

绿色无尾矿山优化充填技术与关键装备研究

Study on Optimization of Filling Technology and Key Equipment of Green Tailings-free Mine

付建勋¹, 贺茂坤¹, 江国建², 王启健², 王怀勇¹

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 招金矿业股份有限公司大尹格庄金矿, 山东 招远 265414)

摘要:实现尾砂的综合利用是建设绿色无尾矿山的必要途径。面对技术的进步、政策的变化和市场的 uncertainty, 矿山尾砂综合利用设施及充填系统均应具备一定的适应性。本文结合某矿山实际情况, 将该矿选厂所产生的尾砂分为全尾砂、分级细尾砂、分级粗尾砂分别进行研究, 通过试验研究及理论计算等方式, 对不同尾砂作为充填材料所能消耗的总尾砂量、细尾砂量、运营成本等进行分析。并以此为基础, 对充填系统的优化设计及关键设备进行研究, 提出了可适应全尾砂充填、分级粗尾砂充填、分级细尾砂充填等多种不同充填工况的最优化充填工艺技术。

关键词:绿色无尾矿山; 尾砂充填; 尾砂综合利用

中图分类号: TD862

文献标志码: A

文章编号: 1672-609X(2022)03-0058-04

Abstract: Comprehensive utilization of tailings is a necessary way to build a green tailings-free mine. Faced with the progress of technology, the policy change and market uncertainty, comprehensive utilization facilities and filling system of tailings should have certain adaptability. According to the actual situation of a mine, the tailings produced by the concentrator of the mine are categorized into unclassified tailings, classified fine tailings and classified coarse tailings. Through experimental research and theoretical calculation, the total tailings amount, fine tailings amount and operating cost consumed by different tailings as filling materials are analyzed. On this basis, the optimized design and key equipment of the filling system are studied, and the optimal filling processes which can adapt to various filling conditions such as unclassified tailings filling, classified coarse tailings filling and classified fine tailings filling are put forward.

Key words: green tailings-free mine; tailings filling; comprehensive utilization of tailings

1 前言

我国现有尾矿堆存量已高达 200 多亿 t, 大量的尾矿堆积在尾矿库中, 形成了巨大的安全隐患和环境污染, 也造成了极大的资源浪费, 成为制约矿山可持续发展的关键因素之一。国内外较为普遍的尾砂利用方式为井下充填, 将尾砂与水、胶结剂等搅拌制备成胶结料浆充填至井下采空区^[1]。由于采矿充填工艺的局限性, 采用井下充填方式很难消耗掉全部尾矿, 尤其对于黄金矿等高尾砂产率矿山, 只能将约 20% ~ 40% 尾砂充填至采空区^[2]。目前, 国家对于尾矿这一大宗工业固废的管控力度不断加大, 国家及各省相继出台政策, 要求“尾矿库数量原则上只减不增”。在矿山现有尾矿库库容不足, 而又无新尾矿库可用的情况下, 剩余尾砂如何处理, 成为了

大批矿山所面临的“卡脖子”难题。

除井下充填外, 尾砂综合利用途径主要有尾矿再选^[3]、作为建筑砂石骨料直接利用、再加工成为建筑材料^[4]等, 不同尾砂利用方式对尾砂粒级的要求不同; 另一方面, 尾砂粒级对充填料浆的性质、充填设施选择、充填体强度等也有较大的影响^[5]。可见, 选择将何种粒级的尾砂用作井下充填或用于其他尾砂利用方式是实现绿色无尾矿山的关键问题之一。尾砂综合利用方式的选择还受矿山自身采选工艺、地域地区特点、政策及技术发展等影响, 因此, 绿色无尾矿山尾砂综合利用设施及充填系统应具备一定的适应性, 从而能够应对这些变化对矿山生产的影响。

本文结合某矿山实际情况, 将该矿选厂所产生的尾砂分为全尾砂、分级细尾砂、分级粗尾砂分别进行研究, 通过试验研究及理论计算等方式, 对不同尾砂作为充填材料所能消耗的总尾砂量、细尾砂量、运营成本(主要为胶固粉成本)等进行分析, 对充填系统的优化设计及关键设备进行研究, 提出了可适应

[作者简介] 付建勋(1990 -), 男, 工程师, 从事非煤矿山设计和科研工作。

[引用格式] 付建勋, 贺茂坤, 江国建, 等. 绿色无尾矿山优化充填技术与关键装备研究[J]. 中国矿山工程, 2022, 51(3): 58-61.

全尾砂充填、分级粗尾砂充填、分级细尾砂充填等多种不同充填工况的最优化充填工艺技术。

2 尾砂消耗量分析对比

2.1 充填材料计算及采矿工艺强度要求

该矿采选规模为 6 000 t/d,尾砂产率为 97%。充填骨料选用全尾砂、分级细尾砂或分级粗尾砂,胶凝材料为胶固粉,尾砂密度为 2.701 t/m³,胶固粉密度为 2.9 t/m³。为便于对不同尾砂进行对比,在充填料浆用量计算时,流失系数及沉缩比均按照相同考虑。

则日平均充填采空区体积为^[6]

$$V_n = \frac{V_k Z}{\gamma_k} = \frac{6\,000 \times 1}{2.78} = 2\,158 \text{ m}^3/\text{d}$$

式中: V_n ——日平均充填采空区体积,m³/d;

V_k ——矿石日产量,t/d;

Z ——充采比,取 $Z = 1$;

γ_k ——矿石体重,t/m³。

日平均充填料浆需用量为

$$Q_r = V_n K_1 K_2 = 2\,158 \times 1.02 \times 1.15 = 2\,531 \text{ m}^3/\text{d}$$

式中: Q_r ——日需料浆充填量,m³/d;

K_1 ——流失系数,取 1.02;

K_2 ——沉缩比,取 1.15。

该矿采用的采矿方法为上向进路充填法和上向水平分层充填法。根据采矿工艺要求,上向进路充填法一步骤进路底部和上向水平分层充填法矿房的底部均采用 3 d 强度 0.5 ~ 1.0 MPa 的充填料充填;上向进路充填法二步骤进路的底部和上向水平分层充填法矿柱的底部均采用低灰砂比胶结料浆充填,强度要求可自立。上向进路充填法和上向水平分层充填法顶部 0.5 m 采用 3 d 强度不低于 1.0 MPa 的充填料浇面。强度要求见表 1。

表 1 采矿工艺对充填体强度要求

序号	充填部位	3 d 强度要求/MPa	占比
1	上向进路充填法顶部; 上向水平分层充填法顶部	不低于 1.0	14%
2	上向进路充填法一步骤进路底部; 上向水平分层充填法矿房的底部	0.5 ~ 1.0	43%
3	上向进路充填法二步骤进路的底部; 上向水平分层充填法矿柱的底部	自立	43%

2.2 尾砂消耗量

根据采矿工艺对充填体强度要求及充填强度试

验结果,当分别采用全尾砂、分级细尾砂及分级粗尾砂作为充填材料进行井下充填时,充填料浆配比、浓度见表 2。

表 2 充填料浆浓度、配比参数

充填材料	充填浓度	灰砂比	3d 强度要求/ MPa	占比
全尾砂	70%	1:6	不低于 1.0	14%
		1:10	0.5 ~ 1.0	43%
		1:20	自立	43%
分级细尾砂	54%	1:3	不低于 1.0	14%
		1:5	0.5 ~ 1.0	43%
		1:8	自立	43%
分级粗尾砂	72%	1:8	不低于 1.0	14%
		1:15	0.5 ~ 1.0	43%
		1:25	自立	43%

该金矿尾砂产率为 97%,日均尾砂总产量为 5 820 t/d,分别采用全尾砂、分级细尾砂及分级粗尾砂作为充填材料进行充填时,井下充填日均消耗尾砂量、地表堆存日均新增尾砂量见表 3。

采用井下充填方式并不能将所有尾砂充填至井下,剩余尾砂堆存至地表采用其他尾砂综合利用方式进行处理。根据当地市场调研情况,目前粗粒级尾砂可作为建筑材料,市场较为稳定,而细粒级尾砂较难处理,须支付一定费用并交由相关固废处置单位进行处理,且粗、细尾砂在外运前,均需要在地表进行暂时堆存。

表 3 尾砂平衡表

项目	井下充填消耗尾砂		地表堆存尾砂干量(t/d)/ 体积(m ³ /d)	
	干量/t·d ⁻¹		体积(m ³ /d)	
	粗尾砂	细尾砂	粗尾砂	细尾砂
全尾砂充填	1 462	1 461	1 449/966	1 448/1 034
细尾砂充填	0	1 759	2 911/1 941	1 150/822
粗尾砂充填	2 911	233	0/0	2 676/1 912

采用粗尾砂充填方式,井下消耗总尾砂量最多,但大部分细尾砂须堆存至地表进行处理。采用细尾砂充填方式,井下消耗细尾砂量最多,但计算的总充填至井下的尾砂量最少,大量尾砂均须堆存至地表进行处理。采用全尾砂充填方式,井下消耗总尾砂量与粗尾砂充填相近,地表堆存细尾砂量也仅比细尾砂充填多约 300 t/d。

3 充填运营成本分析对比

充填运营成本主要包括辅助材料费(胶凝材

料、絮凝剂、充填管路等)、动力费、人工薪酬^[7]等,其中,胶凝材料成本一般占总运营成本50%以上。不同尾砂充填方式对胶凝材料消耗量影响较大,进而使得该种充填方式运营成本发生较大变化,其他费用变化对总成本影响不明显,本文中按照相同进行考虑。采用胶固粉作为井下充填胶凝材料,其单价参考该地区市场价格。分别采用全尾砂、分级细尾砂及分级粗尾砂作为充填材料进行充填时,其胶固粉用量及成本见表4。

表4 胶固粉用量及成本

项目	胶固粉日均消耗量/ $t \cdot d^{-1}$	单位成本/ $元 \cdot t^{-1}$	日均成本/ $万元 \cdot d^{-1}$
全尾砂充填	253	18.13	10.9
细尾砂充填	321	23	13.8
粗尾砂充填	197	14.12	8.5

可见,采用分级粗尾砂充填其胶固粉用量最少,充填运营成本最低,而采用分级细尾砂充填胶固粉消耗量最大,充填运营成本最高。

4 绿色无尾矿山优化充填技术

充填系统为绿色无尾矿山尾砂综合利用系统重要的组成部分,其设计应同时满足采矿工艺及尾砂综合利用的需求。尾砂综合利用技术仍处于起步发展阶段,但其发展方向是明确的,即根据尾砂的化学成分、粒级等特性将尾砂进行筛选,进而分别采区不同的方式进行利用。目前,较为常规的方式为根据粒度将尾砂分为粗、细两种尾砂分别进行利用。

在当前的政策和市场环境下,粗粒级尾砂处理技术较为成熟,尾砂处理成本也较低,如作为建筑材料直接进行利用、制作免烧建材等;细粒级尾砂目前利用方式有制陶瓷、微晶玻璃及特种复合材料等,但目前多数技术路线均不成熟或不具备普遍适用性,往往存在投资过高、产品质量较差等问题,在目前的技术和市场条件下,细粒级尾砂处理成本要高于粗粒级尾砂,因此在满足采矿工艺需求和考虑充填成本前提下,充填系统应该能够将尽量多的细粒级尾砂充填至井下。然而从长远来看,国内对于建材的总体需求在逐年降低,同时更多的矿山可能会采取相同的尾砂利用策略,将导致粗颗粒尾砂建材市场竞争将越来越激烈,其成本也会逐渐升高;细粒级尾砂利用技术在不断的进步和完善,其投资和成本也在不断降低,当细

粒级尾砂处理成本低于粗粒级尾砂时,则要求充填系统将尽量多的粗粒级尾砂充填至井下。面对技术的进步、政策的变化和市场的不确定性,矿山制定的尾砂综合利用方案应具备一定的适应性,能够及时调整策略,避免前期投入浪费等情况,相应的其充填系统也应具有足够的适应能力。

基于以上思路,对该矿山充填系统进行了充分的优化设计,提出了可适应全尾砂充填、分级粗尾砂充填、分级细尾砂充填等多种不同充填工况的最优化充填工艺技术,并已申报国家专利。充填站内共设2套制备输送系统,由尾砂浓密设备、胶固粉存储及给料设施及料浆混合制备设施组成,可满足全尾砂及分级粗尾砂充填的要求;同时还考虑预留了细尾砂率滤饼输送及定量添加设施、膏体泵送设施安装空间,以适应分级细尾砂充填的要求。充填工艺为:全尾砂或分级粗尾砂经泵送至充填站的尾砂浓密设备进行沉降浓缩,浓缩后的尾砂料浆送至搅拌机内;需添加细尾砂时,将细尾砂的浓缩底流输入搅拌机,或者将尾矿干排车间滤饼由给料胶带机输送至充填搅拌站滤饼缓存仓,通过底部尾砂定量给料机按比例要求定量将细尾砂输送至搅拌机内;同时启动胶结充填时启动微粉秤按配比要求将定量胶固粉送入搅拌机内搅拌,并按浓度要求添加适量的水,搅拌均匀后制备成合格的高浓度充填料浆,充填料浆经充填管道自流输送或泵送至井下各中段采空区进行充填。

5 尾砂浓密关键装备

绿色无尾矿山优化充填技术能够适应多种不同粒度尾砂充填工况,其配套尾砂浓密装备的选择也尤为关键。适用于充填系统尾砂浓密装备主要有砂仓、深锥浓密机等。

传统的立式砂仓为圆筒仓,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,由于其结构简单,投资小等优点,在早期分级粗尾砂充填系统设计中得到了广泛的应用。但传统砂仓存在尾砂适用性差、放砂浓度低、放砂不稳定、自动化程度低、不适应连续充填工况等缺点,目前已逐渐被市场淘汰^[8]。深锥浓密机是近些年由国外引进,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。深锥浓密机,顾名思义相比于普通浓密机其底部锥体角度更大,另一方面通过增加边墙高度,实现更大的

高径比,从而进一步提高了底流排放浓度。深锥浓密机还具有集成化、自动化程度高,底流排放相对稳定等特点,得到了较为广泛的应用^[9]。但深锥浓密机由于其结构特点,不适用于较粗颗粒尾砂的浓缩沉降,且当砂位或浓度过高时有压耙风险,尾砂存储缓冲功能有限,也无法满足绿色无尾矿山充填系统适应多种不同粒度尾砂充填的需求。

综合考虑,本次设计选用由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—新型高效“尾砂浓缩贮存装置”,或称“无耙架深锥浓密机”,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,主要具备以下技术特点^[10-11]:

①适应能力强,既适用全尾砂又适用分级尾砂的浓缩和贮存;

②具有较大的尾砂贮存缓冲能力;

③底流排放浓度高,比传统立式砂仓放砂浓度大幅提高,流量稳定;

④可边进料,边放砂,处理能力大,波动适应性强;

⑤溢流浓度低,可直接用于采选、充填相关生产用水;

⑥无耙架装置,更节能环保;

⑦放砂过程自动化多回路控制调节;

⑧满足个性化需求,可根据客户需要量身定制;

⑨适合大规模集中坑内充填和尾矿排放。

新型高效“尾砂浓缩贮存装置”适应性强,可对全尾砂、分级细尾砂及分级粗尾砂进行浓缩,能够满足充填系统实现多种不同粒度尾砂充填的需求,同时新型尾砂浓缩贮存装置还具备较大的尾砂贮存缓冲能力,能够有效解决尾砂综合利用设施与井下充填作业相互匹配的问题。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,较好地解决了各种不同粒径尾砂沉降脱水难题,完全可以满足绿色无尾矿山高浓度甚至膏体充填的要求。

6 结论

(1)通过试验研究及理论计算等方式,对某黄

金矿山充填系统采用不同尾砂作为充填材料所能消耗的总尾砂量、细尾砂量,运营成本(主要为胶固粉成本)等进行分析。

(2)基于对绿色无尾矿山尾砂综合利用技术、政策及市场的分析,可得出矿山制定的尾砂综合利用方案以及其配套的充填系统应具有足够的适应能力,并对该矿山充填系统进行了相应的优化设计。

(3)针对绿色无尾矿山尾砂充填系统所应具备的特点,对其关键尾砂浓密设备进行了选型。

[参考文献]

- [1] 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.
- [2] 王莉,明世祥,张永达,等. 机械化上向水平分层充填连续采矿法在某金矿的应用[J]. 矿业研究与开发, 2015,35(7):5-8.
- [3] 艾德鸿,江启平. 选矿尾砂综合利用的探讨[J]. 环境工程,2002,20(5):74-75.
- [4] 陈家珑. 尾矿利用与建筑用砂[J]. 金属矿山,2005(1):71-75.
- [5] 黄志伟,古德生. 我国矿山无废开采的现状[J]. 矿业研究与开发,2002,22(4):9-10,32.
- [6] 刘可任. 充填理论基础[M]. 北京:冶金工业出版社, 1982.
- [7] 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.
- [8] 施士虎,李浩宇,陈慧泉. 矿山充填技术的创新与发展[J]. 中国矿山工程,2010,39(5):10-13,19.
- [9] 刘同有,蔡嗣经. 国内外膏体充填技术的应用与研究现状[J]. 中国矿业,1998,(5):1-4.
- [10] 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):4.
- [11] 邵思维,徐巍,谷龙飞,等. 基于某铜矿的智能充填生产信息管理系统解决方案[J]. 有色设备,2021,35(02):82-86.