

全尾砂充填试验及充填系统方案研究

Total Tailings Filling Test and Scheme Study on Filling System

王立刚¹, 彭剑平¹, 林健¹, 王炳炜¹, 王怀勇²

(1. 招金矿业股份有限公司, 山东 招远 265400; 2. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

摘要:某地下矿山采用分级尾砂和废石胶结充填, 存在充填设备老化、井下充填泌水率高、料浆离析严重等问题, 迫切需要新建充填系统。本文根据可供选择的充填骨料来源和回采工艺要求, 进行了全尾砂充填材料试验研究, 确定了全尾砂胶结充填料浆输送浓度范围为 68% ~ 72%, 选择灰砂比为 1:6、1:10 和 1:20 三种充填料浆。根据充填试验结果, 选择了全尾砂高浓度自流输送充填工艺, 并就全尾砂沉降装置进行了技术和经济比较, 选择了新型立式砂仓作为尾砂浓缩装置, 为充填站建设提供了依据。

关键词:全尾砂胶结充填; 高浓度; 立式砂仓; 深锥浓密机; 充填系统

中图分类号: TD853 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2022)01-0045-06

Abstract: An underground mine uses graded tailings and waste rock for consolidated filling where there exist such problems as aging filling equipment, high bleeding rate of underground filling, and serious slurry segregation, thus, construction of a new filling system is urgently needed. In this paper, an experimental research on the materials used for total tailings filling was carried out based on available filling aggregate sources and the extraction process requirements, the slurry transport density range of 68% ~ 72% was defined for consolidated filling with total tailings, and three types of filling slurry respectively with a concrete-tailing ratio of 1:6, 1:10 and 1:20 were chosen. According to the results of the filling test, the total tailings high-density gravitating transport and filling process was selected, and a technical and economic comparison of the total tailings settling devices was carried out. Ultimately, a new type of vertical silo was selected as the tailings thickening device, which provided the basis for the construction of the filling station.

Key words: consolidated filling with total tailings; high density; vertical silo; deep cone thickener; filling system

1 前言

随着充填技术的发展, 各类充填方式不断出现, 目前常用的胶结充填方式有高水胶结充填、粉煤灰胶结充填、矿渣胶结充填、全尾砂胶结充填、块石胶结充填和膏体充填等, 需要根据充填骨料来源和回采工艺要求等综合选择适应本矿山的充填工艺。对于矿山企业而言, 充填体强度高增加了充填成本, 而充填体强度过低又影响着回采安全和效率。影响胶结充填体强度的因素有充填浓度、尾砂级配、胶凝材料、灰砂比、添加剂和养护龄期等^[1-2], 常常在实验室内进行材料配比试验、流变特性试验和输送试验等确定充填料浆的参数, 为设计和生产提供依据。

某地下矿山采用上向水平分层充填采矿法回

采, 每分层底部采用废石充填, 底部采用分级尾砂胶结料浇面。矿山建有一套立式砂仓作为尾砂浓缩装置的分级尾砂胶结充填系统, 现有充填系统工艺老化, 在生产过程中分级尾砂充填料浆脱水率高、输送离析严重, 并且因分级尾砂消耗量太少而缩短了尾砂库服务年限等问题, 迫切需要新建充填系统。本文选择全尾砂作为充填骨料进行了全尾砂充填试验研究, 再根据充填试验结果, 对可供选用的充填方案进行比选研究, 确定合理的充填方案, 以指导矿山的决策和生产。

2 充填材料试验研究

2.1 全尾砂物理性质测试

1) 全尾砂密度

参照国标《土工试验方法标准》GB/T 50123—2019 和《土工试验规程》SL 237—1999 测得全尾砂的密度为 2.70 t/m³。

2) 全尾砂粒级组成

实验室先采用筛析法测量 + 30 μm 粒级组成, 再采用 LS-POP(VI) 型激光粒度分析仪测量 - 30

[作者简介] 王立刚(1972-), 男, 山东招远市人, 工程师, 从事金属矿山地质工程技术研究与管理、矿山充填管理等工作。

[引用格式] 王立刚, 彭剑平, 林健, 等. 全尾砂充填试验及充填系统方案研究[J]. 中国矿山工程, 2022, 51(1): 45-50.

μm 粒径组成,两种方法测试数据相结合后得到全尾砂粒径组成,具体情况见表1。全尾砂粒径特征参数为: $d_{10} = 5.10 \mu\text{m}$, $d_{50} = 49.20 \mu\text{m}$, $d_{60} = 75.00 \mu\text{m}$, $d_{90} = 183.00 \mu\text{m}$,平均粒径为 $79.79 \mu\text{m}$ 。

表1 全尾砂粒径组成

粒径/ μm	产率/%	累计/%	粒径/ μm	产率/%	累计/%
-2	2.31	2.31	-48	10.45	49.20
-5	7.66	9.97	-74	10.36	59.56
-10	7.22	17.18	-100	4.68	64.24
-20	12.91	30.10	-154	8.65	72.89
-30	5.00	35.09	+154	27.11	100.00
-37	3.66	38.75			

从试验结果可以看出,全尾砂属于中粗尾砂。

2.2 全尾砂料浆泌水率试验

料浆充填到采空区后,一部分水形成结晶水和毛细水成为胶结体的一部分,其余水则通过泌水渗出。反应多余水以自由状态泌出,本试验采用自由泌水率的方法测定各组方料浆的泌水性,测定结果如图1所示。

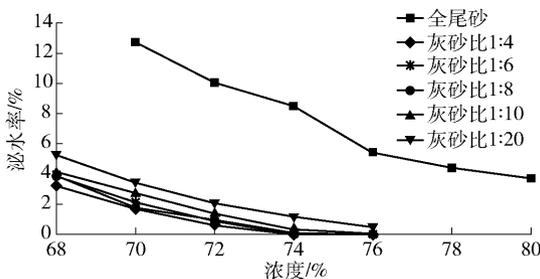


图1 测定组方泌水率与浓度曲线图

从试验可以看出,泌水率随着胶固粉添加量增多而降低,随着质量浓度的增大而减少,非胶结充填料浆的泌水率普遍大于胶结充填料浆的泌水率。浓度68%以上非胶结充填料浆和胶结充填料浆,均不离析;对于胶结充填料浆而言,当浓度达到70%以上时,泌水率均小于3%。

2.3 全尾砂料浆配比试验

实验室参考《土工试验规程》SL 237—1999 中无侧限抗压强度试验方法,测试了不同浓度、灰砂比和养护龄期条件下的试块单轴抗压强度^[3]。试块采用的三联砂浆试模尺寸为 $70.7 \text{ mm} \times 70.7 \text{ mm} \times 70.7 \text{ mm}$ 。试验采用矿山使用的胶固粉作胶凝材料,全尾砂作为骨料。选取充填料浆质量浓度分别为70%、72%,灰砂比分别为1:6、1:10、1:20,养护龄期为3 d和7 d。试验结果如图2所示。

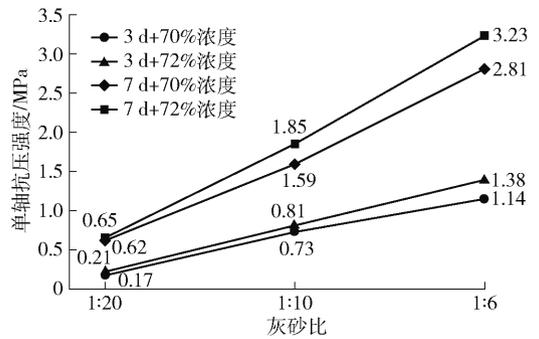


图2 不同灰砂比条件下试块强度曲线图

试验结果表明:(1)在相同胶固粉添加量条件下,随着料浆浓度的增加,充填体单轴抗压强度呈逐渐增大的趋势。灰砂比1:6、1:10和1:20的充填体单轴抗压强度变化较大,随着灰砂比的降低,充填体在3 d和7 d养护龄期的单轴抗压强度呈明显的减小趋势。灰砂比的降低意味着胶凝材料的减少,从而导致水化反应所生成的C—S—H凝胶越少,颗粒不能有效的凝固在一起,表现为颗粒之间孔隙更大,当充填体受到无轨设备压力时更容易出现破坏。(2)在相同浓度条件下,随着养护龄期的增长,充填体单轴抗压强度增长明显,养护龄期的增大,胶固粉发生水化反应所生成的C—S—H凝胶越多,充填体强度不断增大。

2.4 全尾砂料浆输送特性试验

1) 坍落度试验

坍落度是反映充填料浆流动性好坏的指标,坍落度值越大,料浆流动性能越好,料浆流动阻力越小。充填料浆能够在采场顺利流动的情况下,坍落度值应在150~250 mm,扩散度以200~500 mm为宜。实验室选用标准坍落度桶,测试了灰砂比1:6、1:10、1:20、全尾砂,浓度范围为70%~76%料浆的坍落度和扩散度测试,结果见表2。配比1:20的70%浓度组方、全尾砂70%和72%组方中,由于料浆流动性太好,坍落度桶提起来后,料浆已经完全散开,因此没有进行扩散度测试。

试验结果表明:①随着浓度的增加,坍落度和扩散度呈下降趋势;②相同浓度的全尾砂坍落度和扩散度比胶结料浆高;③相同浓度的胶结充填料浆,水泥添加量越多,坍落度和扩散度越小;④采用全尾砂作为充填骨料,流动性能较好。

2.5 全尾砂料浆流变特性试验

全尾砂充填料浆的流变特性参数由屈服应力和黏度系数描述,是衡量其输送性能的重要指标。

表2 不同配比不同浓度坍塌度试验数据

灰砂比	浓度/	扩散	坍塌	灰砂比	浓度/	扩散	坍塌
	%	度/mm	度/mm		%	度/mm	度/mm
1:6	70	1 000	275	1:10	70	1 120	282
	72	673	267		72	880	275
	74	617	263		74	817	272
	76	382	205		76	383	228
1:20	70	-	300	全尾砂	70	-	300
	72	840	277		72	-	300
	74	807	279		74	967	285
	76	510	260		76	790	275

表3 实际管径下充填料浆在沿程阻力损失与最大允许倍线

灰砂比	料浆浓度/ %	容重/ $t \cdot m^{-3}$	Bingham 屈服 应力 τ_0/Pa	Bingham 黏度 $\mu_{(B)}/Pa \cdot s$	沿程阻力损失 $i/MPa \cdot km^{-1}$	最大允许充填倍 线 N_{max}
全尾砂	70	1.78	0.00	0.12	0.6	22.9
	72	1.82	8.08	0.14	1.1	14.1
	74	1.87	22.04	0.24	2.2	6.9
	76	1.92	53.77	0.28	3.8	4.1
	78	1.97	78.52	1.40	10.7	1.5
灰砂比 1:6	68	1.76	13.44	0.11	1.1	12.5
	70	1.8	24.21	0.10	1.6	9.3
	72	1.84	48.42	0.10	2.6	5.7
	74	1.88	98.87	0.15	5.1	3.0
灰砂比 1:10	68	1.75	10.06	0.12	1.1	13.4
	70	1.79	21.76	0.14	1.7	8.7
	72	1.84	44.81	0.23	3.1	4.8
	74	1.88	95.22	0.20	5.2	3.0

充填料浆浓度越高,溢流水越少,随溢流水带出的泥砂也越少,因此应尽量提高充填料浆浓度。根据充填试验研究结果,按照现有充填系统所能达到的料浆浓度,并结合充填倍线,选择全尾砂胶结充填料浆自流输送质量浓度为68%~72%,选择灰砂比1:6、1:10和1:20三种充填料浆。

充填按照每天3班,每年作业330d工作制度。按充填质量浓度70%、生产规模3450t/d计算,日充填采空区1241m³,日需要充填料浆1499m³,全尾砂加权日耗1731t,胶固粉加权日耗150t,水加权日耗806t。现有充填系统消耗尾砂约500t/d,采用全尾砂充填后,多消耗尾砂1231t/d。

3.2 充填方案选择

在保证料浆输送和充填体强度的前提下,尽量提高料浆浓度,减少采场脱水。计算充填倍线在3~6,选择全尾砂高浓度自流充填工艺。

实验采用RST-SST型软固体流变仪测定充填料浆相应粘度和动态屈服应力,按照管道内径DN119mm计算流量100m³/h时的最大允许倍线,具体数据见表3。计算结果与矿山各中段实际的充填倍线进行比较,得出全尾砂胶结充填料浆输送浓度范围为68%~72%。

3 充填方案选择

3.1 充填材料与用量

充填骨料选用全尾砂,胶结材料选用胶固粉。

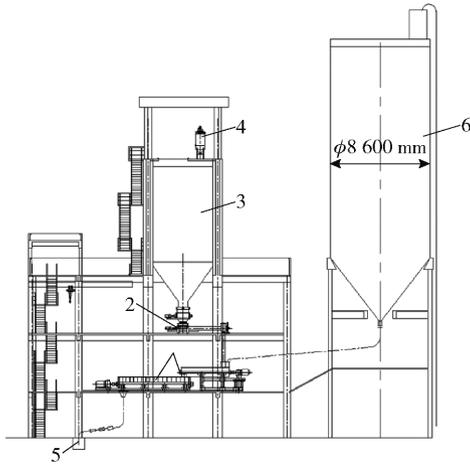
为满足井下采场充填作业工序的要求,共设2套充填制备系统,单套系统充填能力为80~100m³/h,充填料浆浓度68%~72%,单套系统充填尾砂干量约100t/h,正常充填时1套系统同时工作,最大充填时可2套同时工作。

充填站的关键设备为尾砂浓缩装置。根据矿山现有充填工艺的特点,结合尾砂充填实验结果、矿山生产实际需求,在保证制备能力、制备料浆质量和存贮要求的前提下,提出了两个尾砂浓缩方案^[3]:方案I新型立式砂仓方案、方案II深锥浓密机方案。

方案I设置2套制备系统,由2座 $\phi 8.6$ m新型立式砂仓、2台微粉秤、2套两级卧式搅拌机组成。方案I新建充填站配置如图3所示。新型立式砂仓采用高压水造浆。

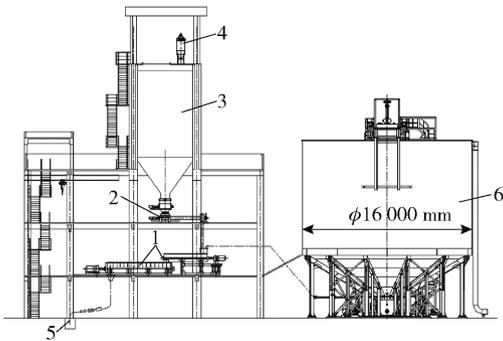
方案II设置2套制备系统,由1台 $\phi 16$ m深锥浓密机、2台微粉秤、2套两级卧式搅拌机组成。方

案Ⅱ新建充填站配置如图4所示。



1—两级卧式搅拌机;2—微粉秤;3—水泥仓;4—收尘器;5—充填钻孔;6—新型立式砂仓

图3 方案Ⅰ新建充填站配置图



1—两级卧式搅拌机;2—微粉秤;3—水泥仓;4—收尘器;5—充填钻孔;6—深锥浓密机

图4 方案Ⅱ新建充填站配置图

两个方案充填站内配置相同。两个方案主要区别在于尾砂浓缩装置不同,方案Ⅰ为新型立式砂仓,

方案Ⅱ为深锥浓密机。

立式砂仓为圆筒仓,仓体常用钢结构或混凝土结构,仓体由圆柱形筒体和半球形底或锥形底组成,圆柱筒体段高度为直径的2~3倍,直径通常为6~10 m。主要由仓体、顶部检修平台及进料装置、底部放砂及放砂辅助设施等构成,可以满足全尾砂高浓度和膏体充填的工艺要求^[4-5]。传统立式砂仓存在放砂浓度低,放砂不稳定,不适应连续充填工况等缺点。中国恩菲工程技术有限公司开发的内部具有整体优化结构的新型立式砂仓(也称为“新型尾砂浓缩贮存装置”),其主要由仓体、顶部检修平台及进料装置、底部放砂及放砂辅助设施等构成,与传统的立式砂仓制备效果相比,底流浓度更高,流量更稳定,较好地解决了极细粒级的全尾砂沉降脱水难题,完全可以满足全尾砂高浓度甚至膏体充填的要求,已经在安徽冬瓜山铜矿、河北崇礼紫金金矿、江西香炉山钨矿、湖北大冶铁矿、刚果(金)KINSEDA铜矿等成功应用^[6-7]。

深锥浓密机是一种固/液分离的设备,主要由浓缩池体、支撑架、驱动装置、中心传动轴、耙架、过载保护装置、进料装置等组成。在浓缩池的中间安装有一根中心竖轴,轴的下端固定有一个十字形耙架,竖轴由固定在支架上的驱动装置带动旋转。深锥浓密机适用于处理细颗粒物料,在膏体充填工艺上应用比较广泛,我国2006年最早在会泽铅锌矿膏体充填中引入深锥浓密机。

选用新型立式砂仓或深锥浓密机均能够满足全尾砂充填的工艺要求,但两种设备特点不同,其优缺点进行对比见表4。

表4 新型立式砂仓与深锥浓密机优缺点对比表

方案	优点	缺点	处理类型
方案Ⅰ 新型立式砂仓	(1) 建设成本及运营费用低; (2) 占地面积小; (3) 工艺简单,维护简单,无耙架装置,更节能环保,没有压耙风险; (4) 具备一定的尾砂存储功能,能解决选矿生产与采矿充填作业的匹配问题; (5) 底流排放浓度高,流量稳定,有利于提高充填料浆浓度,降低充填成本	在初始放砂时,如果储砂时间较长,由于仓体内没有爬架及自循环,会导致初始浓度波动	分级尾砂或全尾砂
方案Ⅱ 深锥浓密机	(1) 集成化性能好; (2) 深锥底流有底流泵,在没有放砂需求时,可自循环。另深锥仓体内有爬架,可保证底部料浆的流动性,底流稳定浓度性较好	(1) 建设成本及运营、维护费用较高; (2) 占地面积大; (3) 仓体内有爬架和驱动装置,维护工作量大,仓体内有异物或大块物料进入时,易发生故障; (4) 浓度或砂位高时有压耙的风险; (5) 对进砂粒度分布要求较高	全尾砂或细粒级尾砂

充填系统方案经济比较结果见表5。

从表5可以看出,方案I建设投资节省投资省,可比充填经营成本低。

新建充填站站址位于已有充填场地附近,场地受限,立式砂仓单个设备占地面积小,且布置相对灵活。

表5 充填系统方案经济比较表(可比部分)

序号	项目	单位	方案I 新型立式砂仓	方案II 深锥浓密机	差值(方案II - 方案I)
1	充填耗电量	10 ³ kW·h/a	982	1 237	255
2	充填系统可比建设投资	万元	4 630	4 902	272
2.1	可比工程费用(含充填钻孔、充填管与联络道)	万元	3 429	3 674	245
2.2	工程建设其他费用	万元	597	588	-9
2.3	预备费用	万元	604	640	36
3	可比充填经营成本	万元/年	4 169	4 197	28
3.1	辅助材料	万元/年	3 732	3 732	
3.2	动力费	万元/年	118	135	17
3.3	人工薪酬	万元/年	231	231	
3.4	维修费	万元/年	88	99	12
4	可比吨矿充填成本	元/t	22.13	22.33	0.20

根据尾砂试验数据,本项目中全尾砂粒度适中,不属于极细粒级尾砂,新型立式砂仓对类似尾砂浓缩处理效果较好,能够满足高浓度充填的工艺要求。矿山现有充填站尾砂浓缩装置为立式砂仓,具有丰富的立式砂仓管理和使用经验,立式砂仓管理和使用方式同传统立式砂仓相近,现有技术人员及操作人员可以快速熟悉新建的充填搅拌系统。

结合技术和经济比较结果,选用方案I新型立式砂仓作为新建充填站的尾砂浓缩装置。

3.3 充填系统

充填站共设2套充填制备系统,充填站一层、二层间布置2套两级卧式搅拌机。充填站三层布置2台微粉秤用于计量并将胶固粉输送进入搅拌机料斗混合,另布置一套絮凝剂添加装置。控制室设在充填站二层。

胶固粉由罐车运至现场,然后通过罐车自带压气吹入胶固粉仓内。胶固粉给料输送设备采用微粉秤对搅拌机给料。设2套两级卧式搅拌机,待搅拌的介质为经砂仓浓缩的高浓度尾砂浆和水或是高浓度料浆添加胶固粉和水。

井下需要充填时,选厂产出的全尾砂经泵送至新型立式砂仓,经浓缩后的尾砂送至搅拌机内;需要胶结充填时,胶固粉由微粉秤按配比要求定量送入卧式搅拌机内,并按浓度要求添加定量的水,搅拌均匀后制备成合格的高浓度充填料浆,充填料浆经充

填管路自流输送至井下各中段采空区进行充填。不需要充填时,全尾砂由选厂直接输送至指定场地进行处理。

3.4 自动化控制

根据充填工艺改造方案,进行配套的检测及控制系统设计,将工艺设备、控制阀门及电机等执行机构、检测仪表的信号引入控制系统,实现设备及生产流程的远程控制,过程参数的自动调节,生产及安全连锁控制,从而提高劳动生产效率。

3.5 充填管选择

充填搅拌站单套系统输送能力为80~100 m³/h,计算所需充填管内径时取输送能力为100 m³/h。充填管内径按式(1)计算

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{3600\pi v_j}} \quad (1)$$

式中: D ——管道内径,m;

Q ——充充填泵流量,m³/h,取100 m³/h;

v_j ——充料浆流速,取2.5 m/s。

由式(1)计算充填管内径为0.119 m,即119 mm。

充填管壁厚按式(2)计算

$$\delta = PD/(2[\sigma]) + K \quad (2)$$

式中: δ ——管壁厚度,mm;

P ——管道所承受的最大压强,MP,经计算取12.35 MPa;

D ——管道内径, mm, 取 119 mm;

$[\delta]$ ——管材的抗拉许用应力, MPa, 双金属耐磨钢管取 100 MPa;

K ——磨损腐蚀量, mm, 对双金属耐磨钢管取 2 mm。

由式(2)计算, 得到 $\delta = 9.3$ mm。

由于充填骨料为全尾砂, 并要兼顾分级尾砂, 因此, 充填钻孔中的充填管选择耐磨效果较好的双金属复合耐磨管, 规格为 $\phi_{\text{外}} = 159$ mm, 壁厚 20 mm, 其中外层为 16Mn 材质, 厚度为 10 mm, 内层为耐磨层, 厚度为 10 mm。

平巷和管缆井中采用普通无缝钢管, 规格为 $\phi 146$ mm \times 12 mm。采场内敷设高密度 PE 管, 规格为 $\phi 146$ mm \times 20 mm。平巷中充填管之间采用法兰连接。

4 结论

(1) 进行了全尾砂实验室试验研究, 测得全尾砂 $-37 \mu\text{m}$ 的含量为 38.75%, $-74 \mu\text{m}$ 的含量为 59.56%, 全尾砂属于中粗尾砂。浓度 68% 以上的非胶结充填料浆和胶结充填料浆均不离析, 当浓度达到 70% 以上时, 泌水率均小于 3%。在相同胶固粉添加量条件下, 随着料浆浓度的增加, 充填体单轴抗压强度呈逐渐增大的趋势。

(2) 全尾砂料浆输送特性试验得出全尾砂胶结充填料浆输送浓度范围为 68% ~ 72%, 流动性能较好。

(3) 根据充填试验研究结果, 按照现有充填系统所能达到的料浆浓度, 并结合充填倍线, 选择全尾砂胶结充填料浆自流输送质量浓度为 68% ~ 72%,

选择灰砂比 1:6、1:10 和 1:20 三种充填料浆。

(4) 计算充填倍线为 3 ~ 6, 选择了全尾砂高浓度自流充填工艺。为满足井下采场充填作业工序的要求, 共设 2 套充填制备系统。经过技术和经济比较, 选择新型立式砂仓作为尾砂浓缩装置。

(5) 采用全尾砂胶结充填后, 每天减少向尾砂库排放尾砂量约 1 231 t(干量), 延长了尾矿库服务年限。

(6) 计算选择的充填管内径为 119 mm, 充填钻孔中的充填管选择耐磨效果较好的双金属复合耐磨管, 规格为 $\phi_{\text{外}} = 159$ mm, 壁厚 20 mm, 其中外层为 16Mn 材质, 厚度为 10 mm, 内层为耐磨层, 厚度为 10 mm。

[参考文献]

- [1] 于润沧. 金属矿山胶结充填理论与工程实践[M]. 北京:冶金工业出版社, 2020.
- [2] 王伟, 王怀勇, 裴斌, 等. 全尾砂充填材料配比及输送特性试验研究[J]. 有色设备, 2020, 34(3): 21 - 25.
- [3] 彭亮, 康瑞海, 柳小胜, 等. 某铅锌矿充填系统工艺选择研究分析[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(3): 28 - 32.
- [4] 任成伟, 乔登攀, 甘德清, 等. 尾砂自流充填系统中立式砂仓的研究及应用现状[J]. 中国矿业, 2018, 27(10): 148 - 151.
- [5] 贺茂坤, 李浩宇, 付建勋. 膏体深度浓缩技术与装备[J]. 有色设备, 2021, 35(3): 9 - 12.
- [6] 李冬青, 杨承祥, 施士虎. 全尾砂高浓度充填技术在深井矿山应用研究[J]. 金属矿山, 2009(7): 13 - 15, 23.
- [7] 万林海. 全尾砂胶结充填在某白钨矿山的应用[J]. 中国钨业, 2014(2): 1 - 4.