

铁尾矿的资源化利用现状及建议

安艳玲 孟 月

(商丘工学院土木工程学院, 河南 商丘 476000)

摘 要: 铁尾矿作为选矿后排放的大宗固体废弃物, 大量堆积不仅造成了矿产资源的浪费, 还极大破坏了周围的生态环境并造成安全隐患。铁尾矿综合利用现状为铁尾矿有价元素磁化再选, 作采空区填料, 作肥料和土壤改良剂, 作砖、墙体保温材料、混凝土和微晶玻璃等建筑材料。本文简述我国铁尾矿资源化综合利用现状及资源化利用的主要形式, 并针对目前完善现有技术的同时提出相关建议, 积极探索新的利用方式和途径。

关键词: 铁尾矿 磁化再选 土壤改良剂 充填 建筑材料

DOI: 10.12319/j.issn.2096-1200.2022.28.163

伴随不断增大的矿山开采量, 铁尾矿作为经过破碎、重选、磁选等选矿工艺流程后剩余的大宗固体废弃物, 其堆存量也在与日俱增。据《中国资源综合利用市场调研报告(2021)》可知, 2020年1月至2021年12月我国工业固体废弃物总体利用率高达62.3%, 总体利用量为20.59亿吨, 而其中尾矿综合利用率仅占18.9%, 综合利用量仅为3.12亿吨, 如此大产量的铁尾矿堆存既造成了大量土地资源的浪费, 又破坏土壤结构, 对周围的生态环境造成了极大的破坏和安全隐患。2021年3月, 国家发改委发布的“关于十四五大宗固体废弃物综合利用指导意见”明确指出, 亟待进一步推进铁尾砂等大宗工业废弃物的高价值综合利用研究。铁尾矿固体废弃物的二次利用, 既可充分利用矿物资源创造新价值, 又可有效解决铁尾矿大量堆存带来的安全与环境问题。因此, 铁尾矿的综合利用方法的探索迫在眉睫。

铁尾矿的综合利用率随着科学技术的进步不断提高。为建设可持续、可循环发展经济, 需要更加深入地开展铁尾矿变废为宝综合利用研究。目前为止, 铁尾矿资源化综合利用途径和方式主要有: 大于4.75mm粒径作为混凝土粗骨料, 小于4.75mm粒径的作为空心砌块、烧结砖、隔声材料等建筑材料细骨料^[1-3]。本文总结我国目前铁尾矿资源化利用基本现状并提出相关建议, 旨在推动铁尾矿资源开发应用更加高效、规范化。

一、铁尾矿综合利用基本现状

(一) 铁尾矿有价元素磁化再选

铁尾矿由于选矿工艺产地不同导致其成分、含量也不尽相同。我国不同地区不同选矿工艺铁尾矿除了含少量金属外, 铁尾矿的主要化学成分分别是Si, Al, Ca, Mg与少量Fe, Na, K的氧化物等。铁尾矿中有价元素的提取再利

用, 对提高铁尾矿综合利用率和高附加值资源化利用意义重大^[4-5]。外国对铁尾矿再选工艺的研究大都是围绕铁尾矿铁元素的再富集和铁、钛、钴、镍、铜和稀土元素等二次有价金属的回收。LI等在铁尾矿中采用磁化-磁选工艺回收有价铁, 当铁尾矿、煤质量比为100:1时, 得到铁品位为61.3%、回收率为88.2%的铁精矿。我国对铁尾矿再选回收是进行除杂达磁化到精铁矿的标准。邓小龙等^[7]从磁铁矿尾矿中经过弱磁-强磁的选矿流程后进行1粗-1精-3扫的反浮选工艺, 得出可达65.43%的铁精矿品位, 53.34%的金属回收率; 霍松洋等^[8]对承德某-0.074mm含量占52.14%的铁尾矿采用一粗三精的浮选工艺和磁-重联选工艺进行试验, 最终获得品位为23.00%, 回收率分1.24%的精矿。

(二) 铁尾矿作肥料及土壤改良剂

铁尾矿中的Mn、B、Zn、Cu、Fe、P等微量元素是植物生长必不可少的, 利用铁尾矿作为植物肥料制作原料, 可改善土壤湿度、酸碱度、稳定性及孔结构, 并增加土壤肥力满足使用要求, 实用价值极高。丁文金等用造粒-磁化的手段以铁尾矿粉作为磁性材料生产复混肥, 且制作出来的磁化复混肥料重金属含量对土壤不会影响农作物品质, 造成重金属污染。张丛香等在东北某盐碱地中应用了按一定比例制备的铁尾矿、有机酸性肥、酸性调理剂土壤改良剂, 且盐碱地的土壤情况得到明显改善, 盐分和pH降低明显, 植被生长的环境得到改善。

(三) 铁尾矿作采空区充填料

矿山开采形成了大量采空区, 对采空区进行大规模充填铁尾矿是消减利用铁尾矿的又一重要途径, 既可解决铁尾矿大量堆存造成的破坏土壤、污染大气及水源、浪费土地资源 and 安全隐患问题, 又可达到采空区低成本高附加值

充填。目前大部分矿洞采取高浓度胶结充填方法，充填环节成本极高，以铁尾矿替代水泥减少河砂用量，缓解充填料的用量，节省充填成本。李恒天^[9]以原状铁尾矿砂为骨料，用铁尾矿—熟料—矿渣三元体系制备出铁尾矿基新型充填材料，以抗压强度为评价指标，研究了矿渣、煤矸石和粉煤灰三种固体废弃物与铁尾矿的相容性。

(四) 铁尾矿作建筑材料

目前水泥和砂石骨料是我国建筑材料中最常用的胶集料和骨料，铁尾矿因其主要矿物成分有Si, Al, Ca, Mg与少量Fe, Na, K的氧化物，与天然河砂、海砂类似，在建筑领域中被广泛应用。利用铁尾矿制备混凝土、砖材、微晶玻璃等建筑材料，既能降低生产成本（替代传统天然砂、碎石和砾石等骨料），又可消减因铁尾矿大量堆积而造成的环境污染、破坏土壤、浪费土地资源和安全隐患等问题。

1. 铁尾矿制砖和保温墙体材料

张全宏等^[10]选用铁尾矿为主要原料制备蒸压灰砂砖，结果表明：尾矿、河砂和石灰的质量比为74:15:11时成型压力为20MPa；在蒸汽压力为1.0MPa条件下，可制得满足国标的密度为1900~2000kg/m³，平均抗压强度可达21.5MPa的MU20级标准灰砂砖。LI等^[6]利用细粒低硅铁尾矿和无水泥固化剂为原料制备出物理性能和耐久性满足国标要求，抗压强度、饱和抗压强度分别达到27.2、24.3MPa的环境友好型砖。南晓杰等^[11]利用铁尾矿采用焙烧工艺制备透水砖，形貌呈簇状、网状和针状3种结构的水化产物增加了砖体结构的密实度，提高了透水砖的抗折、抗压强度，分别可达3.34MPa和15.44MPa。

传统墙材保温材料的建筑能源消耗大、防火性差、易燃烧引起火蔓延及污染环境等，因此，开发研究新型墙材刻不容缓。在国家《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》中促进大宗固废绿色环保、高效节能、高价值、规模化利用的背景下，探索尾矿在新型墙材领域的研究利用，提高铁尾矿的利用率，降低建筑成本。陈永亮等^[12]以铁尾矿、稻壳、膨润土为原料制备出了抗压强度为7.6MPa的轻质保温墙体材料，利用微观手段研究其烧结机理后发现，其烧结过程与制砖相似。杨航等选用河北某质量分数为40%~55%的铁尾矿和废石制备了密度为350kg/m³、抗压强度为2.2MPa的建筑外墙陶瓷保温材料。

2. 作为胶凝材料制备混凝土

铁尾矿为骨料广泛应用于高铁、地下管廊、桥梁、海港等重点民用或军事工程。郑永超等^[13]利用70%铁尾矿用量在水胶比为0.15和60℃蒸养条件下制备出了其抗压强度均

>100MPa的高强混凝土。李德忠等则研究了在低水胶比、标准养护条件下制备的大掺量铁尾矿高强混凝土，其力学性能28d后抗压强度可达97.63MP，抗折强度为93.75MPa。

顾晓薇等^[14]以高硅型铁尾矿砂与粉煤灰复掺替代硅砂制备蒸压加气轻质混凝土（ALC）试件，试件抗压强度为4.15MPa、干体积密度为576kg/m³，反应生成水化硅酸钙凝胶（C-S-H）增大混凝土密实性，混凝土抗压强度满足规范设计要求。张秀芝等^[15]进行铁尾矿与机制砂按照合理比例混合配制混合砂高性能混凝土探索铁尾矿砂掺和比例对混凝土性能的影响规律，发现相同养护天数下，铁尾矿砂混凝土抗压强度较天然河砂混凝土高，当机制砂与铁尾矿砂的混合比4:6时，铁尾矿砂混凝土的新拌流动性以及抗压强度、体积稳定性与河砂混凝土均较接近。综合以上可以看出，铁尾矿砂可替代比例达50%~100%的细骨料。若将铁尾矿进行分级，粒径在4.75~40mm之间的可作为混凝土粗骨料，小于4.75mm粒径的常作为细骨料应用于烧结砖、空心砌块、混凝土制品、吸隔声材料等建筑材料的制备，对于粒径小于0.075mm的更细尾矿粉，可作为活性粉末应用于微晶玻璃、矿山采空区充填、混凝土、筑路材料等，总体上铁尾矿的掺量可达70%~90%。

3. 铁尾矿制备微晶玻璃

尾矿组分中含的Si、Ca、Al、Mg等氧化物极为复杂，通常会将其掺入到对透明度较低要求的新型建筑材料微晶玻璃中。微晶玻璃中的主要成分为SiO₂，其主晶相石英因溶解于液相，结构紧密，强度提高，体积密度和抗压强度增大，性能优于一般的陶瓷、玻璃。铁尾矿硅酸盐成分中SiO₂的含量及其CaO、Al₂O₃、MgO的含量均符合微晶玻璃含量指标。因此，用铁尾矿制备微晶玻璃是对大宗固体废弃物的有效消耗。南宁等^[16]用铁尾矿采用烧结法制备了Ca-Mg-Al-Si氧化物四元体系微晶玻璃，在900℃晶化温度、保温2h情况下微晶玻璃性能较优，抗压强度为158.32MPa，主晶相为透辉石相的微晶玻璃。

二、尾矿综合利用发展的建议

近些年科研工作者在推动尾矿固废综合利用方面的各项工作取得了积极进展，但仍存在高附加值利用率、综合利用率偏低、大量占用土地资源等问题。目前铁尾矿主要以掺合料为主，在建材高附加值等方面的利用相对较少，标准和规范不完善且覆盖领域范围较小。铁尾矿资源大规模、工业化利用仍是当下研究的热点、重点和难点。随着我国不断深入的标准化改革下，社会发展的技术支撑逐渐偏向于行业标准。在铁尾矿标准化、资源化利用领域当

中,对产品的性能建立统一的质量、安全以及环保问题检验标准,促进铁尾矿有价元素回收利用、高赋值性产品及相关技术的推广应用。为满足新产品对标准化的需求,推动产业快速、可持续发展,具体针对铁尾矿资源化利用发展现状提出以下几点建议。

第一,完善与制定铁尾矿综合利用相关产业体系。逐步建立铁尾矿利用技术创新体系,突破其中的关键瓶颈技术,逐步健全铁尾矿标准体系,推动和规范产业发展;实现与粉煤灰、煤矸石、工业石膏等大宗固废产业间融合共生协同发展。

第二,按铁尾矿中化学成分及含量对高硅型铁尾矿、高铝型铁尾矿、低钙镁铝硅型铁尾矿、高钙镁型铁尾矿、金属型铁尾矿等进行分类,建立铁尾矿基本数据库。

第三,加大科研投入和技术转化。拓展综合利用途径和领域,加大技术创新和科研投入,在已有的综合利用领域内开发新产品。在加强制备新型材料、有价元素回收等方面探索新技术、新工艺研究,为达到铁尾矿资源化利用绿色环保可循环发展,需不断提高铁尾矿减量化、资源化水平。

第四,建立集约、高效的铁尾矿产业基地,扩大尾矿生产的建材品种和范围,研发生产尾矿高附加值建材,提升铁尾矿高效回收利用,建立铁尾矿产业高质量、可持续发展新格局。

三、结语

作为我国最典型的一类大宗工业固体废弃物,铁尾矿资源的综合利用难题为整个固废资源化利用产业提出了更高的挑战开辟了新方向,对于生态文明建设具有重要意义。虽然已经在建筑领域上对铁尾矿应用的研究已经颇为深刻,但是当下铁尾矿资源化利用的技术是远远不满足如此大储量情况的。铁尾矿资源大规模、工业化利用仍是当下研究的热点、重点和难点。结合当下利用情况从现有的研究成果综合分析未来的利用方向,推动产业快速、可持续发展,为铁尾矿利用开辟其他全新的应用渠道。对于已经生产使用的产品如何改善利用产品性能,使其硬性指标和辅助性能达到标准,大量消纳铁尾矿还有巨大的潜力空

间,今后仍需探索和投入大量的精力去研究。

参考文献

- [1]路畅,陈洪运,傅梁杰等.铁尾矿制备新型建筑材料的国内外进展[J].材料导报,2021,35(5):5011-5026.
- [2]吕兴栋,刘战鳌,朱志刚等.尾矿作为水泥和混凝土原材料综合利用研究进展[J].材料导报,2018,32(S2):452-456.
- [3]刘文博,姚华彦,王静峰等.铁尾矿资源化综合利用现状[J].材料导报,2020,34(S1):268-270.
- [6] Li W, Lei G, Xu Y, et al. The properties and formation mechanisms of eco-friendly brick building materials fabricated from low-silicon iron ore tailings[J].Journal of Cleaner Production, 2018,204:689-692.
- [7]邓小龙,李茂林,刘旭等.磁选-絮凝-反浮选从山东某铁尾矿中回收铁试验[J].金属矿山,2018,504(6):172-178.
- [8]霍松洋,宋瑞杰,罗世勇等.承德某铁尾矿回收磷、铁的试验研究[J].世界有色金属,2017(1):35-36.
- [9]李恒天.铁尾矿基充填材料研发及性能研究[D].济南:山东大学,2020.
- [10]张全宏,刘理根,裴业虎等.选铁尾矿蒸压灰砂砖试验研究[J].新型建筑材料,2011,38(09):51-53,78.
- [11]南晓杰,王帅,刘立伟等.利用焙烧铁尾矿制备透水砖的水化特征研究[J].金属矿山,2021(08):208-213.
- [12]陈永亮,张一敏,陈铁军等.鄂西铁尾矿烧结砖的烧结过程及机理[J].建筑材料学报,2014,17(01):159-163.
- [13]郑永超,刘艳军,李德忠等.铁尾矿贝利特硫铝酸盐水泥的制备及性能研究[J].金属矿山,2013(08):157-160.
- [14]顾晓薇,王岫宇,刘剑平等.高硅型铁尾矿砂蒸压加气轻质混凝土的制备及其性能研究[J].金属矿山,2022(01):35-40.
- [15]张秀芝,付宝华,刘俊彪等.铁尾矿砂/机制砂制备高性能混凝土性能研究[J].混凝土,2014(03):116-118,123.
- [16]南宁,崔孝炜,孙强强等.铁尾矿制备微晶玻璃的研究[J].矿产综合利用,2022(03):47-50.