

引文格式：陈玉芳,朱灿.铜尾矿库尾矿全粒径规模化低碳消纳研究[J].铜业工程,2022(5):31-37.

铜尾矿库尾矿全粒径规模化低碳消纳研究*

陈玉芳¹, 朱 灿²

(1. 铜陵有色金属集团铜冠建筑安装股份有限公司, 安徽 铜陵 244000; 2. 铜陵有色金属集团控股有限公司, 安徽 铜陵 244000)

摘 要: 某大型矿冶集团针对该集团铜尾矿库尾矿大量堆存, 安全环境风险突出, 新建尾矿库选址困难、尾矿消纳途径有限等问题, 通过长期摸索研究和对铜尾矿库尾矿粒径分布、成分、化学属性、浸出毒性和放射性等因素进行分析, 探索出通过胶凝改造技术充填、制备公路工程无机结合料和铜尾矿资源脱硫分级综合利用的低碳材料消纳模式, 尾矿库尾砂能够全粒径规模化消纳利用。单位产品分别消纳尾矿 0.075t/t、0.1275 t/t 和 1t/t, 降碳 1.564t/t、0.054t/t 和 0.5195t/t, 并分别具有 40.0971 元/t、12.1235 元/t 和 14.4653 元/t 的环境正效益, 同时协同处置了大量其他固体废物, 真正实现了铜尾矿全粒径规模化增值消纳, 在全国范围内有很好的借鉴意义。

关键词: 铜尾矿库; 尾矿消纳; 全粒径; 充填; 低碳

中图分类号: TD982

文章编号: 1009-3842 (2022) 05-0031-07

文献标识码: A

DOI:10.3969/j.issn.1009-3842.2022.05.008

Study on Large-scale Low-carbon Consumption of Copper Tailings with Full Particle Size

CHEN Yu-fang¹, ZHU Can²

(1. Tongling Nonferrous Metals Group Tongguan Construction and Installation Co., Ltd., Tongling 244000, Anhui, China; 2. Tongling Nonferrous Metals Group Holding Co., Ltd., Tongling 244000, Anhui, China)

Abstract: A large mining and metallurgy group aims at the problems of massive stockpiling of tailings in the group's copper tailings pond, prominent safety and environmental risks, difficult site selection of new tailings pond, limited ways to absorb tailings, etc. through long-term exploratory research and analysis of factors such as particle size distribution, composition, chemical properties, leaching toxicity and radioactivity of tailings in the copper tailings pond, it explores how to fill preparation of inorganic binder for highway engineering and low-carbon material consumption mode of desulfurization, classification and comprehensive utilization of copper tailings resources. Tailings of tailings pond can be consumed and utilized on a large scale with full particle size. The unit product can absorb tailings of 0.075t/t, 0.1275 t/t and 1t/t, reduce carbon by 1.564t/t, 0.054t/t and 0.5195t/t respectively, and has positive environmental benefits of 40.0971 yuan /t, 12.1235 yuan /t and 14.4653 yuan /t. It also cooperates with the disposal of a large number of other solid wastes, and truly realizes the full particle size standardized value-added consumption of copper tailings, which has a good reference significance nationwide.

Keywords: copper tailing pond; tailing consumption; full particle size; filling; low carbon

收稿日期: 2022-06-06

* 基金项目: 国家重点研发计划“固废资源化”重点专项项目“资源循环利用过程精准管理支撑技术与应用示范”, 项目批准号: 2019YFC1908500, 教育部人文社会科学研究专项任务项目(高校辅导员研究), 项目批准号: 20JDSZ3005。

作者简介: 陈玉芳(1990—), 女, 安徽怀宁人, 工程师, 主要从事建筑相关技术和管理。E-mail: 929492393@qq.com

通信作者: 朱灿(1982—), 安徽怀宁人, 高级工程师, 主要从事环境与安全技术管理和研究。E-mail: 30400018@qq.com

1 引言

矿业企业每年产生大量的尾矿，近年来许多矿业企业的铜尾矿库已到服务年限，受生态环境保护红线影响，无法选择到符合条件的地块新建尾矿库，面临铜尾矿无处可排的难题。此外，我国现有铜尾矿库环境安全风险问题突出，销库复绿任重道远。现有的尾矿库利用途径有限，以直接充填为主^[1-2]。某大型矿冶集团通过铜尾矿库尾矿全粒径规模化低碳消纳研究，采用分级分质利用与超细粒活化改性，形成高硫铁精矿、建筑用砂、水泥原料、公路路基等产品，实现了铜尾矿全粒径、全质利用，环境正效益和碳效益显著，解决了消纳量有限和资源化产品经济效益差的问题，值得在全国推广应用。

2 尾矿库的成因

2.1 尾矿产生环节

以某矿冶集团某主力矿山为例，尾矿产生于选矿工艺的浮选环节，如图 1 所示。

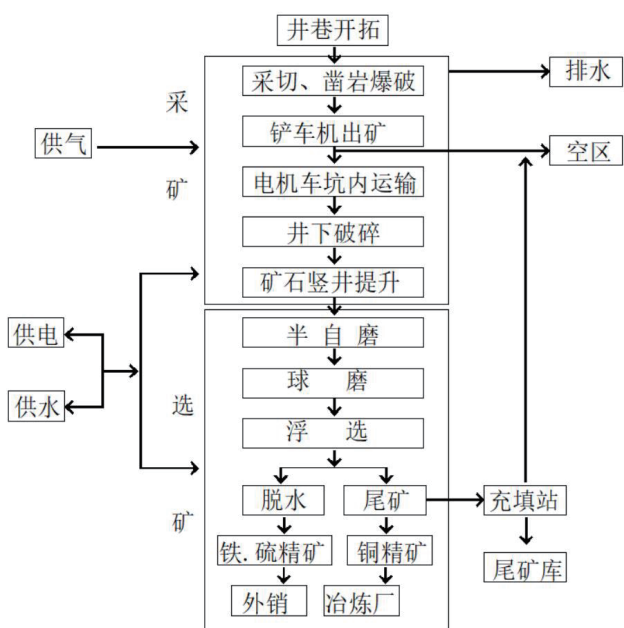


图 1 尾矿产生工艺流程图

2.2 尾矿产生量的确定

该矿山^[3]历年铜矿采掘总量与尾矿产生量如表 1 所示。由表 1 可知：铜矿采掘总量与尾矿产生量呈线性相关，平均经验系数为 0.58。

表 1 采掘总量与尾矿产生量历年经验系数表

年份	采掘总量 /t	尾矿产生量 /t	经验系数
2016	5245229	2900372	0.55
2017	4831683	2829666	0.59
2018	5121135	2789232	0.54
2019	4814885	2823988	0.59
2020	4693461	2892086	0.62
2021（1-6 月）	2528479	1528035	0.60
合计	27234872	15763379	0.58

2.3 尾矿分析

2.3.1 尾矿粒度分布

尾矿粒径^[4]筛分数据见表 2，粒径大于 0.15mm、0.15~0.074mm，0.074~0.044mm，0.038~0.044mm，小于 0.038mm 在尾矿中的占比分别为 20.90%，27.70%，14.70%，20.22%，14.38%。

表 2 尾矿粒径分布

粒级 /mm	粒径占比 /%
大于 0.15	20.90
0.15~0.074	27.70
0.074~0.044	14.70
0.038~0.044	20.22
小于 0.038	14.38

2.3.2 尾矿的化学成分分析

该矿山不同粒级尾矿与铜矿原矿的主要化学成分如表 3 所示。

2.3.3 尾矿的 X 射线衍射分析

尾矿 X 射线衍射（XRD）分析如图 2 所示，尾矿的主要矿物^[5]为石英、水钙铝榴石、石灰石等。

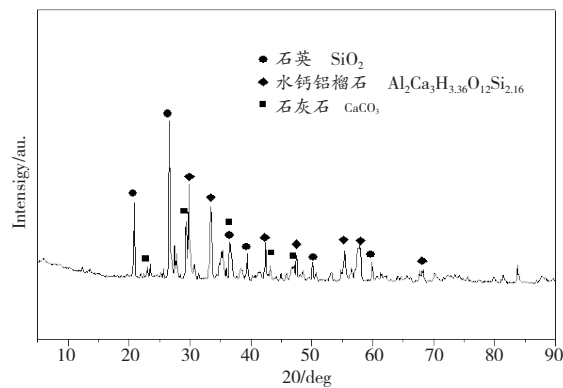


图 2 尾矿 XRD 分析图

2.3.4 尾矿浸出毒性和放射性

该矿山铜尾矿库尾矿浸出毒性和放射性检测

表 3 尾矿的主要化学成分

%

粒度区间	化学成分							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	SO ₃
原矿	44.375	8.441	23.615	2.446	1.48	0.672	13.732	3.769
大于 0.15mm	54.835	10.208	18.183	2.151	2.498	1.025	7.407	2.188
0.15~0.074mm	45.979	8.494	24.74	2.27	1.54	0.72	12.479	2.391
0.074~0.044mm	41.718	7.354	25.695	1.892	1.397	0.661	15.919	2.851
0.038~0.044mm	42.258	7.726	24.557	1.939	1.385	0.643	15.865	3.072
小于 0.038mm	43.764	8.751	22.639	2.802	1.289	0.595	15.163	3.611

结果见表 4, 其各项重金属含量均未超标, 放射性满足《建筑材料放射性核素限量》(GB 6566 — 2010)^[6]的要求。由表 3 和表 4 可知, 该铜尾矿库尾矿属于一般固体废物。按照 2021 年 12 月 30 日生态环境保护部颁布施行的《一般工业固体废物管理台账制定指南(试行)》, 该铜尾矿库尾矿属一般工业固体废物, 分类代码为 SW05。

表 4 尾矿浸出毒性检测

mg/L, pH 无量纲

序号	危害成分项目	水木冲尾矿 1 [#]	检出限	浸出液中危害成分浓度限值
1	铜	0.03	0.01	100
2	锌	0.022	0.006	100
3	镉	<0.003	0.003	1
4	铅	<0.02	0.02	5
5	总铬	<0.01	0.01	15
6	六价铬	<0.004	0.004	5
7	烷基汞	甲基汞 1.0 × 10 ⁻⁵	1.0 × 10 ⁻⁵	不得检出
		乙基汞 1.0 × 10 ⁻⁵	2.0 × 10 ⁻⁵	
8	汞	0.00004	0.00002	0.1
9	铍	<0.0003	0.0003	0.02
10	钡	0.027	0.003	100
11	镍	<0.01	0.01	5
12	总银	<0.0007	0.0007	5
13	砷	0.0015	0.0001	5
14	硒	<0.0005	0.0005	1
15	无机氟化物	0.56	0.05	100
16	氰化物	<0.004	0.0001	5
17	pH	8.06	—	≥ 12.5 或 2.0

3 尾矿消纳现状分析

3.1 充填

充填是尾矿的主要利用途径, 该矿山铜矿尾矿充填工艺流程如图 3 所示。选矿排出的尾矿浆经尾矿输送管道进入深锥浓密机中, 在供砂的同时添加药剂进行絮凝, 加速尾矿与溢流水分层。尾矿浓缩沉降后排出的溢流水自流至深锥浓密机旁设置的溢流水池, 用于回填生产用水, 多余部分通过泵送回矿山水处理系统; 回填时, 深锥浓密机底流料浆经泵输送至搅拌系统, 与来自立式料仓的胶凝材料充分搅拌, 制备成符合要求的回填料浆, 最后通过回填工业泵和管道输送至露天坑回填区域^[7]。

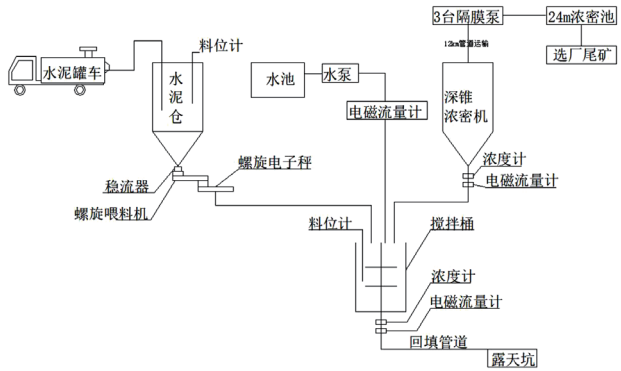


图 3 尾矿充填流程图

该矿山 2016 年 1 月—2021 年 6 月尾矿^[8]充填率如表 4 所示。由表 4 可知, 尾矿充填率在此期间较为稳定, 平均充填率为 65.40%, 剩余的尾矿选择堆存。

3.2 尾矿堆存

由于矿山平均充填率在 55%~75% 之间, 没有被充填的尾矿需要堆存, 最终形成尾矿库。据统计, 我国现有尾矿库 12655 座, 尾矿堆存总量超过

1.6×10¹⁰t, 占地面积累计约 3.7×10⁴ km², 并且仍然在以超过 400km²/a 的速度增长。

表 5 2016 年 1 月—2021 年 6 月尾矿充填率

年份	当年尾矿产生量 /t	充填量 /t	充填率 /%
2016	2900372	2171238	74.86
2017	2829666	1895546	65.99
2018	2789232	1904198	68.27
2019	2823988	1896278	67.15
2020	2892086	1601037	55.36
2021 (1-6 月)	3056070	1839527	60.19
合计	17291414	11307824	65.40

综上所述,我国目前尾矿大规模消纳途径有限。由表 5 可知,该矿山 2016 年 1 月—2021 年 6 月尾

表 6 在用主力尾矿库使用现状

序号	单位	尾矿库	服务年限		库容 /10 ⁴ m ³			已使用年限	年使用库容率 /%
			/ 年（起止时间）		设计	已用	剩余		
1	铜矿 A	尾矿库 A	1991	—	839	579	260	30	2.30
2	铜矿 D	尾矿库 D	2008	—	1938	1698	240	13	5.74
3	铜矿 S	尾矿库 S	2017	—	1445	344	1101	4	5.95

废水,使得地下水质恶化,严重影响到当地居民的饮用水安全;尾矿库表层还会产生大量的扬尘,严重污染大气和影响当地的居住环境。

4.3 安全管理压力

许多铜尾砂库长期高负荷堆存使用,存在一定环境风险和安全隐患,尤其是现排尾矿库或闭库时间较短的尾矿库,在长期应力、山体滑坡、暴雨、山洪等自然灾害的作用下,存在溃坝的可能性,对人民的生命财产安全造成了较大的威胁^[9]。

5 铜尾矿库尾矿全粒径规模化低碳消纳途径

5.1 胶凝改造技术充填

2021 年 7 月以来,该大型矿冶集团采用立磨作为粉磨系统,每年消纳铜尾矿库尾矿 37.5 万 t,加以 1.25×10⁵ t/a 辅料,每年可产生具备胶结充填 5×10⁶ t 尾矿的矿山充填胶凝^[10] 建筑材料 5.0×10⁵ t。尾矿和辅料的粉磨均采用立磨作为粉磨系统,工艺流程如图 4 所示。

矿矿山井下充填 1130.7824 万 t, 598.3590 万 t 尾砂尾矿库堆存,除了零星的取砂用于科技实验,没有其他的利用途径。

4 尾矿消纳的必要性分析

4.1 尾矿库库容压力

2021 年 6 月底,该大型矿冶集团主力尾矿库 A、D、S 使用现状如表 6 所示。根据各矿山尾矿库剩余库容及年入库量进行计算,S 铜矿尾矿库还可继续使用 12a 左右;A 铜矿剩余库容还可使用 11a 左右;D 铜矿所剩库容仅够 1~2a 使用。

4.2 环境管理压力

尾矿长期堆存会向地下渗透大量的酸性或碱性

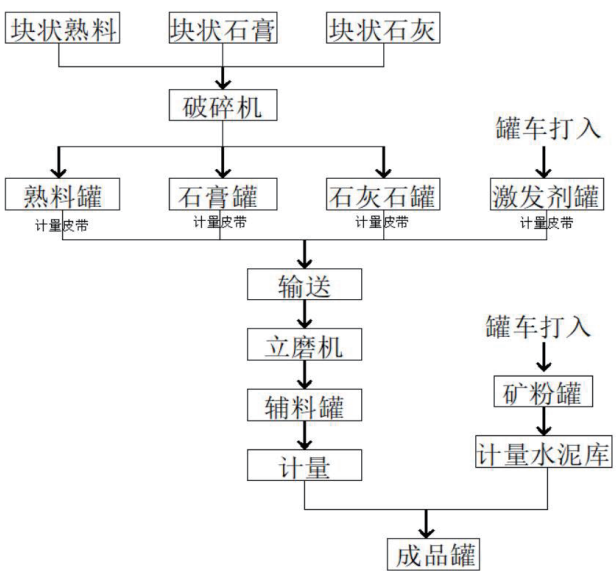


图 4 胶凝改造技术充填工艺流程图

自 2021 年 7 月以来,该矿冶集团的三家单位经试用后,增加了 7.5% 的全粒径尾矿利用率,而且对于分级尾矿或细粒级尾矿也有很好的适应性,可以充填 1.20×10⁶ t/a 铜尾矿资源脱硫分级综合利用富余产能的细粒级尾矿,安全性能好,可以保证

分级分质铜尾矿的完全利用。

5.2 制备公路工程无机结合料

矿业企业产生的浮选尾矿中的粗粒级尾矿, 品质稳定, 既可作为公路工程无机结合料, 也为公路工程无机结合料提供了原材料来源。抛尾废石和浮选尾矿协同复合利用, 作为公路工程无机结合料的骨料, 不仅解决了抛尾废石和尾矿排放问题, 还使其成为一种砂石骨料资源, 产生了一定的经济价值。

固废基道路胶凝材料以全固废为原材料, 固废利用率在 96% 以上, 对所用原材料钢渣、铜冶炼渣、炉渣和高炉矿渣进行粉磨预处理^[11], 将其粉磨至与水泥细度相当水平之后, 将粉煤灰、钢渣粉、铜冶炼渣粉、炉渣粉等物料进行充分搅拌混合, 搅拌混合后的物料与抛尾废石、浮选尾矿、特种激发剂、水和其他配料组分按照设计配比, 进行配料、均化, 形成基础配合料, 在陈化仓中陈化 18~24 h, 然后, 依据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)^[12]入箱, 进行约 72 h 的养护, 经力学性能、耐久性能、环境性能测试, 合格成品达到应用要求。

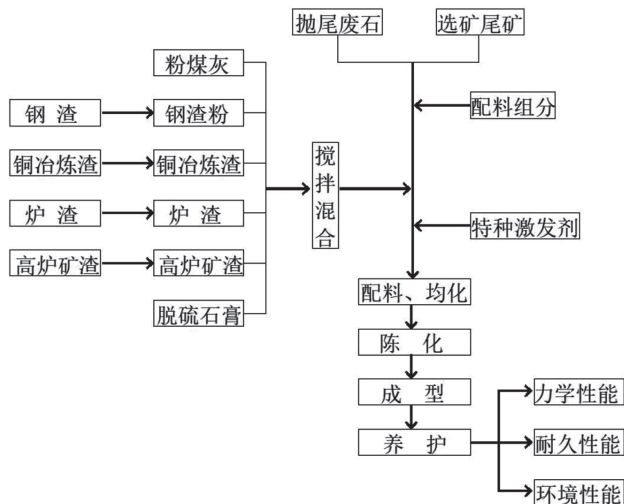


图5 制备公路工程无机结合料

利用尾矿等制备路面基层材料, 以铺筑 1000 m 路面基层 (包括底基层和上基层) 为例, 路宽 12m, 基层总厚度为 0.4m, 可消耗尾矿 1275 t, 该路面基层材料的尾矿纯利用率达 12.88%; 同时可消减粉煤灰 392 t、钢渣粉 2205 t、铜冶炼渣 588 t、炉渣 245 t、高炉矿渣 490 t、脱硫石膏 588 t、抛尾废石 3825 t, 固废利用率可达 97% 以上。此外, 该路面基层较之于传统路面基层, 成本可降低 20%

左右。

该大型矿冶集团年产 100 万 t 公路工程无机结合料可精准消纳粒径大于 0.15mm 的粗尾矿 12.75 万 t, 占比达 20.90%, 其用砂来源于 1.20×10^6 t/a 铜尾矿资源脱硫分级综合利用项目。

5.3 铜尾矿资源脱硫分级综合利用

由表 3 可知, 尾矿中硫含量较高。该大型矿冶集团为实现尾矿精准全利用, 采用全流程干式处置工艺^[13], 并形成了多尺度协同活化改性制备活性矿物质原料技术, 实现铜尾矿低成本脱硫脱水和惰性铜尾矿高效活性激发目的, 将铜尾矿改性加工生产硫铁精矿、建筑用砂、活性矿物质掺合料等产品 (见图 6), 为铜尾矿规模化用做水泥、混凝土等建材行业的矿物质原料, 实现尾矿消纳处置^[14]。

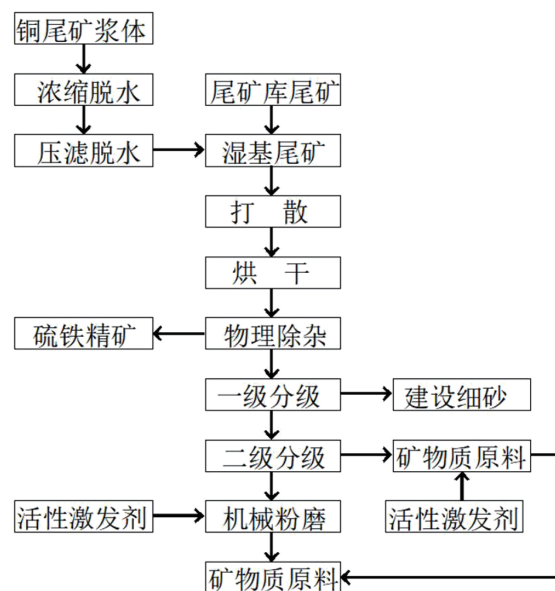


图6 120 万 t/a 铜尾矿资源精准综合利用工艺流程图

5.3.1 尾矿脱水压滤工艺

尾矿为浆体时, 浓度约为 30% 的尾矿浆由管道输送到尾矿汇总池浓缩之后, 尾矿浆体浓度可提升至 60%~70%, 然后将浓缩后的矿浆输送^[15]至压滤机, 通过压滤, 使其成为含水率 13%~15% 的湿基尾矿, 脱水后的尾矿用皮带输送机送到尾矿堆棚堆存备用。

5.3.2 原料输送及烘干

水分小于 15% 的尾矿原料经装载机送入箱式给料机计量后, 由带式输送机送至锁风喂料机, 进入尾矿专用干燥机。尾矿专用干燥机的烘干热源由焦炉煤气沸腾炉系统提供。尾矿经烘干之后, 含水

率 $\leq 0.5\%$,将烘干后的尾矿输送至筛分机,将粗粒级团聚态颗粒筛分出后,细粒级尾矿进入中间料仓备用。

5.3.3 尾矿除杂及分选

烘干后水分小于 0.5% 的尾矿输送至预处理除杂设备,将尾矿中的高硫组分选出,获得第一种产品:硫铁精矿。除杂后的尾矿,通过斗提机输送至高效选粉系统,将粗粒级(粒径大于 0.15mm 的粗尾矿,占比 20.90%)尾矿选出,输送至堆场作为建设用砂。其中,一部分用于制备公路工程无机结合料,另一部分对外出售。细粒级(粒径小于 0.15mm 的细尾矿,占比 79.10%)尾矿输送至二级选粉系统,将超细粒级(粒径小于 0.038mm 的细尾矿,占比 14.38%)尾矿选出后,加入活性激发剂,经活化处理后的超细粒级尾矿直接输送至成品仓^[16],作为大宗建材行业的矿物质原料。

5.3.4 机械粉磨和化学活化

经二级选粉系统分离出来的剩余中粒级($0.038\text{mm}\sim 0.15\text{mm}$,占比 62.62%)尾矿用输送设备送入稳料仓,经计量后,进入粉磨系统并加入化学激发剂。粉磨系统采用闭路磨,粉磨合格的尾矿粉直接输送至成品仓,粒度和比表面积不合格的尾矿返回至粉磨系统进一步粉磨,最终将粉磨合格后的尾矿输送至产品仓^[17],作为大宗建材行业的矿物质原料。

综上所述,采用 120万 t/a 铜尾矿资源脱硫分级综合精准分选粒径大于 0.15mm 的粗粒径尾矿 24万 t (占比 20.9%),小于 0.15mm 的细粒径尾矿 92万 t (累计占比 79.1%)和高硫铁精矿产品 4万 t ,做到了尾矿的 100% 全利用。

6 尾矿库尾矿精准利用应用效果

6.1 50 万 t 胶凝改造技术充填

6.1.1 环境正效益明显

50万 t 胶凝改造技术充填项目投资 5800万元 ,年总成本费用 20054.22万元 ,年收益 21911万元 ,年税后利润 1398.68万元 ,单位产品环境正效益 40.0971元/t ,实现年胶结充填尾矿 500万 t ,精准增加了 37.5万 t 全粒径尾矿利用量,解决了传统胶凝材料水泥用于胶结充填时成本高、水化热高和抗酸性差等缺点,对于分级尾矿或细粒级尾矿具有更

好的适应性。此外,胶结充填达到同等强度效果时,所用的胶凝材料量更少;在同样的浓度条件下进行充填时,有更多的铜尾矿充填进井下。

6.1.2 碳减排显著

一是原材料替代减排。按照达到同样的胶凝效果,充填胶凝材料的用量为水泥用量的 50% ,每年可替代水泥用量 100万 t , CO_2 排放量减少了 77.5万 t ;二是余热利用减排。采用工业副产能源焦炉煤气进行烘干, CO_2 排放量减少了 6378.75t ;三是粉磨降碳。立式粉磨系统粉磨每吨矿渣可节约电耗 10kWh , CO_2 排放量减少了 3000t 。综上所述,该项目年降碳共计 78.437875万 t 。

6.2 100 万 t 制备公路工程无机结合料

6.2.1 环境正效益明显

项目投资 2853.13万元 ,年总成本费用 8538.33万元 ,年收益 11807.11万元 ,年税后利润 1212.35万元 ,单位产品环境正效益 12.1235元/t ,精准协同处置粗尾矿 12.75万 t 。相比于传统路面基层,成本降低了 20% 。

6.2.2 碳减排显著

按照年产量 100万 t 道路基层材料计算,如采用传统道路基层材料需要 6万 t 水泥。按照生产每吨水泥排放 0.9t 的 CO_2 计算,减少 6万 t 水泥用量, CO_2 排放量可减少 5.4万 t 。

6.3 120 万 t 铜尾矿资源脱硫分级综合利用

6.3.1 环境正效益明显

项目投资 10335.47万元 ,年总成本费用 13450.34万元 ,年收益 17900万元 ,年税后利润 1735.84万元 ,单位产品环境正效益 14.4653元/t 。其中,脱硫分级分选的 24万 t 粗粒径尾矿(粒径大于 0.15mm ,占比 20.90%)中的 12.75万 t 送至年产 100万 t 公路工程无机结合料项目消纳,剩余部分直接作为建设用砂产品进行销售;精准脱硫得到的 4万 t 高硫铁精矿产品,利用物理工艺可进一步富集得到高硫高铁精矿($\text{S } 30\%, \text{Fe } 50\%$),进行销售或进一步深加工可制成酸和铁;分级分选后可产生 92万 t 活性矿物质原料,用于水泥生产,可增加混凝土的流动性、保水性。

6.3.2 碳减排显著

一是余热利用减排。采用工业副产能源焦炉煤气进行烘干, CO_2 排放量共减少了 20412t ;二是闭路粉磨降碳。闭路粉磨每吨尾矿可节约电能

5kWh, CO₂ 排放量可减少 4800 t; 三是产品碳减排。相比传统机制, 可减少开采、破碎、筛分工序的电能消耗, CO₂ 排放量减少 192 t, 水泥、混凝土矿物质原料比传统工艺生产的砌筑水泥、特种水泥熟料, 可减少 CO₂ 排放量 59.8 万 t。

综上所述, 该项目年降碳共计 62.34 万 t。

6.4 铜尾矿库实现零增量

由于铜尾矿百分之百被利用, 该矿冶集团不再兴建尾矿库, 并对原有尾矿库实现销库复绿, 为某矿冶集团提供了尾矿转型绿色发展的新路径。

7 结论

(1) 尾矿消纳量大。通过开展铜尾矿库尾矿全粒径规模化低碳消纳研究, 确立了 50 万 t 胶凝改造技术充填、100 万 t 制备公路工程无机结合料和 120 万 t 铜尾矿资源脱硫分级综合利用三大精准利用模式, 项目达产后, 年精准处理尾矿 37.5 万 t、12.75 万 t 和 120 万 t, 年消纳铜尾矿 150.25 万 t。

(2) 环境效益显著。50 万 t 胶凝改造技术充填项目投资 5800 万元, 年税后利润 1398.68 万元, 单位产品环境正效益 40.0971 元/t; 100 万 t/a 多源固废协同制备公路工程无机结合料项目投资 2853.13 万元, 年税后利润 1212.35 万元, 单位产品环境正效益 12.123 元/t; 120 万 t/a 铜尾矿资源脱硫分级综合利用项目投资 10335.47 万元, 年税后利润 1735.84 万元, 单位产品环境正效益 14.4653 元/t。

(3) 降碳效益显著。50 万 t 胶凝改造技术充填项目 CO₂ 排放量可减少 78.2 万 t/a, 单位产品降碳 1.5687575t/t; 100 万 t 制备公路工程无机结合料项目 CO₂ 排放量可减少 5.4 万 t/a, 单位产品降碳 0.054t/t; 120 万 t 铜尾矿资源脱硫分级综合利用项目 CO₂ 排放量可减少 62.34 万 t/a, 单位产品降碳 0.5195t/t。

(4) 尾矿消纳彻底。由于铜尾矿百分之百被利

用, 铜尾矿库实现了零增量, 同时, 随着后期产量的不断提升, 原有铜尾矿库尾矿量将逐渐消减, 逐步实现尾矿库的销库复绿, 为彻底解决我国铜尾矿库问题提供了一条可借鉴途径。

参考文献:

- [1] 杨伟卫, 蔡恒安, 尚世超, 等. 湖北某铜尾矿资源化利用研究 [J]. 金属矿山, 2022(5):135-141.
- [2] 杜艳强, 段文峰, 赵艳. 金属尾矿处置及资源化利用技术研究 [J]. 中国矿业, 2021, 30(8):57-61.
- [3] 杨纪光, 王义海, 吴再海, 等. 某金矿全尾砂高浓度充填流变特性与微观结构的分析 [J/OL]. 有色金属科学与工程:1-11[2022-06-16].
- [4] 朱灿. 绿色工厂环保评价体系的优化研究 [J]. 山东化工, 2020(11):290-291.
- [5] 朱灿, 陈玉芳. 大型国有有色金属企业安全管理智能模式研究 [J]. 山东化工, 2021, 50(6):122-124.
- [6] GB 6566-2010, 建筑材料放射性核素限量 [S].
- [7] 刘奇, 岑佑华, 唐鸣东, 等. 不同尾砂物理性质对尾砂浓密性能的影响 [J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(5):124-130.
- [8] 侯永强, 尹升华, 戴超群, 等. 尾矿膏体流变特性和管输阻力计算模型 [J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(2):510-519.
- [9] 朱灿. 国有企业模块化安全管理实践模式研究 [J]. 山东化工, 2021, 50(5):184-185, 187.
- [10] 朱灿, 曹建国, 陈玉芳, 等. 铜漆包线企业 VOCs 排放精准治理研究 [J]. 山东化工, 2021, 50(17):285-289.
- [11] JTG E51-2009, 公路工程无机结合料稳定材料试验规程 [S].
- [12] 朱灿, 陈玉芳, 朱慧. 铁矾渣精准制砖资源化利用研究 [J]. 中国有色冶金, 2022, 51(1):64-69.
- [13] 朱灿. 在线监测设备在冶炼厂环境保护中的应用 [J]. 有色冶金节能, 2010, 26(2):34-36.
- [14] 朱灿. 浅谈冶炼厂垃圾渗滤液的处理 [J]. 有色冶金节能, 2009, 25(6):52-55.
- [15] 田志刚. 新型胶结剂-细粒级尾砂充填料浆性能研究 [J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(3):76-81.
- [16] 朱灿, 陈玉芳. 一种安全生产远程监控预警设备 [P]. 中国专利, CN214200197U, 2021-09-14.
- [17] 濮阳雪华, 邓汝英, 王春春, 等. 德兴铜矿尾砂重金属在模拟降雨下的淋溶特征 [J]. 环境工程, 2019, 37(5):61-65.