

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

陈俊宇^{1,2}, 吴建俊², 周兴晖², 刘尊², 李帅^{1*}, 黄淇¹, 余李峰¹

(1. 中南大学资源与安全工程学院; 2. 浙江省遂昌金矿有限公司)

摘要:遂昌金矿采矿方法变更为充填采矿法,其关键在于充填工艺与充填系统,对于不同的充填骨料,其物理力学性质、矿物与化学成分各不相同,充填管道输送性能及作为充填材料的力学性能差别较大。通过对不同来源的骨料进行试验研究、理论分析和方案对比,获得矿山易于获取的充填骨料的浓缩脱水、充填配比等关键技术参数,进而对其作为充填骨料的性能进行科学评价,最终确定铅锌矿尾砂及花岗岩岩粉作为充填骨料的可行性及具体配比参数。

关键词:充填采矿法;充填系统;管道输送;充填骨料;物理力学性质;化学成分;科学评价

中图分类号:TD853.34

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)02-0094-05

doi:10.11792/hj20250215

引言

矿床受断层构造带的控制,资源禀赋特征复杂,产状从极薄到厚、品位从低到高、倾角从倾斜至急倾斜变化较大,传统的留矿采矿法适用性差^[1-3],采用混凝土置换矿柱,成本极高,开采工艺复杂,效率低,巨大的采空区也存在安全隐患。因此,需要优选适用性强、安全高效、采矿损失贫化低的充填采矿方案,采用低成本、高效率的充填系统,淘汰低效的混凝土置换工艺。充填料浆制备是充填系统极其重要的一环,是指将充填骨料、胶凝材料和水按照一定的配比,准确计量、均匀拌和、高速搅拌后制备成浓度稳定、流动性较好、不易分层离析、采场泌水少、后期强度较高的合格充填料浆,以满足管道输送的流动性、充填采矿的强度要求等。作为充填料浆中最主要的组成成分,充填骨料的用量占比通常高达50%~75%,因此,充填骨料的选择必须首先考虑来源广泛、价格低廉、安全环保、无毒无害的原则^[4-5]。

浙江省遂昌金矿有限公司(下称“遂昌金矿”)采矿方法由留矿采矿法变更为充填采矿法,其关键在于充填工艺与充填系统。为确定铅锌矿尾砂及花岗岩岩粉作为充填骨料的可行性及具体配比参数,开展了试验研究、理论分析和方案对比,并对其作为充填骨料的性能进行科学评价,以期对矿山安全高效开采提供理论支持。

1 充填材料选择

1)选矿尾砂。虽然遂昌金矿的选金尾砂产出率

高达90%以上,但是由于其尾矿中含有氰化物等污染物成分,不能作为充填骨料充填至井下采空区。遂昌金矿中部铅锌矿段产生的铅锌尾矿则不含有毒有害的污染物成分,可作为充填骨料来源。目前,矿山新建尾矿脱水系统一套,将铅锌尾矿先分级后脱水至滤饼状态,获得的产物为质量比1:1的粗、细粒径2种尾砂^[6]。

2)花岗岩岩粉。矿山所在的浙江省遂昌县有一定数量的露天采石场,采石加工过程中会产生一定量的尚无法有效利用的固体废弃物——花岗岩岩粉。考虑到运输距离较近,确定采用花岗岩岩粉作为辅助充填骨料。

3)胶凝材料。硅酸盐水泥主要化学成分为CaO(64%~67%)、SiO₂(21%~24%)、Al₂O₃(4%~7%)、Fe₂O₃(2%~4%)等。因此,本次试验选用湖南宁乡南方水泥有限公司生产的强度等级42.5的普通硅酸盐水泥作为胶凝材料进行充填配比试验^[7]。

2 充填材料试验研究

2.1 充填骨料物理力学性质

充填骨料的物理力学性能和化学成分及其含量对充填体强度、沉降率、渗滤水性能等充填参数有重要影响^[8-10]。尾砂和花岗岩岩粉的粒径组成及性质见表1,粒径组成曲线见图1和图2。

2.2 充填骨料化学成分分析

化学成分测定方法主要包括X射线荧光光谱法(XRF)、原子吸收法、钼蓝光度法、EDTA滴定法、

收稿日期:2024-08-20; 修回日期:2024-10-12

基金项目:湖南省科技创新计划资助项目(2023RC3035);湖南省自然科学基金项目(2021JJ40745)

作者简介:陈俊宇(1990—),男,助理工程师,从事金属矿山采矿工程技术研究工作;E-mail:429375628@qq.com

*通信作者:李帅(1989—),男,副教授,博士,研究方向为充填采矿工艺技术;E-mail:3177109683@qq.com

表 1 充填骨料粒径组成及性质

Table 1 Particle size distribution and property of filling aggregate

充填骨料	控制粒径 $d_{60}/\mu\text{m}$	中值粒径 $d_{50}/\mu\text{m}$	$d_{30}/\mu\text{m}$	有效粒径 $d_{10}/\mu\text{m}$	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c	比表面积/ ($\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$)
粗粒径尾砂	162.392	117.385	61.574	27.370	5.93	0.85	164.6
细粒径尾砂	163.480	111.785	45.610	4.580	35.69	2.78	565.3
花岗岩岩粉	25.71	18.40	7.950	1.790	14.36	1.37	

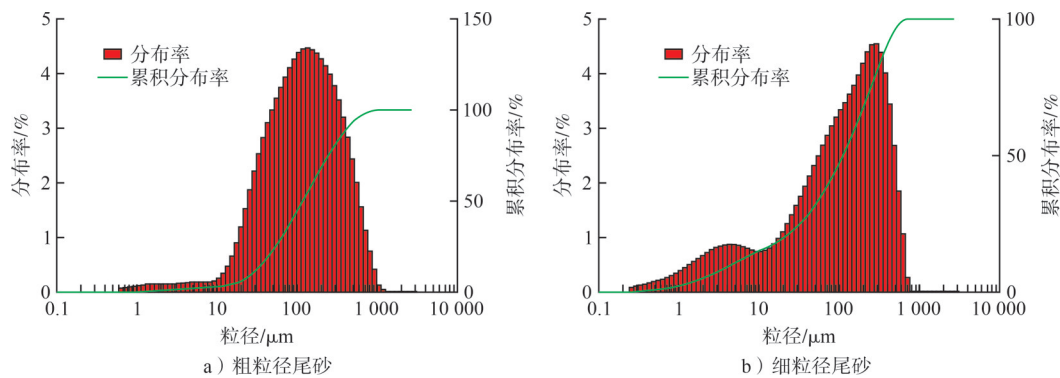


图 1 尾砂粒径组成曲线

Fig. 1 Particle size distribution curves of tailings

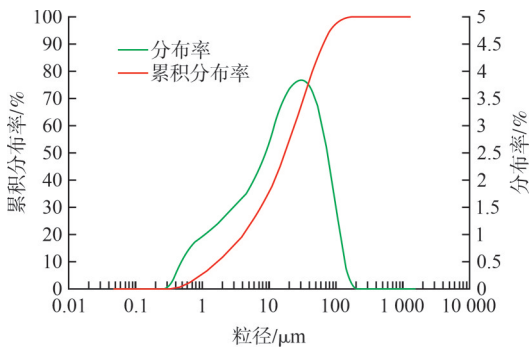


图 2 花岗岩岩粉粒径组成曲线

Fig. 2 Particle size distribution curve of granite powder

EDTA 容量法、电位法、返滴定法等。基于 XRF 的粗粒径、细粒径尾砂化学成分测试结果见表 2。测试结果表明：铅锌尾砂中以 SiO_2 (占比约 66%)、 Al_2O_3 (占比约 13%) 为主，还有少量 CaO 、 K_2O 、 Fe_2O_3 、 MnO 、 SO_3 、 MgO 等。

基于 XRF 的花岗岩岩粉化学元素测试结果见表 3。测试结果表明：花岗岩岩粉中以 O (占比 47.3%)、Si (占比 30.78%)、Al (占比 8.333%)、K (占比 3.588%)、Na (占比 3.4%)、Ca (占比 2.199%)、Fe (占比 2.036%) 元素为主，主要包含石英、长石、绿泥

表 2 基于 XRF 的粗、细粒径尾砂化学成分测试结果

Table 2 Test results of chemical composition of coarse and fine tailings based on XRF

成分	SiO_2	Al_2O_3	CaO	K_2O	Fe_2O_3	MnO	SO_3	MgO	其他
w (粗粒径尾砂)/%	65.970	13.100	4.502	3.974	3.656	2.459	1.420	0.967	3.952
w (细粒径尾砂)/%	66.030	13.470	4.103	4.082	3.653	2.354	1.470	0.897	3.941

石、云母、磁铁矿、角闪石等成分。

表 3 基于 XRF 的花岗岩岩粉化学元素测试结果

Table 3 Test results of chemical elements of granite powder based on XRF

分析元素	O	Si	Fe	Al	S	Ca	Zn	Mg	K	Mn
w /%	47.3	30.78	2.036	8.333	0.016	2.199	0.009 7	0.971	3.588	0.062 4
分析元素	P	Cu	Na	Ti	Ba	Cl	Sr	Zr	Rb	
w /%	0.137	0.008 7	3.4	0.343	0.11	0.024	0.033	0.008 6	0.008 6	

2.3 充填骨料性能评价

1)经高频振动筛筛分后获得的粗粒径尾砂平均含水率为 12%，经板框式压滤机压滤后获得的细粒径尾砂平均含水率为 20%，花岗岩岩粉的平均含水

率为 18%，均满足汽车运输、地面临时堆存和制备充填料浆的要求。

2)粗粒径尾砂中 37 μm 以下占比 16.44%，74 μm 以下占比达到 35%，中值粒径为 117.385 μm ，说明尾砂

粒径较粗,对充填体强度提升有利,但不利于长距离管道输送;细粒径尾砂中 37 μm 以下占比 27.2 %, 74 μm 以下占比达到 40 %,中值粒径为 111.785 μm ,说明尾砂粒径为细—中粗粒径,是较为适宜的充填骨料;花岗岩岩粉中 18 μm 以下占比约 50 %,37 μm 以下占比达到 72 %,中值粒径仅为 18.40 μm ,说明花岗岩岩粉粒径超细,对管道磨损较小,有利于长距离管道输送^[11]。

3)根据尾砂级配,粗粒径尾砂不均匀系数较小,颗粒级配相对良好;细粒径尾砂和花岗岩岩粉级配不均匀系数均较大($C_u>10$,且曲率系数 $C_c>1$),属于间断级配的颗粒散体,可能会影响胶结充填体的强度发展。

4)化学成分测定结果表明,粗、细粒径尾砂中含硫约为 1.4 %,花岗岩岩粉中含硫为 0.016 %,且不含其他杂质成分,不会对充填体的强度产生影响。

综上所述,遂昌金矿所提供粗粒径尾砂粒径较粗、细粒径尾砂粒径细—中粗、花岗岩岩粉粒径超细,颗粒的粗细程度对管道磨损和充填体强度均会产生不同的影响。

3 充填配比试验研究

3.1 充填配比强度试验

试验主要在充填骨料物理力学性能测定基础上,选择不同充填配比参数,制备室内充填体试块,测定其养护期为 3 d、7 d、28 d 的充填体单轴抗压强度,然后通过综合技术经济分析,优化选择充填材料及其最优配比参数^[12-13]。

1)细粒径尾砂充填配比试验。通过强度等级 42.5 普通硅酸盐水泥与细粒径尾砂的配比探索试验,发现满足自流输送条件的充填料浆浓度为 66 % ~ 68 %,充填配比试验结果见表 4。由表 4 可知:细粒径尾砂与水泥拌和所形成的充填体,在相同灰砂比条件下,料浆浓度越高,抗压强度更大;在相同料浆浓度条件下,灰砂比越大,抗压强度越大^[14-15]。同时,考虑到充填料浆浓度越高,泵送阻力越大,建议遂昌金矿细粒径尾砂普通胶结充填料浆浓度为 66 %、灰砂比为 1:8,7 d 抗压强度可达到 1.26 MPa。

2)粗、细粒径尾砂质量比 1:1 混合充填配比试验。按照粗、细粒径尾砂质量比 1:1 的比例,通过强度等级 42.5 普通硅酸盐水泥与粗、细粒径尾砂的配比探索试验,发现满足自流输送条件的充填料浆浓度为 70 % ~ 72 %,充填配比试验结果见表 5。由表 5 可知:添加粗粒径尾砂后,尾砂粒径更加均匀,充填体强度略有提升。同时,考虑到充填料浆浓度越高,泵送阻力越大,建议遂昌金矿按照粗、细粒径尾砂质量比 1:1

表 4 细粒径尾砂胶结充填配比试验结果

Table 4 Test results of ratios of fine tailings for cementation filling

灰砂比	料浆浓度/%	3 d 抗压强度/MPa	7 d 抗压强度/MPa
1:4	66	1.75	3.11
1:8	66	0.44	1.26
1:12	66	0.20	0.82
1:20	66	0.10	0.25
1:4	68	1.92	3.52
1:8	68	0.52	1.44
1:12	68	0.32	0.95
1:20	68	0.14	0.41

的比例混合后,普通胶结充填料浆浓度为 70 %、灰砂比为 1:8,7 d 抗压强度可达到 1.41 MPa。

表 5 粗、细粒径尾砂质量比 1:1 混合胶结充填配比试验结果

Table 5 Test results of coarse and fine tailings mixed at 1:1 for cementation filling

灰砂比	料浆浓度/%	3 d 抗压强度/MPa	7 d 抗压强度/MPa
1:4	70	1.05	2.84
1:8	70	0.51	1.41
1:12	70	0.21	0.53
1:20	70	0.11	0.25
1:4	72	1.37	3.06
1:8	72	0.65	1.92
1:12	72	0.23	0.71
1:20	72	0.16	0.32

3)粗、细粒径尾砂质量比 2:1 混合充填配比试验。按照粗、细粒径尾砂质量比 2:1 的比例,通过强度等级 42.5 普通硅酸盐水泥与粗、细粒径尾砂的配比探索试验,发现满足自流输送条件的充填料浆浓度为 72 % ~ 74 %,充填配比试验结果见表 6。由表 6 可知:添加大量粗粒径尾砂后,尾砂粒径更加均匀,充填体强度略有提升,但提升效果并不明显。同时,考虑到充填料浆浓度越高,泵送阻力越大,建议遂昌金矿按照粗、细粒径尾砂质量比 2:1 的比例混合后,普通胶结充填料浆浓度为 72 %、灰砂比为 1:8,7 d 抗压强度可达到 1.43 MPa。

4)花岗岩岩粉胶结充填试验。通过强度等级 42.5 普通硅酸盐水泥与花岗岩岩粉的配比探索试验,发现满足自流输送条件的充填料浆浓度为 72 % ~ 74 %。胶结充填配比试验结果见表 7。由表 7 可知:与水泥拌和所形成的充填体,在相同灰砂比条件下,料浆浓度越高,抗压强度越大;在相同料浆浓度条件下,灰砂比越大,抗压强度越大。同时,考虑到充填料浆浓度越高,泵送阻力越大,建议遂昌金矿花岗岩岩粉充填料浆浓度

表 6 粗、细粒径尾砂质量比 2:1 混合胶结充填配比试验结果
Table 6 Test results of coarse and fine tailings mixed at 2:1 for cementation filling

灰砂比	料浆浓度/%	3 d 抗压强度/MPa	7 d 抗压强度/MPa
1:4	72	1.65	3.72
1:8	72	0.53	1.43
1:12	72	0.28	0.74
1:20	72	0.15	0.46
1:4	74	1.87	3.99
1:8	74	0.60	1.74
1:12	74	0.34	0.86
1:20	74	0.20	0.54

为 72 %、灰砂比为 1:8,7 d 抗压强度可达到 1.21 MPa。

表 7 花岗岩岩粉胶结充填配比试验结果
Table 7 Test results of granite powder ratios for cementation filling

灰砂比	料浆浓度/%	7 d 抗压强度/MPa	28 d 抗压强度/MPa
1:4	72	1.47	4.03
1:8	72	1.21	2.28
1:12	72	0.89	1.79
1:20	72	0.22	0.60
1:4	74	3.02	5.69
1:8	74	1.24	2.70
1:12	74	1.02	1.60
1:20	74	0.31	0.72

3.2 充填料浆密度和泌水率测定

充填料浆的密度是充填制备与输送系统设计的重要参数,而充填料浆的泌水率(料浆凝固后的滤水量与浆体质量之比)是衡量充填料浆进入采场后脱水量的重要指标,直接影响充填采场脱、滤水装置的设计和充填体的早期强度^[16-18]。分析各配比密度、泌水率测试结果,可以得出如下结论:

1)在灰砂比一定条件下,料浆密度随料浆浓度的提高而增大,这是因为浓度越高,单位体积内固料含量越高。

2)泌水率随料浆浓度的增大而减小,但与灰砂比之间无确切规律可循,因此,为减少充填采场内泌水量,在保证料浆流动性的同时,应尽量提高充填料浆浓度。

3)所试验胶结充填料浆泌水率都小于 5 %,说明试验所取浓度较高,达到似膏体的状态。泌水率小不仅能有效缩短充填体初凝时间,而且也有利于简化采场滤水工程布置,减少因大量脱水造成的井下环境污染。

3.3 充填料浆流动性能参数

充填配比强度试验给出了不同配比充填强度指标,但这仅是充填配比优化的一个方面,合理的充填配比不仅要满足强度指标要求,更要保证料浆具有良

好的流动性和管道输送性能。高浓度充填料浆的流变特性测试和研究,对深入了解其在管道中的运动状态和变化特点,指导充填系统设计和工业生产,调节充填物料配比,确定管输参数等都有重要意义。奥地利 MCR702 安东帕流变仪可用于精确、快速、方便地测量黏度及液体和半固体样品的流动行为^[19]。细粒径尾砂充填料浆,粗、细粒径尾砂质量比 1:1 混合充填料浆,花岗岩岩粉充填料浆的部分流变特性测试结果见图 3、图 4。流变特性主要包括充填料浆的屈服应力、黏度和剪切应力。

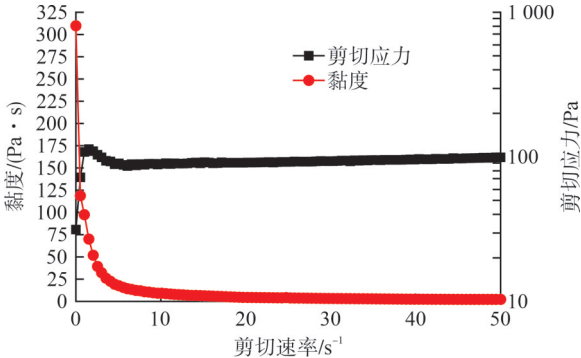


图 3 粗、细粒径尾砂质量比 1:1 混合充填料浆黏度曲线 (灰砂比 1:8、料浆浓度 70 %)

Fig. 3 Viscosity curve of fine and coarse tailings mixed at 1:1 for filling slurry (cement-sand ratio 1:8, filling slurry concentration 70 %)

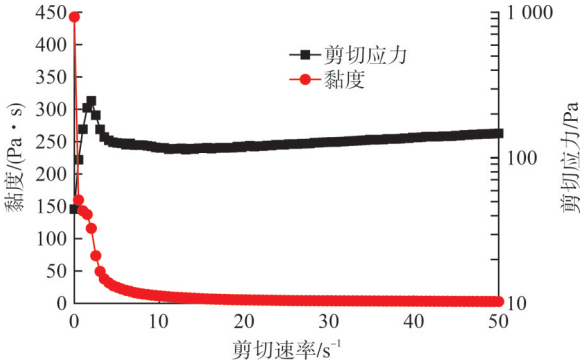


图 4 花岗岩岩粉黏度曲线 (灰砂比 1:8、料浆浓度 72 %)

Fig. 4 Viscosity curve of granite powder

3.4 充填配比参数推荐

根据遂昌金矿开采技术条件和配比试验结果,综合考虑技术和经济因素^[20-21],建议胶凝材料采用强度等级 42.5 普通硅酸盐水泥,推荐铅锌尾砂和花岗岩岩粉的充填配比参数见表 8 和表 9。

4 结 论

1)经高频振动筛筛分后获得的粗粒径尾砂平均含水率为 12 %,经板框式压滤机压滤后获得的细粒径尾砂的平均含水率为 20 %,花岗岩岩粉的平均含水率为 18 %,均满足汽车运输、地面临时堆存和制备充填料浆的要求。

表 8 推荐铅锌尾矿充填配比参数

Table 8 Recommended filling ratio parameters for lead-zinc tailings

充填步骤	充填用途	水泥、粗粒径尾砂、 细粒径尾砂质量比	料浆浓度/%	密度/(t·m ⁻³)	抗压强度/MPa	充填高度/m	占比/%
一步骤	全断面充填	1:4:4	70	1.95	7 d≥1.2	3.3 ~ 3.4	5
二步骤	打底充填	1:0:20	66	1.93	7 d≥0.2	2.8 ~ 2.9	80
	胶面充填	1:4:4	70	1.95	7 d≥1.2	0.5	10
	底部分层人工假顶	1:3:3	70	1.96	56 d≥4.0	3.3 ~ 3.4	5

表 9 推荐花岗岩岩粉充填配比参数

Table 9 Recommended filling ratio parameters for granite powder

充填步骤	充填用途	灰砂比	料浆浓度/%	密度/(t·m ⁻³)	抗压强度/MPa	充填高度/m	占比/%
一步骤	全断面充填	1:8	72	1.81	7 d≥1.2	3.3 ~ 3.4	5
二步骤	打底充填	1:20	72	1.86	7 d≥0.2	2.8 ~ 2.9	80
	胶面充填	1:8	72	1.81	7 d≥1.2	0.5	10
	底部分层人工假顶	1:6	72	1.79	56 d≥4.0	3.3 ~ 3.4	5

2)粗粒径尾砂中37 μm以下占比16.44 %,74 μm以下占比达到35 %,中值粒径为117.385 μm,说明尾砂粒径较粗,对充填体强度提升有利,但不利于长距离管道输送;细粒径尾砂中37 μm以下占比27.2 %,74 μm以下占比达到40 %,中值粒径为111.785 μm,说明尾砂粒径为细一中粗粒径,是较为适宜的充填骨料;花岗岩岩粉中18 μm以下占比约50 %,37 μm以下占比达到72 %,中值粒径仅为18.40 μm,说明花岗岩岩粉粒径超细,对管道磨损较小,有利于长距离管道输送。

3)根据尾砂级配,粗粒径尾砂不均匀系数均较小,颗粒级配相对良好;细粒径尾砂和花岗岩岩粉不均匀系数均较大($C_u>10$,且曲率系数 $C_c>1$),属于间断级配的颗粒散体,可能会影响胶结充填体的强度发展。化学成分测定结果表明,粗、细粒径尾砂中含硫约为1.4 %,花岗岩岩粉中含硫为0.016 %,且不含其他杂质成分,不会对充填体的强度产生影响。

4)粗、细粒径尾砂质量比2:1和1:1混合充填配比试验,充填料浆浓度72 %、灰砂比1:8,7 d抗压强度分别为1.92 MPa和1.43 MPa,均满足充填体强度要求。

[参 考 文 献]

[1] 王刚.无底柱浅孔留矿法回采技术的应用研究[J].冶金与材料,2024,44(11):86-88.

[2] 刘银,张晶,周宗红,等.浅孔留矿法采场结构参数综合评价体系构建及应用[J].矿业研究与开发,2024,44(9):18-25.

[3] 许冰.浅孔留矿采矿法在内蒙古某矿山的应用[J].有色矿冶,2023,39(5):19-21.

[4] 王新民,古德生,张钦礼.深井矿山充填理论与管道输送技术[M].长沙:中南大学出版社,2010.

[5] 张涛,李德贤,张鹏强,等.镍渣-全尾砂混合骨料配比试验研究[J].黄金科学技术,2024,32(3):437-444.

[6] 中南大学,浙江省遂昌金矿有限公司.软弱岩层条件下高品位金

银资源安全高效低贫损充填采矿可行性研究报告[R].长沙:中南大学,2021.

[7] LI S,ZHANG R,FENG R,et al.Feasibility of recycling bayer process red mud for the safety backfill mining of layered soft bauxite under coal seams[J].Minerals,2021,11(7):722.

[8] 侯俊.某矿山浮选尾矿充填材料特性试验研究[J].黄金,2023,44(8):26-29,34.

[9] 张果瑞,王赞潇,刘羿甫.无活性固废作为细骨料对充填体强度的影响与优化[J].金属矿山,2024(11):284-288.

[10] 郑治栋.混合骨料胶结充填体的力学性能及其配比优化设计[J].冶金管理,2023(11):78-80.

[11] 李帅,王新民,张钦礼,等.超细全尾砂似膏体长距离自流输送的时变特性[J].东北大学学报(自然科学版),2016,37(7):1 045-1 049.

[12] 李帅,于正,冯如,等.基于RSM-BBD的拜耳法赤泥胶结充填配比优化[J].黄金,2022,43(1):34-41.

[13] 康国伟,严庆文,王洪江,等.基于深锥底流极限质量分数的全尾砂膏体配比参数优化[J].矿业研究与开发,2022,42(3):147-152.

[14] LI S,YU Z,YU H,et al.The recent progress china has made in high-concentration backfill[J].Sustainability,2022,14(5):2 758.

[15] 李坤,潘彦臻,胡骅,等.混合碎石料配比对浆体流动性能和充填体强度的影响[J].科技创新与应用,2024,14(20):65-69.

[16] YU H,LI S,WANG X M.The recent progress china has made in the backfill mining method, part III: Practical engineering problems in stope and goaf backfill [J]. Minerals,2022,12(1):88.

[17] 徐毅安,邓博团.粗骨料充填料浆泌水特性及其对充填体性能的影响[J].金属矿山,2022(11):271-276.

[18] 宋学林.纤维全尾砂胶结充填体早期力学性能及损伤破裂机制研究[D].赣州:江西理工大学,2024.

[19] LI S,YU Z,HU B,et al.Effect of flocculants residue on rheological properties of ultra-fine argillaceous backfilling slurry[J].Materials,2022,15(18):6485.

[20] 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.

[21] 陈金刚,杨超.充填料浆配比参数试验研究[J].中国矿业,2023,32(增刊2):219-222,228.