

安庆铜矿尾砂综合利用工艺技术研究及应用

王红武¹, 陈 灿², 彭啸鹏³

(1. 铜陵有色金属集团股份有限公司安庆铜矿, 安徽 怀宁 246131;

2. 铜陵有色设计研究院有限责任公司, 安徽 铜陵 244000;

3. 矿冶科技集团有限公司, 北京 100160)

摘要:目的:随着开采年限增加,安庆铜矿已逐步面临尾矿库库容不足难题。为此开展了安庆铜矿尾矿综合利用工艺研究,以期实现尾砂资源化利用,降低排尾量,延长尾矿库使用年限。方法:通过安庆铜矿尾砂产出工艺调研,结合尾砂物化特性分析,研究形成了基于旋流分级联合震动脱水的尾砂综合利用工艺技术。并通过工业试验研究,分析了分级粗尾砂产品质量指标与利用效率。结果:试验结果表明,粗尾砂产品 $-74\mu\text{m}$ 颗粒平均含量低于15%,含水率约18%,硫元素含量低于0.5%,均满足建筑用砂标准。工业试验的尾砂综合利用能力为30 t/h,利用效率为48%,每年可减少约20万t尾矿库排尾量,能有效缓解安庆铜矿尾矿库库容不足难题。意义:相关成果对于面临类似难题的矿山具有较好的指导意义和实用价值,为我国金属矿尾矿固废综合利用技术的发展起到促进作用。

关键词:尾砂综合利用;尾砂建材化利用;尾砂消纳处置;金属矿尾矿;尾矿库排尾

中图分类号:TD235

文献标志码:A

文章编号:1671-4172(2024)05-0157-06

Study on comprehensive utilization process plan of Anqing copper mine tailings

WANG Hongwu¹, CHEN Can², PENG Xiaopeng³

(1. Anqing Copper Mine of Tongling Nonferrous Metals Group Holding Co., Ltd., Huaining Anhui 246131, China;

2. Tongling Nonferrous Design and Research Institute Co., Ltd., Tongling Anhui 244000, China;

3. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China)

Abstract: Purpose: With the increase of mining years, the Anqing copper mine has gradually faced the problem of insufficient storage capacity of tailings dam. Therefore, the study of comprehensive utilization technology of tailings at the Anqing copper mine has been conducted, aiming to achieve the resource utilization of tailings, reduce the amount of tailings disposal, and extend the service life of the tailings dam. Method: Through the research on tailings production processes of Anqing copper mine, and the analysis of physical and chemical characteristics of the tailings, a comprehensive utilization process technology of tailings based on cyclone classification combined with vibratory dewatering has been developed. And by conducting industrial trial, the quality indicators and utilization efficiency of classified coarse tailings were analyzed. Result: The tests results show that the average content of particles finer than $-74\mu\text{m}$ of coarse tailings product is less than 15%, and the water content of coarse tailings product is approximately 18%, moreover the content of sulfur is less than 0.5%, which all meet the requests of standards for construction sand. The industrial trial demonstrated that the comprehensive utilization capacity of the tailings is 30 t/h, with an efficiency of 48%, and can then reduce the tailings discharge by around 200,000 t annually, which can effectively alleviate the Anqing copper mine's problem of insufficient capacity of tailings dam. Significance: The related research results can provide guidance and practical value for mines facing similar challenges and contribute to the development of solid waste comprehensive utilization technology for metal mine tailings in China.

Key words: comprehensive utilization of tailings; utilization of tailings as building materials; tailings consumption and disposal; metal mine tailings; tailings discharge in tailings dam

收稿日期:2024-06-22

基金项目:国家重点研发计划青年科学家项目(2021YFC2900600),矿冶科技集团有限公司青年创新基金资助项目(04-2408)

作者简介:王红武(1989—),男,工程师,主要从事采矿工程、矿山生产管理工作。E-mail:819172892@qq.com。

矿山尾砂综合利用是缓解尾砂排放压力、延长尾矿库服务年限的必由之路^[1]。随着我国环保要求的提高,目前已很难再新建尾矿库,越来越多的矿山开始面临尾矿库库容不足、尾砂无处排放的难题^[2-3]。而与此同时,随着建筑材料紧缺,价格上涨,不少矿山企业开始对尾砂进行建材化利用,包括尾砂制砖、水泥、混凝土、微晶玻璃、陶粒和陶瓷等^[4-5],并且取得了一定的成果。

在尾砂综合利用技术研究方面,国内外矿山和科研单位均已开展了一定的理论研究工作。KUBRA KUNT 等研究了帕加马金尾矿作为一种混合材在硅酸盐水泥生产中的应用,以硅酸盐水泥和干金尾砂为原料,制备了水泥砂浆。研究表明,金尾矿适合做砂浆骨料,掺量为5%时,产品的抗压和抗折强度能达到比较好的效果^[6]。温龙新等总结了铅锌尾矿用于制备水泥生料的优势,指出铅锌尾矿中的铝氧化物与水泥生料中的铝质组分相近,同时含有铅、锌以及锰、铬等元素,有助于生料的烧制,提高水泥熟料产率,具有较好的综合利用价值^[7]。刘娟红等分析了细粒级金属尾砂用于制备建筑材料的相关活化技术与高温烧结技术,探讨了未来金属尾砂综合利用的发展方向^[8]。

安庆铜矿建矿于90年代初,是我国最早采用大直径深孔采矿法的矿山之一^[9]。矿山经过多年的生产,目前即将面临尾矿库库容不足的难题。为此,本论文围绕矿山尾矿特征,阐释匹配矿山充填采矿工艺的尾砂综合利用技术研究成果以及工业试验应用情况。以期能够对国内外相似矿山的尾砂综合利用提供借鉴,促进矿山固废的资源化利用技术水平。

1 矿山尾砂产出工艺与基本物化特征分析

1.1 矿山尾砂产出工艺分析

安庆铜矿原矿首先经浮选得到铜精矿,之后尾矿再次经旋流分级得到细粒级溢流与粗粒级分级尾砂。其中溢流尾砂通过渣浆泵输送至尾矿库堆存,粗粒级分级尾砂再次进入重介质选厂进行选铁、选铜后输送至充填站用于井下充填。

基于上述工艺可知,若针对粗尾砂进行建材化利用,则需要针对输送至充填站的分级粗尾砂进行处置。为此,需分别在选厂总尾矿排除口及充填站来料处分别进行取样测试,以探明矿山各工艺环节的尾砂物化特性。按照该方案,通过跟班取样分别

得到了全尾砂及分级尾砂的各8组试样。

1.2 矿山尾砂物化特性测试

针对取样所得尾砂,采用自然晾晒法将尾砂风干至表面气干状态,采用缩分法进行取样,并采用取样袋分别密封保存以备后续尾砂物化特性测试。

采用 Mastersize 2000 激光粒度分析仪分别测试分级尾砂及全尾砂粒级组成,绘制相应对比曲线。同时考虑到尾砂建材化利用对于其含硫量要求较高,分别选取全尾砂及分级尾砂中的3组试样进行元素组成测试,并取平均值作为代表值。

尾砂粒级组成测试结果如图1所示:

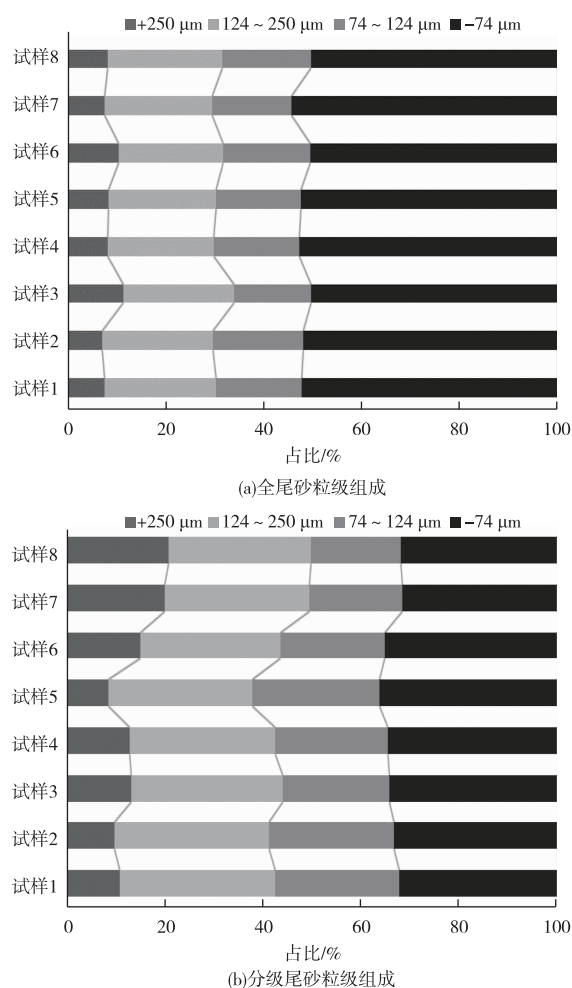


图1 安庆铜矿全尾砂及分级尾砂粒级组成对比图

Fig. 1 Comparison chart of particle size distribution of un-classified tailings and classified tailings in Anqing copper mine

由图1可知,取样所得两类尾砂,各自样品间的粒级组成以及-74 μm以下的颗粒占比均较为接近。其中全尾砂-74 μm颗粒占比在51%左右,即完全将其剔除最大可以得到49%的粗粒级部分用于建材化利用。对比分级尾砂,其-74 μm颗粒占比在35%左右,经过旋流分级已经有部分细颗粒得

到剔除,为后续进一步提取粗颗粒用于建材利用奠定条件。

将两类尾砂的元素组测试结果进行统计如表1所示,分级尾砂经铜、铁再选后元素含量与全尾

砂差异不大,具体区别主要为 Fe 元素含量进一步降低,同时 Ca 与 Si 元素升高。而两类尾砂的 S 元素含量均较低,小于 0.5%,具有进行建材化利用的潜力。

表1 安庆铜矿分级尾砂及全尾砂化学元素组成统计表

尾砂类型	Ca	S	Fe	Al	Mg	Mn	Si	Ti
全尾砂	19.89	0.41	15.89	1.83	2.54	0.19	18.35	0.07
分级尾砂	21.70	0.39	11.64	2.67	2.49	0.17	19.32	0.09

2 尾砂综合利用工艺方案研究

2.1 工艺流程分析

通过上述尾砂粒径与元素分析可知,安庆铜矿为再选铜、铁资源,预先对全尾砂进行了分级处置,使得输送至充填站的尾砂中 $-74\mu\text{m}$ 含量只约占35%,且元素组成较为简单,特别是S元素含量低。因此,考虑采用粗尾砂建材化利用加细尾砂充填处置的利用方案进行矿山尾砂综合利用。

基于上述分析,选择旋流分级联合震动脱水的尾砂综合利用工艺,采用旋流器与脱水筛撬装一体组成装备系统,对安庆铜矿分级尾砂进行处理,使得经分级与脱水的尾砂产品中粗颗粒含量进一步提高,同时降低产品含水率。而旋流器溢流与筛下细颗粒则通过振动筛底部细砂仓收集后使用渣浆泵泵送至充填站用于充填。具体工艺流程及设备联络图见图2、3。

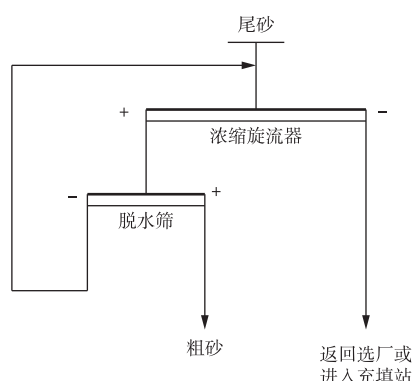


图2 安庆铜矿尾砂综合利用工艺方案图

Fig. 2 Process plan for comprehensive utilization of tailings in Anqing copper mine

2.2 物料平衡与工艺参数分析

基于上述尾砂综合利用方案,结合矿山尾砂流量等参数,进行物料平衡分析,并以此开展设备选型。

1) 来料参数

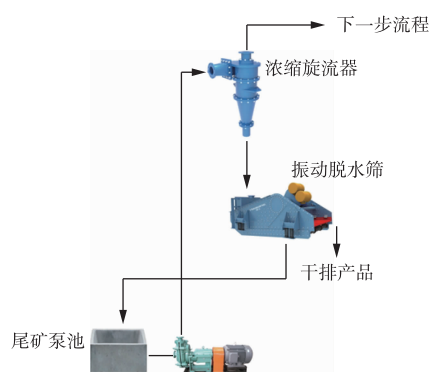


图3 安庆铜矿尾砂综合利用工艺设备联络图

Fig. 3 Contact diagram of equipment for comprehensive utilization of tailings in Anqing copper mine

进入一体机的来料为经铜、铁再选后的分级尾砂浆,浓度较为稳定,约为26%;其 $-74\mu\text{m}$ 目细颗粒占比约35%;来料流量 $\geq 180\text{ m}^3/\text{h}$ 。

2) 分级脱水设备技术参数

为满足分级粗砂产量要求,设备处理效率需 $\geq 180\text{ m}^3/\text{h}$;以 $74\mu\text{m}$ 为分级界限,尽量提高沉沙中粗颗粒含量;根据相似设备的调研,一体机脱水筛可实现的分级粗砂含水率在 $(18\pm 2)\%$;脱水筛筛上产品粒度根据GB/T 14684—2022《建筑用砂》标准要求,分级粗砂 $-74\mu\text{m}$ 颗粒含量须 $\leq 15\%$ 。

3) 物料平衡分析

矿山尾矿比重为3,结合来料浓度26%,可计算得到来料密度约为 $1.21 \times 10^3\text{ kg}/\text{m}^3$,则根据来料流量大于 $180\text{ m}^3/\text{h}$,可换算得到来料中尾砂含量约为56 t/h,即一体机的处理量必须大于56 t/h。

按照最大分级粗砂产率55%进行计算,则一体机粗砂产品的产量约为30 t/h。分级细砂产量即约26 t/h。同时以来料流量、浓度集合粗砂产品的含水率指标进行分析,分级细砂排放量应 $\geq 170\text{ m}^3/\text{h}$ 。

基于上述分析,综合利用生产线的相关工艺参数与物料平衡数据汇总见表2。

表 2 安庆铜矿尾砂综合利用工艺参数与物料平衡数据汇总表

Table 2 Process parameters and material balance table for comprehensive utilization of tailings at Anqing Copper Mine

分级粗砂产量/ (t·h ⁻¹)	尾矿比重	来料浓度/%	来料粒度	分级粗砂 产率/%	分级粗砂 含水率/%	分级细砂排放量/ (m ³ ·h ⁻¹)
30 t/h	3	26	—74 μm 含量约 35%	50±5	18±2	≥170

2.3 设备选型分析

考虑来料及处理量需大于 200 m³/h, 选择 FX350-GX 型旋流器组 2 台并联进行浓缩作业, 即使单台设备出现问题, 也可保障一定能力的生产作业。同时, 考虑到分级粗砂产量需满足 30 t/h 指标, 设计单套设备入筛干矿量 40 t/h, 选择 ZKX1845 型脱水筛 1 台, 旋流器组与脱水筛采用撬

装一体式设计。

根据旋流器的选型, 考虑 1.2 的波动系数, 渣浆泵流量以 250 m³/h 设计, 旋流器入料压力以 0.12 MPa 设计, 渣浆泵同旋流器入口高差以 8 m 进行设计, 则渣浆泵扬程为 20~25 m, 渣浆泵功率为 45 kW。

表 3 安庆铜矿尾砂综合利用设备选型表

Table 3 Equipment selection table for comprehensive utilization of tailings in Anqing copper mine

设备名称	规格	单位	数量	装机功率	备注
旋流器	FX350-GX	组	2	——	旋流器内衬耐磨橡胶
脱水筛	ZKX1845	台	1	7.5×2=15 kW/台	聚氨酯筛板
渣浆泵	100HWCP-R	台	1	45 kW	流量 250 m ³ /h, 扬程 20~25 m

3 尾砂综合利用工业试验

矿山根据上述工艺方案及设备选型结果, 进行了尾砂综合利用工业试验生产线的建设, 并进行了为期 9 个月的工业试生产。在此期间, 通过跟班调研, 进行了三次现场取样, 共获得筛上分级粗砂产品及溢流细砂共 10 组样品。

3.1 尾砂产品质量分析

将 10 组样品进行称重, 之后分别置于 105 ℃烘箱中烘干处理 24 h, 测试烘干后试样质量, 从而测试得出含水率。所得数据如图 4 所示, 可以看出 10 组平行试样的含水率范围在 18%±0.3%, 因此可

认为目前工业试验条件, 粗砂产品含水率与设备的工艺参数相匹配。

采用水筛加激光粒度分析方式测试 10 组试样的粒级组成, 所得各粒级区间的物料量占比结果如表 4 所示。对结果进行统计得到对比图, 如图 5 所示。可以看出, 10 组分级粗尾砂 74 μm 以下细颗粒含量在大部分满足小于 15% 的标准, 平均 74 μm 以下颗粒含量为 14.27%, 总体而言仍然满足产品细颗粒含量低于 15% 的要求。但同时可以看出, 74 μm 以下颗粒占比仍存在一定波动, 后续仍有必要进行去泥优化。

表 4 分级粗砂产品的粒级组成分布统计表

Table 4 Statistical table of the particle size distribution of coarse tailings products

名称	250 μm	124~250 μm	74~124 μm	—74 μm
样品 1	34.27	37.03	15.34	13.36
样品 2	32.8	35.46	16.45	15.29
样品 3	34.98	36.83	14.87	13.32
样品 4	28.43	38.94	18.32	14.31
样品 5	24.97	38.82	20.07	16.14
样品 6	34.98	34.32	16.51	14.19
样品 7	36.02	33.48	16.47	14.03
样品 8	29.90	38.32	17.47	14.40
样品 9	38.83	33.72	15.13	12.32
样品 10	30.77	36.49	17.36	15.38

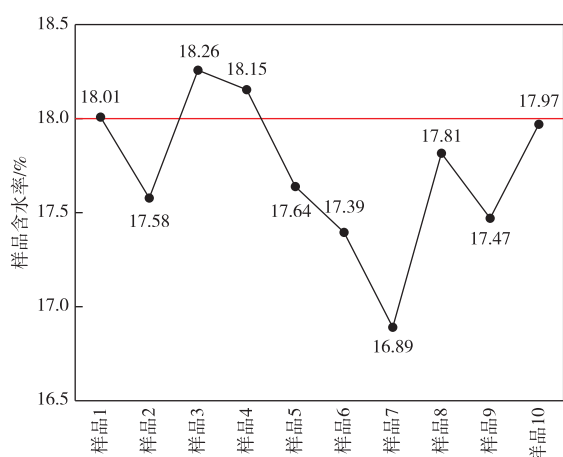


图4 分级粗砂样品含水率统计图

Fig. 4 Statistical chart of water content of the classified coarse tailings

为进一步分析分级粗砂产品质量,分别选取试样4、试样8与试样10进行化学元素分析,主要分析包括Ca、Mg、Al等金属元素以及S元素的含量,从而对尾砂的元素组成特性进行评估。三组试样的元素组成如表5所示。

表5 分级粗尾砂化学元素组成统计表

Table 5 Chemical element composition of classified coarse tailings

试样编号	Ca	S	Fe	Al	Mg	Mn	Si	Ti	/%
试样4	19.89	0.41	15.89	1.83	2.54	0.19	18.35	0.07	
试样8	19.61	0.34	14.62	1.87	2.49	0.20	18.77	0.086	
试样10	20.98	0.25	16.41	2.00	1.61	0.22	18.75	0.098	

3.2 综合利用效率分析

分别利用测试所得分级粗尾砂、分级细尾砂和来料尾砂的粒度组成,从粗细物料守恒角度可统计计算得到实际工业试验阶段的尾砂综合利用率为49.5%。对比设计参数的产品产率 $50\% \pm 5\%$,基本符合设计参数要求。

利用上述入料、分级粗砂与分级细砂的粒度组成测试结果,采用常用的汉考克综合分级效率进行旋流器的分级效率分析与评价。相关计算公式如下:

$$\eta = \frac{(\alpha - \theta)(\beta - \alpha)}{\alpha(\beta - \theta)(100 - \alpha)} \quad (1)$$

式中: α —入料中分级界限以下颗粒含量,%;
 β —溢流中分级界限以下颗粒含量,%; θ —底流中分级界限以下颗粒含量,%。

将对应数据, $\alpha = 33.55\%$ 、 $\beta = 50.46\%$ 、 $\theta = 14.27\%$ 代入式(1)中有:

$$\eta = \frac{(33.55 - 14.27) \times (50.46 - 33.55)}{33.55 \times (50.46 - 14.27) \times (100 - 33.55)} = 40.41\%$$

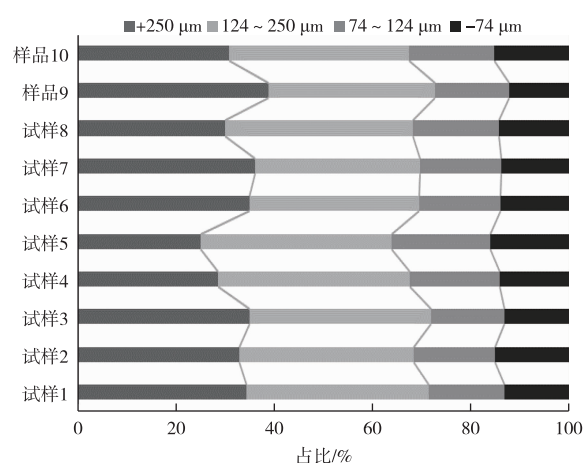


图5 分级粗砂样品粒级组成统计图

Fig. 5 Statistical chart of particle distribution of the classified coarse tailings

从表5数据可以看出,三组试样的S元素含量均小于0.5%,符合工艺参数要求。同时可以看出相较于类似矿山,尾砂中Fe元素含量均较高,平均达到了15%左右。此外三组试样的Al、Mg含量均在3%以下。

因此,工业试验阶段旋流器的综合分级效率为40.41%,仍有优化的必要。导致分级效率不高的原因,首先在于脱水筛的筛下细颗粒产物并没有被排出,而是重新与来料混合后进入旋流器,导致来料物料粒度组成存在波动,影响旋流器分级效果。其次,旋流器的沉沙嘴角度与来料中35%细颗粒含量的工况不匹配,导致分级效率低。后续可针对一体机筛下细颗粒构建专门的处理装置,避免闭路循环的影响。同时,就安庆铜矿的来料颗粒组成特征,开展旋流器的沉沙嘴选型与优化研究,提高旋流器分级效率。此外,还有必要通过增加洗砂设备,进一步优化粗砂产品的细颗粒含量,提高产品质量,促进其对外销售。

3.3 综合利用技术经济指标分析

如表3所示,工业试验阶段的尾砂综合利用总功耗为60 kW,底流输送至立式砂仓的砂浆泵与一体机所用泵型号相同,功率为45 kW,因此整套系统每小时动力消耗约105度电。按照工业用电标准,每度电成本1元计,每小时动力成本约105元。此

外,经统计,设备折旧、配件耗材支出、人力成本等约8.5元/t。综合而言,按照工业试验生产线的设计生产能力30 t/h计算,分级尾砂产品的综合成本约12元/t。

经矿山技术人员统计核算,自2022年9月起至2023年9月,已累计产出并销售分级粗砂产品约11.7万t,获得销售额230万元,平均售价约19.66元/t。

结合矿山生产成本核算,工业试验阶段吨分级粗砂效益约8元。若实现全部分级尾砂的综合利用,可年产分级粗砂22万t,年经济收益约176万元。同时,将溢流细砂进行充填利用,可每年减少20万t的尾矿库排尾量。

4 结论

1)基于安庆铜矿选矿工艺,开展了尾矿物化特性分析,论证了安庆铜矿尾矿建材化利用可行性,设计了针对预先分级尾砂的旋流加振动脱水综合利用工艺,并完成了相应的物料平衡分析与设备选型,实现了粗尾砂产品外销,细尾砂底流用于充填的分级分质利用。

2)基于安庆铜矿尾砂综合利用工业试验,取样分析了分级粗砂产品质量,样品的含水率范围在 $18\% \pm 0.3\%$,平均74 μm 以下颗粒含量为14.27%,S元素含量均小于0.5%,均实现了设计指标,且满足建筑用砂的相关标准,达到了建材化利用的目标。

3)经工业试验验证,安庆铜矿尾砂综合利用的吨分级粗砂产品效益约8元。仅工业试验阶段已累计产出并销售分级粗砂产品约11.7万t,获得销售额230万元。若实现全部分级尾砂的综合利用,年经济收益约176万元,同时可每年减少20万t的尾矿库排尾量。

参考文献

- [1] 施灿海,刘明生,程立家,等.尾矿综合利用研究进展及工程实践[J].中国矿业,2024,33(2):107-114.
SHI Canhai, LIU Mingsheng, CHENG Lijia, et al. Research progress and engineering practice on comprehensive utilization of tailings[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(2): 107-114.
- [2] 沈楼燕,李连通,张超,等.我国尾矿库安全监测技术发展综述[J].有色金属工程,2023,13(1):121-126.
SHEN Louyan, LI Liantong, ZHANG Chao, et al. Review on the development of safety monitoring technology for tailings pond in China [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023, 13(1): 121-126.
- [3] 魏宁.金属矿山的主要矿山地质环境问题探讨[J].有色金属(矿山部分),2024,76(1):123-125.
WEI Ning. Discussion on the main mining geo-environmental problems of metal mines [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2024, 76(1): 123-125.
- [4] 张小永,封东霞,柏林,等.硫化矿尾矿资源化利用研究现状及展望[J].矿冶,2021,30(3):51-62.
ZHANG Xiaoyong, FENG Dongxia, BO Lin, et al. Research status and prospect of resource utilization of sulfide tailings[J]. Mining and Metallurgy, 2021, 30(3): 51-62.
- [5] 张雷,郭利杰,魏晓明,等.矿渣基胶凝材料充填试验及胶结体微观结构演化研究[J].有色金属工程,2023,13(5):84-93.
ZHANG Lei, GUO Lijie, WEI Xiaoming, et al. Study on filling test of slag-based binder and microstructure evolution of backfill [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023, 13(5): 84-93.
- [6] KUNT K, YILDIRIM M, DUR F, et al. Utilization of bergama gold tailings as an additive in the mortar [J]. Celal Bayar University Journal of Science, 2015, 11(3): 365-371.
- [7] 温龙新,唐培垚,李伟光.铅锌尾矿的资源化综合利用研究进展[J].有色金属(矿山部分),2024,76(3):17-22.
WEN Longxin, TANG Peiyao, LI Weiguang. Research progress on comprehensive utilization of lead-zinc tailings as resources [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2024, 76(3): 17-22.
- [8] 刘娟红,周在波.细粒级金属尾砂的综合利用及在矿山充填中存在的问题和对策[J].金属矿山,2022,51(7):240-249.
LIU Juanhong, ZHOU Zaibo. Comprehensive utilization of ultra-fine metal tailings and its problems and countermeasures in the application of backfill materials [J]. Metal Mine, 2022, 51(7): 240-249.
- [9] 覃星朗,方文改,郑攻关.安庆铜矿分级尾砂胶凝材料配比试验及应用研究[J].采矿技术,2023,23(4):176-179.
QIN Xinglang, FANG Wengai, ZHENG Gongguan. Research on the recipe test and application of classified tailings cementitious backfill materials in Anqing Copper Mine [J]. Mining Technology, 2023, 23(4): 176-179.