

高硫尾砂胶结充填体强度影响因素实验研究及应用

郭进平¹, 强 浩¹, 王小林², 皇甫凤成³, 张 明³, 严宏君³, 张晓峰³

(1. 西安建筑科技大学 资源工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083;
3. 新疆哈巴河阿舍勒铜业股份有限公司, 新疆 哈巴河 836700)

摘要: 全尾砂用于井下充填在环保、安全、经济方面均具有显著优势, 但有色矿山尾砂普遍含硫, 过多的硫会劣化充填体长期强度。用新疆某铜矿高硫尾砂与戈壁料混合作充填骨料, 通过全面实验法研究骨料硫含量、灰砂比、料浆浓度、养护龄期对充填体强度的影响, 通过灰关联法分析各影响因素的主次排序。结果表明, 硫含量低于 11.72% 时, 充填体强度随硫含量、灰砂比、浓度增加呈线性增长, 随养护龄期增加呈多项式函数增长, 确定骨料中尾砂占比为 30%。充填体强度影响因素的主次排序为灰砂比 > 养护龄期 > 浓度 > 硫含量(尾砂含量), 建议矿山优化进路开采顺序以延长充填体养护时间, 灰砂比由 1:4 降为 1:6, 可在满足强度和采充周期的同时降低充填成本。

关键词: 高硫尾砂; 胶结充填; 单轴抗压强度; 全面实验法; 灰关联分析

中图分类号: X753

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)06-0859-06

Experimental study and application of factors affecting the strength of high sulfur tailings cemented backfill

GOU Jinping¹, QIANG Hao¹, WANG Xiaolin², HUANGPU Fengcheng³, ZHANG Ming³,
YAN Hongjun³, ZHANG Xiaofeng³

(1. School of Resource Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. School of Civil and Environment Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

3. Xinjiang Habahe Ashele Copper Industry Co., Ltd., Habahe 836700, China)

Abstract: Unclassified tailings are used for underground filling, which has significant advantages in environmental protection, safety and economy. However, tailings in nonferrous mines are generally sulfur-containing, and excessive sulfur degrades the long-term strength of the cemented backfill. The high-sulfur tailings from a copper mine in Xinjiang were mixed with Gobi materials as aggregates. The effects of sulfur content, lime-sand ratio, slurry concentration and curing age on the strength of the cemented backfill were studied by comprehensive experimental method. The primary and secondary ordering of each factor is analyzed by the grey relational method. The results show that when the sulfur content is lower than 11.72%, the strength of the filling body increases linearly with the increase of sulfur content, lime-sand ratio and concentration, and increases with the polynomial function with the increase of curing age. The proportion of tailings in the aggregate is determined to be 30%. The factors affecting the strength of the filling body are lime-sand ratio, curing age, concentration and sulfur content (tailing content), which are sorted from strong to weak. It is recommended to optimize the mining sequence of the roadway to increase the curing time of the backfill, and the lime-sand ratio should be decreased from 1:4 to 1:6, which can reduce the filling cost while satisfying the strength and mining & filling cycle.

Key words: high sulfur tailings; cemented filling; uniaxial compressive strength; comprehensive experimental method; the grey relational analysis

尾砂是我国产出量最大、综合利用率最低的大宗固体废弃物之一, 每年以 12 亿 t 的增长速度堆存在尾矿库中^[1], 成为潜在的地质灾害和环境污染源头^[2-3]。因此, 进行尾砂利用是矿山安全、绿

色开采的必然要求^[4]。随着国家对环保的日益重视, 自 2018 年起尾砂排放将征收 15 元/t 的环保税, 矿山排尾成本显著提高。同样因为环保的影响, 河沙、山石和戈壁料等传统充填骨料开采成

收稿日期: 2019-02-17 修改稿日期: 2019-11-13

基金项目: 国家十三五课题(2017YFC0602903)

第一作者: 郭进平(1970—), 男, 副教授, 主要从事矿山开采技术研究。E-mail: 41405711@qq.com

通信作者: 王小林(1991—), 男, 博士生, 主要从事充填采矿研究。E-mail: 18706841567@163.com

本逐年攀高,且不少地方开始限制开采,矿山获取充填骨料的成本和难度越来越大.而全尾砂全部或部分取代传统充填骨料用于井下充填可以有效防止地质灾害和环境污染^[5-6],达到“一废治两害(采空区、尾矿库)”的效果^[7],还能节省矿山充填成本,在环保、安全、经济方面均具有显著优势.

充填体强度达标是矿山安全开采的前提保证^[8],但有色矿山尾砂大多含有硫化物,硫含量超过某一临界值后会劣化充填体长期强度^[1].现有研究中,骨料硫含量的临界值存在较大差异,质量分数从 2.5%^[9]、3.64%^[10]、12%^[11]到 18.3%^[12]不等.究其原因,充填体强度既与充填料的物理化学性质有关^[13],还与灰砂比、养护龄期和料浆浓度等因素有关^[14-18].由于各矿山在充填料性质和充填参数等方面具有“特异性”,以上研究关于各因素对充填体强度的影响规律和主次排序均有较大差异^[16-19],还需针对特定矿山对上述内容进一步研究.

新疆某铜矿采用充填采矿法,每年充填量超过 40 万 m³,有大量消耗尾砂的潜力.但全尾砂中硫质量分数超过 38%,不宜单独作为充填骨料.论文以此为工程背景,用高硫尾砂与戈壁料混合作为充填骨料,通过全面实验法研究硫含量、灰砂比、质量浓度、养护龄期 4 个因素对胶结充填体

单轴抗压强度的影响规律,确定骨料中尾砂的适宜添加量,并借助灰关联法分析各因素对充填体强度影响的主次排序,最后对工程应用提出改进建议.

1 实验

1.1 实验材料

全尾砂来自矿山选矿厂,戈壁料来自矿山附近采集点,胶凝材料为 32.5 硅酸盐水泥.骨料粒度分布如图 1.

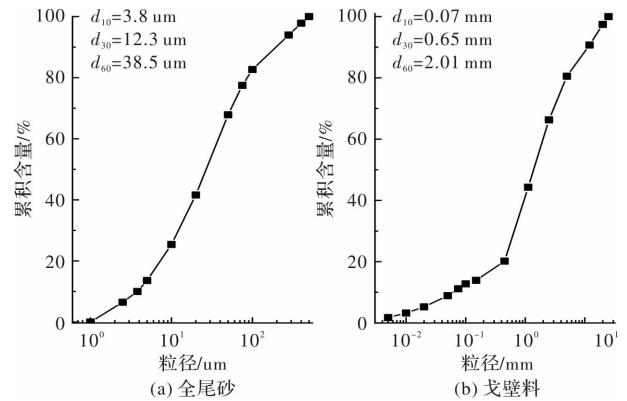


图 1 全尾砂及戈壁料粒径分布

Fig. 1 Particle size distribution of unclassified tailings and Gobi aggregate

测得骨料的基本物理参数如表 1.

表 1 实验材料基本物理参数

Tab. 1 Basic physical parameters of experimental materials

材料	比重	松散容重/t·m ⁻³	密实容重/t·m ⁻³	孔隙率/%	自然安息角/°
戈壁集料	2.520	1.670	2.000	20.63	30.3
全尾砂	3.514	1.790	2.270	35.40	34.4

测得骨料的化学组分如表 2.

表 2 实验材料化学成分含量

Tab. 2 Chemical composition content of experimental materials

化学成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	S	Fe	Cu	其他
戈壁集料	87.18	4.38	0.26	1.47	0.04	0	0	6.67
全尾砂	16.72	1.99	0.10	0.98	38.97	28.36	0.32	12.56

1.2 实验设计

采用全面实验法,考查硫含量(混合骨料的质量占比)、质量浓度、灰砂比、养护龄期 4 个因素对胶结充填体单轴抗压强度的影响.每个因素设计 4 个水平,如表 3.为方便操作,硫含量用尾砂含量进行换算,表 3 中硫含量从小到大依次对应尾砂含量 15%、20%、25%、30%.

表 3 实验考虑的因素和水平

Tab. 3 Factors and levels of experiment considerations

影响因素	硫含量/%	灰砂比	浓度/%	养护龄期/d
因素水平 1	5.88	1 : 10	75	3
因素水平 2	7.82	1 : 8	77	7
因素水平 3	9.77	1 : 6	79	28
因素水平 4	11.72	1 : 4	81	60

试块采用 $7.07\text{ cm} \times 7.07\text{ cm} \times 7.07\text{ cm}$ 的三联模具浇筑, 24 h 后拆模, 在温度 $20 \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 90% 以上的环境中进行标准养护, 到龄期后进行测试。

2 实验结果分析

除养护龄期外, 其余因素分析时均采用充填体的 60 d 单轴抗压强度值。对实验结果均采用多种函数关系进行拟合, 论文中列出拟合优度 R^2 最高的结果。

2.1 硫含量对充填体强度的影响

对 64 组 60 d 强度数据进行拟合, 拟合优度 R^2 的平均值为 0.973, 拟合结果如图 2。

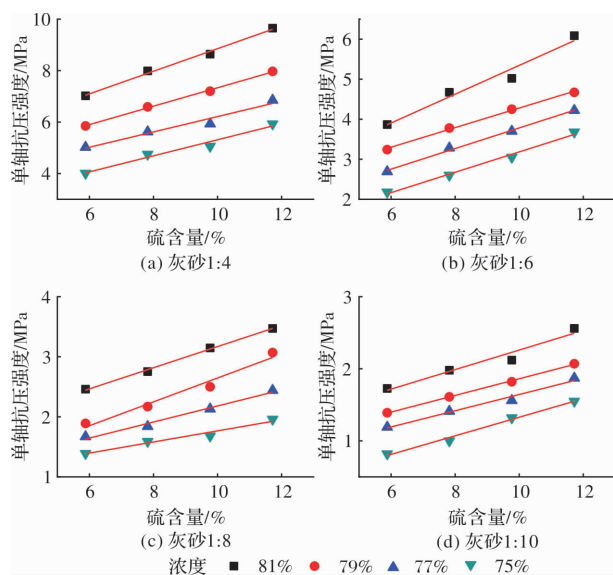


图 2 硫含量与充填体强度的拟合关系

Fig. 2 Fitting relationship between sulfur content and backfill strength

由图 2 可知, 充填体强度随硫含量的增加呈线性增长。硫含量 5.88%、7.82%、9.77%、11.72% 对应的各组所有试块的 60 d 平均强度分别为 2.90 MPa、3.35 MPa、3.70 MPa、4.25 MPa, 硫含量由 5.88% (尾砂 15%) 增加至 11.72% (尾砂 30%) 时, 充填体平均强度提高 46.6%。进一步分析发现, 充填体强度 S_t 随尾砂含量 x_1 增加同样呈线性增长, 可表示为 $S_t = a_1 + b_1 x_1$ (a_1 、 b_1 为与灰砂比、浓度和养护龄期有关的回归系数)。

2.2 灰砂比对充填体强度的影响

进一步分析图 2 中数据可知, 充填体强度 S_t 随灰砂比 x_2 的增加呈线性增长, 可表示为 $S_t = a_2 + b_2 x_2$ (a_2 、 b_2 为与尾砂含量、浓度和养护龄期有关的回归系数), 拟合优度 R^2 的平均值为 0.991。

灰砂比 1:10、1:8、1:6、1:4 对应的各组

所有试块的 60 d 平均强度分别为 1.63 MPa、2.26 MPa、3.78 MPa、6.50 MPa, 灰砂比由 1:10 增加至 1:4 时, 充填体平均强度提高 298.8%。

2.3 浓度对充填体强度的影响

进一步分析图 2 中数据可知, 充填体强度 S_t 随料浆浓度 x_3 的增加呈线性增长, 可表示为 $S_t = a_3 + b_3 x_3$ (a_3 、 b_3 为与尾砂含量、灰砂比和养护龄期有关的回归系数), 拟合优度 R^2 的平均值为 0.971。

料浆浓度 75%、77%、79%、81% 对应的各组所有试块的 60 d 平均强度分别为 2.66 MPa、3.21 MPa、3.75 MPa、4.57 MPa, 料浆浓度由 75% 增加至 81% 时, 充填体平均强度提高 71.8%。

2.4 养护龄期对充填体强度的影响

对 256 组实验数据进行拟合, 拟合优度 R^2 的平均值为 0.961, 拟合结果如图 3。

由图 3 可知, 含硫充填体强度 S_t 随养护龄期 x_4 的增加呈多项式函数增长, 可表示为 $S_t = a_4 + b_4 x_4 + c x_4^2$ (a_4 、 b_4 、 c 为与尾砂含量、灰砂比和浓度有关的回归系数)。养护龄期 3 d、7 d、28 d、60 d 对应的各组所有试块的平均强度分别为 0.93 MPa、1.61 MPa、2.99 MPa、3.55 MPa, 养护龄期由 3 d 增加至 60 d 时, 充填体平均强度提高 281.7%。

研究表明, 含硫量超过临界值后, 充填体从 28 d 开始产生不可逆的强度劣化^[10-11, 20-22], 论文实验范围内未观察到此种现象, 而是随着养护龄期的增加强度呈多项式函数增长, 在 60 d 时趋于平缓。因此认为含硫量低于 11.72% 时不会对充填体长期强度造成明显的劣化, 确定骨料中尾砂占比为 30%, 以降低戈壁料用量和充填成本。

对全面实验获得的 256 组数据进行回归拟合, 得到充填体强度 S_t 与尾砂含量 x_1 、灰砂比 x_2 、料浆浓度 x_3 、养护龄期 x_4 四个因素的函数关系:

$$S_t = 1.7569x_2^2 + 0.0115x_3^2 - 0.0011x_4^2 + 0.3881x_1x_2 + 0.0038x_1x_3 + 2.025x_2x_3 + 0.3932x_2x_4 + 0.0033x_3x_4 - 0.2928x_1 - 156.0x_2 - 2.0584x_3 - 0.21x_4 + 89.71 \quad (1)$$

拟合优度 $R^2 = 0.978$, 可作为矿山调整相关参数并预测充填体强度的依据。

2.5 充填体强度影响因素主次排序

获得充填体强度影响因素的主次排序, 有助于矿山有针对性地采取工程应对措施。

灰关联分析能精确地寻找两个系统之间关联性的, 能克服传统单因素分析无法同时考虑

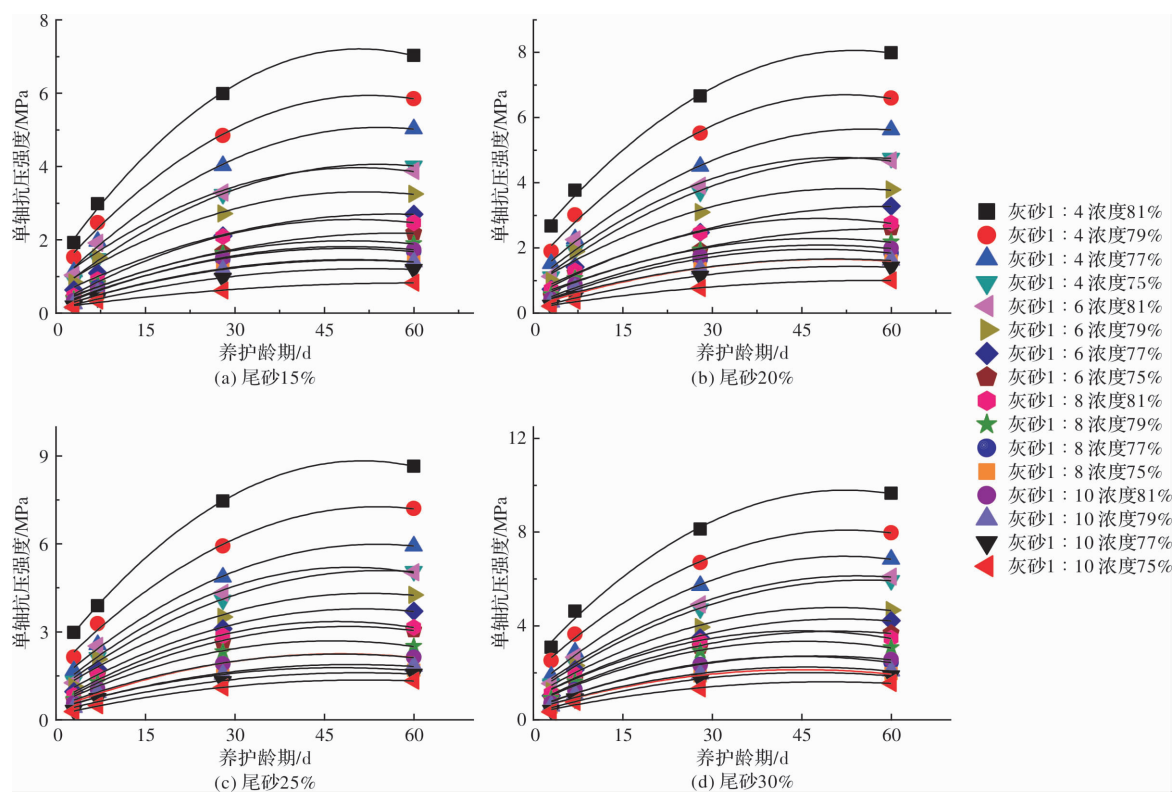


图 3 养护龄期与充填体强度的拟合关系

Fig. 3 Fitting relationship between curing age and backfill strength

所有因素影响的局限性^[23]. 论文引入灰关联分析法研究各因素对充填体强度影响的主次排序, 主要步骤为^[18]

(1) 根据实验数据建立母数列(充填体强度) $X_0(t)$ 和子数列(各影响因素) $X_i(t)$.

$$X_0(t) = \{X_0(1), X_0(2), \dots, X_0(m)\},$$

$$X_i(t) = \{X_i(1), X_i(2), \dots, X_i(m)\}$$

其中: t 为实验组数, i 为影响因素个数.

(2) 对母数列和子数列进行标准化处理.

$$X_0(t) = \frac{X_0(t) - \min X_0(t)}{\max X_0(t) - \min X_0(t)} \quad (2)$$

子数列处理方法与(2)式相同.

(3) 求标准化后的母数列 $X_0(t)$ 和子数列 $X_i(t)$ 在序列 $t = k$ 时的关联度 $\xi_{0i}(k)$:

$$\xi_{0i}(k) = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \rho \Delta_{\max}} \quad (3)$$

式中: $\Delta_{0i}(k)$ 为序列 $t = k$ 时母序列与子序列的绝对差, $\Delta_{0i}(k) = |X_0(k) - X_i(k)|$. ρ 为用来提高关联系数之间差异显著性的分辨系数, 一般取 0.5. Δ_{\max} 、 Δ_{\min} 分别为所有绝对差中的最大值和最小值, 即 $\Delta_{\max} = \max_i \max_k \Delta_{0i}(k)$, $\Delta_{\min} = \min_i \min_k \Delta_{0i}(k)$.

(4) 计算子序列与母序列的关联度 R_{0i} :

$$R_{0i} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \xi_{0i}(k) \quad (4)$$

R_{0i} 越大表明关联度越大, 即因素对充填体强度的影响越大.

将实验得到的 256 组数据按照步骤(1)~(4)进行处理, 得到尾砂含量、灰砂比、浓度、养护龄期的灰关联度分别为 0.618 0、0.730 1、0.626 2、0.726 9, 分析此结果可知:

(1) 灰砂比对充填体强度影响最大, 提高灰砂比能显著提高充填体强度, 但也意味着充填成本的升高.

(2) 养护龄期对充填体强度的影响略次于灰砂比, 但也明显大于浓度和尾砂含量的影响, 在采充周期允许的情况下, 延长养护时间是提高充填体强度最经济有效的办法.

(3) 浓度对充填体强度的影响略大于尾砂含量, 在满足流动性的前提下, 应尽量提高料浆浓度.

3 工程应用及建议

矿山采用的充填浓度为 77%, 骨料中尾砂掺量为 30%. 阶段空场嗣后充填为主要采矿方法, 采场高 50 m, 宽 12 m, 长为矿体厚度, 顶部和底部 8 m 灰砂比 1:4, 上部和下部 10 m 灰砂比 1:6, 中部 14 m 灰砂比 1:8. 二步骤回采时充填体未出现大规模垮落现象.

矿山部分高品位破碎矿石采用下向进路充填开采,进路沿矿体走向进行南北布置,南北2条进路同时开采,进路长50 m,每日进尺1.5~2.0 m,工期25~33 d。2条进路回采完毕后同时充填,灰砂比1:4,充填3~7 d后开采相邻进路。缺点是充填体养护时间过短,且频繁受爆破扰动,影响强度增长。

料浆浓度77%、尾砂含量30%时,灰砂比1:4的7 d强度为2.88 MPa,1:6的28 d强度为3.49 MPa,后者比前者高21.2%,同时满足《有色金属采矿设计规范(GB50771-2012)》关于下向进路充填体单轴抗压强度不小于3 MPa的要求。

因此建议将南北进路同时开采改为南北进路交叉开采,充填体养护时间可由3~7 d延长至28 d,同时将灰砂比由1:4降为1:6,如此可在满足充填体强度和采充周期的同时降低充填成本。改进后的施工组织方案如图4。

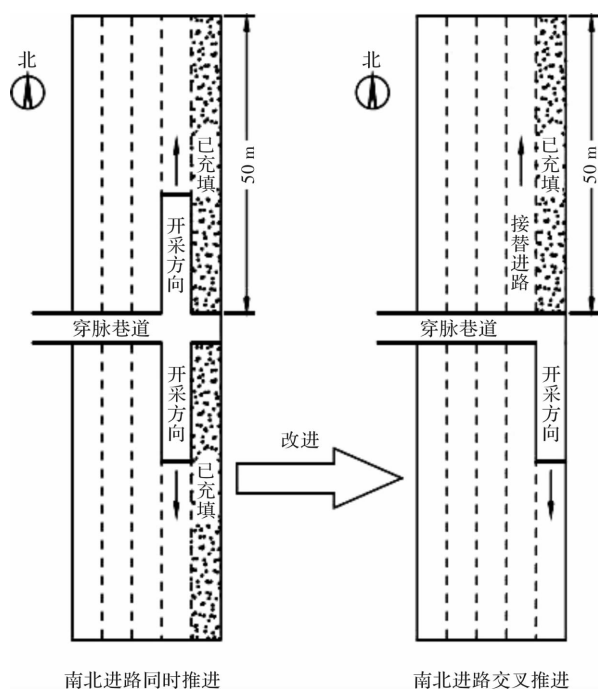


图4 进路采矿施工组织改进方案

Fig. 4 Improvement program for road mining construction organization

矿山每天需要4个进路采矿工作面,根据现有开拓情况,可以实现上述改进方案。

4 结论

(1)骨料含硫量低于11.72%(全尾砂掺量30%)时不会劣化充填体长期强度,充填体强度随灰砂比、浓度和硫含量增加呈线性增长,随养护龄期增加呈多项式函数增长。

(2)回归得到充填体强度与尾砂含量、灰砂比、浓度和养护龄期的函数关系,充填体强度影响因素的主次排序为灰砂比>养护龄期>浓度>尾砂含量。采充周期允许时,延长养护时间是提高充填体强度最经济有效的办法。

(3)建议矿山将南北进路同时开采改为南北进路交叉开采以延长养护时间,灰砂比由1:4降为1:6,可在满足充填体强度和采充周期的同时降低充填成本。

参考文献 References

- [1] 孟跃辉,倪文,张玉燕. 我国尾矿综合利用发展现状及前景[J]. 中国矿山工程, 2010, 39(5): 4-9.
MENG Yuehui, NI Wen, ZHANG Yuyan. Current state of ore tailings reusing and its future development in China [J]. China Mine Engineering, 2010, 39(5): 4-9.
- [2] WU Tianyong, ZHANG Chunyuan, ZHAO Yunsheng. Monitoring and warning methods of tailings reservoir using BP neural network[J]. International Journal of Perforability Engineering, 2018, 14(6): 1171-1180.
- [3] TANG Y L, CAO X Y, FU J X, et al. Emergency treatment process research of tailings reservoir failure and pollution accident[C]//Frontiers of Energy and Environmental Engineering-Proceedings of the 2012 International Conference on Frontiers of Energy and Environmental Engineering, ICIEEE 2012, 2013: 290-295.
- [4] 刘殿华,吴贤振. 全尾砂充填技术的应用与发展[J]. 世界有色金属, 2012(8): 44-45.
LIU Dianhua, WU Xianzhen. Application and development of unclassified tailings filling technology[J]. World Nonferrous Metals, 2012(8): 44-45.
- [5] YANG Lei, QIU Jingping, JIANG Haiqiang, et al. Use of cemented super-fine unclassified tailings backfill for control of subsidence[J]. Minerals, 2017, 7(11): 1-20.
- [6] SUN Wei, WANG Hongjiang, HOU Kepeng. Control of waste rock-tailings paste backfill for active mining subsidence areas[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 171: 567-579.
- [7] 吴爱祥,王勇,王洪江. 膏体充填技术现状及趋势[J]. 金属矿山, 2016(7): 1-9.
WU Aixiang, WANG Yong, WANG Hongjiang. Status and prospects of the paste backfill technology[J]. Metal Mine, 2016(7): 1-9.
- [8] CUI Liang, FALL Mamadou. Multiphysics modeling and simulation of strength development distribution in cemented tailings backfill structures[J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2018, 12

- (3):353-374.
- [9] 刘允秋,侯大德.含硫尾砂充填体强度试验[J].现代矿业,2013(11):195-199.
LIU Yunqiu, HOU Dade. Strength test of sulphidic tailings backfill[J]. Modern Mining, 2013(11): 195-199.
- [10] 尹升华,邵亚建,吴爱祥,等.含硫充填体膨胀裂隙发育特性与单轴抗压强度的关联分析[J].工程科学学报,2018,40(1):9-16.
YIN Shenghua, SHAO Yajian, WU Aixiang, et al. Association analysis of expansion crack development characteristics and uniaxial compressive strength property of sulphide-containing backfill[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(1): 9-16.
- [11] 姜关照,吴爱祥,李红.高硫尾砂充填体性能及化学外加剂对其影响[J].金属矿山,2017(10):71-175.
JIANG Guanzhao, WU Aixiang, LI Hong. High sulfur tailings backfill properties and effect of chemical additives[J]. Metal Mine, 2017(10): 171-175.
- [12] 韩瑞军,王麒.某铅锌矿高硫尾砂充填系统研究[J].有色冶金节能,2014,30(1):29-32.
HAN Ruijun, WANG Qi. Study on tailings filling system for a lead-zinc mine with high sulfur content[J]. Energ Sav Non-ferr Metall, 2014, 30(1): 29-32.
- [13] 徐文彬,杜建华,宋卫东,等.超细全尾砂材料胶凝成岩机理试验[J].岩土力学,2013,34(8):2295-2302.
XU Wenbin, DU Jianhua, SONG Weidong, et al. Experiment on the mechanism of consolidating backfill body of extra-fine grain unclassified tailings and cementitious materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(8): 2295-2302.
- [14] 刘超,韩斌,孙伟,等.高寒地区废石破碎胶结充填体强度特性试验研究与工业应用[J].岩石力学与工程学报,2015,34(1):139-147.
LIU Chao, HAN Bin, SUN Wei, et al. Experimental study of strength of backfillings of cemented rock debris and its application under low temperature condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(1): 139-147.
- [15] 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 Zhiqiang, GAO Qian, WANG Yongqian, 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.
- [16] 洪训明,饶运章,刘炜鹏,等.某铁矿全尾砂胶结充填配比优化研究[J].矿业研究与开发,2017,37(11):34-36.
HONG Xunming, RAO Yunzhang, LIU Weipeng, et al. Study on ratio optimization of full tailings cemented filling in an iron mine[J]. Mining Research and Development, 2017, 37(11): 34-36.
- [17] 魏晓明,李长洪.胶结充填体强度敏感性分析及灰砂比优化[J].金属矿山,2016(6):37-42.
WEI Xiaoming, LI Changhong. Sensitivity analysis of strength of cemented backfill and ratio of optimization[J]. Metal Mine, 2016(6): 37-42.
- [18] QIU Jingping, YANG Lei, SUN Xiaogang, et al. Strength characteristics and failure mechanism of cemented super-fine unclassified tailings backfill[J]. Minerals, 2017, 7(4): 1-13.
- [19] 付建新,杜翠凤,宋卫东.全尾砂胶结充填体的强度敏感性及其破坏机制[J].北京科技大学学报,2014,36(9):1149-1157.
FU Jianxin, DU Cuifeng, SONG Weidong. Strength sensitivity and failure mechanism of full tailings cemented backfills[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2014, 36(9): 1149-1157.
- [20] 常宝孟,韩斌,闫其盼,等.高硫尾矿胶结充填长期强度演化规律及机理分析[J].现代矿业,2016(5):6-9.
CHANG Baomeng, HAN Bin, YAN Qipan, et al. Analysis of the long-term strength evolution regularity and mechanism of cemented filling with high sulphur tailings[J]. Modern Mining, 2016(5): 6-9.
- [21] 王怀勇,张爱民,贺茂坤.高硫极细全尾砂充填料配比及输送特性试验研究[J].中国矿山工程,2014,43(6):1-4.
WANG Huaiyong, ZHANG Aimin, HE Maokun. Experimental study on unclassified tailing backfill materials proportion and pipeline transportation property with high sulphur and superfine particle[J]. China Mine Engineering, 2014, 43(6): 1-4.
- [22] 程海勇,吴爱祥,王洪江,等.高硫膏体强度劣化机理实验研究[J].工程科学学报,2017,39(10):1493-1497.
CHENG Haiyong, WU Aixiang, WANG Hongjiang, et al. Experimental study on the strength deterioration of sulfidic paste backfill[J]. Chinese Journal of Engineering, 2017, 39(10): 1493-1497.
- [23] 任红岗,谭卓英,王海军.基于OED-GRA评价模型的采场岩体参数敏感性分析[J].有色金属(矿山部分),2017,69(1):63-69.
REN Honggang, TAN Zhuoying, WANG Haijun. Sensitivity analysis of rock mass parameters in stope based on the OED-GRA evaluation model[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2017, 69(1): 63-69.

(编辑 吴海西 桂智刚)