

综合评述

铁尾矿综合利用研究进展

任明昊^{1,2}, 谢贤^{1,2}, 李博琦^{1,2}, 胡尚军^{1,2}, 陈桃^{1,2}, 朱辉^{1,2}, 童雄^{1,2}

1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;
2. 金属矿尾矿资源绿色综合利用国家地方联合工程研究中心, 云南 昆明 650093

中图分类号: TD926.4⁺2 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2022)03-0155-14
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2022.03.022

摘要 铁尾矿是铁矿开发过程中所产生的主要固体废弃物之一,也是重要的二次资源。从五个方面详细阐述了目前铁尾矿资源常见的综合回收利用途径:回收有价值元素方面,一般遵循先预选再提纯的原则,还会通过阶段磨矿阶段分选和多种选别技术联合作业来应对尾矿的贫、细、杂特点;制备建筑材料方面,铁尾矿可在混凝土体系中充当细骨料或活化后用作胶凝材料,在不同焙烧工艺下能产出熟料、玻化砖、玻璃等多种产品,还可用于生产水泥砂浆涂料和降噪板材填料;制作填筑材料方面,铁尾矿经改性和级配调整后在路面基层、底基层和路基填料层均有应用,而当其用于调配采空区充填料浆时必须同时满足抗压强度和流动性要求;生产化工产品方面,铁尾矿可被加工成陶粒、分子筛等水体净化吸附材料,可用于催化 NO 转化为 N₂ 的还原反应和 H₂O₂ 去除有机污染物的氧化反应,还可以用于生产颜料、白炭黑、调质剂等产品;用作农用产品方面,铁尾矿是合适的土壤改良剂原料,而为实现矿区生态修复常采取生物技术来实现铁尾矿的土壤化和重金属固化。

关键词 铁尾矿;固体废弃物;综合利用;建筑材料;填筑材料;吸附材料

0 引言

我国铁尾矿资源增量和存量都极其巨大。一方面,我国铁矿资源储藏总量丰富、矿床类型齐全,但以贫矿为主且伴生组分多。据估计,中国铁矿石平均入选品位仅为 25.54%^[1],因此一般每生产 1 t 铁精矿需排出近 3 t 铁尾矿。以 2018 年为例,该年我国共产生约 4.76 亿 t 铁尾矿,占到了当年全国尾矿总排放量的 39.3%^[2]。另一方面,我国铁矿资源呈现相对集中分布的特点,超过半数铁矿在鞍山、白云鄂博、攀枝花等成矿带^[3],历年累积下也造就了很多地区巨量的尾矿存量。有报告显示,截至 2018 年年底,我国尾矿累积堆存量约为 207 亿 t,其中占比最大的就是铁尾矿。

铁尾矿的大量堆存带来了环境、安全和经济方面的影响。铁尾矿普遍粒径小还缺乏有机质固定,其中的重金属离子、残余药剂等有害组分极易通过混入雨水径流和扬尘的方式产生释放和迁移,进而破坏当地的土壤结构以及污染大气和水体环境^[4]。同时为应对尾矿存量的增加,尾矿库的坝体高度也在不断增加,逐

渐成为了矿山安全生产中的重大隐患^[5]。铁尾矿的堆存还为矿山企业带来了包括征地、尾矿库建设维护在内的巨额成本,据悉尾矿库的设计投资能占到整个项目总投资的 20%~30%。而如今随着生态环境部建立健全尾矿库污染防治长效机制等政策的提出,尾矿库的建设成本还在增加。

另一方面,铁尾矿的理化性质表明,它具有被多种行业利用的潜质。国内铁尾矿因产地不同其组分会有所差异,但主要化学组分均是铁硅铝钙镁和一些其他有价值元素,所以它是重要的待开发矿藏资源和化工、农业原料。粗粒铁尾矿硬度高、表面粗糙多棱角,可以支撑起胶凝产品和烧结坯体等材料的结构。细粒铁尾矿则形态近圆、分散性好还含有多种元素,可以用于开发各类细粒集料^[6]。所以,铁尾矿在道路和建筑领域的应用也有极大潜力。

综上所述,铁尾矿作为我国大宗工业固体废弃物的重要组成部分,亟需实现低成本的无害化处理和综合利用率的加工利用。具体来说,包括综合考虑再选成本、可回收组分市售价格等进行技术经济评价后

收稿日期:2022-04-05

基金项目:国家自然科学基金(52174252)

作者简介:任明昊(1997-),男,硕士研究生,研究方向为矿产资源综合利用、尾矿资源二次利用。E-mail:3256316452@qq.com。

通信作者:谢贤,博士,教授,研究方向为浮选理论与工艺、尾矿资源二次利用、矿产资源综合利用。E-mail:kgxianxie@126.com。

对部分尾矿进行有价元素的回收,以及依据铁尾矿性质分别进行配料、改性后用于建筑材料、填筑材料、化工产品和农用产品领域。

1 有价元素回收

1.1 铁的回收

国内矿山对铁尾矿进行回收利用时一般优先考虑回收铁,只对少数残存有价值较高的老尾矿,选厂才会考虑对其他有用组分进行回收。

铁尾矿中易于选别的磁铁矿和赤铁矿一般含量较低,若要选别需先进行富集。复杂难选尾矿虽然铁含量较高,而想要有效回收铁需要先进行针对性处理,如菱铁矿需要焙烧除杂、褐铁矿研磨时易泥化要进行脱泥、硅酸铁可直接抛除或通过碱熔浸出实现铁硅分离。所以铁尾矿一般先要预选然后再提纯。针对不同尾矿性质,常见的预选手段有弱磁选—强磁选、磁化焙烧、碱溶浸出、预先分级、抛尾脱泥等,并会根据矿物解离情况选择是否引入磨矿作业。预选后的提纯工艺则主要有单一磁选、单一浮选以及重—磁—浮的联合选矿流程等^[7]。而更具体的工艺选择则要依据矿石性质和成本核算来确定。

针对以赤褐铁矿、磁铁矿为主要有用矿物的尾矿,直接磁选效果不理想时,可以采用预富集—絮凝—反浮选工艺。邓小龙等^[8]从山东某铁尾矿中回收铁,依次进行了弱磁选、强磁选、磨矿和两段选择性絮凝脱泥及反浮选,保证了浮选精矿铁品位和回收率分别达到 65.43% 和 53.34%。

含有针铁矿和部分细粒赤铁矿的难选铁尾矿的有效选别工艺有预富集—还原焙烧—弱磁选工艺。预富集后的铁尾矿经还原焙烧,将弱磁性的赤铁矿等转化为磁铁矿,可以经弱磁选轻易选出。目前还可采用深度还原工艺直接由铁尾矿生产铁粉,在接近千度的还原温度和还原剂的作用下,矿物中的铁将会由 Fe_2O_3 逐级还原到 Fe_3O_4 、 FeO 最后到 Fe ,与此同时矿物中的磷、硫等杂质也会在高温下被分离出去^[9]。范敦城^[10]将获取的铁品位 36.1% 的预富集粗精矿,分别在随炉升温 and 高温入炉的条件下进行深度还原,均能得到 93% 以上铁品位和 93% 以上回收率(较粗精矿)的铁粉。

要想从铁橄榄石等含铁硅酸盐矿物中回收铁,可以通过氧化焙烧后碱浸实现铁硅分离,也可以使用上述的深度还原技术。王洪阳等^[11-12]发现铁橄榄石在 800 ℃ 以上的高温氧化焙烧下,可获得物相为无定形二氧化硅和铁氧化物的焙烧产物。而将橄榄石 1 200 ℃ 高温下深度还原 60 min 后,可以完全分解为金属铁、石英固溶体和方石英固溶体。这些产物中的硅元素均可通过碱浸实现有效脱除。

铁尾矿粒度不均,并且其中的铁在各粒级中均匀分布时,可以采用分级分选的手段处理。钟森林等^[13]对铁尾矿进行粗选和抛尾后,将所得粗精矿按 0.074 mm 分级,并分别使用高梯度磁选机和摇床对 -0.074 mm 产品和 +0.074 mm 产品继续回收,实现了对镜铁矿组分 89.24% 的回收率。此外,为了保证一定的解离度同时降低磨矿成本和避免细粒部分过磨,还常采用预先分级—粗粒级再磨后与细粒级一同分选的方法。同理,中矿再磨、粗精矿再磨等工艺也在铁尾矿再选中得到了广泛的应用。付余^[14]先将尾矿磁选得到的精矿再磨后再给入弱磁—磁选柱进行精选,最终实现了精矿铁品位 62.13% 和回收率 68.59% 的分选指标。

若铁在尾矿细粒级中富集时,为了提高细粒级铁尾矿选别指标,应考虑采用絮凝浮选和适于微细粒级物料的磁选设备(如高梯度磁选机)及微细粒级的重选设备(如悬振锥面选矿机)。李奕然等^[15]针对以赤铁矿为主要成分的低品位微细粒铁尾矿,提出了细磨—分散—絮凝—高冲次高梯度磁选的工艺。李小娜^[16]对弓长岭选矿厂的铁矿浮选尾矿进行分级分选,将细粒级和粗粒级磨矿后尾矿使用悬振锥面选矿机再选,得到的铁精矿综合铁品位 63.22%,回收率达到 40.73%。

由于近年来矿山选铁的回收率不断提高,铁尾矿中残存的铁也越来越贫细和难选,因此应加强对预选技术和提纯技术的研究,探索重选、分级、干式磁选抛尾、磁化焙烧等初步富集操作的适用条件和矿种,研究搅拌磨细磨—磁选、絮凝浮选等适应微细粒尾矿的选铁技术。此外,深度还原等方法铁回收率高且对各类铁尾矿适应性强,但往往受限于成本高不易推广,对此类技术降成本、降能耗的研究也是很关键的研究方向。

1.2 其他金属元素的回收

铁尾矿中除铁以外常见的可回收金属元素有钛、铜、锌、钼和稀土等^[17]。铁尾矿中这些共伴生组分往往嵌布粒度细、共生关系复杂,要想充分解离需要细磨甚至超细磨,而尾矿粒度较细相当于节省了部分磨矿成本,一些尾矿甚至可以不经再磨直接进行分选。而在选别阶段,由于铁尾矿中这些有价金属元素含量低、分散度高,综合利用困难,因此工艺设计上也是秉承先预富集、再选别和阶段磨矿阶段选别的理念。

增加预富集环节可以显著降低成本,例如邱凯^[18]改进了攀枝花微细粒钛铁尾矿的钛回收工艺,将其由单一浮选变为了微细粒重选—浮选联合工艺。结果在所获最终精矿指标未变的情况下,减少了浮选作业中药剂的用量和精选次数。想要从堆存较久、污染严重的老尾矿中提取目标元素应增加擦洗环节,通过清理掉矿物表面的氧化层和污染物实现目的成分回收率的提高。翟继华等^[19]将某选铁尾矿经两次高梯度富集

和摩擦洗涤后再进行浮选,在工业生产获得了 TiO_2 品位达到 47.02% 的钛精矿。

最常见的从铁尾矿中回收各类金属元素的工艺就是浮选法,秦玉芳等^[20]使用硅酸钠抑制石英、萤石等脉石矿物,采用羟肟酸类药剂 LF-P8 作为捕收剂并在碱性环境下加温浮选,成功地从白云鄂博选铁尾矿中获得了 REO 品位达 50.52%、回收率达 81.30% 的稀土精矿。

铁尾矿浸出方面的研究也很多,如 Kursunoglu Sait 等^[21]依次采用硫酸和氢氧化钠浸出浮选尾矿,实现了尾矿中锌和铅与铁的分离。其中酸浸阶段 pH 为 2、固液比为 20%,经 40 °C 下 2 h 的浸出可将 82.3% 的 Zn 转移进浸出液中,碱浸阶段添加酒石酸钾钠在 80 °C 浸出温度下可以实现 60% 以上的 Pb 的溶解,而剩余残渣中有 70.3% 的组分为 Fe_2O_3 。

使用焙烧方法处理铁尾矿则多见于以下两种应用情形:一种是作为无害化处理的储备技术,例如李日文等^[22]选用 CaCl_2 作为氯化剂在 1 000 °C 高温下对铁尾矿进行氯化焙烧以实现铁尾矿的无害化处理,铜、铅和镉则作为副产品以挥发物的形式通过冷凝和湿法洗涤吸收等方式收集。另一种则是用于回收高价值的稀土产品,例如周严等人^[23]向富含氟碳铈矿和独居石的铁尾矿中添加了还原剂煤粉和碱度调节剂 CaO 后进行了高温焙烧,之后被还原成金属状态的铁可通过磁选分离,而稀土元素则转化形成可被硫酸浸出的稀土氧化物。

而要想综合回收利用铁尾矿中的多种元素,需要对工艺流程进行充分的分析比较和试验研究。例如对铁尾矿中低品位钼和锌的浮选中,李继福等^[24]以钼为主要目标,选择全硫化矿物混合浮选与粗精矿再磨再选结合的工艺,就能得到符合需求的钼锌混合精矿。而夏青等人^[25]处理另一批锌、钼含量近似的铁尾矿时,却发现抑锌浮钼再浮锌的方案相较全硫化矿物混合浮选后再钼锌分离方案,所获钼精矿和锌精矿的品位和回收率均有提高。在综合回收铁尾矿中有价元素的流程选择中应该以工艺矿物学结果为依据,如包玺琳等^[26]针对秘鲁某选铁尾矿中硫含量极高且赋存于黄铜矿和大量黄铁矿中,同时尾矿中还存在不可忽视的金和银,因此选择优先浮选铜并把金和银回收至铜粗精矿中;而由于尾矿中部分黄铜矿与黄铁矿嵌布关系密切,因此为提纯铜精矿需要进行粗精再磨;之后在磁选选铜尾矿时发现所得到的铁精矿硫含量超标,于是对磁选精矿进行浮选脱硫操作。由此,该团队确定了优先浮铜—粗精再磨—铜尾矿选铁—铁精矿脱硫的工艺,实现了对该选铁尾矿中的金、银、铜和铁的综合回收。

为了实现对铁尾矿中其他金属元素的利用,尤其是综合回收利用多种元素,需要对铁尾矿进行工艺矿

物研究和选矿试验研究。

1.3 非金属矿物的回收

铁尾矿中常见的非金属矿物有磷灰石、云母和石英等,对这些成分的回收一般要依据市场需求和矿物性质进行针对性分析和处理。

磷的存在会导致钢材产品的脆性增加和延展性降低,而磷本身可以用于肥料生产,因此常在铁尾矿选铁前尽可能地回收其中的磷。实践中常使用脂肪酸及其盐类为阴离子捕收剂,纤维素酶、淀粉、糊精和硅酸钠为铁抑制剂,实现对铁尾矿的浮选脱磷^[27]。如张作金等^[28]使用 MES-1、MES-2 及氧化石蜡皂按照 7:2:1 的质量比配制了组合捕收剂并配合抑制剂硅酸钠对承德某铁尾矿进行了浮选脱磷试验,磷精矿 P_2O_5 品位和回收率分别为 34.60% 和 87.91%。

铁尾矿中的云母往往泥化严重,多以碎云母和细粒云母的形式存在。此时,对于云母品位较高的铁尾矿,可以不考虑回收细粒云母,而选择直接脱泥后浮选,但也可以使用絮凝浮选有效回收微细粒级云母。如吕昊子^[29]通过在粗选和扫选中组合使用捕收剂十二烷基磺酸钠和十二胺,实现了微细粒级云母的选择性疏水和团聚,进而在 5 次精选后获得钾品位和回收率分别达 7.82% 和 64.74% 的云母精矿,其中的钾折算为 K_2O 时含量达 9.42%。

市场上对石英品位的要求极高,所以从铁尾矿中分选石英时必须做到选前除杂和充分提纯。工业上常采用反浮选方法从铁尾矿中回收石英,许晗等人^[30]在预处理阶段对某铁尾矿进行了脱泥再磨、弱磁—强磁等多次除杂操作,在反浮选阶段进行十余次扫选并对精矿再次进行了强磁除铁,最终获取了 SiO_2 品位达 99.15% 的石英精矿。而采用醚胺或酰胺捕收剂选择性地从铁尾矿中浮选石英的方法更多地被视作铁的预富集工艺^[31]。此外,李明阳等^[32]还开发出了依次添加淀粉和 PEO 分别选择性絮凝赤铁矿和石英后再浮选石英絮凝体的异步絮凝浮选工艺,实现了微细粒级赤铁矿和石英的分离。

对铁尾矿中非金属矿物的回收如今多采用浮选手段,浮选研究则集中在更具选择性的捕收剂开发以及微细粒级矿物的回收方法探索两方面。

2 制备建筑材料

2.1 混凝土

使用铁尾矿作为原料制备混凝土建材是当今常见的研究和应用方向。混凝土的主要制作方法为选取级配合适的粗、细骨料掺入活性胶凝材料和其他辅料,然后将之充分搅拌再使用模具压制或蒸压成型,铁尾矿可在其中充当骨料和胶凝辅料。

2.1.1 骨料

铁尾矿最直接的用法就是替代天然砂石用作骨料,铁矿选别尤其是再选后的尾矿往往粒度较细,满足细骨料要求。不过,使用铁尾矿制备的混凝土产品,其抗压强度往往会随着尾矿取代率的提高先升再降,因此在应用中必须考虑铁尾矿掺量。如全宵等人^[33]研究发现,30%取代率下的铁尾矿砂水化程度最大,可以对再生骨料混凝土体系起到最大的堆积填充作用,增强产品的密实性。

以粗粒尾矿、黄沙或再生骨料为粗骨料并使用铁尾矿作为细骨料,再掺入水泥、石灰与骨料中钙质发生水化反应充填孔隙,就能够制备出蒸压砖和免蒸免烧砖。在此基础上仅需调节各类材料的掺量、粒级以及成型压力,就可以增强透水率、制备出透水砖。赵阳^[34]则希望强化尾矿材料的耐盐碱性,其以鞍山式铁尾矿为细骨料,在粗骨料和水泥之外又添加了粉煤灰和氯化钙后再振动成型,在养护 28 d 后形成了符合《非烧结垃圾尾矿砖》MU15 规范的建筑用砖。

2.1.2 胶凝材料

铁尾矿还可以用作胶凝材料,不过一般原状铁尾矿活性低不能直接使用,需要先通过机械、化学、加温等手段使得尾矿砂中石英、氧化铝等组分的晶格畸变增加或者反应生成活性物质,进而激发火山灰活性。

采用机械研磨方式可以通过不断缩小铁尾矿粒径以产生足够的比表面积和化学不稳定性,进而实现铁尾矿砂的活化。不过单纯使用机械活化手段获得的铁尾矿往往活性较低,因此实践中常结合化学手段。通过在研磨中添加脱硫石膏可以减弱矿粒的团聚效应,进行更充分的研磨,得到更小的粒径^[35]。在研磨中添加 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 等活化剂则可以增加体系中的无序物质,进而增强铁尾矿砂的胶凝活性^[36]。而考虑到热处理方法能耗大,机械—化学活化是目前最常用的铁尾矿活化手段。

铁尾矿的热处理活化手段分为热活化和水热活化,且均可通过添加化学试剂实现更佳的活化效果。其中铁尾矿的热活化温度范围为 550 ~ 700 °C,略低于熟料的烧结温度。在该温度范围内,铁尾矿中高岭石会发生脱羟基作用,形成的无定形硅、铝组分可以增强铁尾矿的活性。Luciano 等^[37]研究发现,铁尾矿在 750 °C 下经 40 min 的热处理后再进行研磨,能够表现出最好的火山灰性。而向铁尾矿中掺入 CaO 并置于在水热环境后,能够反应生成水合硅酸钙和水合铝酸钙等物质。这些物质经焙烧脱水后,可以为铁尾矿砂提供胶凝活性^[38]。

活化后的铁尾矿就能够以辅助胶凝材料的形式用于砖瓦和混凝土的制备,或是在水泥的水化过程中生

成 CSH 等胶凝成分,或是促进水泥铝相的二次水化,进而提高产品密实性、改善孔隙结构、增强抗渗和抗冻融能力。

2.2 发泡水泥

将铁尾矿基混凝土的各种配料加温水混合均匀后,再掺入双氧水、活性蛋白等发泡剂以及稳泡剂、减水剂等外加剂,在快速搅拌数秒钟并放入模具后,混凝土内部会因化学反应产生气体最终形成发泡水泥^[39]。还可以使用发泡剂先制出泡沫,再将泡沫加入铁尾矿砂和活性胶凝材料组成的浆体,经塑形和养护后得到发泡水泥。

发泡水泥是一种抗压强度良好且极易调整性能的轻质材料,所以目前往往会在制备过程中添加各种材料以提升发泡水泥性能并赋予其特殊功能。例如添加聚丙烯纤维可以提高发泡水泥的弯曲强度和拉伸强度,使用碳纳米管可以改善产品的孔隙结构^[40],添加 APP 粉末可增强产品阻燃效果。陈飞旭^[41]以铁尾矿、粉煤灰为主要原料,采用物理发泡方法制备了发泡水泥,并通过添加 EPS 颗粒和 SiO_2 气胶凝填料,降低了产品的导热系数使之可以用作保温材料。

2.3 地质聚合物

将铁尾矿和高岭土等硅铝矫正料活化调配并添加液体激发剂激活材料活性后,经塑形和养护可制备成地质聚合物^[42]。地质聚合物具有特殊的缩聚三维网络结构,具有水泥和陶瓷等材料的许多特征,可以用作建筑材料。同样得益于此,地质聚合物可以很好地固化原料中的重金属元素^[43]。以铅离子为例,铁尾矿中的大部分铅离子会在制备过程中被物理固化,残存的还可能会以离子态或带负电羟基配合离子形式固化到地质聚合物的三维网络结构中,不再轻易渗出^[44],因此也是一种重要的铁尾矿无害化处理手段。

2.4 砖瓦

采用普通的烧结工艺即可制得铁尾矿基的砖瓦。烧结之后,铁尾矿中大量的钙、铁等金属元素与长石、石英及硅铝酸盐等脉石结合形成的低共熔物会充填于产品坯体的颗粒之间,保证产物的密实性和强度。同时铁尾矿中的锌、铜、铅和镉等重金属元素会在 850 ~ 1 000 °C 的烧结温度下先后生成稳定的尖晶石或硅酸盐结构从而实现固化^[45]。

不过,单一的铁尾矿无黏性、不保水,一般需要向其中添加煤矸石、粉煤灰等辅料用以调整化学组分和降低烧成温度。陈永亮^[46]使用鄂西低硅铁尾矿添加少量黏土和粉煤灰调配后烧制出了以铁、石英和长石等为主要骨架的普通砖瓦。

2.5 水泥熟料

铁尾矿可以替代铁料和部分黏土硅料用于生产水泥熟料。徐庆荣^[47]将细磨后铁尾矿、石灰石和钢渣按 17%、70% 和 13% 的质量配比在 1 400 ℃ 下液相烧结 25 min,制备出了硅酸盐水泥熟料。

铁尾矿较黏土和砂岩有更好的活性和易烧性,煅烧过程中生成的 C_3S 、 C_2S 晶体缺陷更少。因此在制备硅酸盐水泥熟料时,使用铁尾矿替代黏土后所需的煅烧温度和能耗更低,且掺入铁尾矿后制备出的水泥熟料产品放热速率和水化热较低^[48]。此外,铁尾矿组分复杂,含有很多能够增益水泥熟料烧制过程的物质,如 G. Young^[49]就使用一种含有碱金属 K_2O 的高镁低硅铁尾矿烧结制备了水泥熟料,在烧结过程中铁尾矿里的 MgO 会在碱金属存在时促进阿利特的生成,而阿利特是熟料中提供强度和胶凝性的重要物质。

2.6 陶粒和陶粒基相变材料

陶粒使用烧结后的硅铝组分充当骨架,所以铁尾矿也可以在调配后用于生成陶粒制品。吴俊权等^[50]将磨细后的高硅铁尾矿和含铝粉煤灰加水塑形成铝含量达 17% 的料球后,经两段升温预热和 1 210 ℃、30 min 的煅烧后制备出了一种轻质陶粒。轻质陶粒可以除污、吸附重金属等用于环境治理,而具有较高强度的铁尾矿陶粒产品可以用于替代碎石和卵石等天然粗骨料。李晓光等^[51]使用铁尾矿陶粒为粗骨料制备了混凝土试件并对试件进行了多种力学测试。结果发现,铁尾矿陶粒混凝土在抗折强度和弹性模量上较普通混凝土要弱,但在整体上能够满足《轻骨料混凝土技术规范》中对 LC30 ~ LC40 等级混凝土的制备要求,且在抗氯离子渗透能力和抗冻性能上表现出色。

复合相变材料能在温度不变的情况下通过改变物质状态提供潜热,是理想的保温隔热材料,在太阳能利用、工业余热回收等方面未来可期,而轻质陶粒可以作为复合相变材料的多孔载体。孟宪昊^[52]就利用熔融木糖醇浸渗铁尾矿多孔陶瓷载体制备出了抗压强度翻倍的新型复合相变材料。李润丰^[53]则选择掺加石墨烯的石蜡作为结合料浸渗铁尾矿多孔陶瓷,增强了产品的传热能力。而刘晓倩等^[54]则在铁尾矿多孔陶粒的烧制过程中添加石墨粉,通过将尾矿中的部分氧化物还原成高碳化物,制备出了更适合复合相变材料的高热导率载体。

2.7 陶瓷玻化砖

铁尾矿能满足陶瓷玻化砖的制备要求。铁尾矿组分复杂,其中的硅、铝经石英、铝料等校正剂掺入调整后可以用于成坯,钠钾长石等低熔点物质经焙烧会形成釉面,部分石英在溶解于液相后增强烧结体紧密程

度并降低显气孔率,而剩下的铁元素会因不同的含量和存在形式赋予陶瓷玻化砖丰富的色彩^[55]。陶瓷玻化砖一般作为装饰材料使用,部分产品还具有防水功能。其原理在于在铁尾矿烧结过程中添加了碳酸钠等碱性引发剂,养护过程发生的返碱现象可以生成防水的玻面。

此外,发泡工艺也能用在铁尾矿的陶瓷产品中,采取合适的物料配比和工艺可以使制备出具有优良保温性能的发泡陶瓷。马子钧^[56]研究了尾矿制备发泡陶瓷系统中 Na_2O 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 等组分的作用,并给出了保温时间、物料配比、烧结温度等生产要素对发泡陶瓷密度和导热系数的影响程度。

2.8 玻璃建材

微晶玻璃同陶瓷玻化砖制备要求类似,所以组分复杂的铁尾矿可以在其制备过程中充当硅料并提供少量铝、钙和镁。此外,铁尾矿的加入一般可以提高这些玻璃建材的抗折强度、密度和耐酸碱性。

2.8.1 微晶玻璃

以铁尾矿为原料,一般选择制备 $CaO - MgO - Al_2O_3 - SiO$ 系和 $CaO - Al_2O_3 - SiO_2$ 系微晶玻璃,其主晶相多为辉石相结构。但由于铁尾矿复杂的成分性质且不同地区铁尾矿成分差异较大,制备出的微晶玻璃种类繁多,性能各异,所以还存在其他工艺体系如 $BaO - Fe_2O_3 - SiO_2$ 系微晶玻璃。

微晶玻璃的制备流程主要包括熔融法和烧结法。熔融法仅需在典型玻璃生产工艺中添加结晶热处理过程。通常为实现理想的成核和结晶还需在热处理过程中添加助熔剂、成核剂。不过相较于烧结法,熔融法能耗高、晶化时间长,所以实际生产中烧结法应用更广。烧结方法采用玻璃熔融后水淬或球磨后再二次烧成型的方法,在这其中尾矿可与废玻璃粉、 CaO 、 MgO 等辅料熔制再磨粉以生产出用于二次烧结的基础玻璃粉。

2.8.2 黑色玻璃

黑色微晶玻璃在微晶玻璃中比较特殊。通常制备彩色的微晶玻璃是通过在白色微晶玻璃基础配方上加入着色剂以调出相应色调的微晶玻璃板材。但是此法用于黑色微晶玻璃生产时易出现明显的色差,需要专门调配黑色微晶玻璃的配方。王明^[57]用铁尾矿取代全部的氧化铝,部分代替二氧化硅、石灰石、纯碱等,加入硼砂调节产品的光泽度,加入澄清剂去除产品中的气泡,以氧化铁和氧化钴着色制备了颜色纯正的黑色微晶玻璃。

2.8.3 泡沫玻璃

以铁尾矿为主要原料并使用废平板玻璃粉补正硅

含量后,还可以制备泡沫玻璃。在制备过程中可以用 CaCO_3 和 Na_2CO_3 发泡,也可以用碳化硅作为造孔剂,同时掺入硼砂作为稳定剂^[58]。但是如今更多的是结合发泡工艺和微晶化工艺来制备微晶泡沫玻璃。如孙强强等^[59]以铁尾矿、玻璃粉和 CaCO_3 为基底,以 TiO_2 和 CaF_2 为复合晶核剂,二次烧结后制成了微晶泡沫玻璃。

2.9 水泥砂浆

水泥砂浆可以用作砌块材料的黏合剂以及室内外涂料,它一般由水泥、细骨料和水混合调配制成,其中细骨料部分可以使用铁尾矿。生产用作涂料的水泥砂浆时,还可以使用高温煅烧后的铁尾矿部分替代水泥,并随着铁尾矿取代比例的变化,生产出米色或浅棕色的彩色砂浆以免除油漆的使用^[60]。

用以生产水泥砂浆的铁尾矿砂也需要先进行调配和改性,铁尾矿在堆存时受风化和不规则沉淀的影响,不同部分的密实度、固结程度和渗透系数差异极大^[61],只有在通过改性稳定住它的性质后才能适应水泥砂浆的生产需求。使用水泥、石灰和铁尾矿调制的水泥砂浆虽然结构劣化但内部结合更紧密^[62],加入土工织物及木质素或聚丙烯这类工业用纤维则能提高铁尾矿砂的结构抗剪性能。添加其他物质也可以提高铁尾矿制品的附加值,胡倩倩等^[63]合成了具有核壳结构的改性剂苯丙乳液,并连同适量的消泡剂、减水剂掺入质量配比为 2:2:1 的铁尾矿、钢渣和粉煤灰,制备出了环境友好的防水砂浆。

随着铁尾矿取代率的增加,水泥砂浆会难以避免地出现孔隙率增加、抗渗能力降低的状况。但是铁尾矿中的二氧化硅和氧化铁等成分较其他尾矿要多、自身强度要高,足以弥补上述结构劣化造成的力学性能损失,可以保证铁尾矿产品的基本力学性能仍能满足国家标准的要求。而贺艳军等^[64]发现,在调配铁尾矿水泥砂浆时复用适量的分散剂羟丙基甲基纤维素与减水剂可以在保证流动性的前提下增大砂浆黏度,进而促进砂浆的均质化并改善砂浆的孔结构。

2.10 板材填料

铁尾矿研磨成粉后可以代替现有的粉体填料,加工出性能出色的石塑、木塑等复合材料,再经过浇筑制备出板材、管材。使用铁尾矿制作板材方面最流行的是制作降噪板材,而降噪的途径有隔声和吸声,一般需要通过材质和结构这两方面来实现。

材质方面,对单层板材来说,单位面积质量越高隔声效果越好,而铁尾矿的密度一般远大于水泥,同时铁尾矿中含量不低的氧化铁还会发生磁致伸缩现象,在遭遇声波后磁化并由此对声波的传播产生阻尼效应。所以理论上以铁尾矿作为板材填料可以获得优异的隔

音性能。熊哲^[65]研究发现,使用 13.45% 含水率的铁尾矿砂可以取得最佳的整体隔声性能,而且铁尾矿粒径越小、在板材中填充率越高,隔音效果越好。李明俊^[66]则将铁尾矿砂细磨至 200 nm 的微细颗粒级别,在此粒径下铁尾矿可以开发出兼具隔声和吸声功能的板材。

结构方面常见的运用是多层结构和多孔结构,声波遇到界面就会因为反射和投射消耗能量,所以多层结构隔音效果更好,多孔结构则能为材料提供吸声能力。常宁^[67]就使用钕铁磁铁矿尾矿复合胶凝材料和粗颗粒尾矿制备了单层和多层的结构隔声板材,并研究了添加微细钢纤维保证强度和掺和橡胶粉提高阻尼的配料方式。而肖涛^[68]设计了孔型为球台形的中空多孔板材,然后将铁尾矿作为填料填充增加密度和形成多层结构,并研究了该板材的吸声和隔声能力。

3 填筑材料

3.1 路用材料

铁尾矿可以应用到公路的路面基层、底基层和路基填料层这些层面。

3.1.1 路基填料

铁尾矿可替代砂石作为路基填料。一般铁尾矿强度大、脆性高,作为填料使用时要注意粒型和规格,例如控制其在破碎阶段产生的针片状颗粒含量,以免最终产品质量下降、损失强度。而在加工并处理好级配后,就可以依据工程所需的密实程度和强度要求,直接将不同铁尾矿用作填料主体或填隙碎石。部分要求路基密实的则要搭配黏性土、石灰等提高铁尾矿填料黏聚力并填补颗粒间空隙^[69]。而为应对湿陷性黄土地等特殊路段,有时还要考虑加筋或进行强夯。

3.1.2 路面基层、底基层应用

而将铁尾矿应用于路面基层和底基层时则免不了进行二次处理,这是由于一方面铁尾矿产品在密度、粒径、元素、物相、硬度和耐久性等方面的物化和力学性质证明铁尾矿具备代替常规路面材料的可能^[70],但另一方面铁尾矿在实际路用性能如各类稳定性、抗拉强度、重金属污染等方面存在不足之处,例如铁尾矿一般金属元素含量高、活性强,这会导致其配制出的混料产品水稳定性较差。而这些问题就需要采取添加辅料和调整物料掺比等方式来进行弥补。

铁尾矿在路面基层和底基层的具体应用则相差不多。以路面基层为例,铁尾矿在刚性基层、半刚性基层和柔性基层三类常见路面基层中均有应用,其中在刚性基层主要是参与各类混凝土和配筋混凝土的制备,与前文建筑材料中的混凝土部分类似,此处不再赘述。

而在半刚性基层方面,常单独使用或混用石灰、水泥和粉煤灰作为铁尾矿的胶结剂并在固化后路用,其中石灰可以优化混料的抗压和抗剪能力,水泥的水化物能与矿粒团聚然后凝结硬化,形成更加稳定的空间网状骨架结构,而在确定水泥掺量后添加低掺量的粉煤灰可以提高混合料密实度并稳定其强度^[71]。试验中还可以使用10%左右掺量的土凝岩替代水泥作为固化剂来赋予铁尾矿半刚性材料特性以提升强度、增强路用性能。两类固化剂各有千秋,赵飞等人^[72]试验发现,同等条件下水泥改性产品的抗压强度效果整体上好于土凝岩,仇健^[73]则发现相较于水泥,土凝岩能更好地改良铁尾矿的干温缩性能。而为满足路用材料应对复杂气候能力的硬性要求,刘晶磊等^[74-75]依次研究了干湿循环和冻融循环作用下常见固化剂对铁尾矿无侧限抗压强度方面的改善情况,确定了两种情况下稳定产品强度所需的循环次数,还比较分析了固化剂掺量、养护时间、压实率、循环次数这些生产因素的关联和程度。

铁尾矿在柔性基层方面的应用中常与沥青相关,张宝虎等^[76]采用体积法设计了一种75%掺量的铁尾矿沥青混凝土,通过试验确定新型沥青混凝土的抗车辙变形能力优于石灰岩质集料,其短板低温抗裂和水稳定性方面也能满足现行行业规范要求。田知文^[77]则针对铁尾矿沥青混料给出了掺加消石灰和硅烷偶联剂两项改进方法,可以增加黏性、增长韧性、增强骨架,进而改善高温稳定性和低温抗裂性。曹丽萍等^[78]进一步通过运用关联沥青、硅烷偶联剂和铁尾矿三者的模型反复模拟试验,揭示了硅烷偶联剂是利用物理吸附增进了铁尾矿和沥青间黏附的机理,并基于迁移法选出了对集料路用性能提升最高的KH-550。此外,0~3 mm的细粒铁尾矿可以应用到微表处混合料的级配中,此类混料可以用于沥青路面上的坑洼和裂隙的修复。邹宗民等^[79]试验研究发现,对于石灰岩混料和玄武岩混料这两类微表处集料,向前者中添加15%的铁尾矿砂时可以在耐磨能力和水稳定性上获得最大的提升,而在后者中添加铁尾矿砂只会降低该混料的各项性能。

3.2 采空区充填

使用铁尾矿胶结产品对抗采采空区进行回填是另一种可以大量消耗铁尾矿库存的手段,在矿山治理和充填采矿时应用很多。

3.2.1 水泥胶结法

水泥胶结法的理论依据和制备方式均与前文建筑材料胶凝体系一节的混凝土产品类似,但由于用途不同两者在物料组分和配比上有所不同。

充填料浆需要通过管道输送至充填区域必须保证

可输送性能,所以用于采空区回填的铁尾矿胶结材料必须同时满足抗压强度和料浆流动性的要求。李恒天^[80]以激发活性后的铁尾矿和矿渣、熟料混合作为胶凝材料,同时使用无活性的原状铁尾矿砂作为主要骨料成分,将两者按照1:4的胶砂比和70%的质量浓度加水混合调制得到了流动度为188 mm的充填料浆,固结后抗压强度达到了2.03 MPa,达到了多数充填采场的施工要求。

充填作业中的热环境也是考虑的因素之一,魏丁一等^[81]为降低胶结尾矿充填作业中的水化热,调整了水化热的主要产物胶结粉的含量,其试验发现在胶凝材料含量4%、胶砂比1:8和质量分数68%时产热最低。

还可以应用数字技术来探索充填材料各组分的最佳配比,魏晓明^[82]基于采场地质调查和试样试验数据建立力学模型后,模拟计算了不同配比下的尾矿充填材料的应力和位移变化规律并择优选取,杨晓炳^[83]则基于尾矿充填体强度和管输阻力性质等约束建立了决策模型,再使用优化算法进行探索。

3.2.2 微生物胶结法

微生物胶结法(MICP技术)是在水泥胶结材料的基础上通过使用微生物间接生成碳酸盐沉淀来增强胶结能力,其原理为利用巴氏杆菌产生的脲酶将尿素分解为 NH_3 和 CO_2 ,其中 NH_3 水解提供碱性环境并促进 CO_2 转化为 CO_3^{2-} ,之后这些 CO_3^{2-} 会与外部的 Ca^{2+} 结合生成 CaCO_3 沉淀^[84]。由此在该材料成型后的一段时间内,材料内部还会不断生成具有一定强度的 CaCO_3 沉淀来填补空隙,促使材料的结构更加紧密。

邱景平等^[85]使用电石渣、脱硫石膏和硫酸钠为胶凝材料,0.75 mm筛下铁尾矿为骨料配制了铁尾矿基胶结材料,并在注入培养好的巴氏杆菌菌液后养护7 d。其中电石渣可以增强体系内碱性,脱硫石膏和铁尾矿能为MICP反应提供足量的 Ca^{2+} 。最终得到的微生物胶结材料相较于空白对照组能提高5.45%至63.33%的抗压强度。

4 化工产品

4.1 吸附材料

铁尾矿中残留的氧化铁成分,在水环境中会由于水合作用产生覆盖表面的游离羟基和羧基官能团,这些含氧官能团可与多种重金属阳离子作用形成配合物,进而在宏观上表现为铁尾矿可以吸附水体中的重金属元素。铁尾矿中的 Fe^{3+} 还对磷酸盐等具有良好亲和力和力,可以通过化学吸附除去水中的磷等污物^[86]。因此铁尾矿很适合用于生产吸附材料。

4.1.1 多孔陶粒

铁尾矿制备的多孔陶粒除了能用作建筑材料,在吸附污物、改善水质方面也有极大的应用价值。因为应用方向不同,这些领域的陶粒在生产方面也有所特化。例如为实现对铁尾矿基陶粒的高精度造孔,一般不会采用作为建筑材料时常使用的泡沫注凝成型制法,而是使用微晶泡沫玻璃的生产工艺,通过添加黏结剂、造孔剂和助熔剂实现更精细的生产控制^[87]。

在应用中,铁尾矿陶粒滤料首先可以借助其多孔的结构实现对生活污水中污染物的截留吸附,又因为陶粒表面粗糙、孔隙丰富适合微生物菌落附着,还会在其表面培育特殊的生物菌膜以实现对其进一步降解和去除^[88]。

4.1.2 复合吸附材料

使用铁尾矿为骨架与其他吸附材料结合可以制备出兼具二者吸附性能的复合吸附材料。如海藻酸钠是一种优秀的吸附材料但在水性介质中溶解性过强需要改性后才能使用,徐成龙等^[89]使用铁尾矿粉和海藻酸钠通过溶胶-凝胶法制取了复合吸附材料 IT@SA。在新的体系内,铁尾矿与海藻酸钠颗粒共存,孔隙较多满足物理吸附条件,铁尾矿中的含氧官能团还增强了复合吸附材料表面的亲水性和对重金属离子的络合能力。它对 Pb^{2+} 表现出了 10.000 mg/g 的吸附能力和 90.17% 回收能力,在净化含铅废水方面潜力巨大。

4.1.3 分子筛

以铁尾矿碱浸后获取的硅酸钠溶液为硅源,可以在加入适量的表面活性剂和水混匀后,通过水热合成法制备出各种分子筛。分子筛拥有吸附工业废水中氮、磷和各类重金属离子的能力,一些分子筛还是重要的光催化剂。还需注意的是直接合成所得的一般是微孔分子筛,孔径太小以至于不利于吸附大分子,实践中常采取加入介孔模板剂并在分子筛结晶后烧去模板的方法来制备具有有序多孔结构的介孔分子筛^[90]。许小东^[91]就以 P123 为模板使用铁尾矿的硅酸钠浸出液和氯化铁-硅酸钠混液分别制备了 SBA-15 和 Fe-SBA-15 两种介孔分子筛,两者均对亚甲基蓝溶液展现出良好的吸附能力,后者还具有光催化能力。

4.2 催化剂

4.2.1 光催化剂

前文所述水热合成法制备的含铁二氧化硅介孔分子筛材料,其中的 Fe^{3+} 可作为活性位点促进光化学反应中电子与空穴的分离,从而表现出良好的光催化活性。除此之外,使用硫酸焙烧法处理铁尾矿也可制备

出具有光催化能力的铁基材料。牟文宁等^[92]将铁尾矿焙烧后酸浸获得了铁提取率 89.80% 的硫酸盐溶液,再经中和沉淀和双氧水处理可获得较纯净的氢氧化铁前驱体,该产物煅烧后就是能加速降解溶液中甲基橙分子的纳米级光催化剂 $\alpha-Fe_2O_3$ 。

4.2.2 氮氧还原催化剂

化石燃料燃烧产生的大气污染物 NO 需要通过还原技术脱除,而铁尾矿研磨成粉后可用作此类还原反应中的催化剂。在 600 °C 下使用铁尾矿催化 NH_3 还原 NO 的反应时初始催化效率能达到 97.5%,但因为铁尾矿中起到催化作用的 Fe_2O_3 组分在高温氛围下易转换为 Fe_3O_4 ,所以其催化能力会逐渐丧失。而郑昭^[90]使用 MnO_2 和铁尾矿粉末混合,在较低的 250 °C 下实现了协同催化,催化效率达到了 98%。铁尾矿还可以催化 CO 还原 NO 的反应,龚志军等^[94]将铁尾矿引入了煤炭还原脱硝技术流程中,用于消耗煤炭直接还原 NO 时产生的多余 CO,此时铁尾矿会催化 CO 对 NO 的还原反应产生无害的 N_2 和 CO_2 。

4.2.3 芬顿工艺催化剂

芬顿法是一种利用 H_2O_2 与 Fe^{2+} 混合溶液反应生成的强氧化性 $\cdot OH$ 自由基处理水体中的难降解有机污染物的工艺,铁尾矿中铁元素丰富还具有良好的分散性,因此可以用于生产此类工艺中的 H_2O_2 催化剂。Victor 等^[95]向铁尾矿中掺加膨润土造粒后,在 550 °C 下通入 CH_4 进行还原焙烧将 Fe_2O_3 转换为了 Fe_3O_4 ,增加了体系内的 Fe^{2+} 含量,此时的球形粒料可以应用于流动的水环境,而其在试验中通过 H_2O_2 活化实现对大约 75% 亚甲基蓝染料的氧化去除。

4.3 其他

4.3.1 颜料

由于铁尾矿的硅铁混合特性,它也可被用于制作颜料。龚琳琳等^[96]使用氯化铁、氯化钡和九水合硅酸钠按摩尔比为 1:1:8 的 Ba、Cu、Si 比例配制并掺入质量占比达 36.1% 的铁尾矿掺料调配出了前驱体混合溶液,在 200 °C 的水热温度下反应了 12 h 后合成出了亮紫色铜钡硅酸盐复合颜料。其中铁尾矿首先作为体系中的细粒组分优化了材料的分散性,其次尾矿里的二氧化硅会在碱作用下水热解离并与铜和钡结合形成新骨架。

4.3.2 白炭黑

依次进行酸浸和碱浸可以充分提取铁尾矿中的铁和硅,其常见处理方法如下:先通过酸浸将尾矿中的氧化铁转变为水溶性的氯化铁或硫酸铁,其中滤液可通

过水热反应转化为纳米级氧化铁材料。再将浸出渣碱浸获得硅酸钠溶液,以此为硅源可以通过加酸中和沉淀或煅烧除去结晶水的手段制备出白炭黑产品^[97]。

4.3.3 调质剂

以铁尾矿为调质剂,可以增加高炉渣生产矿渣纤维体系中的二氧化硅和碱金属氧化物含量。合适的铁尾矿添加量可以降低高炉渣的流动性、增大成纤温度范围,此时现场工人的操作空间会变得更大,也因此更易生产出高质量产品^[98]。

5 农用产品

5.1 土壤改良剂

铁尾矿中含有硅、钙、镁、钾等有益元素,依据各地铁尾矿特点并搭配其他辅料进行配方试验,可以制备出各类碱性和酸性的土壤改良剂。孙希乐等^[99]和陈贤树等^[100]利用选铁尾矿和选矿副产品云母、白云石为主料,经过混合煅烧活化,制备出了碱性的复合型土壤调理剂,可以有效改良酸性土壤。张丛香等^[101]则选择铁尾矿粉、粉煤灰提供微量元素,使用糠醛渣、腐殖酸增加酸性,添加离子置换剂处理钠离子和氯离子,制成的调理剂可以改良中、重盐碱地。

铁尾矿的磁化性能和磁性稳定性好,还可以用于肥料的磁化处理^[102]。铁尾矿作为磁性材料经过磁场磁化在伴随肥料施入土壤后,其中残存的剩磁会缓慢释放,改良土壤并促进农作物增产。

5.2 土壤化

尾矿库复垦及生态恢复主要是利用各种技术调整铁尾矿砂的酸碱性、保湿能力、透气结构等以期实现它的土壤化,包括联合施加稻壳、秸秆、生物炭等改良矿区土壤性能^[103],以及引进抗逆性强的多种植被和接种根瘤菌来加快积累生物量^[104-105]。而上述成果的综合利用就是如今矿区生态修复中被广泛运用的植被混凝土,配制成型的植被混凝土具有良好的抗冲刷能力和植被恢复效果,宋建伟等^[106]以铁尾矿为基础材料,辅以植物纤维、保水剂、有机填充料、有机肥、矿区第四系表土等材料,配制出了适宜高羊茅、紫花苜蓿生长的植被混凝土配。

此外还必须做到的是对尾矿库重金属污染的治理。除了传统的焙烧固化方式以及添加腐殖酸、膨润土等钝化剂的钝化处置外,现在更倾向于采用生物技术。包括选取白茅等对镉、镍和锰等多种重金属都具有极强的耐受能力和吸收效果的植株作为尾矿区植被恢复的先锋作物^[107],以及引入筛选改良后可以有效固定尾矿中重金属的菌落并佐以络合剂的化学-微生物联合修复技术^[108],以期在实现消除重金属污染的同

时,增强尾矿区土壤的肥力。

6 结语

(1)快速消纳积压的铁尾矿库存是进行铁尾矿综合利用的重要目的,该方面的主要技术是有价元素回收、制备建筑材料和制备充填材料。其中,有价元素回收要求不断降低选厂的生产成本,直至选厂的获利足够覆盖成本,而这有赖于选矿技术的发展,尤其是需要增强微细粒级铁尾矿回收技术和低成本高处理量预富集设备两方面的研发,以期未来可以回收过去从成本角度考量没有利用价值的铁尾矿。而铁尾矿用于建筑材料和充填材料方面的制备技术已经较为成熟,缺乏的是投入实际应用时所需的产品标准和法律法规。因此需要推动相关国家标准的建立,以增强铁尾矿基建材和填料的社

会认可度。

(2)推动铁尾矿资源利用向高附加值方向发展也是趋势之一,该方向上现阶段的技术如使用铁尾矿生产吸附剂和催化剂,一方面其生效机理和适用条件还不够明确,另一方面产品生产还难以脱离实验室的环境。在今后应进行更加深入的理论研究和试验,同时投入实际生产,在实践中进行工艺的化繁为简和原料的更替优化。

(3)不同铁尾矿的性质差异太大,很多优秀的处理方法在实践中面临着“此处灵丹妙药,彼处毫无意义”的困境,几乎没有直接移植的可能性。这就需要依据性状对铁尾矿做好更细致的分类,同时将其与相应的处理方法一一对应,建立起专属于铁尾矿资源综合回收利用的数据库。

(4)还应更多地开展对铁尾矿进行多级处理、充分利用的研究,回收过有价元素的铁尾矿可以用于制作建筑材料,分级后的矿砂可以将粗粒级来充填矿山、细粒级则修补路面,源于铁尾矿的硅和铁可以分别用于生产白炭黑和光催化剂,由此可以极大地提高铁尾矿的综合利用率。

参考文献:

[1] 张亮,杨卉芃,冯安生,等. 全球铁矿资源开发利用现状及供需分析[J]. 矿产保护与利用,2016(6):57-63.
ZHANG L, YANG H P, FENG A S, et al. Development, utilization status, supply and demand analysis of global iron ore resources [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2016(6): 57-63.

[2] 王海军,王伊杰,李文超,等. 全国矿产资源节约与综合利用报告(2019)[J]. 中国国土资源经济,2020,33(2):2.
WANG H J, WANG Y J, LI W C, et al. National mineral resources conservation and comprehensive utilization report (2019) [J]. China Land and Resources Economy, 2020, 33(2): 2.

[3] 姜雪薇. 中国铁矿行业发展现状及前景分析[J]. 中国金属通报,2017(7):160-161.
JIANG X W. Analysis on development status and prospect of Chinese iron ore industry [J]. China Metal Bulletin, 2017(7): 160-161.

[4] ZHAN G X, YANG H H, CUI Z J. Evaluation and analysis of soil mi-

- gration and distribution characteristics of heavy metals in iron tailings [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 172: 475–480.
- [5] 张家荣, 刘建林. 中国尾矿库溃坝与泄露事故统计及成因分析[J]. *中国钼业*, 2019, 43(4): 10–14.
- ZHANG J R, LIU J L. Statistics and cause analysis of dam break and leakage accidents of tailings ponds in China [J]. *China Molybdenum Industry*, 2019, 43(4): 10–14.
- [6] 杨永浩, 魏作安, 陈宇龙, 等. 基于图像处理技术的尾矿颗粒形态研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(1): 3689–3695.
- YANG Y H, WEI Z A, CHEN Y L, et al. Study on particle morphology of tailings based on image processing technology [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(1): 3689–3695.
- [7] 蒋京航, 叶国华, 胡艺博, 等. 铁尾矿再选技术现状及研究进展[J]. *矿冶*, 2018, 27(1): 1–4.
- JIANG J H, YE G H, HU Y B, ZHANG S M. Current status and research progress of iron tailings recycling technology [J]. *Mining and Metallurgy*, 2018, 27(1): 1–4.
- [8] 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(6): 172–178.
- DENG X L, LI M L, LIU X, et al. Iron recovery from an iron tailings by magnetic separation – flocculation – reverse flotation in Shandong province [J]. *Metal Mine*, 2018(6): 172–178.
- [9] 蒋曼, 李俊达, 张乐, 等. 硫酸渣煤基直接还原焙烧制备直接还原铁[J]. *矿产保护与利用*, 2019, 221(3): 58–62.
- JIANG M, LI J D, ZHANG L, et al. Preparation of direct reduced iron from sulfuric acid slag by coal – based direct reduction roasting [J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2019, 221(3): 58–62.
- [10] 范敦城. 齐大山铁尾矿预富集—深度还原提铁及尾渣综合利用研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2018.
- FAN D C. Research on comprehensive utilization of iron tailings from Qidashan iron preconcentration and deep reduction [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2018.
- [11] 王洪阳, 包焕均, 张文韬, 等. 铁橄榄石的氧化分解及碱浸溶硅[J]. *金属矿山*, 2020(10): 167–173.
- WANG H Y, BAO H J, ZHANG W T, et al. Oxidation decomposition of iron olivine and alkaline leaching of silicon [J]. *Metal Mine*, 2020(10): 167–173.
- [12] WANG H Y, SONG S X. Separation of silicon and iron in copper slag by carbothermic reduction – alkali leaching process [J]. *Journal of Central South University*, 2020, 27(8): 2249–2258.
- [13] 钟森林, 张超达, 吴城材, 等. 某磁铁矿尾矿中镜铁矿回收试验研究[J]. *铜业工程*, 2019(3): 40–42+45.
- ZHONG S L, ZHANG C D, WU C C, et al. Experimental study on recovery of specularite from magnetite tailings [J]. *Copper Engineering*, 2019(3): 40–42+45.
- [14] 付余. 山东某铁尾矿再选试验研究[J]. *山东化工*, 2020, 49(12): 90–91.
- FU Y. Experimental study on reselection of an iron tailings in Shandong [J]. *Shandong Chemical Industry*, 2020, 49(12): 90–91.
- [15] 李奕然, 叶国华, 朱冰龙, 等. 选择性分散絮凝—磁选工艺回收云南上厂铁尾矿中的铁[J]. *矿产保护与利用*, 2018(2): 63–68.
- LI Y R, YE G H, ZHU B L, et al. Selectively dispersed flocculation – magnetic separation process to recover iron in Yunnan Shang factory iron tailings [J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2018(2): 63–68.
- [16] 李小娜. 悬振选矿机在弓长岭选厂铁尾矿再选中的应用[J]. *矿产综合利用*, 2016(3): 80–82.
- LI X N. Application of suspension concentrator in Gongchangling Concentration Plant [J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2016(3): 80–82.
- [17] 张以河, 胡攀, 张娜, 等. 铁矿废石及尾矿资源综合利用与绿色矿山建设[J]. *资源与产业*, 2019, 21(3): 1–13.
- ZHANG Y H, HU P, ZHANG N, et al. Comprehensive utilization of iron ore waste stone and tailings resources and construction of green mine [J]. *Resources & Industry*, 2019, 21(3): 1–13.
- [18] 邱凯. 攀枝花微细粒钛铁尾矿再选新工艺研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018.
- QIU K. Research on new process of titanium iron tailings in Panzhihua [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2018.
- [19] ZHAI J H, WANG H B, CHE N P, et al. Recycling of iron and titanium resources from early tailings: from fundamental work to industrial application [J]. *Chemosphere*, 2020, 242: 125178.
- [20] 秦玉芳, 李娜, 马莹, 等. 白云鄂博选铁尾矿优先浮选稀土试验研究[J]. *矿冶*, 2021, 30(1): 32–37.
- QIN Y F, LI N, MA Y, et al. Experimental study on preferential flotation of rare earth from iron tailings in Bayan Obo [J]. *Mining and Metallurgy*, 2021, 30(1): 32–37.
- [21] KURSUÑOGLU SAIT, TOP SONER, KAYA MUAMMER. Recovery of zinc and lead from Yahyalı non – sulphide flotation tailing by sequential acidic and sodium hydroxide leaching in the presence of potassium sodium tartrate [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2020, 30(12): 3367–3378.
- [22] 李日文, 蔡海立, 宁寻安, 等. CaCl_2 氯化焙烧分离铁尾矿中的重金属铅铜镉[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(3): 1083–1091.
- LI R W, CAI H L, NING X A, et al. Separation of heavy metals lead, copper and cadmium in iron tailings by chlorination roasting with CaCl_2 [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(3): 1083–1091.
- [23] ZHOU Y, LIU J X, CHENG G J, et al. Carbothermal reduction followed by sulfuric acid leaching of Bayan Obo tailings for selective concentration of iron and rare earth metals [J]. *Separation and Purification Technology*, 2021, 271: 118742.
- [24] 李继福, 衷水平, 英雄, 等. 某选铁尾矿中钼的综合回收试验研究[J]. *中国矿业*, 2020, 29(3): 115–119.
- LI J F, ZHONG S P, HUANG X, et al. Study on the comprehensive recovery of molybdenum in an iron selected tailings [J]. *China Mining*, 2020, 29(3): 115–119.
- [25] 夏青, 梁治安, 杨秀丽, 等. 某选铁尾矿中低品位钼、锌分选回收试验研究[J]. *有色金属工程*, 2020, 10(5): 81–88.
- XIA Q, LIANG Z A, YANG X L, et al. Experimental study on low grade molybdenum and zinc sorting in an iron tailings [J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2020, 10(5): 81–88.
- [26] 包玺琳, 柏亚林, 杨俊龙, 等. 秘鲁某高硫选铁尾矿综合回收铜铁金银新工艺试验研究[J]. *中国矿业*, 2022, 31(1): 153–159.
- BAO X L, BAI Y L, YANG J L, et al. Experimental research on new comprehensive recovery of copper and silver from a high sulfur iron preparation tailings in Peru [J]. *China Mining*, 2022, 31(1): 153–159.
- [27] AHMED YEHIA, SAWSANABD EL – HALIM, HAYAT SHARADA, et al. Application of a fungal cellulase as a green depressant of hematite in the reverse anionic flotation of a high – phosphorus iron ore [J]. *Minerals Engineering*, 2021, 167: 106903.
- [28] 张作金, 周振华, 吴天来, 等. 组合捕收剂回收某铁尾矿中的磷[J]. *矿产保护与利用*, 2021, 41(2): 112–116.
- ZHANG Z J, ZHOU Z H, WU T L, et al. Recovery of phosphorus from

- iron tailings with combined collectors [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2021, 41(2): 112–116.
- [29] 吕昊子. 大红山铁尾矿中微细粒云母资源的高效分选及理论研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2017.
- LV H Z. Efficient sorting and theoretical study of fine-grained mica resources in Dahongshan iron tailings [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017.
- [30] 许晗, 徐彪, 陈焯年. 南芬铁尾矿回收石英试验研究[J]. 矿业工程, 2017, 15(5): 21–24.
- XU H, XU B, CHEN X N. Experimental study on the recovery of quartz from Nanfen iron tailings [J]. Mining Engineering, 2017, 15(5): 21–24.
- [31] KLAYDISON SILVA, LEV O FILIPPOV, ALEXANDRE PIÇARRA, et al. New perspectives in iron ore flotation: use of collector reagents without depressants in reverse cationic flotation of quartz [J]. Minerals Engineering, 2021, 170: 107004.
- [32] LI M Y, XIONG Y H, CHEN T J, et al. Separation of ultra-fine hematite and quartz particles using asynchronous flocculation flotation [J]. Minerals Engineering, 2021, 164: 106817.
- [33] 全宵, 王社良. 铁尾矿砂再生骨料混凝土力学性能及微观结构分析[J]. 混凝土, 2021(1): 91–93+97.
- TONG X, WANG S L. Mechanical properties and microstructure analysis of iron tailings recycled aggregate concrete [J]. Concrete, 2021(1): 91–93+97.
- [34] 赵阳. 鞍山式铁尾矿制备耐盐碱建筑用砖的研究[D]. 唐山:华北理工大学, 2017.
- ZHAO Y. Research on the preparation of salt-alkali-resistant building bricks from Anshan-type iron tailings [D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2017.
- [35] 李萌, 周庆立, 白丽梅, 等. 机械力化学效应提高铁尾矿活性试验研究[J]. 矿产综合利用, 2021(1): 179–185.
- LI M, ZHOU Q L, BAI L M, et al. Experimental study on improving the activity of iron tailings by mechanochemical effect [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(1): 179–185.
- [36] 朴春爱, 王栋民, 张力冉, 等. 化学-机械耦合效应对铁尾矿粉胶凝活性的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2016, 24(6): 1100–1109.
- PU C A, WANG D M, ZHANG L R, et al. Effects of chemical-mechanical coupling effect on the gelation activity of iron tailings powder [J]. Journal of Basic Sciences and Engineering, 2016, 24(6): 1100–1109.
- [37] LUCIANO FERNANDES DE MAGALHÃES, SÂMARA FRANÇA, MICHELLY DOS SANTOS OLIVEIRA, et al. Iron ore tailings as a supplementary cementitious material in the production of pigmented cements [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 274: 123260.
- [38] ZHANG N, TANG B W, LIU X M. Cementitious activity of iron ore tailing and its utilization in cementitious materials, bricks and concrete [J]. Construction and Building Materials, 2021, 288: 123022.
- [39] LI H N, LIU P F, LI C, et al. Experimental research on dynamic mechanical properties of metal tailings porous concrete [J]. Construction and Building Materials, 2019, 213: 20–31.
- [40] LUO J L, HOU D S, Li Q Y, et al. Comprehensive performances of carbon nanotube reinforced foam concrete with tetraethyl orthosilicate impregnation [J]. Construction & Building Materials, 2017, 131(30): 512–516.
- [41] 陈飞旭. 铁尾矿/粉煤灰/EPS颗粒/气凝胶复合保温材料研究[D]. 北京:中国地质大学, 2019.
- CHEN F X. Research on composite thermal insulation materials of iron tailings fly ash EPS particles aerogel [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2019.
- [42] 黎洁, 谢贤, 李博琦, 等. 地质聚合物研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(6): 141–148.
- LI J, XIE X, LI B Q, et al. Research progress of geopolymers [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020, 40(6): 141–148.
- [43] 康博文. 尾矿地质聚合物的制作及其对重金属离子的固化研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2020.
- KANG B W. Preparation of tailings base geopolymer and its solidification of heavy metal ions [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2020.
- [44] 邓兆洋, 王晓伟, 贾铭椿. 地质聚合物固化重金属研究进展[J]. 现代化工, 2021, 41(11): 77–81.
- DENG Z X, WANG X W, JIA M C. Research progress on the solidification of heavy metals in geopolymers [J]. Modern Chemical Industry, 2021, 41(11): 77–81.
- [45] WANG G W, NING X A, LU X W, et al. Effect of sintering temperature on mineral composition and heavy metals mobility in tailings bricks [J]. Waste Management, 2019, 93: 112–121.
- [46] 陈永亮. 鄂西低硅铁尾矿烧制制砖及机理研究[D]. 武汉:武汉科技大学, 2012.
- CHEN Y L. Research on sintering and mechanism of low-silicon iron tailings in western Hubei to make bricks [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2012.
- [47] 徐庆荣. 利用铁尾矿烧制硅酸盐水泥熟料[J]. 现代矿业, 2018, 34(5): 165–168.
- XU Q R. Using iron tailings to produce portland cement clinker [J]. Modern Mining, 2018, 34(5): 165–168.
- [48] 罗力. 利用铁尾矿制备硅酸盐水泥熟料的试验研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2016.
- LUO L. Experimental study on preparation of portland cement clinker from iron tailings [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2016.
- [49] YOUNG G, MEI YANG. Preparation and characterization of portland cement clinker from iron ore tailings [J]. Construction and Building Materials, 2019, 197: 152–156.
- [50] 吴俊权, 马晶, 汪应玲, 等. 高硅铁尾矿制备陶粒工艺试验研究[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(6): 126–132.
- WU J Q, MA J, WANG Y L, et al. Experimental study on the preparation of ceramics from high-silicon iron tailings [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020, 40(6): 126–132.
- [51] 李晓光, 侯鑫鑫, 梁保真, 等. 铁尾矿陶粒混凝土的制备与性能分析[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(3): 929–935.
- LI X G, HOU X X, LIANG B Z, et al. Preparation and performance analysis of iron tailings ceramics concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(3): 929–935.
- [52] 孟宪昊. 隔墙板用铁尾矿多孔陶瓷及其复合相变材料的制备与性能研究[D]. 北京:北京交通大学, 2020.
- MENG X H. Preparation and properties of iron tailings porous ceramics and their composite phase change materials for partition panels [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [53] 李润丰. 铁尾矿多孔陶瓷/石蜡复合相变储能材料的制备与性能研究[D]. 北京:北京交通大学, 2019.
- LI R F. Preparation and properties of iron tailings porous ceramic/paraffin composite phase change energy storage materials [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [54] 刘晓倩, 周洋, 刘旭峰, 等. 碳热还原法制备铁尾矿多孔陶瓷的结构

- 与性能[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(3): 56–63.
- LIU X Q, ZHOU Y, LIU X F, et al. Structure and properties of iron tailings porous ceramics prepared by carbothermal reduction [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020, 40(3): 56–63.
- [55] 隋延力, 王继全, 杨芳, 等. 国内铁尾矿制备陶瓷玻化砖的研究现状及问题分析[J]. 金属矿山, 2014(1): 177–180.
- SUI Y L, WANG J Q, YANG F, et al. Research status and problem analysis of ceramic vitrified bricks prepared from iron tailings in China [J]. Metal Mines, 2014(1): 177–180.
- [56] 马子钧. 利用硅酸盐工业废(尾)矿制备发泡陶瓷的研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2019.
- MA Z J. Research on the preparation of foamed ceramics from silicate industrial waste (tailings) [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2019.
- [57] 王明. 铁尾矿黑色微晶玻璃制备工艺概述[J]. 现代矿业, 2020, 36(6): 252–254.
- WANG M. An overview of the preparation process of iron tailings black glass – ceramic [J]. Modern Mining, 2020, 36(6): 252–254.
- [58] 马明鑫. 铁尾矿泡沫玻璃制备及添加量研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2017.
- MA M X. Preparation and addition of iron tailings foam glass [D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2017.
- [59] 孙强强, 杨文凯, 李兆, 等. 利用铁尾矿制备微晶泡沫玻璃的热处理工艺研究[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(3): 69–74.
- SUN Q Q, YANG W K, LI Z, et al. Study on heat treatment process of microcrystalline foam glass prepared from iron tailings [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020, 40(3): 69–74.
- [60] MORAIS C F, BELO B R, BEZERRA A C S, et al. Thermal and mechanical analyses of colored mortars produced using Brazilian iron ore tailings[J]. Construction and Building Materials, 2020, 268: 121073.
- [61] 吕绍伟, 姜屏, 钱彪, 等. 铁尾矿砂力学特性及再生利用研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(2): 466–470 + 512.
- LV S W, JIANG P, QIAN B, et al. Research progress on mechanical properties and recycling of iron tailings [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(2): 466–470 + 512.
- [62] 王营, 顾晓薇, 张延年, 等. 铁尾矿砂水泥砂浆抗压强度及微观结构分析[J]. 金属矿山, 2022(1): 60–64.
- WANG Y, GU X W, ZHANG Y N, et al. Compressive strength and microstructure analysis of iron tailings sand cement mortar [J]. Metal Mining, 2022(1): 60–64.
- [63] 胡倩倩. 核壳结构苯丙聚合物改性防水砂浆的研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2015.
- HU Q Q. Research on core – shell structure styrene – acrylic polymer modified waterproof mortar [D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2015.
- [64] 贺艳军, 张金山, 石占山, 等. 羟丙基甲基纤维素改善铁尾矿砂砂浆的性能[J]. 非金属矿, 2020, 43(6): 30–32.
- HE Y J, ZHANG J S, SHI Z S, et al. Hydroxypropyl methyl cellulose improves the properties of iron tailings mortar [J]. Non – metallic Minerals, 2020, 43(6): 30–32.
- [65] 熊哲. 铁尾矿砂填充颗粒的阻尼和隔声性能的研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2016.
- XIONG Z. Research on the damping and sound insulation performance of iron ore tailings sand filled particles [D]. Nanchang: Nanchang Aviation University, 2016.
- [66] 李明俊, 石春华. 微纳铁尾矿砂吸隔声板的制备及其影响因素分析[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(2): 787–793.
- LI M J, SHI C H. Preparation of micro – nano iron tailings sand sound absorption and sound insulation board and analysis of its influencing factors [J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21(2): 787–793.
- [67] 常宁. 钒钛磁铁矿复合胶凝材料制备隔声板材的研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2020.
- CHANG N. Research on the preparation of sound – insulating panels from vanadium – titanium – magnetite tailings composite cementitious materials [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2020.
- [68] 肖涛. 铁尾矿砂复合板的非柱形孔吸隔声性能研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2017.
- XIAO T. Research on the sound absorption and insulation performance of non – cylindrical holes of iron tailings sand composite panels [D]. Nanchang: Nanchang Aeronautical University, 2017.
- [69] 罗森华. 黏性土改良铁尾矿砂的路用性能研究[J]. 福建交通科技, 2021(2): 25–30.
- LUO S H. Research on road performance of iron tailings sand improved by clay soil [J]. Fujian Communications Science and Technology, 2021(2): 25–30.
- [70] 丁玉江. 改性铁尾砂混合料于道路基层中的应用研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2020.
- DING Y J. Application of modified iron tailings mixture in road base [D]. Ma'anshan: Anhui University of Technology, 2020.
- [71] 王绪旺. 无机结合料处治铁尾矿渣路用水稳定性试验研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2020, 34(3): 59–62 + 95.
- WANG X W. Experimental study on road water stability of iron tailings slag treated with inorganic binders [J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2020, 34(3): 59–62 + 95.
- [72] 赵飞, 李桂英, 张会芳, 等. 固化剂改良铁尾矿无侧限抗压强度试验研究[J]. 河北建筑工程学院学报, 2021, 39(1): 50–53.
- ZHAO F, LI G Y, ZHANG H F, et al. Experimental study on unconfined compressive strength of iron tailings improved by curing agent [J]. Journal of Hebei Institute of Architecture and Civil Engineering, 2021, 39(1): 50–53.
- [73] 仇健. 固化剂改良铁尾矿路用耐久性能试验研究[D]. 张家口: 河北建筑工程学院, 2020.
- ZHANG J. Experimental study on road durability performance of iron tailings improved by curing agent [D]. Zhangjiakou: Hebei University of Architecture, 2020.
- [74] 刘晶晶, 仇健, 温孟瑶, 等. 冻融循环作用对固化改良铁尾矿抗压强度的影响试验研究[J]. 中外公路, 2020, 40(6): 262–266.
- LIU J L, ZHANG J, WEN M Y, et al. Experimental study on the effect of freeze – thaw cycles on the compressive strength of solidified and improved iron tailings [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(6): 262–266.
- [75] 刘晶晶, 仇健, 薛晓峰, 等. 干湿循环作用下改良铁尾矿强度特性试验研究[J]. 公路, 2019, 64(7): 25–31.
- LIU J L, ZHANG J, XUE X F, et al. Experimental study on strength characteristics of improved iron tailings under the action of dry – wet cycle [J]. Highway, 2019, 64(7): 25–31.
- [76] 张宝虎, 余天航, 韩先瑞, 等. 铁尾矿砂骨料沥青混凝土性能研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2019, 43(3): 481–485.
- ZHANG B H, YU T H, HAN X R, et al. Research on the performance of iron tailings sand – gravel aggregate asphalt concrete [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering Edition), 2019, 43(3): 481–485.
- [77] 田知文. 铁尾矿沥青混合料性能评价及改善措施研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.

- TIAN Z W. Research on performance evaluation and improvement measures of iron tailings asphalt mixture [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [78] 曹丽萍, 张晓亢, 杨晨, 等. 基于分子动力学的硅烷偶联剂对铁尾矿沥青混合料改性的机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(7): 2276–2286.
- CAO L P, ZHANG X K, YANG C, et al. The mechanism of modification of iron tailings asphalt mixture by silane coupling agent based on molecular dynamics [J]. Journal of Central South University (Nature Science), 2021, 52(7): 2276–2286.
- [79] 邹宗民, 苏纪壮, 汲平, 等. 铁尾矿对微表处混合料耐久性影响研究[J/OL]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2021.
- ZOU Z M, SU J Z, JI P, et al. Study on the effect of iron tailings on the durability of micro-surface mixtures [J/OL]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering Edition), 2021.
- [80] 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.
- LI H T. Research and development and performance research of iron tailings-based filling materials [D]. Ji'nan: Shandong University, 2020.
- [81] WEI D Y, DU C F, LIN Y F, et al. Impact factors of hydration heat of cemented tailings backfill based on multi-index optimization [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2020, 18: 100601.
- [82] 魏晓明. 高阶段全尾砂胶结充填体强度特性及充填体配比设计研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2018.
- WEI X M. Research on the strength characteristics of high-stage full tailings cemented backfill and the design of backfill ratio [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2018.
- [83] 杨晓娟. 低品质多固废协同制备充填料浆及其管输阻力研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2020.
- YANG X B. Synergistic preparation of filling slurry with low-quality multi-solid waste and its pipeline resistance [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2020.
- [84] YUZE WANG, KENICHI SOGA, JASON T. DE JONG, et al. Microscale visualization of microbial-induced calcium carbonate precipitation processes [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2019, 145(9): 04019045.
- [85] QIU J P, XIONG J C, ZHANG W Q, et al. Effect of microbial-cemented on mechanical properties of iron tailings backfill and its mechanism analysis [J]. Construction and Building Materials, 2022, 318: 126001.
- [86] THANDIEVERONICA SIMA, MOATLHODI WISE LETSHWENYO, LESEDI LEBOGANG. Efficiency of waste clinker ash and iron oxide tailings for phosphorus removal from tertiary wastewater: Batch studies [J]. Environmental Technology & Innovation, 2018(11): 49–63.
- [87] LI P W, LUO S H, ZHANG L, et al. Study on preparation and performance of iron tailings-based porous ceramics filter materials for water treatment [J]. Separation and Purification Technology, 2021, 276: 119380.
- [88] 杜熠. 微生物载体高硅铁尾矿基多孔陶粒孔结构调控及生物效应研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2019.
- DU Y. Study on pore structure regulation and biological effect of microbial carrier high-silicon iron tailings-based porous ceramics [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2019.
- [89] XU C L, FENG Y L, LI H R, et al. Adsorption of heavy metal ions by iron tailings: behavior, mechanism, evaluation and new perspectives [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 344: 131065.
- [90] LU C, YANG H M, WANG J, et al. Utilization of iron tailings to prepare high-surface area mesoporous silica materials [J]. Science of the Total Environment, 2020, 736: 139483.
- [91] 许小东. 铁尾矿合成 Fe-SBA-15 介孔材料及其性能研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2019.
- XU X D. Synthesis and properties of Fe-SBA-15 mesoporous materials from Iron tailings [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2019.
- [92] 牟文宇, 卢俊达, 罗绍华, 等. 铁尾矿硫酸焙烧法提取铁制备 α -Fe₂O₃ 光催化剂[J]. 金属矿山, 2020(7): 206–210.
- MOU W M, LU J D, LUO S H, et al. Preparation of α -Fe₂O₃ photocatalyst from iron tailings by roasting with sulfuric acid [J]. Metal Mines, 2020(7): 206–210.
- [93] 郑昭. 铁矿石墨矿制备催化剂催化还原氮氧化物试验研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2017.
- ZHENG Z. Experimental study on the catalytic reduction of nitrogen oxides in the preparation catalyst of iron ore tailings [D]. Ma'anshan: Anhui University of Technology, 2017.
- [94] GONG Z J, QI R, ZHANG Z, et al. NO reduction by semi-coke and tailing combined catalyst [J]. Energy Reports, 2021, 7: 296–305.
- [95] VICTOR AUGUSTO ARAÚJO DE FREITAS, SAMUEL MOURABREDER, FLVIA PAULUCCI CIANGA SILVAS, et al. Use of iron ore tailing from tailing dam as catalyst in a fenton-like process for methylene blue oxidation in continuous flow mode [J]. Chemosphere, 2018, 219: 328–334.
- [96] GONG L L, LIANG J S, KONG L P, et al. Synthesis of high-performance copper barium silicate composite pigment from waste iron ore tailings [J]. Ceramics International, 2021, 47(19): 27987–27997.
- [97] 苏琳, 刘双, 程煜昊, 等. 以铁尾矿为原料制备微/纳米结构白炭黑和氧化铁[J]. 沈阳理工大学学报, 2016, 35(2): 90–95.
- SU L, LIU S, CHENG Y H, et al. Silica and iron oxide with micro/nano structure were prepared from iron tailings [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2016, 35(2): 90–95.
- [98] 杜培培, 张玉柱, 龙跃. 铁尾矿对矿渣纤维制备中熔体流动性的影响[J]. 钢铁, 2019, 54(6): 109–113.
- DU P P, ZHANG Y Z, LONG Y. Effect of iron tailings on melt fluidity in the preparation of slag fibers [J]. Iron & Steel, 2019, 54(6): 109–113.
- [99] 孙希乐, 安卫东, 张韬, 等. 利用铁尾矿和副产品云母粉、白云石制备土壤调理剂试验研究[J]. 金属矿山, 2018(6): 192–196.
- SUN X L, AN W D, ZHANG T, et al. Experimental study on soil conditioner preparation by using iron tailings and by-product mica powder and dolomite [J]. Metal Mine, 2018(6): 192–196.
- [100] 陈贤树, 曲生华, 张琼琼, 等. 利用选铁尾矿及铁矿副产品制备土壤调理剂关键技术与应用研究[J]. 新型建筑材料, 2021, 48(2): 106–109.
- CHEN X S, QU S H, ZHANG Q Q, et al. Key technology and application of soil conditioner preparation by iron sils and iron mine by-products [J]. New Building Materials, 2021, 48(2): 106–109.
- [101] 张丛香, 刘润华, 刘双安, 等. 利用铁尾矿改良苏打盐碱地技术与应用[J]. 矿业工程, 2016, 14(1): 39–41.
- ZHANG C X, LIU R H, LIU S A, et al. Research and application of iron tailing [J]. Mining Engineering, 2016, 14(1): 39–41.
- [102] 丁文金, 李丁, 马友华, 等. 磁化复混肥料的磁化工艺及磁性稳定性研究[J]. 磷肥与复肥, 2014, 29(2): 13–15.
- DING W J, LI D, MA Y H, et al. Study on magnetization process and magnetic stability [J]. Phosphorus & Compound fertilizer, 2014, 29(2): 13–15.

[103] CUI X W, GENG Y, LI T, et al. Field application and effect evaluation of different iron tailings soil utilization technologies [J]. Resources, Conservation & Recycling, 2021, 173: 105746.

[104] 王磊, 许永利, 李富平. 不同配植模式对铁尾矿性质的影响[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(5): 144 – 148.
WANG L, XU Y L, LI F P. Effects of different planting modes on the properties of iron tailings [J]. Mining Research and Development, 2020, 40(5): 144 – 148.

[105] 王俊娟, 杨何宝, 王薇, 等. 苜蓿接种根瘤菌和施肥对铁尾矿砂基质改良效果的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 272 – 277.
WANG J J, YANG H B, WANG W, et al. Effects of alfalfa inoculation with rhizobia and fertilization on the improvement of iron tailings sand matrix [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(1): 272 – 277.

[106] 宋建伟, 刘硕, 袁运许, 等. 铁尾矿植被混凝土配制及其植物适宜性研究[J]. 金属矿山, 2021(8): 170 – 177.

SONG J W, LIU S, YUAN Y X, et al. Study on the preparation of iron tailings vegetation concrete and its plant suitability [J]. Metal Mines, 2021(8): 170 – 177.

[107] 宋凤敏, 张兴昌, 刘瑾, 等. 铁尾矿库区白茅对重金属的吸收与富集特征[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(4): 83 – 90 + 100.
SONG F M, ZHANG X C, LIU J, et al. Absorption and enrichment characteristics of heavy metals in Imperata cylindrica in iron tailing pond area [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2019, 47(4): 83 – 90 + 100.

[108] 孙立群. 铁尾矿土壤化利用及重金属污染的微生物修复技术[D]. 济南: 山东大学, 2017.
SUN L Q. Microbial remediation technology for iron tailings soil utilization and heavy metal pollution [D]. Ji'nan: Shandong University, 2017.

Research Progress on Comprehensive Utilization of Iron Tailings

REN Minghao^{1,2}, XIE Xian^{1,2}, LI Boqi^{1,2}, HU Shangjun^{1,2}, CHEN Tao^{1,2}, ZHU Hui^{1,2}, TONG Xiong^{1,2}

1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;
2. National & Regional Engineering Research Center for Green Comprehensive Utilization of Gangue Resources from Metal Mines, Kunming 650093, China

Abstract: Iron tailings is one of the main solid waste produced in the process of iron ore development, and is also an important secondary resource. The common ways of comprehensive recovery and utilization of iron tailings resources at present are described in detail from five aspects: In terms of the recovering valuable elements, the principle of first pre – concentration and then purification is generally followed, and the combined operation of stage grinding, stage separation and a various separation technologies will be carried out to deal with the poor, fine and miscellaneous tailings. In the preparation of building materials, iron tailings can be used as fine aggregate in the concrete system or as cementitious material after activation. Under different roasting processes, it can produce clinker, vitrified brick, glass and other products. It can also be used to produce cement mortar coating and noise reduction plate filler; In terms of making filling materials, iron tailings are applied to the pavement base, subbase and subgrade filling layer after modification and grading adjustment. When they are used to prepare the filling slurry in goaf, they must meet the requirements of compressive strength and fluidity at the same time. In terms of the production of chemical products, iron tailings can be processed into water purification and adsorption materials such as ceramics and molecular sieves, which can be used to catalyze the reduction reaction of NO into N₂ and the oxidation reaction of H₂O₂ to removal organic pollutants, and can also be used to produce pigment, white carbon black, conditioning agent and other products. In terms of agricultural products, iron tailings are suitable raw materials for soil amendment, and biotechnology is often used to realize soil formation and heavy metal solidification of iron tailings in order to realize ecological restoration in mining areas.

Keywords: iron tailings; solid waste; comprehensive utilization; building materials; filling materials; adsorption material

引用格式: 任明昊, 谢贤, 李博琦, 胡尚军, 陈桃, 朱辉, 童雄. 铁尾矿综合利用研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2022, 42(3): 155 – 168.
REN Minghao, XIE Xian, LI Boqi, HU Shangjun, CHEN Tao, ZHU Hui, TONG Xiong. Research progress on comprehensive utilization of iron tailings[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022, 42(3): 155 – 168.