

“尾矿综合利用”专题

文章编号: 1004-4051(2024)02-0107-08

DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20230719

尾矿综合利用研究进展及工程实践

施灿海, 刘明生, 程立家, 蓝蓉

(昆明有色冶金设计研究院股份公司, 云南昆明 650231)

摘要: 尾矿作为一种特殊的大宗工业固体废物, 堆存量逐年增加, 带来了诸多的安全问题和环保问题, 已成为制约我国经济发展和生态保护的因素之一。目前, 尾矿的主要处置方式为进入尾矿库堆存, 但该方法引起的安全问题和环保问题严重制约企业的持续发展, 影响企业经济效益。近二十年来, 尾矿作为一种二次资源, 其综合利用得到国家的大力支持, 以及研究机构的持续关注, 不同种类尾矿的资源化途径和方式均有不同程度的研究。与此同时, 尾矿资源化利用的工程实践也取得了突破。首先, 基于国内行业统计数据, 结合云南省尾矿库数量变化, 对尾矿库、尾矿产生量及尾矿综合利用情况进行分析。其次, 结合尾矿综合利用的技术研发及工程实践, 重点介绍了云南省结合生态修复的露天采坑尾矿回采和矿山尾矿井下充填技术的应用案例。在应用案例中, 通过相关技术的应用有效地解决了区域内历史遗留的生态环境破坏和企业持续生产的难题。最后, 对后续研发的关注点提出建议, 可为今后区域内尾矿资源化利用提供借鉴。

关键词: 尾矿; 综合利用; 尾矿回采; 尾矿充填; 资源化利用

中图分类号: TD98 **文献标识码:** A

Research progress and engineering practice on comprehensive utilization of tailings

SHI Canhai, LIU Mingsheng, CHENG Lijia, LAN Rong

(Kunming Engineering & Research Institute of Nonferrous Metallurgy Co., Ltd., Kunming 650231, China)

Abstract: As a special kind of bulk industrial solid waste, the stockpile of tailings has been increasing year by year, bringing about many safety and environmental protection problems, and has become one of the factors restricting China's economic development and ecological protection. At present, the main disposal method is tailings ponds storage, but the safety and environmental protection issues caused by this method seriously constrain the sustainable development of enterprises and affect their economic benefits. In the past two decades, as a kind of secondary resources, the comprehensive utilization of tailings has received strong support from the country, as well as continuous attention from research institutions. The resource utilization pathways and methods of different types of tailings have been studied to varying degrees. Meanwhile, the engineering practice of tailings resource utilization made a breakthrough. Firstly, based on the domestic industry statistics, combined with the changes in the number of tailings ponds in Yunnan Province, the tailings ponds, tailings generation and comprehensive

收稿日期: 2023-10-05 责任编辑: 刘硕

第一作者简介: 施灿海(1988—), 男, 白族, 云南洱源人, 高级工程师, 主要从事固废(尾矿)处置及矿山生态修复方面的研究工作, E-mail: 774204825@qq.com。

通讯作者简介: 蓝蓉(1968—), 女, 汉族, 山东青岛人, 正高级工程师, 主要从事固废(尾矿)处置及矿山生态修复方面的研究工作, E-mail: 525864324@qq.com。

引用格式: 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.

utilization of tailings are analyzed. Secondly, combined with the technology research and development and engineering practice of comprehensive utilization of tailings, the application cases of open pit tailings reclamation and mine tailings underground filling technology combined with ecological restoration in Yunnan Province are highlighted. In the application cases, the application of relevant technologies effectively solved the problems of historical ecological environment damage and sustainable production of enterprises in the region. Finally, some suggestions are made for future research and development focus, which can provide a reference for future tailings resource utilization in the region.

Keywords: tailings; comprehensive utilization; tailings reclamation; tailings filling; resource utilization

0 引言

大宗工业固体废物是指我国各工业领域生产活动中产生量在 1 000 万 t 以上、对环境和安全影响较大的固体废物,主要包括尾矿、煤矸石、粉煤灰、冶炼渣、工业副产石膏、赤泥和电石渣等^[1]。大宗工业固体废物具有的共性环境问题为大量原矿开采导致源头生态破坏、大量不规范堆存造成场地污染。而且一旦发生场地污染,其表现出的隐蔽性、长期性、复杂性都增加了未来修复的难度和成本^[2]。尾矿作为一种特殊的大宗工业固体废物,其堆存量逐年增加。根据中国矿业联合会统计数据,2015—2020 年,我国尾矿堆存量分别为 146 亿 t、168 亿 t、195 亿 t、207 亿 t、220 亿 t、231 亿 t。

金属尾矿产生量巨大,可占到我国工业固体废物产生总量的一半以上。金属尾矿主要包括黑色金属尾矿、有色金属尾矿和稀贵金属尾矿,其中,有色金属尾矿主要包括铜尾矿、铅锌尾矿、镍尾矿、锡尾矿等。有色金属尾矿含有多种残余有色金属,并包括硫化物,石英、长石、云母等氧化物和硅酸盐类矿物。对于周边环境来说,有色金属尾矿大都是潜

在的重金属污染源,砷、铅污染控制难度大。大部分有色金属尾矿由于含有较多的硫化矿物,也是矿山酸性废水的潜在发生源^[3]。

近十年来,诸多学者和矿山企业对尾矿综合利用开展了大量的研究和实践^[4-8],但我国尾矿综合利用率仍处于低于 30% 的水平^[9],约 70% 的尾矿未得到有效利用^[10]。因此,通过分析全国和云南省尾矿库相关数据,进一步梳理尾矿产生量、综合利用情况及典型经验,为尾矿综合利用提供指导和借鉴。

1 重点省份尾矿库情况

2021 年,我国共有尾矿库 7 000 余座,总量仍居世界第一位。尾矿库数量居全国前 10 位的省份分别为河北省、辽宁省、内蒙古自治区、云南省、湖南省、河南省、山西省、陕西省、广西壮族自治区、四川省(图 1),合计占比约 65%。

在我国 7 000 余座尾矿库中有“头顶库”(系指下游 1 km(含)距离内有居民或重要设施的尾矿库)1 112 座,“头顶库”因数量多、安全基础薄弱,易引发生产安全事故,受到各级应急部门和矿山企业的高度重视。与此同时,尾矿对生态环境的影响也是

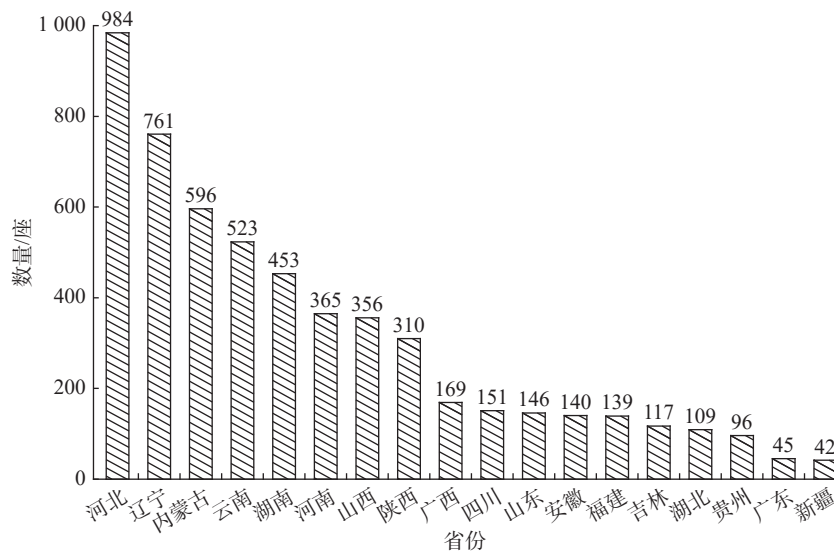


图 1 2021 年全国部分重点省份尾矿库数量

Fig. 1 Number of tailings ponds in some key provinces in China in 2021

尾矿堆存面临的主要矛盾之一。我国长江流域共有尾矿库 1 641 座, 其中 1 618 座已完成污染治理, 完成率 98.60%。长江流域上游干流尾矿库主要分布于云贵川地区, 如攀枝花市(金沙江)共有 38 座, 以黑色金属尾矿、有色金属尾矿为主; 长江流域中下游尾矿库主要分布于湖北省、安徽省等地, 如安徽省马鞍山市共有 12 座; 长江支流尾矿库主要分布于陕南地区, 以商洛市、汉中市、安康市为主, 数量分别为 134 座、71 座、40 座。长江流域尾矿库存在的问题主要有以下方面。①历史堆存量, 区域跨度大, 经济发展不均衡。长江流域在用尾矿库主要集中于经济欠发达地区, 地区经济结构对资源依赖性显著, 地区尾矿综合利用压力大。②尾矿长期堆存, 安全风险和环境风险并存。长江中上游及支流部分尾矿库分布于沿江不足 3 km 范围内, 部分停用时间超三年且未做相关闭库措施, 安全风险和生态污染风险长期存在。以云南省为例, 2020—2022 年尾矿库数量分别为 588 座、523 座和 489 座, 总体上呈递减趋势, 但总量仍接近 500 座, 堆存尾矿种类主要有铅锌尾矿、铜尾矿、铁尾矿、钛尾矿和锡尾矿五种(图 2)。

2 尾矿产生量情况

随着经济的发展、浮选技术的提升及有色金属需求的增加, 我国矿石处理量处于快速增长阶段。2011—2021 年, 我国尾矿的产生量始终围绕 15(±3) 亿 t 波动(图 3)。2018 年供给侧改革初显成效, 大量小矿山关停, 尾矿产生量出现最大降幅, 而后逐年回升。2021 年, 受全球货币政策宽松、金属工业品需求旺盛及新冠肺炎疫情等因素影响, 工业品价格全年

处于高位运行, 高利润是矿山保持高效生产的核心驱动力, 因此, 各类尾矿产生量均出现普遍性增长。

2021 年, 我国尾矿总产生量 14.19 亿 t, 同比增长 9.58%^[10]。其中, 铁尾矿产生量约 6.11 亿 t, 占比 43.06%; 铜尾矿产生量约 3.92 亿 t, 占比 27.63%; 黄金尾矿产生量约 1.61 亿 t, 占比 11.35%; 其他金属尾矿产生量约 1.35 亿 t, 占比 9.50%; 非金属尾矿产生量约 1.20 亿 t, 占比 8.46%。

3 尾矿综合利用情况

3.1 综合利用研究进展

尾矿综合利用研究关注点为尾矿作为二次资源再选和尾矿的整体利用^[12]。比如从钨钼尾矿中综合回收钨、钼、铋、铜、锌, 从多金属硫化尾矿中综合回收绢云母、铁、硫、铅、锌、银、铋^[13]; 整体利用包含尾矿制建筑材料、尾矿代替水泥铁质校正材料等^[14]。尾矿综合利用研究主要涉及铁尾矿、石棉尾矿、含铈尾矿、钼尾矿、铜尾矿、钨尾矿、磷尾矿、黄金尾矿、稀土尾矿、锡尾矿、钒钛磁铁矿尾矿、菱镁矿尾矿等^[15-27], 其中, 值得重点关注的研究成果有石棉尾矿制备高纯超细氢氧化镁和高纯超细高比表面积白炭黑是一种技术上可行、经济效益明显的路线^[28]; 钼尾矿合成制造金云母、玻璃、混凝土小型空心砌砖等建筑材料; 钼尾矿还可以用作农业肥料。综合分析, 尾矿综合利用途径集中于有价元素回收、建筑材料、充填、复垦等方面。

但上述综合利用途径均存在一定问题, 如从尾矿中提取有价元素, 多为选矿工艺相对落后的历史堆积尾矿; 尾矿建材化虽有一定进展, 但受到环境安

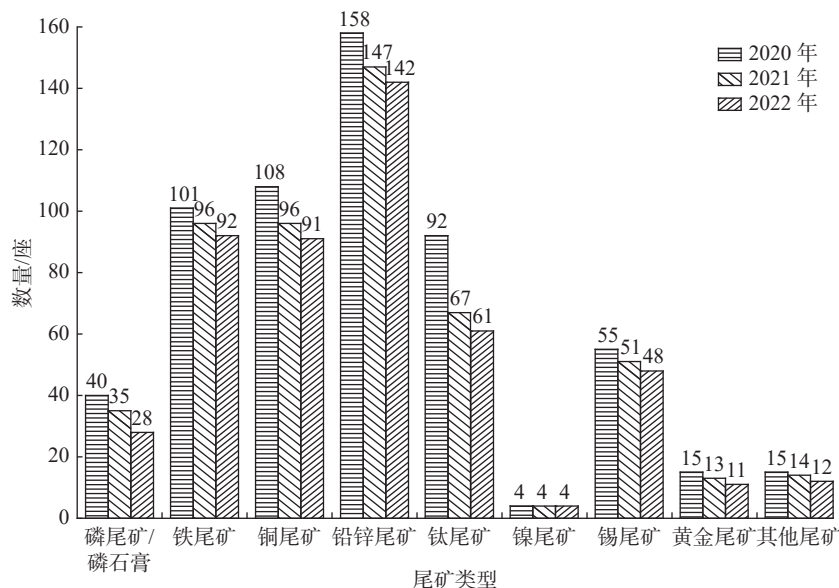


图 2 2020—2022 年云南省不同类型金属尾矿库数量

Fig. 2 Number of different types of metal tailings ponds in Yunnan Province from 2020 to 2022

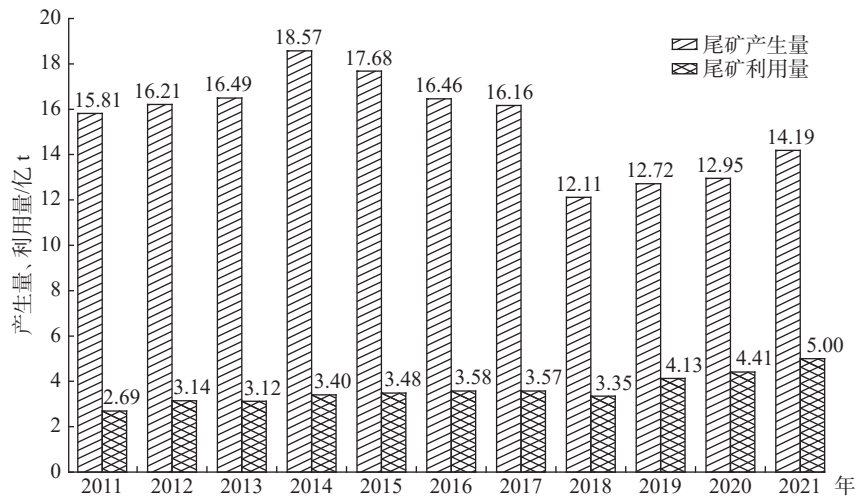


图3 2011—2021年我国尾矿综合利用情况

Fig. 3 Comprehensive utilization of tailings in China from 2011 to 2021

全、工艺稳定性和产业化等因素制约,未得到持续性的发展;尾矿制作农用肥料和主流的肥料生产企业相比,整体效益不足以支撑该模式下的投入。这些问题也是导致在国家政策层面大力支持尾矿固废资源化,但利用率仅为30%左右的主要原因。

在区域尾矿资源综合利用方面,钛尾矿、铁尾矿利用潜力较大。其中,钛尾矿因采矿工艺为地表水采,且选矿工艺多为磁选和重选,其尾矿为土壤颗粒的水力沉积,因此,钛尾矿土壤化具有较大的市场前景。铜尾矿、铅锌尾矿、黄金尾矿的规模化利用仍然面临较大的挑战,究其原因,与矿石的成矿机理和选矿工艺有直接关系。矿石选别过程中工艺选择、药剂的添加成分及比例直接影响固体废物属性,从而间接影响规模化固体废物综合利用。

近年来,从单纯的尾矿作为充填材料、路基材料等砂石材料利用模式,逐步转化成大量利用尾矿中的高含量元素Ca、Mg和主要元素Si、Al制备轻质、隔热、耐火等多功能高附加值材料利用模式^[29]。河南省嵩县柿树底金矿在尾矿综合利用方面取得了实质进展,建成充填系统,将浮选尾矿振动筛分,中细粒径尾砂用于井下采空区充填,粗粒径尾砂脱水后,可作为建筑石料对外销售,将“废品”变成资源,实现了生态效益和经济效益相统一^[30]。

综上所述,尾矿综合利用规模化、无害化既是整个产业中的难点,也是科技进步和技术应用的痛点。

3.2 利用量及利用方向

根据工业固废网^[31]统计数据,2021年我国尾矿综合利用量达到5.00亿t,利用率达到35.24%,同比增长了3.47%(图3)。目前,尾矿综合利用的方式有价组分回收、矿山井下充填、生产建筑用砂、轻质

砌块和条板、路基垫层料、矿山植被复垦、填海造地等途径。综合利用占比最大的方式是尾矿洗砂和尾矿充填,占比约为84.5%^[32]。

1)建筑材料。尾矿中含有Si、Al等元素,将尾矿用作建材原料可以减少传统建筑材料开发,实现尾矿的大宗消纳,产生一定的经济效益和社会效益。目前,在建筑材料方面,尾矿主要应用于分选机制砂、生产加气块、加气条板、免烧砖、透水砖、干混预拌砂浆、特种砂浆、混凝土掺合料、微晶玻璃、发泡陶瓷、陶粒轻骨料及路基等领域。

2)尾矿充填。尾矿充填可以大量消纳尾矿,是极其有效的尾矿减量化利用技术之一^[33]。矿山的充填经历了干式充填、水力充填、胶结充填以及膏体充填等阶段。近年来,随着新一轮找矿战略突破行动,以及矿业作为国民经济基础产业的作用日益突出,矿石价格回升和技术发展同时促进了充填采矿技术的迅速发展,其中具有代表性的是全尾砂胶结充填技术和高水固结全尾砂充填技术,近年来新建的矿山多采取充填采矿技术进行开采,真正实现了“无尾矿山”。

3)二次分选及有价组分回收。由于特定时期工艺和设备等原因,选矿后排出的尾矿仍有多种共生有价组分未被完全提取与回收,目前主要集中于铁、铜、金、银、钛等有价金属和云母、石英等非金属矿物的回收方面,提取方法主要有磁选、浮选、反浮法、重选耦合等多种选矿法。

4)农业领域。目前,尾矿用于农业领域主要有三个方向:一是利用尾矿中含有的Zn、Mn、Cu、Mo、P等植物生长必备微量元素,经处理将其制成化肥,以达到提高土壤肥力的作用;二是土壤改良剂,尾矿

中的有效组分与土壤有害物质反应, 达到以废制废、修复土壤环境的目的; 三是采用微生物法或者生物法进行尾矿库复垦。

3.3 存在问题及解决途径

1) 存在问题。我国尾矿处理目前存在的主要问题有: ①历史存量尾矿量大, 占用大量的土地; ②尾

矿堆存存在溃坝和污染生态环境的风险; ③尾矿入库堆存仍然是新增尾矿的主要处置方式。

2) 现有技术。尾矿处置以尾矿库堆存及综合利用为主。专利的申请和授权能够有效展示研究热度及技术前沿, 尾矿综合利用相关专利申请及授权情况如图 4 所示。

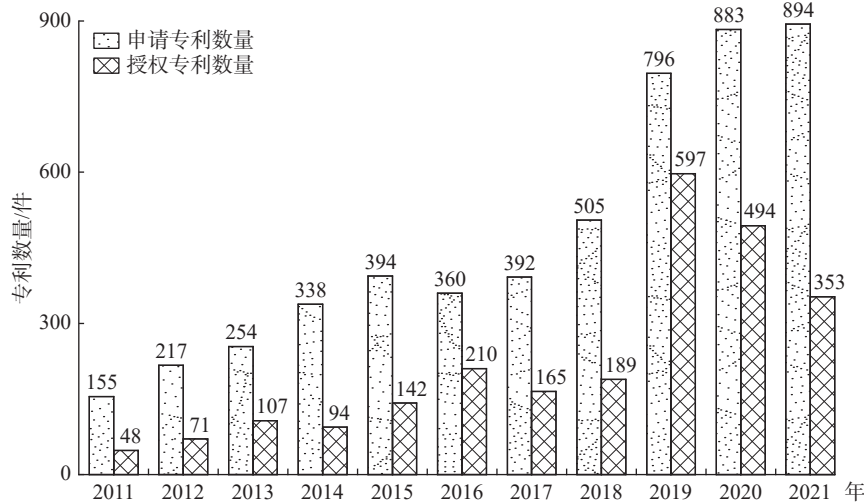


图 4 2021 年尾矿综合利用相关专利申请与授权情况

Fig. 4 Patent applications and authorizations related to comprehensive utilization of tailings in 2021

从专利授权领域看, 尾矿专利授权集中在尾矿充填、尾矿制备建材、有价值组分回收、农业等领域, 其中, 尾矿充填方向占比 42%, 尾矿制备建材方向占比 33%, 有价值组分回收占比 19%, 农业领域占比 3%, 其他领域占比 3% (图 5)。

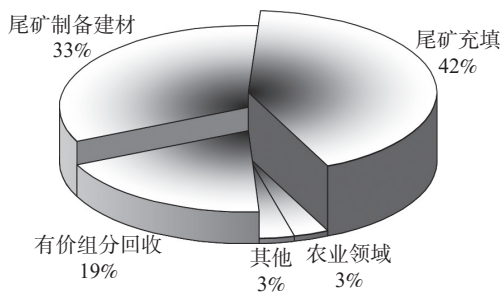


图 5 2021 年尾矿综合利用相关授权专利涉及主要领域

Fig. 5 Main areas covered by authorized patents related to comprehensive utilization of tailings in 2021

从申请人看, 2021 年昆明理工大学获得尾矿综合利用相关专利授权 18 件, 主要集中在尾矿协同脱硫、钝化重金属、有价值组分提取及尾矿制备建材等方向; 其次为鞍钢集团矿业有限公司, 获得相关专利授权 4 项, 主要集中在尾矿制备吸附剂和絮凝剂方向。

技术标准的制定与实施体现相关技术的成熟度。现行尾矿综合利用相关标准 21 项, 其中, 推荐性国

家标准 3 项、行业标准 8 项 (黑色冶金方向 7 项, 建材方向 1 项)、地方标准 10 项 (河北省 4 项, 江西省 2 项, 青海省、安徽省、福建省、吉林省各 1 项)。现行标准主要集中在用于水泥、混凝土中的掺合料, 矿山修复及治理, 制备烧结砖及加气混凝土砌块方面。

3) 解决途径。区域尾矿资源处置的建议: ①采用原位封存及植被生态恢复技术实施尾矿库生态闭库, 使其与周边自然环境融为一体; ②研发“安全+生态”集成技术, 突破应急主管部门或生态主管部门单向管控尾矿库的现状; ③尾矿实现资源处置的关键在于选矿环节产生尾矿的减量化。

3.4 重点技术及应用案例

结合工作实践, 部分项目成功实施并取得了较为突出的生态效益、社会效益和经济效益。本文主要介绍两种重点技术及应用情况。

3.4.1 磷石膏回采技术

为解决某历史遗留磷矿区生态修复充填材料来源困难的问题, 由多家企业、高校合作成立了新型矿山生态修复充填材料专项研发团队, 针对采用磷石膏作为主要原料生产矿山生态修复充填材料进行了研究与开发, 所得磷石膏基新型生态修复材料能够满足矿坑充填材料各项相关指标要求。该技术的合理推广, 可以解决流域遗留矿坑修复材料短缺的问

题,推进流域生态修复工作,改善流域生态环境质量现状。

1)回采方式:露天开采。

2)回采范围:结合《磷石膏库安全技术规程》(AQ 2059—2016)要求及工程实际,坝前150.0 m范围作为禁采区,不考虑回采。回采分为南区和北区,交替实施。

3)回采工艺:南区、北区回采时,总体由库尾向坝前方向进行。放矿时,将放矿管设置在坝体上,由坝前向尾部进行放矿。南区和北区回采工艺相同,仅分区内带宽南区为40.0 m,北区为60.0 m。

4)产品方案:回采出的磷石膏作为磷石膏基新型生态修复材料的原材料,磷石膏基新型生态修复材料作为矿区生态修复示范项目的充填材料使用。

5)生产能力:磷石膏的生产(回采)能力为240.0万 m^3/a 。

6)实施总结:磷矿生态修复区域由4个矿坑组成,生态修复面积102.66 hm^2 。4个矿坑进行相应的地表清理、防渗处理后采用磷石膏基生态修复材料进行回填,回填后表面做阻隔防渗处理,覆土并恢复为农用地及林地。磷石膏的回采意义在于减少固废堆存量、降低安全风险,同时可有效解决区域(流域)历史遗留矿山边坡垮塌、滑坡等地质灾害,景观损毁区域的植被生态恢复等,突出缓减了企业固废处置场的建设成本,尤其是在当前基本农田、公益林等用地审批难度大的背景下。与此同时,也能积极推进当地政府落实历史遗留矿山生态修复工作。因此,该案例应用场景为废弃矿山治理下的固废规模化处理提供了新的途径。

3.4.2 高浓度细粒级全尾砂充填技术

1)技术简介。高浓度细粒级全尾砂充填技术已列入金属尾矿综合利用先进实用技术目录^[34],采用特殊的立式砂仓脱水,可将极细粒级全尾砂(-20 μm 全尾砂约占40%)直接制备成高浓度(74%以上)砂浆,并联合深井开采全尾砂高浓度充填料浆自流管输降压技术及采场泄水技术,实现立式砂仓流态化全尾砂高浓度连续充填,解决深部高大采场嗣后充填问题。

尾砂充填和排放工艺中的关键设备是新型高效全尾砂浓缩贮存装置。结合传统的立式砂仓,通过合理的活化设施布置,将选矿厂全尾砂直接泵入尾砂浓缩贮存装置,经高效沉淀、澄清脱水,采用高压水/气活化尾砂等流程,直接制备出高浓度全尾砂料浆或膏体,用于充填或者干式堆放。低成本、稳定、高浓度的尾砂脱水和给料是保障尾砂充填及排放工

艺正常生产的关键。

该技术通过合理的喷咀设施造浆技术,以及喷咀布置,将选矿厂全尾砂直接泵(注)入砂仓,经高效沉淀、澄清脱水,采用高压水/气活化尾砂,直接制备出高浓度全尾砂料浆或膏体,全部用于充填。

2)应用案例及推广前景。尾矿空区膏体充填机安全无害处理技术领域的革新和开发,从源头解决尾矿、煤矸石造成的一系列环保问题和安全问题,自主研发充填工业泵、膏体浓密机、矿用混凝土泵、矿用湿喷机、矿用清仓机等高端环保装备,已完成的或在建的项目有云南金沙公司因民铜矿、云南保山核桃坪铅锌矿、新疆阿希金矿、贵州开阳磷矿、安徽铜陵有色冬瓜山铜矿等。

高浓度细粒级全尾砂充填技术能提高矿山的资源利用率,是充分利用尾矿资源发展节地、节能、节材、环保的直接有效途径。该项技术经济效益和社会效益显著,拥有广阔的推广应用前景。

3)实施总结:全尾砂充填的意义在于实现“无尾”矿山,推进无废“矿山”建设,同时可以有效解决矿山地下开采的采空区治理,均已得到国家、行业、企业的认可。与此同时,将井下充填技术延伸至露天采坑尾矿固结充填领域是行业新技术研发的方向之一。

4 结论及展望

1)综合分析,尾矿的综合利用途径主要为回收有价值组分、研发建筑材料或回填料,多功能高附加值材料利用模式也得到了关注和实践。近年来,云南省在尾矿、磷石膏回采工程中,结合历史遗留废弃露天采坑的治理和回填,既解决了历史遗留废弃矿山的治理问题,同时又消耗了部分大宗工业固体废物,但是相比总体工业固体废物存量,占比仍旧很小。

2)尾矿井下充填为国家鼓励的新技术,已得到了广泛应用。工程实践中仍存在建设成本高、推广程度不足等问题。在此基础上,进一步从政策导向和技术开发的角度,研发露天采坑闭坑或政策原因退出(停产)的固体废物充填技术。

3)对于尾矿综合利用的研究方向,今后应重点关注以下方面:①尾矿的化学改性技术,使其改性后能够稳定满足工程和环保的要求,更多地应用于实际工程;②尾矿中超标因子采用植物或者微生物的方式控制,并使其转变为土,尾矿成土后将成一种高价值资源。

4)尾矿综合利用后的场地生态环境不容乐观,因此,现有尾矿库完成回采后的场地污染防治也需要引起重视。

参考文献(References):

- [1] 宁平,孙鑫,董鹏,等.大宗工业固体废物综合利用:矿浆脱硫[M].北京:冶金工业出版社,2018.
- [2] 宁平,孙鑫,唐晓龙,等.大宗工业固废环境风险评价[M].北京:冶金工业出版社,2014.
- [3] 王长龙,魏浩杰,王肇嘉,等.典型金属尾矿绿化技术研究与案例分析[M].北京:科学出版社,2021.
- [4] 罗冰,王梓龙,杜娟.基于循环经济的铜尾矿综合利用浅析[J].矿业研究与开发,2019,39(3):137-140.
LUO Bing, WANG Zilong, DU Juan. Analysis on comprehensive utilization of copper mine tailings based on recycle economy[J]. Mining Research and Development, 2019, 39(3): 137-140.
- [5] 王中海.山西某选银堆存尾矿资源综合利用[J].矿业研究与开发,2022,42(10):81-87.
WANG Zhonghai. Multipurpose utilization of tailings resources from a silver dressing and stockpiling in Shanxi Province[J]. Mining Research and Development, 2022, 42(10): 81-87.
- [6] 刘晓圣,王美娜,王振方,等.全固废泡沫混凝土性能研究[J].混凝土与水泥制品,2018(10):75-78.
LIU Xiaosheng, WANG Meina, WANG Zhenfang, et al. Study on properties of all solid waste foamed concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2018(10): 75-78.
- [7] YANG W, LAN X C, WANG Q, et al. Selective pre-leaching of tellurium from telluride-type gold concentrate[J]. Frontiers in Chemistry, 2021(9): 593.
- [8] 郑竞,程波,杨武,等.尾矿减量化、资源化和无害化实践状况与思考[J].矿山机械,2022,50(1):38-43.
ZHENG Jing, CHENG Bo, YANG Wu, et al. Practice and thinking on tailings reduction, recycling and harmlessness[J]. Mining & Processing Equipment, 2022, 50(1): 38-43.
- [9] 魏浩杰,于皓,彭犇,等.我国大宗工业固废综合利用发展状况分析[J].中国资源综合利用,2019(11):56-58.
WEI Haojie, YU Hao, PENG Ben, et al. Analysis on the development of comprehensive utilization of solid waste in mass industries in China[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2019(11): 56-58.
- [10] 李文超,王海军,王雪峰,等.全国矿山资源节约与综合利用报告(2020)[M].北京:地质出版社,2020.
- [11] 郭万进,吴明海,王阳,等.我国铜矿尾矿资源化利用技术现状及进展[J].矿产综合利用,2023(5):127-134.
GUO Wanjin, WU Minghai, WANG Yang, et al. Present situation and progress of resource utilization technology of copper tailings in China[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2023(5): 127-134.
- [12] 胡天喜,文书明,陈名洁,等.我国尾矿综合利用的一些进展[J].中国矿业,2006,15(1):22-25,29.
HU Tianxi, WEN Shuming, CHEN Mingjie, et al. Some progress on the comprehensive utilization of the tailings our country[J]. China Mining Magazine, 2006, 15(1): 22-25, 29.
- [13] 张文朴.我国有色金属尾矿综合利用进展[J].资源再生,2008(8):27-29.
ZHANG Wenpu. Development progress on non-ferrous metals beneficiation tailings comprehensively utilization in China[J]. Resource Re-
- cycling, 2008(8): 27-29.
- [14] 杜建发.梅山选矿厂细粒级尾矿综合利用进展[J].金属矿山,2008(6):145-147,149.
DU Jianfa. Progress in comprehensive utilization of Meishan Concentrator's fine tailings[J]. Metal Mine, 2008(6): 145-147, 149.
- [15] LI Y F, WANG X Y, BAO J L. Analysis on mode of Iron tailings comprehensive utilization[C]//Proceedings of the 2016 6th International Conference on Machinery, Materials, Environment, Biotechnology and Computer(MMEBE). 2016.
- [16] 杜高翔.石棉尾矿综合利用研究进展[J].中国非金属矿工业导刊,2007(2):14-17,31.
DU Gaoxiang. Advancement of the research on the synthesis utility of asbestos tailings[J]. China Non-metallic Minerals Industry, 2007(2): 14-17, 31.
- [17] 张波.含铋尾矿综合利用工艺的基础研究[D].沈阳:东北大学,2012.
- [18] 胡卜亮,王快社,胡平,等.钼尾矿资源回收综合利用研究进展[J].材料导报,2015,29(19):123-127,134.
HU Boliang, WANG Kuaishe, HU Ping, et al. Research progress of molybdenum tailings resources recycling and utilization[J]. Materials Reports, 2015, 29(19): 123-127, 134.
- [19] 兰志强,蓝卓越.铜尾矿资源综合利用研究进展[J].矿产保护与利用,2015(5):51-56.
LAN Zhiqiang, LAN Zhuoyue. The progress of comprehensive utilization of copper tailings resource[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2015(5): 51-56.
- [20] 兰志强,蓝卓越,张镜翠.钨尾矿资源综合利用研究进展[J].中国钨业,2016,31(2):37-42.
LAN Zhiqiang, LAN Zhuoyue, ZHANG Jingcui. Research progress on the comprehensive utilization of tungsten tailings[J]. China Tungsten Industry, 2016, 31(2): 37-42.
- [21] 黎继永,童雄,韩彬,等.磷尾矿综合利用研究进展[J].矿产保护与利用,2015(5):57-62.
LI Jiyong, TONG Xiong, HAN Bin, et al. Research development of comprehensive utilization of phosphate tailings[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2015(5): 57-62.
- [22] 胡月,丁凤,刘韬,等.黄金矿山尾矿综合利用技术研究与应新进展[J].黄金,2013,34(8):75-78.
HU Yue, DING Feng, LIU Tao, et al. Study of comprehensive utilization technology of gold tailings and its new progress of application[J]. Gold, 2013, 34(8): 75-78.
- [23] 李宏静,王丽明,贾佳.白云鄂博稀土尾矿综合利用技术研究[C]//第九届国际稀土开发与应用研讨会.2019.
- [24] 符海桃,莫峰,兰希雄.锡尾矿综合利用研究进展[J].世界有色金属,2018(6):221-224.
FU Haitao, MO Feng, LAN Xixiong. Research progress on comprehensive utilization of Tin tailings[J]. World Nonferrous Metals, 2018(6): 221-224.
- [25] 陈桃,简胜,谢贤,等.钒钛磁铁矿尾矿综合利用研究进展[J].矿产保护与利用,2021,41(2):174-178.
CHEN Tao, JIAN Sheng, XIE Xian, et al. Research progress on comprehensive utilization of vanadium-titanium magnetite tailings[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2021, 41(2):

- 174-178.
- [26] 张亚峰,安路阳,崔晓东,等.菱镁矿尾矿综合利用研究进展[J].矿产保护与利用,2022,42(6):128-140.
ZHANG Yafeng, AN Luyang, CUI Xiaodong, et al. Advances in comprehensive utilization of magnesite tailings[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022, 42(6): 128-140.
- [27] 吴浩.我国尾矿资源综合利用研究进展与展望[J].资源信息与工程,2022,37(3):102-104.
WU Hao. Recent research progress and prospect in comprehensive utilization of tailings in China[J]. Resource Information and Engineering, 2022, 37(3): 102-104.
- [28] 苏庆平,龙小玲.石棉尾矿的危害及综合利用途径[J].矿产综合利用,2009(1):27-31.
SU Qingping, LONG Xiaoling. On the approach for comprehensive utilization of asbestos tailings[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2009(1): 27-31.
- [29] 黄洋,叶义成,胡南燕,等.磷尾矿材料化综合利用途径研究进展[J].材料导报,2021,35(S2):279-284,293.
HUANG Yang, YE Yicheng, HU Nanyan, et al. Research progress in materialized utilization of phosphate tailings[J]. Materials Reports, 2021, 35(S2): 279-284, 293.
- [30] 刘晓辉,王飞飞,李振龙.“废品”:变成资源[N].中国矿业报,2022-07-26.
- [31] 工业固废网.2021—2022年度中国大宗工业固体废物综合利用产业发展报告[R].2022.
- [32] 石晓莉,杜根杰,张铭,等.尾矿综合利用产业存在的问题及建议[J].现代矿业,2022,38(2):38-40,44.
SHI Xiaoli, DU Genjie, ZHANG Ming, et al. Problems and suggestions of comprehensive utilization industrial of tailings[J]. Modern Mining, 2022, 38(2): 38-40, 44.
- [33] 易龙生,米宏成,吴倩,等.中国尾矿资源综合利用现状[J].矿产保护与利用,2020,40(3):79-84.
YI Longsheng, MI Hongcheng, WU Qian, et al. Present situation of comprehensive utilization of tailings resources in China[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020, 40(3): 79-84.
- [34] 金属尾矿综合利用先进适用技术目录[EB/OL].(2011-03-03)[2023-10-05].https://www.miit.gov.cn/jgsj/jns/wjfb/art/2020/art_a288534_d96d146199bcd85b72b55faee.html.