金尾砂充填体力学性能和毒浸行为试验,探讨了其在不同条件下的强度、泌水与沉缩规律,评估其作为尾矿充填材料的可行性。研究结果不仅为尾矿回填技术提供数据支持,也为尾矿治理与环境保护策略的优化提供了科学依据。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

本研究使用的材料包括黄金尾砂、钢渣微粉、普通硅酸盐水泥(强度等级42.5)和搅拌水。尾砂的粒径分布如图1所示。粒度分析结果显示:该黄金尾砂的平均粒径分别为 $d_{10}=5.92\text{ }\mu\text{m}$, $d_{50}=21.2\text{ }\mu\text{m}$, $d_{90}=127\text{ }\mu\text{m}$,74 μm 筛余为80.52%。尾砂的不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 分别为4.62和0.77,属于不良级配的超细尾砂^[12-14]。通过X射线荧光光谱(XRF)对该黄金尾砂化学成分进行分析,结果如表1所示。该黄金尾砂的主要化学成分为 SiO_2 和 Al_2O_3 。其中, SiO_2 占比高达50.01%, Al_2O_3 占比为17.78%。该黄金尾砂中还含有少量的 CaO 、 Fe_2O_3 、 K_2O 和 MgO ,四者质量分数分别为6.968%、5.669%、4.414%和2.04%。

收稿日期:2025-06-03; 修回日期:2025-07-08

基金项目:深地国家科技重大专项(2024ZD1003804)

作者简介:胡高峰(1989—),男,工程师,从事采矿技术研究工作;E-mail:hugao Feng2024123@163.com

*通信作者:张庆嵩(1998—),男,工程师,硕士,从事金属矿山采矿方法及工艺研究工作;E-mail:qingsong_zhang0@163.com

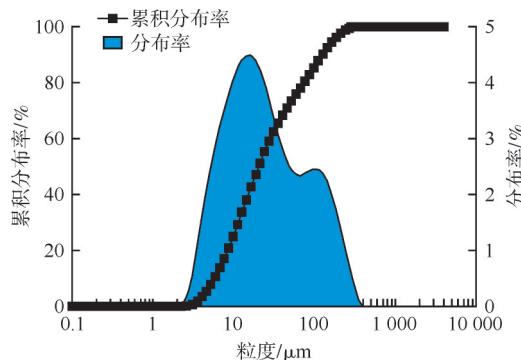


图1 黄金尾砂粒径分布

Fig. 1 Particle size distribution of gold tailings

表1 黄金尾砂主要化学成分分析结果

Table 1 Analysis results of main chemical composition of gold tailings

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
w/%	50.01	17.78	5.669	6.968	2.04	0.517	4.414	0.824

1.2 样品制备及方案

根据该金矿可采用的充填材料,对其充填料浆进行配比试验,以确定在不同胶凝材料下全尾砂胶结充填的坍落度、单轴抗压强度、泌水率及沉缩规律。针对3种因素(胶凝剂、灰砂比、料浆浓度)多水平开展全面试验,采用矿山提供的强度等级42.5普通硅酸盐水泥(水泥)和矿渣微粉作为胶凝剂,全尾砂作为骨料,配比试验各因素水平如表2所示。

表2 配比试验各因素水平统计结果

Table 2 Statistical results of levels of each factor in ratio test

水平	因素		
	胶凝剂	灰砂比	料浆浓度/%
1	强度等级42.5普通硅酸盐水泥	1:4	64
2	矿渣微粉	1:6	66
3		1:8	68
4		1:10	

2 充填体单轴抗压强度分析

充填体单轴抗压强度试验结果如图2所示。由图2可知:不同配比的水泥胶凝剂与矿渣微粉胶凝剂在不同灰砂比条件下,对充填体单轴抗压强度的影响表现出随着灰砂比的减小而逐渐降低的趋势。这一现象的主要原因在于,胶凝材料用量增加导致了胶凝体的密实度提升,从而提高了其单轴抗压强度^[15]。然而,当灰砂比减小时,水泥与矿渣微粉的胶结作用被削弱,导致充填体的单轴抗压强度降低。此外,随着料浆浓度的提高,充填体的单轴抗压强度也呈现出逐步增大的趋势。这是因为,料浆浓度的提高意味着料

浆中固体颗粒的含量增加,从而增强了充填体的结构稳定性和密实性。较高的固体含量为充填体提供了更为坚固的内部结构,进而提高了其抗压性能^[16]。值得注意的是,矿渣微粉相较于强度等级42.5普通硅酸盐水泥,在提升尾砂充填体单轴抗压强度方面展现出了更为优越的适用性。这表明,矿渣微粉在提高充填体单轴抗压强度方面具有更好的效果,可能与其独特的化学活性和反应性能密切相关,有助于提升尾砂充填体的整体单轴抗压强度和稳定性。

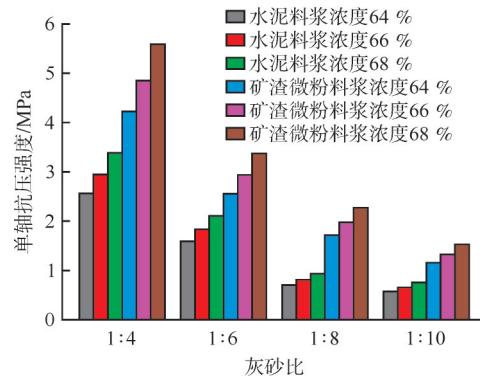


图2 充填体单轴抗压强度试验结果

Fig. 2 Test results of uniaxial compressive strength of filling material

充填体单轴抗压强度方差分析结果如表3所示。由表3可知:3种因素对充填体单轴抗压强度的影响均显著,各个因素对充填体单轴抗压强度影响大小的排序为灰砂比>胶凝剂>料浆浓度。充填体单轴抗压强度方差分析结果中的 R^2 为0.959,调整后的 R^2 为0.945,均接近于1,说明拟合模型的选择尚佳^[17]。

表3 充填体单轴抗压强度方差分析结果

Table 3 Analysis of variance of uniaxial compressive strength of filling material

因素	自由度	均方	F值	显著性
胶凝剂	1	8.918	87.225	显著
灰砂比	3	10.198	99.738	显著
料浆浓度	2	0.736	7.202	较显著

通过充填体单轴抗压强度估算边际平均值(如图3所示)可以看出,在该试验条件下,充填体单轴抗压强度达到最佳时各因素为:胶凝剂矿渣微粉、灰砂比1:4、料浆浓度68%。

3 充填体泌水率与沉缩率分析

充填体泌水率与沉缩率试验结果如图4所示。由图4可知:胶凝剂对二者的影响较为有限。通常,胶凝剂可在一定程度上改善材料的流动性,但在本次试验条件下,可能由于胶凝剂的使用量或类型限

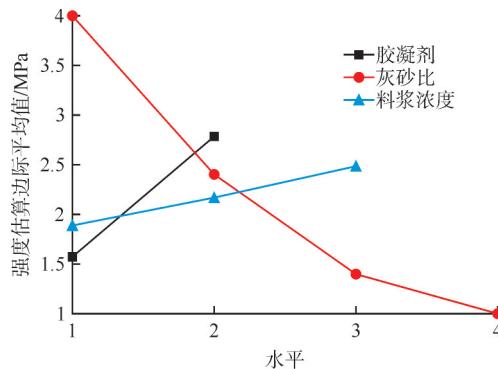


图3 充填体单轴抗压强度估算边际平均值

Fig. 3 Estimated marginal average of uniaxial compressive strength of filling material

制,其对泌水率和沉缩率的影响不显著。随着灰砂比

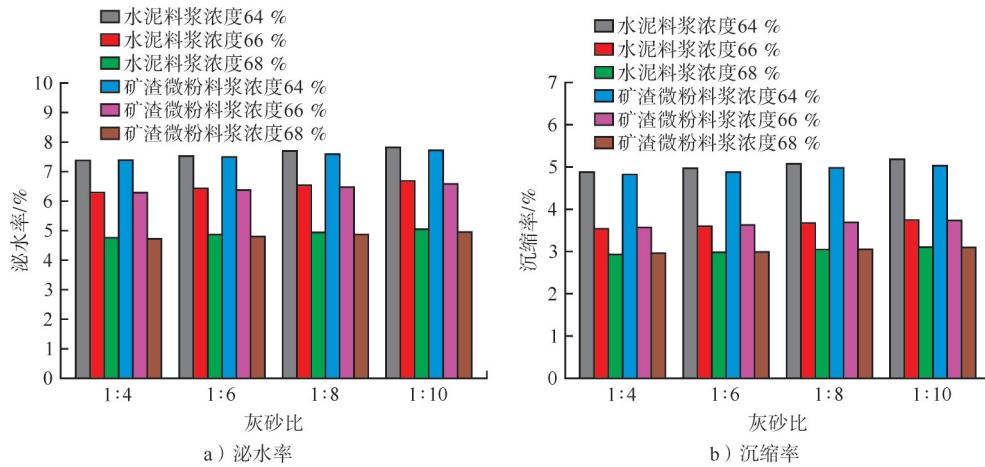


图4 充填体泌水率与沉缩率试验结果

Fig. 4 Result diagrams of bleeding rate and shrinkage rate of filling material

充填体泌水率与沉缩率方差分析结果如表4所示。由表4可知:3种因素对充填体泌水率的影响均显著,而对沉缩率的显著影响仅有灰砂比和料浆浓度。3种因素对泌水率与沉缩率的影响大小排序为料浆浓度>灰砂比>胶凝剂。此外,充填体泌水率与沉缩率的方差分析结果中, R^2 值分别为0.999和0.998,表明拟合效果良好。

表4 充填体泌水率与沉缩率方差分析

Table 4 Variance analysis of bleeding rate and shrinkage rate of filling material

指标	因素	自由度	均方	F值	显著性
泌水率	胶凝剂	1	0.027	25.19	较显著
	灰砂比	3	0.119	109.85	显著
	料浆浓度	2	14.778	13 619.84	显著
沉缩率	胶凝剂	1	0.005	3.026	不显著
	灰砂比	3	0.046	30.395	显著
	料浆浓度	2	7.986	5 326.364	显著

在充填试验中,较低的泌水率和沉缩率意味着充填料浆更加稳定。通过估算充填体泌水率与沉缩率

的降低,充填体的泌水率和沉缩率均呈上升趋势。其原因是灰砂比降低导致尾砂的比例增大,而尾砂颗粒较大且表面粗糙,降低了料浆的流动性,水分难以有效包裹在颗粒间,进而增加泌水的可能性^[18]。同时,较高的尾砂比例会增加充填体的体积收缩倾向,砂粒间的间隙较大,水泥浆无法完全填充这些空隙,从而导致沉缩率上升。另一方面,随着料浆浓度的增加,充填体的泌水率和沉缩率显著降低。这是因为更高的料浆浓度意味着固体成分含量增加,从而提高了充填体的整体黏度,增强了结构的稳定性。增加的固体成分不仅减少了水分的流失(泌水率降低),还使得固体颗粒之间形成更紧密的结构,进而减少了由于水分蒸发或其他因素引起的体积收缩(沉缩率降低)^[19]。

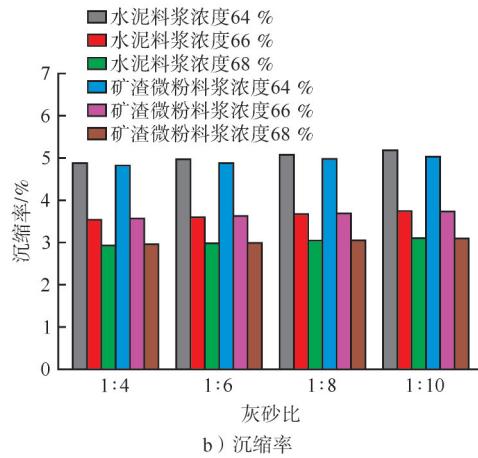


图5 充填体单轴抗压强度估算边际平均值

的边际平均值(如图5所示)可知,在该试验条件下,充填体泌水率与沉缩率达到最佳时,各因素的最优条件为:胶凝剂矿渣微粉、灰砂比1:4、料浆浓度68%。这一结果与充填体单轴抗压强度最佳时的条件一致。

对泌水率与沉缩率试验结果进行线性拟合,发现二者存在较强的相关性,且泌水率越大,沉缩率也越大(如图6所示)。当充填体中的泌水率增大,通常伴随着结构的松散或孔隙率的增大。特别是当充填体内部水分在固化过程中流失时,水泥颗粒间的水化作用没有得到充分补充或均匀分布,导致结构的不稳定性,使其内部的结构更容易松动,进而促使充填体发生沉缩。

4 充填体毒浸试验结果及分析

充填料浆充入采场后,泌出的多余水分通过脱滤水装置处理后与井下涌水一同排至地表,可能含有有害元素,对地下水造成二次污染。此类污染具有难以逆转、长期性、迁移性和隐蔽性等特点,威胁矿山环境安全^[20-21]。但由于固体颗粒在滤水中的自然沉降作

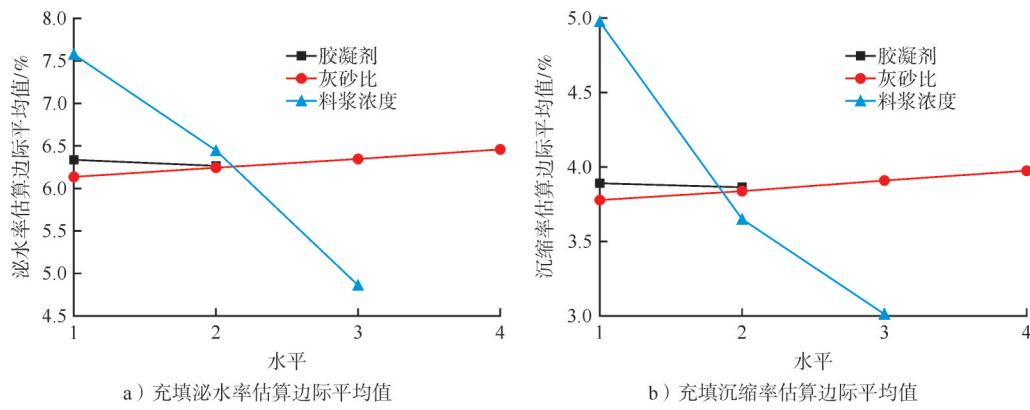


图5 充填体泌水率与沉缩率估算边际平均值

Fig. 5 Estimated marginal average of bleeding rate and shrinkage rate of filling material

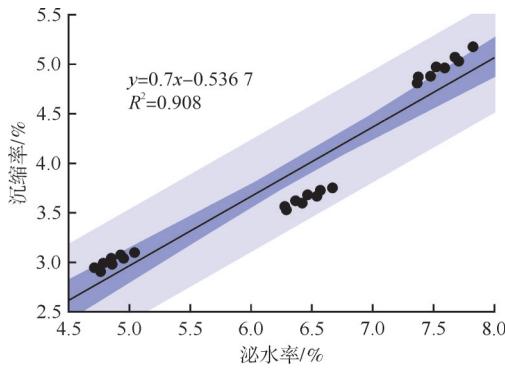


图6 泌水率与沉缩率的线性关系

Fig. 6 Linear relationship between bleeding rate and shrinkage rate

用,最终的滤水中固体颗粒含量较少,且充填料浆的滤水量远小于井下自然涌水量,因此对地表废水处理系统的影响较小。为全面了解充填材料及充填体滤水水质,对充填体泌水、淋溶、浸泡的水质进行相关检测。排放的污染物按其性质及控制方式分为两类:第一类污染物在车间或车间处理设施排放口采样;第二类污染物在排污单位排放口采样。根据GB 8978—1996《污水综合排放标准》,对第一类污染物最高允许排放质量浓度进行了限制,具体如表5所示。

表5 第一类污染物最高允许排放质量浓度

Table 5 Maximum allowable emission concentration of first category of pollutants

序号	污染物	元素符号	最高允许排放质量浓度/(mg·L ⁻¹)
1	汞	Hg	0.05
2	镉	Cd	0.1
3	铬	Cr	1.5
4	砷	As	0.5
5	铅	Pb	1.0
6	镍	Ni	1.0
7	铍	Be	0.005
8	银	Ag	0.5

4.1 充填体泌水毒性研究

对实验室配制试样进行泌水水质检测,结果如表6所示。由表6可知:充填料浆泌水水质基本符合GB 8978—1996《污水综合排放标准》,主要元素均达到相关标准。考虑到充填料浆泌水仅占井下排水总量的一小部分,可以判断其不会恶化井下水质。进一步分析表明,泌水水质符合地下水质量标准,大多数泌水水质为Ⅱ~Ⅳ类水质,且均在Ⅴ类水质范围内,表明其对环境的影响较小。

表6 充填料浆泌水水质检测结果

Table 6 Water quality test results of filling slurry's bleeding mg/L

样品	元素													
	Al	As	B	Ba	Be	Ca	Cd	Cr	Cu	Fe	Li	Ni	F ⁻	Zn
MS-1	1.93	0.0082	—	0.276	—	824.6	0.0004	1.92	0.024	0.078	1.888	0.01	<0.02	0.19
MS-2	1.736	0.0081	—	0.35	—	948.4	0.0004	1.93	0.03	0.056	1.47	0.036	5.56	0.094
MS-3	2.596	0.0084	—	0.568	—	911.8	0.0003	1.91	0.176	0.274	1.428	0.056	18.52	1.264

4.2 充填体淋溶毒性研究

对实验室配制试样进行充填体淋溶毒性检测,结果如表7所示。由表7可知:充填材料及充填体淋溶水质均符合GB 8978—1996《污水综合排放标准》,均在Ⅴ类标准范围内。大多数水质为Ⅱ~Ⅲ类水质。

在所检测的元素中,As、Ba和F⁻的含量偏高,但仍在Ⅴ类水质范围内,表明这些元素对井下水质的影响微乎其微。

4.3 充填体浸泡毒性研究

对实验室配制试样进行充填体浸泡毒性检测,结

表7 充填体淋溶水质检测结果

Table 7 Water quality test results of filling slurry's leaching

mg/L

样品	元素													
	Al	As	B	Ba	Be	Ca	Cd	Cr	Cu	Fe	Li	Ni	F ⁻	Zn
LR-1	1.151	0.003 4	0.502	0.165	—	959.8	—	0.051	0.027	0.053	3.574	0.046	2.14	0.424
LR-2	1.002	0.002 9	—	0.105	—	547.2	—	0.013	0.027	0.043	0.037	0.129	20.64	0.445
LR-3	11.67	0.002 4	—	0.026	—	24.95	0.000 1	0.044	0.012	0.202	2.201	0.022	3.69	0.164

果如表8所示。由表8可知:充填材料及充填体浸泡水质均符合GB 8978—1996《污水综合排放标准》,且水质均在V类标准范围内。大多数水质属于Ⅱ~

Ⅲ类水质。在所检测的元素中,As、Ba、Cu、Zn和F⁻的含量偏高,但仍在V类水质范围内,表明这些元素对井下水质的影响非常有限。

表8 充填体浸泡水质检测结果

Table 8 Water quality test results of filling slurry's soaking

mg/L

样品	元素													
	Al	As	B	Ba	Be	Ca	Cd	Cr	Cu	Fe	Li	Ni	F ⁻	Zn
JP-1	1.002	0.010	—	0.116	—	453.8	0.000 1	0.005	0.024	0.063	0.031	0.033	8.06	0.591
JP-2	3.601	0.011	0.612	0.078	—	611.5	0.000 1	0.076	0.04	0.154	10.12	0.008	2.16	0.308
JP-3	1.128	0.009	—	0.083	—	79.68	0.000 1	0.036	0.115	0.074	0.11	0.048	3.78	0.277

5 结 论

本文分析了超细黄金尾砂的物理力学特性,通过单轴抗压强度、泌水率、沉缩率等一系列试验来分析各因素对不同指标的影响关系,结合毒浸试验检测了充填体泌水、淋溶、浸泡的水质。主要结论如下:

1)充填体单轴抗压强度受灰砂比、胶凝剂和料浆浓度的影响显著。随着灰砂比减小,单轴抗压强度降低,但提高料浆浓度和改用矿渣微粉胶凝剂有助于提高单轴抗压强度。方差分析显示,灰砂比对充填体单轴抗压强度影响最大,其次是胶凝剂和料浆浓度。充填体单轴抗压强度达到最佳条件为胶凝剂矿渣微粉、灰砂比1:4、料浆浓度68%。

2)胶凝剂对充填体的泌水率和沉缩率影响较小,主要受灰砂比和料浆浓度的显著影响。随着灰砂比降低,尾砂含量增加,导致泌水率和沉缩率增加。提高料浆浓度能增加固体含量,从而增强结构稳定性,减少泌水率和沉缩率。方差分析结果表明,料浆浓度对泌水率的影响最大,其次是灰砂比。泌水率和沉缩率达到最佳条件为:胶凝剂矿渣微粉、灰砂比1:4及料浆浓度68%,与单轴抗压强度最优条件一致。此外,泌水率与沉缩率呈正相关,泌水率的增加通常伴随沉缩率的升高。

3)通过对充填体在泌水、淋溶和浸泡条件下的水质检测,结果表明,3种情况下的水质均符合V类水质标准,大多数水质属于Ⅱ~Ⅳ类,基本达到GB 8978—1996《污水综合排放标准》。主要元素的含量符合GB 8978—1996《污水综合排放标准》,表

明充填料浆泌水不会对井下水质造成不良影响。在所有检测元素中,少部分元素的含量略高,但仍处于V类标准水质范围内,对井下水质的影响较小。

参 考 文 献

- [1] 迟崇哲,刘影,王超,等.有色金属矿山尾矿土壤化生态修复技术研究进展[J].黄金,2024,45(12):8-12,138.
- [2] 盘樱,李二平,邱亚群,等.某河道堆存尾砂重金属形态特征分布及风险评价[J].矿冶工程,2017,37(4):93-97,103.
- [3] 宋鑫,熊芷毓,李杰,等.华南铀尾矿附近土壤和水体中铀的分布与污染评价[J].有色金属(冶炼部分),2024(12):139-145.
- [4] 祝鑫,彭亮,作锋锋,等.贵州某金矿超细尾砂充填工艺优选与应用[J].矿业研究与开发,2022,42(9):34-38.
- [5] 胡亚军,陈彦亭,赖伟,等.超细全尾砂似膏体绿色胶凝充填关键技术研究[J].黄金,2023,44(5):12-15,20.
- [6] 胡亚军,陈彦亭,赖伟,等.超细全尾砂新型胶结材料最优配比研究及应用[J].采矿技术,2023,23(6):176-179.
- [7] 杨磊,邱景平,范凯,等.超细全尾砂胶结充填体的强度特征分析[J].硅酸盐通报,2017,36(1):249-256.
- [8] 张浩强.基于正交设计的某矿超细全尾砂膏体材料配比试验研究[J].有色金属(矿山部分),2019,71(4):114-118.
- [9] 梁峰,高谦,丛革臣,等.思山岭铁矿超细全尾砂固结粉充填胶凝材料研究[J].金属矿山,2019(8):198-203.
- [10] 王荣林,陆虎,王欢,等.超细尾砂充填材料性能优化及机理研究[J].金属矿山,2021(6):131-135.
- [11] 陈金刚,许文远,刘志双,等.超细全尾砂胶结充填体强度特性研究[J].中国矿业,2021,30(增刊2):251-255.
- [12] 王文波,李帅,于正,等.絮凝剂残留对超细全尾砂似膏体流变特性的影响规律研究[J].黄金,2025,46(1):64-68,81.
- [13] 贾理争,吴宝峰,何磊,等.粒径对固废在充填体材料中胶凝性的影响研究[J].黄金,2024,45(12):53-55.
- [14] ZHANG Q, QIU J, JIANG H, et al. Effect of hydroxypropyl methyl cellulose on coarse tailings cemented backfill: Rheology, stability,

- strength and microstructure[J]. Construction and Building Materials, 2024, 425: 136042.
- [15] 刘杰,白腾飞,李广波,等.不同胶凝材料充填体强度与水化产物含量的量化关系研究[J].黄金科学技术,2024,32(6):1 046-1 055.
- [16] 郑娟荣,卢小玉,赵振波.煅烧硬质高岭土对铅锌矿溢流尾砂胶结膏体充填材料抗压强度的影响[J].有色金属(矿山部分),2016,68(6):48-51.
- [17] 刘东升,谢朝武.基于SPSS的胶结充填配比及多元线性回归分析试验研究[J].黄金,2019,40(9):32-36.
- [18] 陈俊宇,吴建俊,周兴晖,等.铅锌矿尾砂及花岗岩岩粉作为充填骨料的适应性试验研究[J].黄金,2025,46(2):94-98,108.
- [19] 杨柳华,李一凡,李一良,等.粗骨料对膏体料浆新鲜及硬化性能影响研究[J].有色金属(中英文),2025,15(2):298-306.
- [20] 李芹涛,褚洪涛,任玉东.尾砂胶结充填对井下水环境影响评价[J].黄金,2017,38(4):40-43.
- [21] 吴立波,王贻明,陈威,等.基于正交实验的赤泥粉煤灰膏体充填材料配比优化[J].矿业研究与开发,2020,40(5):45-49.

Mechanical properties and toxicity leaching tests of ultra-fine gold tailings backfill

Hu Gaofeng¹, Luo Caiyan¹, Wang Yuding^{2,3}, Zhang Qingsong^{2,3}

(1. Shaanxi Fengxian Sifang Gold Mine Co., Ltd.; 2. Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd.;
3. National Engineering Research Center for Metal Mining)

Abstract: The safe and effective application of ultra-fine gold tailings as backfill material holds significant environmental and economic importance. By using ultra-fine gold tailings produced by a gold ore processing plant as the primary test material, a series of experiments was conducted to analyze the effects of different cementing agents, cement-to-sand ratios, and slurry concentrations on the mechanical properties of the backfill. Water quality changes were also assessed through toxicity leaching tests. The research results indicate that the uniaxial compressive strength, bleeding rate, and settlement shrinkage rate of the backfill are significantly influenced by the cement-to-sand ratio, the type of cementing agent, and the slurry concentration. As the cement-to-sand ratio decreases, the uniaxial compressive strength decreases, while the use of a slag micropowder cementing agent and higher slurry concentrations help improve the uniaxial compressive strength. The optimal process conditions are identified as a slag micropowder cementing agent, a cement-to-sand ratio of 1:4, and a slurry concentration of 68 %. The bleeding rate and settlement shrinkage rate increase as the cement-to-sand ratio decreases, but increasing the slurry concentration can effectively reduce both the bleeding rate and settlement shrinkage rate. Water quality testing results show that the water quality after backfill bleeding meets Class V standards, with most samples falling into Class II - IV water quality, complying with national wastewater discharge standards and having a minor impact on underground water quality.

Keywords: ultra-fine gold tailing; uniaxial compressive strength; mechanical property; bleeding rate; settlement shrinkage rate; toxicity leaching test