

有色金属矿山尾矿综合利用与资源化

卢楠^{1,2,3,4,5*}, 王鹏^{1,3,4,5}

¹陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 陕西 西安

²陕西地建 - 西安交大土地工程与人居环境技术创新中心, 陕西 西安

³自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 陕西 西安

⁴陕西省土地整治工程技术研究中心, 陕西 西安

⁵陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司, 陕西 西安

收稿日期: 2021年12月28日; 录用日期: 2022年1月31日; 发布日期: 2022年2月7日

摘要

我国有色金属矿产资源的利用效率整体仍然不高, 尾渣堆存量不断增多, 加强对低品位矿、共伴生矿、难选冶矿、尾矿等的综合利用, 推进有价值组分高效提取利用, 对于保障国家资源安全, 促进生态文明建设具有重大意义。本文从提取作为硅肥、建筑稳定材料、新型基质材料等方面, 讨论了有色金属尾渣的综合利用和资源化, 并对未来研究方向进行了展望。

关键词

有色金属, 尾矿, 综合利用, 资源化

Comprehensive Utilization and Resource Utilization of Nonferrous Metal Mine Tailings

Nan Lu^{1,2,3,4,5*}, Peng Wang^{1,3,4,5}

¹Shaanxi Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

²Technology Innovation Center for Land Engineering and Human Settlements, Shaanxi Land Engineering Construction Group Co., Ltd. and Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi

³Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, The Ministry of Natural Resources, Xi'an Shaanxi

⁴Shaanxi Land Consolidation Engineering Technology Research Center, Xi'an Shaanxi

⁵Institute of Land Engineering and Technology, Shaanxi Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

*通讯作者。

Abstract

The overall utilization efficiency of my country's non-ferrous metal mineral resources is still not high. The stock of tailings piles continues to increase. It is of great significance to continuously strengthen the comprehensive utilization of low-grade minerals, co-associated minerals, refractory metallurgical minerals, tailings, etc., and promote the efficient extraction and utilization of valuable components. Accelerating the development of resource recycling economy can guarantee the security of national resources and promote the construction of ecological civilization. This article focuses on the extraction of silicon fertilizer, building stabilizing materials, new matrix materials, etc., discusses the comprehensive utilization and resource utilization of non-ferrous metal tailings, and prospects for future research directions.

Keywords

Non-Ferrous Metals, Tailings, Comprehensive Utilization, Recycling

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国在 1958 年将铁、铬、锰以外的 64 种金属列入有色金属[1]。有色金属是国民经济、日常生活及国防工业、科学技术发展必不可少的基础材料和重要的战略物资[2]，因而，各国对有色金属矿产资源愈加重视，有的国家对有色金属限制资源出口。我国是有色金属资源比较丰富的国家之一，世界上已经发现的金属矿产在我国基本都有探明储量[3]，资源分布相对集中于长江流域。

2021 年 8 月生态环境部发布的《2019 年中国生态环境统计年报》显示，仅 2019 年，全国一般工业固体废物产生量为 44.1 亿吨，综合利用量为 23.2 亿吨，处置量为 11.0 亿吨。有色金属矿采选业的一般工业固体废物产生量居第 2 位，超过 5 亿吨，占全国一般工业固体废物产生量的 14.9%；处置量居第 1 位，占全国工业企业一般工业固体废物处置量的 22.2% [4]。以上数据表明，我国有色金属矿产资源的利用效率整体仍然不高，大量生产、大量消耗、大量排放的生产生活方式尚未根本性扭转，尤其是作为矿业开发固体废料的尾矿，既是造成环境污染的主要来源，也是导致资源损失的关键环节。

2021 年 7 月，经国务院同意，国家发展和改革委员会印发了《“十四五”循环经济发展规划》(以下简称“规划”)，发展循环经济成为我国经济社会发展的一项重大战略。《规划》中提出了“加强对低品位矿、共生伴生矿、难选冶矿、尾矿等的综合利用，推进有色组分高效提取利用，到 2025 年，再生有色金属产量达到 2000 万吨”的具体要求。提高有色金属尾矿的资源利用率和再生利用水平，成为构建资源循环型产业体系的重要一环，对于保障国家资源安全，促进生态文明建设具有重大意义，旨在实现社会、经济、生态协同发展[5]。

对于已经没有重选价值的尾矿，目前主要利用为采空矿区充填材料、铺垫材料、矿物细掺合料等[6]。资源化利用研究主要围绕利用尾渣中的硅质组分制作建筑材料等[7] [8]开展，本文就将尾渣利用为硅肥、

建筑稳定材料以及功能材料开展现状分析及利用建议。

2. 利用为硅肥

根据尾矿中主要组成矿物成分, 可将尾矿分为钙铝硅酸盐型尾矿、长英岩型尾矿、碱性硅酸盐型尾矿、高铝硅酸盐型尾矿、高钙硅酸盐型尾矿、硅质岩型尾矿、碳酸盐型尾矿等类型。除碳酸盐型尾矿之外, 几乎所有的尾矿都含有硅, 且土壤中二氧化硅含量占一半以上。近年来, 大量研究围绕硅在植物体内的吸收利用途径, 及其对植物的生长、产量和品质调控效应等开展, 硅作为植物有益元素的作用毋庸置疑。

硅不仅可以通过物理屏障提高植物的抗逆能力, 而且可以作为生物活性分子主动参与植物胁迫响应的调控。研究表明, 硅对小麦、水稻、甘蔗、苹果等累硅类植物生理功能发挥显著调节作用, 从而对抗如土壤干旱、盐渍化、极端温度、病虫害、养分缺乏等多种逆境胁迫[9] [10]。崔德江等[11]通过研究硅钾肥对不同水分条件下小麦光合作用日变化得到, 硅肥可缓解水分胁迫下的光合作用“午休”程度, 有效降低光合作用日变化幅度, 提高光合速率, 增加籽粒中干物质的累积量[12] [13]。王显等[14]的研究结果表明, 施用硅肥能够提高水稻剑叶光合速率和气孔导度, 改善光合作用功能。宫海军、饶立华等学者的研究表明, 硅能促进水稻生长, 协调地上部和根系比例, 改善根系功能和活力, 提高作物水肥吸收能力[15] [16]。许金凤等[17]研究表明, 硅素浓度可显著增加根冠比, 使根系总表面积和总长增加。戎洁庆[18]的研究结果表明, 施硅肥能够有效提高雷竹林抗低温胁迫能力。高茜等[19]通过监测紫花苜蓿越冬生理指标, 明确了施用硅肥可降低紫花苜蓿丙二醛含量, 从而提高紫花苜蓿的抗寒性。施硅肥具有增强植株抗病性的良好功效, 施硅的小麦、水稻抗病性明显增强[20] [21], 此外, 施硅肥还可促进植株对氮磷钾等养分的吸收, 改善植物无机养分利用率[22]。

农业生产当中, 硅可以通过硅酸钙、硅酸镁、硅酸盐炉渣、白云石和磷矿石等不同方式施用[9]。对无害含硅尾渣进行加工, 提取含硅有效组分, 是对尾渣综合利用和资源化的一种有效途径。

3. 应用为建筑稳定材料

随着国民经济的发展, 为了满足人民对美好生活的诉求, 国家在基础设施建设的投资不断加大, 城乡基础设施不断完善, 建设规模持续较快发展, 建筑材料的缺口也不断增大, 问题日益突出。有色金属行业产生的尾渣多含硅酸盐、铝硅酸盐等矿物, 对于二氧化硅质量分数高于 60% 的高硅尾渣, 因同时还有 Ca、Fe、Mn 等碱金属, 与一般建筑材料的组成相似, 可利用制备建筑材料。

1) 尾矿渣应用为建筑或铺垫材料。经砂化处理后的尾渣级配均匀, 可用作矿物细掺合料, 力学强度堪比普通碎石, 广泛应用于改性材料制备、路基等铺垫材料, 稳定性良好。陈华等[23] [24]研究了以特殊钢尾渣为掺合料, 制备钢渣代砂环保型泡沫混凝土。将提钒尾渣锻烧活化后, 可在碱激发剂的作用下制备地聚物[25]。此外, 提钒尾渣制备的建筑用砖主要有免烧砖、蒸压砖和烧结砖[26]。白魁和曾兴华[27]利用钨尾矿渣制备了蒸压加气混凝土砌块, 对尾渣的磨细粒度、掺量、碱激发剂功效等参数和效应进行了研究。

2) 尾矿渣应用为充填材料。随着矿产开采规模和速度的加快, 尾渣堆存量不断上升, 矿区内矿坑、采空区等极易发生次生地质灾害, 合理利用和使用尾渣充填, 是实现环境和经济效益双赢局面的最佳措施。史采星等[28]利用铅锌冶炼渣制备的矿山充填胶凝材料, 具有流动性好, 充填效果佳的特点。张丹和薛杉杉[29]研究了碱激发剂对于提高尾矿-冶炼渣充填复合胶凝材料强度的最佳掺量。郭树林等[30]将氰化尾渣无害化处理后, 采用膏体充填技术将氰化尾渣回填至井下, 并对国内外回填标准进行了分析。

4. 开发为新型基质材料

具有良好透水透气性能, 且符合土壤环境质量的尾渣在土质资源匮乏地区可开发为新型基质材料。含有重金属的有色金属尾渣因营养元素贫乏, 易导致堆存区水土流失, 造成植被稀少。但尾渣也通常具备良好透水透气性能, 由于矿岩性质和选矿工艺不同, 有些尾渣还会含有植物生长所必需的营养元素, 特别是微量元素, 因此, 在重黏土区及土壤资源极度缺乏的裸露山体, 将尾渣用于种植或用作客土改良复垦的基质, 变废为宝, 是一种将矿业固废作为新型资源的有效利用形式。主要适用于尾渣中不含有毒有害元素的中小矿山, 且在矿山周围有适宜的地形。

肖舒等[31]以栎树为研究对象, 通过测定以锰矿废弃物(不同配置比例的尾渣和尾泥)为主要成分的基质的物理性质, 监测栎树存活率及其生长状况等, 得到基质的最佳配置比例。与此同时, 值得关注的是为尾渣为主要成分的基质中有机质、氮、磷、钾等主要营养成分含量较低, 且几乎不含动植物残体、生物、微生物, 自然熟化能力较差, 在对基质进行应用时应注意改良和培肥, 以增加新型土壤的结构性、可耕性及保水保肥性。可配合采用种植绿肥还田、添加食用菌肥料等方式加速基质熟化和改良速度。

5. 总结

随着我国工业产品消耗量的逐年增长, 有色金属矿山尾渣堆存量不断增多。有色金属矿区固废产生强度高、利用不充分、综合利用产品附加值低等突出问题与加大循环经济发展力度, 绿色低碳循环发展的矛盾日益凸显。我国的尾矿利用率低于国外 50% 以上, 主要集中于有价金属回收的现状需要持续改变, 未来, 有害元素脱除剂的开发、多种有价金属的回收、工艺流程的简化和工程成本进一步降低, 高附加值产品的研发等均是尾渣综合利用与资源化研究的重点方向, 力争实现环境保护和经济增长的可持续, 进而推动社会经济的高质量发展。

基金项目

陕西地建 - 西安交大土地工程与人居环境技术创新中心开放基金项目(2021WHZ0094); 陕西省土地整治重点实验室开放基金项目(2019-JC04)。

参考文献

- [1] 宋凯. 为建设有色金属工业强国提供高素质技能人才支撑[J]. 江苏教育(职业教育版), 2013(6): 18-22.
- [2] 全国有色金属标准化技术委员会, 中国标准出版社第五室. 铝冶炼标准汇编(产品卷) [M]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [3] 龙安举. 有色金属矿产资源的开发利用与可持续发展[J]. 世界有色金属, 2017(10): 42-43.
- [4] 中华人民共和国生态环境部. 2019 年中国生态环境统计年报[R]. 北京: 中国环境出版集团, 2021.
- [5] 国家发展与改革委员会. “十四五”循环经济发展规划(发改环资[2021]969 号) [R]. 北京: 国家发展与改革委员会, 2021.
- [6] Lei, C., Yan, B., Chen, T., *et al.* (2017) Recovery of Metals from the Roasted Lead-Zinc Tailings by Magnetizing Roasting Followed by Magnetic Separation. *Journal of Cleaner Production*, **158**, 73-80. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.164>
- [7] 王钦建, 石琳, 黄颖. 国内铅锌尾矿综合利用概况[J]. 中国资源综合利用, 2012, 30(8): 33-37.
- [8] Guo, J.P., Wu, F.C., Xie, S.R., *et al.* (2007) Environmental Conditions and Exploitation of Lead-Zinc Tailings in Linxiang County, Hunan Province. *Chinese Journal of Soil Science*, **38**, 553-557.
- [9] Sahebi, M., Hanafir, M.M., Alanar, A.S.N., Rafri, M.Y., Azizi, P., Tengoua, F.F., Azwa, J.N.M. and Shabanimofrad, M. (2015) Importance of Silicon and Mechanisms of Biosilica Formation in Plants. *BioMed Research International*, **2015**, Article ID: 396010. <https://doi.org/10.1155/2015/396010>
- [10] Ma, J.F. and Yamaji, N. (2015) A Cooperative System of Silicon Transport in Plants. *Trends in Plant Science*, **20**,

435-442. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2015.04.007>

- [11] 崔德杰, 王月福, 高静, 等. 硅钾肥对不同水分条件下小麦光合作用日变化的影响[J]. 土壤通报, 1999, 30(1): 38-39.
- [12] 高淑萍, 替林生. 硅肥对小麦养分吸收与光合物质生产的影响[J]. 土壤肥料, 2001(5): 35-37.
- [13] 王玉强, 王俊仁, 吕玉亮, 等. 小麦基施硅肥的应用效果[J]. 安徽农业科学, 2000, 28(1): 90-91.
- [14] 王显, 张国良, 霍中洋, 等. 氮硅配施对水稻叶片光合作用和氮代谢酶活性的影响[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2010, 31(3): 44-49.
- [15] 宫海军, 陈坤明, 王锁民, 张承烈. 植物硅营养的研究进展[J]. 西北植物学报, 2004, 24(12): 2385-2392.
- [16] 饶立华, 覃莲祥, 朱玉贤, 谢学民. 硅对杂交稻形态结构和生理的效应[J]. 植物生理学, 1986(3): 22-26.
- [17] 许金凤, 朱瑾, 任响霏, 等. 外源硅添加对草地早熟禾硅素吸收及根系生长的影响[J]. 草地学报, 2017, 25(5): 1007-1013.
- [18] 戎洁庆. 硅肥对雷竹抗寒性的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江农林大学, 2013.
- [19] 高茜, 徐洪雨, 李振松, 等. 硅肥对紫花苜蓿越冬特性及冬灌对田间土壤温湿度、越冬率的影响[J]. 草地学报, 2020, 28(1): 230-236.
- [20] 邵长泉, 张翠珍, 邵长荣. 小麦施用硅肥的效果及适宜用量的研究[J]. 中国土壤与肥料, 2006(4): 51-53. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-6257.2006.04.014>
- [21] 阮洪家, 胡敬年, 叶为发, 等. 施用硅肥对水稻生育特性及产量的影响[J]. 现代农业科技, 2015(3): 9-10.
- [22] 朱从桦, 李其勇, 程明军, 等. 氮磷钾减量配施硅肥对玉米养分吸收、利用及产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2018(1): 56-63.
- [23] 陈华, 李辉, 顾恒星, 等. 基于正交设计与 BP 神经网络优化制备钢渣代砂环保型泡沫混凝土[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(7): 2447-2452.
- [24] 陈华, 李辉. 特殊钢尾渣粉在泡沫混凝土制备中的作用机理[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(3): 446-450.
- [25] 刘金生, 丁学勇, 薛向欣, 张学婕. 提钒尾渣资源化综合利用的研究进展, 2021, 56(7): 152-160.
- [26] 马莹. 石煤直接浸出提钒尾矿制备建筑材料的研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
- [27] 白魁, 曾兴华. 利用钨尾矿渣制备蒸压加气混凝土砌块研究[J]. 江西建材, 2013(5): 26-28.
- [28] 史采星, 郭利杰, 李文巨, 等. 铅锌冶炼渣充填胶凝材料研究及应用[J]. 黄金科学技术, 2018, 26(2): 160-169.
- [29] 张丹, 薛杉杉. 碱激发剂掺量对充填复合胶凝材料强度影响的试验研究[J]. 中国矿业, 2015(S2): 221-226.
- [30] 郭树林, 闵忠鹏, 刘龙琼, 等. 黄金矿山氰化尾渣充填技术探究[J]. 黄金, 2020, 41(9): 72-76.
- [31] 肖舒, 邓湘雯, 黄志宏, 等. 栎树对湘潭锰尾矿土不同处理方式下植被修复盆栽实验[J]. 环境科学学报, 2017, 37(7): 2721-2727.