

铁尾矿综合利用研究进展

尹琛, 白丽梅, 李绍英, 赵留成, 马玉新, 单浩轩

华北理工大学, 河北 唐山 063000

中图分类号: TD926.4² 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2023)06-0041-13
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2023.06.005

摘要 铁尾矿的大量堆存不但会产生尾矿库安全隐患、污染环境,而且也浪费了其中大量的有价组分,不符合国家建设资源节约型、环境友好型社会的要求。因此,如何充分利用铁尾矿,实现二次资源的综合利用已成为目前的研究热点。本文从阐述铁尾矿的分类开始,详细介绍了铁尾矿有价元素的回收,铁尾矿制备建筑与填筑材料、装饰材料、制备肥料及土壤改良剂以及化工产品等方面的研究现状,最后探讨了铁尾矿利用未来发展前景并提出相关建议。

关键词 铁尾矿;综合利用;有价元素;建筑材料;肥料;化工产品

引言

随着国家经济的迅速发展,矿产资源开发引发的问题越来越受到重视。尾矿是矿石经过一系列的选矿处理艺后排出的废弃物,近十年来尾矿堆积总量不断上升,截至 2020 年底,我国尾矿总堆积量已超过 600 亿 t^[1],而尾矿的大量堆存带来一系列问题,如排出的尾矿含有残留的化学药剂、重金属离子等,经过雨水冲刷及风化,对土壤及周围的生态环境造成极大的破坏,而尾矿库的建立不仅占用土地资源,定时维护花费资金的同时还存在倒塌的危险。铁尾矿是铁矿石经过选矿作业后产生的废弃物,主要由少量金属矿物和大量非金属矿物组成。我国铁矿石资源的特点是储量大、矿石类型多,但是贫矿多、富矿少、组分复杂、质量不高,因此在选别过程中会产生大量尾矿,当前处理方式是对铁尾矿进行堆存,但铁尾矿的理化性质表明,其在诸多行业都有利用的潜质,因此对铁尾矿二次利用的研究具有重大意义。

2012 年我国铁尾矿综合利用率只有 7% 左右^[2],2022 年铁尾矿的综合利用率达到 33%,虽然铁尾矿综合利用率在不断上升,但是综合利用的提升空间依旧巨大。本文主要总结了目前铁尾矿在各个方面的再利用现状,并分析了存在的一些问题,展望了未来铁尾矿的综合利用方向,并提出一些建议。

1 铁尾矿的分类

我国铁尾矿的特点为种类较多、成分复杂、嵌布粒度细。由于不同地区资源的差异,造成尾矿成分及其含量也不尽相同,但化学成分也有一定相似性,主要成分包括 SiO₂、Fe₂O₃、Al₂O₃、CaO 和 MgO 等,表 1 为几种典型类型的铁尾矿的主要化学成分。铁尾矿资源按照伴生元素的含量可分为单金属类铁尾矿与多金属类铁尾矿。单金属类铁尾矿根据其中硅、钙、镁、铝的含量不同可分为高硅型铁尾矿、高铝型铁尾矿、高钙镁型铁尾矿、低钙镁铝硅型铁尾矿^[3],可根据含量的不同制备不同的材料。

表 1 不同地区铁尾矿主要化学成分含量 /%
Table 1 Contents of main chemical components of iron tailings in different areas

类型	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	REO
高硅类铁尾矿 (鞍山)	76.2	12.1	1.4	2.4	1.5	—
高铝类铁尾矿 (南阳)	45.4	10.9	19.1	7.2	12.4	—
高钙、镁类铁尾矿 (邯郸)	32.0	10.2	6.5	13.8	30.8	—
多金属类铁尾矿 (包头)	11.71	13.06	1.39	3.32	—	7.09

高硅类铁尾矿中 SiO₂ 含量较高,伴生元素较少,如弓长岭、齐大山、本溪和鞍山等地区铁尾矿,从尾

收稿日期: 2023 - 09 - 18

基金项目: 河北省自然科学基金(钢铁联合项目)(E2022209127); 河北省高等学校科学技术研究项目(CXY2023008)

作者简介: 尹琛(2001—),男,安徽安庆人,硕士研究生,主要从事矿物加工新材料方面的研究工作, E-mail: 2564870128@qq.com。

通信作者: 白丽梅(1979—),女,河北邯郸人,博士、教授,博士研究生导师。主要从事矿物加工过程方面的研究工作, E-mail: limeibai@126.com。

矿利用角度来看,制备水泥、混凝土是极其不错的选择。高铝类铁尾矿排出量并不是特别大,主要分布在长江中下游,主要特点是 Al 含量较高,伴生元素较少,如马鞍山、黄梅山和南阳等地区。高钙、镁类铁尾矿主要集中在邯郸地区,主要伴生元素为 S 和 Co 等,细颗粒级含量较多,如玉石洼、梅山、邯郸等地区。多金属类铁尾矿主要分布在西南攀西地区、内蒙古包头、长江中下游的武钢矿区,矿物组成复杂,伴生元素较多,且含有一定量的稀有金属。

2 有价元素的回收

2.1 铁的回收

由于铁尾矿中铁的含量较低,为了降低成本,因此一般先预选富集,再进一步提纯。预选手段有磁化焙烧、重选、弱磁选—强磁选、碱溶浸出、预先分级、抛尾脱泥等,根据矿物解离情况选择是否需要细磨,预选后的提纯工艺主要有阶段磨矿—阶段选别、磁选、浮选、重—磁—浮选联合流程,具体根据矿石性质分别采用对应的回收工艺。

我国的铁尾矿特点之一是嵌布粒度细,需要细磨才能得到高品位精矿,但嵌布粒度不均匀。对于嵌布粒度粗细极不均匀、部分嵌布粒度偏细的尾矿,采用阶段磨矿—阶段选别的方法可提高回收率。郭丽东等^[4]以铁尾矿为原料,采用阶段磨矿—阶段选别—强磁选工艺流程获得品位 52.69%、回收率 75.69% 的铁精矿。

对于一些铁尾矿,铁主要存在于磁铁矿、弱磁性赤铁矿和褐铁矿中,脉石主要为无磁性石英、角闪石等硅酸盐矿物,利用两者之间的磁性差异可回收铁尾矿中的铁。当采用一次磁选作业效果不佳时,可进行多次磁选作业,也可先通过磁化焙烧、强磁抛尾等手段先进行预处理,再选用合适的工艺进行选别。如 CHAO L 等^[5]使用先磁化焙烧后磁选的技术回收铁尾矿中的铁,在煤与铁尾矿质量配比 1:100、800℃ 高温焙烧 30 min 的条件下得到的精矿 Fe 品位为 61.3%、回收率为 88.2%。戴惠新等^[6]对云南某含铁 17.11% 的铁尾矿采用弱磁选、强磁选抛尾,抛尾粗精矿再磨至 -0.074 mm 经过弱磁选—摇床分选,得到铁品位为 59.51%、回收率为 9.85% 的铁精矿。采用单一磁选的方法回收尾矿,工艺流程较为简单,但磁选的效率比较低,主要原因是当前的磁选设备难以有效回收细粒或微细粒磁性含铁矿物,磁选前进行预富集可大大提高回收率与产品品位。

2.2 其他金属元素的回收

铁尾矿中还有其他金属元素,例如 Ti、Cu、Co、Zn、Au 和 Re 等。由于地区差异,各地的尾矿金属成分含量不同,随着技术的不断发展,越来越多的金属

元素被利用,大大提高了综合利用率。由于共生关系复杂,且嵌布粒度细,单体解离度较低,想要充分解离一般需要再磨,在回收过程中大多数也是遵循先预富集、再精选的原则。

李素^[7]以陕西某铁尾矿为研究对象,以硫酸为 pH 调节剂、草酸为抑制剂及复配捕收剂 MQ 通过一次粗选四次精选的闭路浮选,获得 TiO_2 品位为 47.31%、回收率为 74.79% 的钛精矿。邹锋等人^[8]以攀枝花铁尾矿为研究对象,采用高梯度磁选—浮选联合工艺,最终得到 TiO_2 品位为 47.31%、回收率为 39.52% 的钛精矿。郭艳华等^[9]采用铜硫混浮—铜硫分离—铜硫尾矿再选铁的工艺流程从某铁尾矿中回收有价元素,在海水介质条件下可获得铜品位为 25.22%、回收率为 88.03% 的铜精矿。刘志国等^[10]以安徽某铁尾矿为研究对象回收钴,用脱泥—浮选工艺、CMC 为调整剂、MIBC 为起泡剂、丁基黄药为捕收剂,一次粗选二次精选一次扫选的浮选流程可得到钴品位为 0.47%、回收率为 54.14% 的钴精矿。JIA Q M 等^[11]以河北某铁尾矿为研究对象,根据矿石特点选用阶段磨矿—弱磁选—强磁选—阴离子反浮选工艺得到品位为 36.25%、回收率为 84.15% 的锌精矿。张浩^[12]对承德铁尾矿采用一次粗选一次扫选三次精选、中矿顺序返回的浮选流程处理,得到 P_2O_5 品位为 36.60%、回收率为 95.61% 的磷精矿。王丽明等^[13]对白云鄂博铁尾矿采用稀土浮选—萤石预选—萤石精选—强磁选工艺流程,其中稀土浮选以水玻璃为抑制剂、油酸钠为捕收剂获得了回收率为 92.32% 的稀土精矿,萤石浮选以酸性水玻璃为调整剂、SY 为抑制剂、油酸钠为捕收剂获得了回收率为 50.98% 的萤石精矿。

2.3 非金属矿物的回收

铁尾矿中最常见的非金属矿物有云母、石英、萤石、磷灰石、重晶石等。根据市场需求与矿物的性质,目前大多数对非金属矿物的回收采用的是浮选工艺。

大多数云母都以单体形式存在,少数为连生体,且嵌布粒度粗细不均,在浮选过程中其他层状硅酸盐矿物极易进入云母精矿,影响云母精矿的品质,因此在浮选过程常采用不磨矿直接进行浮选。如李俊旺等^[14]在碱性矿浆浓度下,以 BK500 为调整剂、BK421D 和混合胺为阴离子与阳离子捕收剂,对安徽某铁尾矿采用不磨矿直接“一粗一扫四精,中矿顺序返回”的浮选工艺流程得到回收率为 64.41%、 K_2O 含量为 7.89% 的云母精矿。

石英是制造玻璃的主要原料,也是铁尾矿中含量较多的非金属矿物,具有较大的回收潜力。碱性浮选是回收石英的主要方法,为了消除尾矿中微细泥泥与其他杂质对浮选的影响,一般都会采用重磁预选,预选粗精矿再进行浮选精选。如许晗等人^[15]通过脱泥、

弱磁选、强磁选等预选除杂作业然后反浮选,从南芬铁尾矿中获得 SiO_2 品位为 99.15%、回收率为 27.98% 的石英精矿。

萤石在铁尾矿中嵌布粒度较细,分选难度较大,在回收萤石之前常对尾矿进行磨矿—磁选来降低杂质对浮选产生的不利影响。刘春光等^[16]以内蒙古某铁尾矿为研究对象,采用磨矿、磁选等工艺除铁后以硫酸为 pH 调整剂、水玻璃为抑制剂、L-1 001 为捕收剂,采用一次粗选九次精选两次扫选的浮选工艺流程得到 CaF_2 品位为 97.12% 的浮选精矿。吴迪等人^[17]以内蒙古某铁尾矿为研究对象,通过磁选抛废提高萤石入选品位,选用 HG-1 有机抑制剂浮选获得回收率为 63.15% 的高品质萤石精矿。

含磷铁尾矿在选铁前都尽可能先回收磷。浮选工艺有直接浮选、单一反浮选、正一反浮选、双反浮选等,浮选主要使用脂肪酸类捕收剂、醚胺、酰胺羧酸类捕收剂,如油酸、油酸钠、氧化石蜡皂等,水玻璃作为抑制剂^[18]。霍松洋等^[19]以承德铁尾矿为研究对象,磨矿细度达到 -0.074 mm 占 52.14% 时,以 AW-01 为捕收剂采用一粗三精浮选工艺,得到 P_2O_5 品位为 31.63%、回收率为 82.49% 的磷精矿。

综上所述,目前对有价元素的回收技术已经较为成熟,能够从铁尾矿中回收品位较好的有价元素,对非金属矿物的回收采用较多的是浮选工艺,而捕收剂的选择与开发尤为重要。

3 制备建筑材料

3.1 砖

铁尾矿中富含 SiO_2 、 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 等组分,是制备砖的理想原料,利用铁尾矿作为原料可提高砖的砌体强度与耐久性,代替黏土降低成本。采用普通的烧结工艺制备砖,焙烧后铁尾矿中的 Fe、Ca 等金属元素能与脉石矿物形成低共熔物充填在产物中,提高其强度,同时铁尾矿中的锌、铜等重金属会在高温下生成稳定的尖晶石或硅酸盐结构实现固化。如 LIU S X^[20]对滩上地区铁尾矿进行实验,以铁尾矿、粉煤灰、砂等为原料得到了抗压强度为 28.30 MPa、抗折强度为 5.63 MPa 的砖。南晓杰等^[21]通过实验发现,经过焙烧后的铁尾矿可提高透水砖的强度,焙烧尾矿用量 60% 时透水砖的抗压强度为 15.44 MPa,抗折强度为 3.34 MPa。

免烧砖以铝硅酸盐矿物、矿渣与粉煤灰等为原料,不需烧结,经高压压制成型,具有耐高温、耐腐蚀的优点,是一种新型的建筑材料。如王梓^[22]以铁尾矿、矿渣、钛石膏等为原料,当铁尾矿掺入量为 75% 时,发现免烧砖主要由六方 $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$ 与斜方 $\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_4\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 晶相构成,其形成提高了铁尾

矿免烧砖的强度,同时含有未完全反应的六方 SiO_2 、立方 Fe_2O_3 等晶相。刘俊杰等^[23]以铁尾矿为原料,加入标准砂、熟石灰、水泥制成的免烧砖满足 MU10 的强度要求。

制砖过程中铁尾矿的掺入量需要控制,一旦掺入量过多可能会导致产品吸水率与抗压强度下降,因此需要考虑铁尾矿、熟石灰、水泥等配料的最佳配比。

尾矿库的地理位置一般比较偏僻,交通运输不利,运输成本是一笔较大的费用,目前还是很难与市面上出售的建筑砖竞争。

3.2 水泥

铁尾矿粒度较细,含有大量的 Fe、Si、Al、Ca 等元素,且与水泥化学组成相似,不仅可代替铁粉、黏土、河砂等原料,减少原料使用降低成本,还可改善生料易烧性,而是否能成为水泥掺合料主要取决于铁尾矿是否具有火山灰活性。铁尾矿一般活性较低,制备水泥前需激发其活性,目前主要有机械活化法、化学激发法、热活化法等。

机械活化是固体在粉磨过程中颗粒粒度不断细化,同时物料比表面积增大,在细磨的过程中也完成了能量的转化,导致矿物结晶度降低,使水分子更轻松进入颗粒内部。如 WU C R 等^[24]对磁性铁尾矿进行机械活化后作为水泥添加剂,发现磁性铁尾矿的低比表面积克服了其粗糙与棱角颗粒的不利影响,使砂浆的流变性能得到提高。LIANG H H 等^[25]利用铁尾矿与 1-羟基亚乙基二磷酸(HEDP)制备了缓凝、低成本的硫氧镁水泥,适当的机械研磨铁尾矿可以提高反应活性,随着 HEDP 掺入量的增加,样品的抗压强度呈现先增大后减小的趋势,最佳掺入量为 0.75%,其抗压强度为 105.32 MPa,流动性与凝固时间随着 HEDP 的增加而增加(如图 1 所示)。

化学激发法是通过掺入化学物质来提高铁尾矿的活性,较为常见的激发剂有硫酸盐、水玻璃和碱金属盐等。热活化法是通过高温煅烧的方式来提高尾矿活性。如易忠来等^[26]发现 700 °C 热活化法处理可得到胶凝活性最好的铁尾矿。杨鹏博^[27]探索 Na_2SiO_3 、NaOH、 Na_2SO_4 和 CaSO_4 四种化学激发剂对铁尾矿活性的影响,发现对铁尾矿都有活化作用,但 NaOH 效果最优。

铁尾矿掺量也是一个需要考虑的问题,掺入适量的铁尾矿可以增加水泥材料的抗折抗压强度,因为铁尾矿中的活性物质与熟料水化生成物可继续反应生成水化硅酸钙等一些具有凝胶作用的矿物,进而提高强度,但大量掺入铁尾矿会降低材料的力学性能,最佳掺入量为 30%~55%。如易龙生等^[28]以铁尾矿为掺和料制备发泡水泥,当铁尾矿掺量为 55%、普通硅酸盐水泥掺量为 45%,发泡水泥 7 d 的抗压强度为 1.35 MPa,28 d 抗压强度为 1.65 MPa。众多结果表明铁尾矿的适

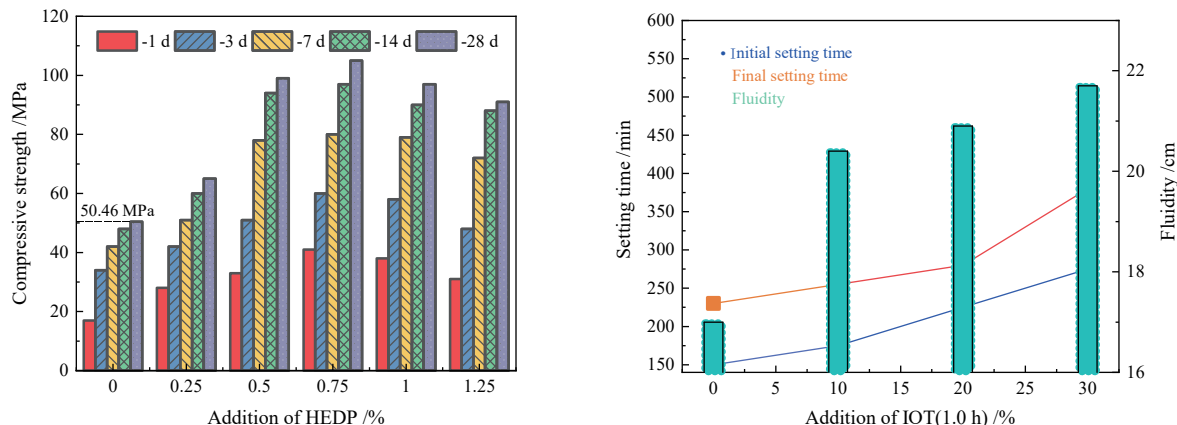


图1 HEDP 对抗压强度、流动性、凝固时间的影响^[25]

Fig. 1 Influence of HEDP on compressive strength, fluidity and solidification time^[25]

当加入不仅显著降低成本,还可提高强度,降低烧成的温度。

3.3 混凝土

利用铁尾矿制备混凝土材料可极大降低原料所需成本。混凝土的制作一般是将骨料掺入胶凝材料和辅料中,充分搅拌后装入模具压制成型,而铁尾矿可代替河沙作为骨料或激发活性充当胶凝材料。

3.3.1 骨料

将铁尾矿代替河砂作为骨料加入到混凝土中,能明显提高混凝土的黏度、流动性、抗压抗冻能力,但其掺入量需要控制,混凝土的性能一般随着铁尾矿的掺入先提高后下降。如叶飞^[29]研究粉煤灰与铁尾矿掺量对混凝土抗压强度的影响,发现铁尾矿砂掺量为30%时,抗压强度达到峰值,相比没掺入铁尾矿砂时抗压强度提高了5%,增强效果有限,但随着粉煤灰的掺入弥补了铁尾矿砂活性不足的缺点,粉煤灰掺入15%时,抗压强度达到最大值,此时与普通混凝土相比强度增加12.9%。袁益欣等^[30]采用铁尾矿砂为细骨料制备混凝土,随着再生粗骨料取代率的增加,劈裂强度与抗折强度都呈现先上升后下降的趋势,当取代率为50%时,混凝土的综合性能最佳。DUAN Y J等^[31]利用铁尾矿粉、铁尾矿砂、铁尾矿沙砾为混凝土掺和料制成的混凝土满足相应强度等级的要求,其弹性模量与粉煤灰混凝土的弹性模量极其相近,铁尾矿占原料总量比达到了88.4%,使铁尾矿资源得到了充分利用。

3.3.2 胶凝材料

铁尾矿的矿物组成较为复杂,结晶度较高,其中的硅和铝等活性成分很难被激发,因此利用铁尾矿制备胶凝材料前一般都要对尾矿进行优化,采用有机械、化学、煅烧等激活手段让铁尾矿中矿物晶格发生改变或反应得到活性物质,让火山灰活性得到激发。

机械活化法目前是较为常用的一种方法,如吝晓

然^[32]以钒钛磁铁矿为对象,采用机械力活化方式得到铁尾矿微粉,实验发现铁尾矿微粉在胶凝材料中的用量不得超过30%,尾矿的掺入提高了混凝土的抗冻能力,掺量为16%时,C30尾矿微粉预拌混凝土的3 d和28 d的抗压强度分别达到13.4 MPa与40.3 MPa,王邵熙^[33]通过机械活化+化学激发的方式激发铁尾矿火山灰活性,机械粉磨45 min时,铁尾矿比表面积为543 m²/kg,3 d、28 d的抗压强度为分别18.2 MPa、38.9 MPa。WANG C H等^[34]使用铁尾矿为原料制得的新型耐火胶凝材料在1200~1300℃的高温下依旧保持其强度,无破裂或变形。在室温条件下由于铁尾矿吸附大量的游离水,增加了未水化硅酸盐水泥颗粒数量,从而导致抗压强度随着铁尾矿掺量增多而呈现负相关关系。随着温度的增高,试样的失重在增加,在850℃时最显著,主要是因为水泥浆体的失水产生气穴使材料的完整性被破坏,材料中的气孔增多,且存在“团聚”现象,但是骨架致密结构增强。

通过煅烧或化学法均可提高铁尾矿的活性。如姜楠^[35]以铁尾矿为原料,发现化学激发剂能提高铁尾矿的胶凝活性,升高温度有利于铁尾矿胶凝活性的激发,且通过化学激发方式使铁尾矿无害化、资源化利用。

铁尾矿的活性得到激发后作为辅助胶凝材料制备混凝土等建筑材料,在水泥的水化过程中促进其二次水化,增强水泥的力学性能和密实性等。利用铁尾矿制备混凝土已经成为实现铁尾矿资源二次利用的一条较好途径,极大地缓解了建筑材料短缺的问题,为以后的绿色建材生产开辟了新道路。

3.4 陶粒

陶粒有保温隔热、抗震性好、耐火性优异等特点,一般以硅铝组分充当骨架,而铁尾矿中富含硅铝,以铁尾矿制备陶粒可减少成本。WANG Z等^[36]以铁尾矿为主要原料,在1100℃保温30 min制备的陶粒抗压强度为10.1 MPa,当温度低于1000℃时,堆积密度小于760.72 kg/m³、表观密度小于460.48 kg/m³,可能是

因为铁尾矿污泥中的有机物与密度低造成的,随着温度的升高,陶粒堆积密度、表观密度、抗压强度明显增强,吸水率不断降低。YU C H等^[37]利用铁尾矿与粉煤灰在1100℃保温40 min制得含有纳米级空隙的铁尾矿陶粒在建筑领域取得了优异的效果。LI P W等^[38]以铁尾矿和粉煤灰为原料制备具有处理污水能力的多孔人工陶粒滤料(ACFM),各项指标都能满足国家行业要求。当烧结温度为1060℃时,原料中存在的助熔剂CaO能形成液相通道,导致有毒元素凝固。随着温度的升高,失重现象逐渐明显,因为矿物混合原料中结晶水与高岭土中腐殖质的氧化分解导致迅速失重。在加热过程中陶粒生料中的玻璃体熔化产生液相,组织中部分气体逸出,内部形成丰富的多孔结构,气体逸出同时增加了ACFM的比表面积。李育彪等^[39]以低硅铁尾矿制得的陶粒堆积密度为873.2 kg/m³,1 h吸水率达到7.65%,为低硅铁尾矿的利用提供了新途径。

3.5 降噪板材

铁尾矿研磨成粉后可替换目前常用的粉体填料,加工出性能较好的石塑、木塑等复合材料,再经过浇筑制备出板材与管材等。目前用铁尾矿制备较多的为降噪板材,可以有效地隔声与降噪,降噪一般分为两种途径:隔声与吸声。

隔声效果的好坏一般都是根据材质来决定,对于单层板材,单位面积质量越高表现出的隔声效果越好,因为铁尾矿的密度远大于水泥。如熊哲^[40]发现铁尾矿砂颗粒的粒径越小,结构内颗粒堆积得越密集,降噪板材的隔声性能越优异。吸声主要是根据其结构来决定的,结构方面常见的是多层结构与多孔结构,多层结构隔音效果更好,因为声波遇见界面会反射消耗能量,而多孔介孔可以提供更好的吸声能力。如常宁^[41]利用钒钛磁铁矿尾矿制备了单层隔声板材与多层隔声板材,其抗折抗压强度都能满足国家板材要求。石春华^[42]发现铁尾矿砂粒径越小,所得到的多孔材料空隙随之减小,吸声性能越好,且少量的SiO₂气凝胶的加入可以提高其吸声性能。

3.6 保温材料

铁尾矿含有大量的SiO₂能充当硅料,并能提供少量的钙、铝,其多孔性能吸附空气中的水蒸气减缓材料内部水分蒸发速度使得保温效果更佳,且制备成本低。如王鹏昕^[43]以铁尾矿砂为基材应用到保温材料,掺混SiO₂气凝胶、纤维素醚等外加剂合成了一种新型保温隔热复合材料,尾矿砂粒径越小,导热系数越小,保温效果也越好,当铁尾矿砂平均粒径为0.2 μm左右时得到的复合材料性能最好,导热系数为0.065 W/(m·K)、抗压强度为1.938 MPa。陈永亮等^[44]使用铁尾

矿为原料、稻壳为造孔剂,加入黏结剂与助熔剂制备轻质保温墙体材料,当铁尾矿加入量为46%时效果最优,材料抗压强度为7.6 MPa,导热系数为0.2925 W/(m·K),显气孔率为45.54%。喻振贤等^[45]以铁尾矿为主要原料制得的阻燃型轻质保温墙体材料28 d抗压强度大于3.0 MPa,导热系数小于0.231 W/(m·K)。

综上所述,铁尾矿作为主要原料制备保温材料掺入比例可达45%以上,制备的保温材料不仅保温性能好,导热系数低,铁尾矿的掺入还可提高建材的抗压抗折强度、耐酸碱性。

3.7 陶瓷材料

制作陶瓷的原料一般为天然的矿物与岩石,主要为黏土、石英、长石等,而铁尾矿富含SiO₂、Al₂O₃及其他碱金属氧化物,以铁尾矿为原料能极大地降低成本。利用铁尾矿制备的陶瓷材料主要有多孔陶瓷和功能陶瓷。

多孔陶瓷具有耐高温、耐腐蚀、密度小和强度高等特点,制备工艺有添加造孔剂工艺、发泡工艺等^[46]。如吴松泽等^[47]采用泡沫注凝成形—常压烧结的工艺制备多孔陶瓷,以铁尾矿为原料制备出孔隙率为87.2%、抗压强度为1.37 MPa、导热率为0.036 W/(m·K)的铁尾矿多孔陶瓷。WANG H等^[48]以铁尾矿制备的多孔陶瓷有致密的孔隙结构、孔隙较为均匀,且孔径大多一致。黎邦城等^[49]以铁尾矿为原料,掺入玻璃粉、高岭土、石英及发泡剂,得到闭口气孔为主、孔径分布均匀的多孔陶瓷材料,通过调节发泡剂的含量及烧成温度可获得不同性能的多孔陶瓷材料,但铁尾矿掺量不能超过55%。

功能陶瓷机械强度较高,耐高温、耐腐蚀性能强,在许多领域都有应用,如能源、医疗等。MENG J P等^[50]以铁尾矿为主要原料,采用半干法压制—无压烧结工艺烧成了一种应用于太阳能领域的新型吸热功能陶瓷,其体积收缩与弯曲强度随着温度的升高先上升后降低,可能是因为低温共晶混合物的熔化,在1185℃时得到的功能陶瓷弯曲强度为119.03 MPa。

3.8 玻璃材料

铁尾矿可在制备玻璃材料过程中提供Al、Mg和Ca等金属元素并充当硅料,且铁尾矿的掺入可适当提高玻璃的韧性、密度与耐酸碱性。由于不同地方的尾矿成分含量存在一定差异,所以制备的玻璃材料种类较多,其性能也各有差异,一般制备的玻璃材料可分为微晶玻璃、黑色玻璃和泡沫玻璃。

铁尾矿制备的微晶玻璃一般分为两种:一种为结构材料,一种为功能材料。SiO₂-Al₂O₃-CaO系微晶玻璃为结构材料,具有耐腐蚀、高硬度等特点;MgO-Al₂O₃-SiO₂为功能材料,其具有优异的介电性能。制备微晶玻璃主要方法有熔融法、烧结法。WANG C L

等^[51]以铁尾矿与煤矸石为原料,采用改进的熔融法制备了力学性能优异的 $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 微晶玻璃,当晶化温度为 $980\text{ }^\circ\text{C}$ 时,抗弯强度为 293.3 MPa 。LU X W 等^[52]用铁尾矿高温烧结制备的微晶玻璃具有较佳的耐化学腐蚀性与抗压强度。MENG J P 等^[53]以铁尾矿为主要原料采用熔融—淬火—烧结工艺制备了透辉石基微晶玻璃,发现晶须(schorl)的掺入能有效提高微晶玻璃的力学性能与远红外发射率,图 2 为提高玻璃陶瓷远红外发射率的黑电气石掺杂工艺示意图,远红外发射率的改善可能是因为透辉石中的 Mg 与 Si 离子被铁离子取代,铁离子的置换反应导致类质同象结构的形成,当黑电气石的质量分数增加到 10% 时,微晶玻璃综合性能强,抗折强度为 107.03 MPa 。

目前很少生产黑色玻璃,因为生产的黑色玻璃颜色不纯正,制备颜色纯正的黑色玻璃一般都需添加大量氧化铁与氧化钴进行着色。李彬等人^[54]用铁尾矿与工业废渣制备黑色玻璃材料,工艺流程较为简单、成本低、性能优越。当铁尾矿掺入量为 40%~60% 时,抗压强度为 50 MPa 。

微晶泡沫玻璃是掺入玻璃粉、发泡剂和助熔剂等原料经过粉碎后放入模具,再经预热、熔融、发泡等一系列工艺制成,发泡剂一般有 CaCO_3 、 Na_2CO_3 、SiC 粉体等。如 YIN H R 等^[55]用铁尾矿与废玻璃为原料、SiC 粉体充当发泡剂,在 $830\text{ }^\circ\text{C}$ 左右制得铁尾矿含量较高的泡沫玻璃,但抗折强度与体积密度达到最小值,此时抗折强度为 0.53 MPa 、体积密度为 0.024 g/cm^3 。

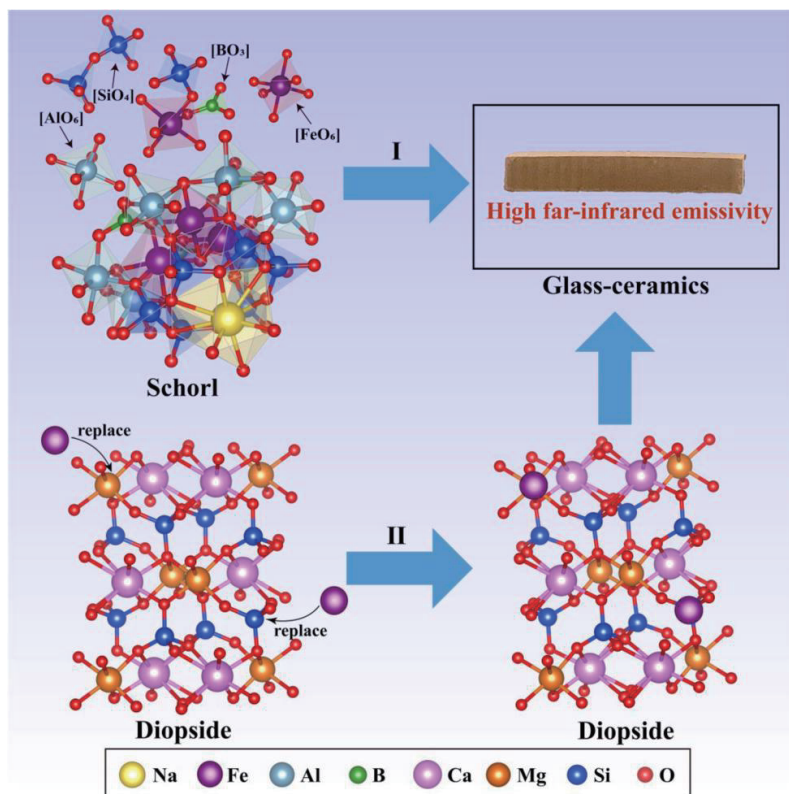


图 2 增强玻璃陶瓷远红外发射率示意图^[53]

Fig. 2 Schorl schematic diagram of enhanced far-infrared emissivity of glass ceramics^[53]

3.9 地质聚合物

以铁尾矿与高岭土和粉煤灰等为主要原料,添加碱性激发剂可制备地质聚合物。地质聚合物有特殊的无机三维网络结构,其力学性能、耐久性、耐酸性、热导率也较为优异,利用铁尾矿与矿渣两种废弃物制备地质聚合物的同时不仅解决了环境污染问题,也降低了物料所需成本。制备地质聚合物的方法有浇筑法、超声波辅助法、压制成型法,常见的碱激发剂有 Ca(OH)_2 、 NaOH 、 KOH 、 Na_2SiO_3 、 Na_2CO_3 等。王梦婵等^[56]以低硅铁尾矿为原料、高岭土为硅铝校正料、氢氧化钠为碱激发剂制备地质聚合物,28 d 强度达到

72.3 MPa ,其内部有大量的 N-A-S 与 C-S-H 凝胶相,能把多种矿物紧密胶结充填在颗粒空隙间,构成紧密的结构,增强其力学性能。

4 填筑材料

4.1 采空区填充

大规模开采地下矿山导致采空区越来越多,容易诱发地面沉陷产生危险,铁尾矿最便捷的利用是将铁尾矿胶结材料应用到采空区填充,不仅可以消纳掉大量的尾矿,还可消除安全隐患。

制备铁尾矿胶结材料的方法主要有水泥胶结法与微生物胶结法。水泥胶结法与制备建筑材料有些相似但是由于用途不同,成分与配比存在差异,微生物胶结法是在水泥胶结材料的基础上使用微生物来加强其胶结能力。刘益良等^[57]将水泥与铁尾矿砂固定配比,加入少量的纤维,充填试样的强度有所增加,充填矿浆的流动性较好。王剑云等^[58]发现球形芽孢杆菌掺入到水泥砂浆可提高砂浆的疏水性及流动性。V Poornima等^[59]发现加入芽孢杆菌可以增强砂浆的抗压强度,且砂浆有较好的耐久性。

4.2 路基填料

铁尾矿具有一定的硬度,其形状与力学性能与轧制碎石相似,有良好的抗腐蚀性、稳定性与耐久性,适当的掺入可延长道路的使用时间,是铁尾矿再利用的较好途径。但作为路基填料使用时,需要注意铁尾矿粒径与级配,粗粒径的铁尾矿可以提供更好的支撑力,而细颗粒需要更多的辅助材料来保持稳定,因此需要根据实际情况进行选择。一般为了提高铁尾矿作为路基填料的稳定性,通常会在铁尾矿中掺入适当的黏土、水泥和石灰等材料。如杨光磊等^[60]在铁尾矿中掺入黏土改善其强度,发现随着黏土掺量的增多,掺黏土铁尾矿含水量逐渐上升,当掺入量为15%时,可满足路基填料要求。

4.3 道路基层材料

铁尾矿主要成分为石英、方解石、赤铁矿等,与砂石骨料成分相似,且铁尾矿因具有粒径较小、稳定性较强、硬度高、耐久性等特点在道路基层方面具有可行性。不过铁尾矿黏粒太少,为了提高矿物混合料的胶结能力,改善亲水性,一般通过掺入无机结合材料的方式来解决,如石灰、水泥和黏土。韦奔^[61]以铁尾矿为原料,发现铁尾矿代替普通石料的沥青路面各项指标都能达到国家标准要求,并且承载能力更强。张智豪等^[62]把铁尾矿用作底基层材料进行抗压强度与耐久性实验,当水泥掺量为5%时,其力学性能与耐久性得到改善,满足道路基层材料的要求。

基层材料按照力学性能可分为柔性基层、半刚性基层、刚性基层三类。柔性基层的特性为不易产生温缩与开裂,能降低沥青路面的开裂,但是无法承受大的荷载,对面层要求高,如级配碎石。刘圣洁等^[63]发现,铁尾矿粒径为4.75~13.20 mm掺入沥青混合料时路用性能改善最好,抗滑抗裂能力都优于玄武岩沥青混合料。赵连平等^[64]研究不同掺量的铁尾矿加入沥青混合料中,当掺入量为30%时效果最优,沥青的物理性能得到增强。随着铁尾矿掺入量的增加,沥青混合料锥入度、软化点、延度呈现先上升后下降的趋势。半刚性基层的特性为承载能力强、刚度大、水稳定性

好,为路面的主要承重者,当前高速公路很多都是采用半刚性基层类型,如水泥稳定土。一般采用石灰、黏土、水泥作为无机结合剂,石灰、黏土可提高混合料的力学性能,水泥的水化物可与矿粒胶结形成更加稳定的网状骨架结构。张智豪等对比掺入石灰、钢渣、水泥在铁尾矿中,得到水泥改良后的铁尾矿性能最佳,当水泥掺量为5%时,力学性能与耐久性都得到提升。JIANG P等^[65]将铁尾矿先经石灰、粉煤灰固化,再通过纤维材料改性得到一种性能良好的道路基层材料,随着纤维材料的掺量增加,抗压抗拉强度先上升后下降,掺入量为0.5%时性能最佳。刚性基层的特点为承载能力强、刚度大、强度高、耐久性优越等特点,如混凝土等。

5 制备肥料以及土壤改良剂

5.1 肥料

铁尾矿组成成分复杂,其内含有植物生长所需的Fe、Zn、Cu、Ca、P、K等十几种微量元素,可制备磷肥、硅肥、缓释肥等肥料,用来改良土壤性能,提高土地肥力。

磷肥能促进作物产量、促进对于水分及养分的吸收。刘代俊等^[66]利用磷铁尾矿、硫酸、尿素制备含有缓释作用的氮磷钾硫多元粒状复合肥,对水稻、花生等作物进行大田实验都取得了较好的增产效果,因含有部分缓释成分,肥料利用率得到提高,且制备过程中直接从磷铁尾矿中获取复合肥料,不需要制取磷酸。

硅肥能够提高作物叶绿素含量,促进有机物积累,铁尾矿中含有大量的硅,但是其活性较低,因此在制备硅肥前需要对铁尾矿进行处理,提高硅活性,目前方法主要有三种:水热法、高温焙烧法和磁化处理。水热法为在高温高压条件下将硅酸盐矿物与水混合反应,加入一些催化剂促进化学反应的进行,并提高硅的活性。赵淑芳等^[67]在NaOH与铁尾矿质量比为1.2:1、温度为180℃的条件下制得硅肥样品中硅含量最高。高温焙烧法是在高温下对铁尾矿进行焙烧以激发硅活性。磁化处理是将铁尾矿磨成粉状后进行磁化处理以激发硅活性。如丁文金等^[68]以粉煤灰、钢渣粉、铁尾矿制备磁化复混肥,在磁场强为8000 mT下磁化10 s时制得样品最佳。

缓释肥料可将包裹的肥料缓慢释放,避免肥料流失与出现烧苗现象,能使肥料有效时间更长,用量更少。如李丁等人^[69]以铁尾矿、钢渣、粉煤灰为原料制备缓释磁化复混肥,发现其能提高作物对氮磷钾的吸收,施用后小麦的产量、小麦有效穗、穗粒结构均高于普通肥料,且所需成本更低。

5.2 土壤改良剂

土壤改良剂可以改善土壤的物理性质,促进作物

对养分的吸收,利用铁尾矿可制备碱类与酸类土壤改良剂,其对土壤的 pH 值起到改善作用,且改良后对土壤无副作用、无污染,具有较好的发展前景。如张丛香等^[70]利用铁尾矿为主要原料制备的复合改良剂对苏打盐碱地起到了疏松土壤、加强透水能力等作用,明显改变了中重盐碱地的 pH 值,使作物能更好地生长。孙希乐等^[71]以铁尾矿、云母、白云石为原料,在 1 100 °C 的条件下制得碱类土壤改良剂,对酸性土壤的改良具有很好效果。JIN W J 等^[72]利用铁尾矿建设农田,通过大量的实验验证了其可行性,发现种植的玉米产量高于正常农田,提高了土壤的质量与作物产量。

6 制备化工产品

6.1 分子筛

以铁尾矿制备介孔材料,可提供铁源与硅源,以酸浸后的酸浸液为铁源,碱浸后的硅酸钠溶液为硅源,再加入模板剂与水混合后即可制备出介孔分子筛。主要制备方法有水热合成法、微波合成法和室温合成法等。如许小东^[73]以铁尾矿为原料采用水热合成法,当 HCl 酸浓度为 2 mol/L、水热晶化 72 h 时,得到的 SBA-15 介孔分子筛比表面积为 685 m²/g、孔径为 11.5 nm,对亚甲基蓝溶液有较好的吸附能力。林志祥^[74]以铁尾矿为原料,在酸浓度为 2 mol/L、水热晶化 72 h 时,制得的 SBA-16 介孔分子筛比表面积为 897 m²/g、孔径为 15.9 nm,对亚甲基蓝溶液表现出很好的吸附效果。目前在介孔分子筛上的研究相对而言不是很多,因为工艺流程较为繁琐,且制备时间较长,未来介孔材料将是研究热点。

6.2 催化剂

催化剂在化学反应中能提高化学反应的速率且不改变化学平衡,大多数工业生产中都会使用。铁尾矿常制备的催化剂有光催化剂、Fenton 催化剂、还原

催化剂等。

光催化剂为一种环境净化功能材料,介孔分子筛就是一种光催化材料,制备方法前文已提到,如 LUC 等^[75]以铁尾矿为原料采用一步水热法制备了含铁介孔二氧化硅材料(如图 3 所示),得到的材料不仅在较宽的 pH 范围内表现出优异的光催化降解效率与稳定性,且相比于常规方法成本可降低 129.8 美元/kg。

Fenton 反应是一种利用 H₂O₂ 与铁离子催化氧化有机物的方法,可以将有机废水的有害物质转化成无害物质,Fenton 催化剂的优点为反应速率快、效果优异且操作简单。如 GAO L H 等^[76]使用铁尾矿掺杂麦秸质量比为 3 : 1、900 °C、60 min 制得催化速率较快的 Fenton 催化剂,具有较大的比表面积、更小的孔径与更高的活性,在废水处理中可以起到很好的效果。

还原催化剂是一种在化学反应中起到催化作用的物质,让反应更快地进行,将铁尾矿研磨成粉可作为一些还原反应中的催化剂。如韩云龙等人^[77]以铁尾矿为原料制备无载体催化剂,在反应温度为 500~600 °C 下具有较好的催化活性,且粒径越小催化还原率越高。

6.3 吸附材料

铁尾矿中存在的 Fe³⁺对磷酸盐有着较好的亲和力,可以通过化学吸附去除水中的磷与一些其他污染物^[78],且铁尾矿中的氧化铁等成分也能吸附水中的一些重金属元素。

6.3.1 多孔陶粒

前面介绍到的一些材料例如多孔陶粒等不仅可以用于建筑材料,在吸附污染物、改善水质方面也有着较大的应用价值,只不过应用领域有所差异,制备工艺会存在一些差别。唐伟博^[79]在多孔陶粒中加入硝酸钕改性剂制成的改性多孔陶粒在处理污水中表现出优异的效果,对地下水中的氟离子吸附达到国家

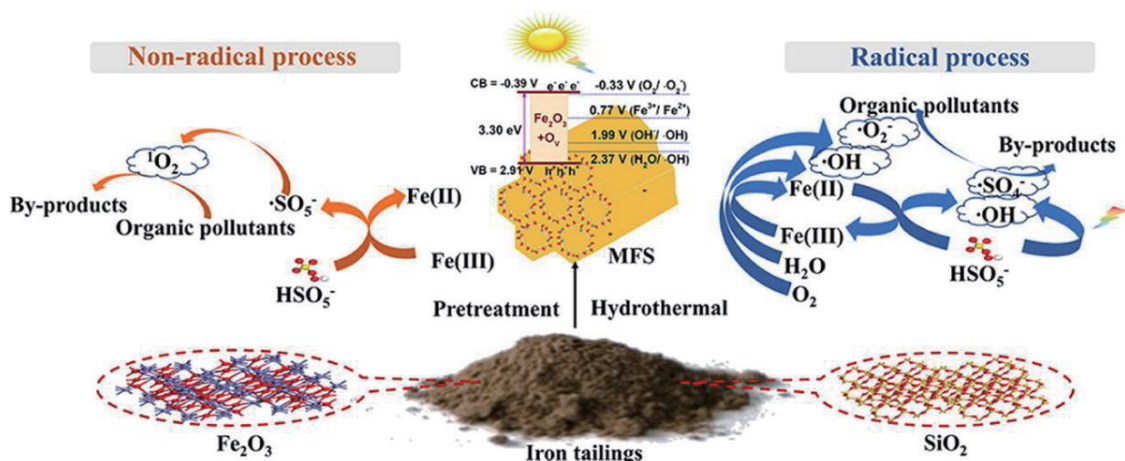


图 3 制备含铁介孔二氧化硅材料工艺流程^[75]

Fig. 3 Flowsheet of preparing iron-containing mesoporous silica materials^[75]

饮用水的标准,处理成本低、吸附效果稳定,在用稀土负载后陶粒可重复利用。

6.3.2 复合吸附材料

利用铁尾矿与其他吸附材料混合可以制备出性能更优的复合吸附材料。如任康辉^[80]以铁尾矿为原料,生物炭为载体,采用共热解的方法,制备了一种无污染、成本低的磁性铁尾矿-生物炭复合材料,对污染水中的六价铬表现出很好的吸附能力。

6.4 白炭黑

铁尾矿中铁与硅的提取一般采用酸浸法与碱浸法,首先加入盐酸得到 FeCl_3 溶液与酸浸渣,在向酸浸渣中加入 NaOH 得到硅源硅酸钠。如苏琳^[81]采用酸碱联合法提取铁与硅,采用化学沉淀法制得白炭黑,其化学结构为无定形的水和二氧化硅,粒径为150 nm。张鹏等人^[82]采用煅烧酸浸法制得白炭黑,在最佳条件下,硅的浸出率达到86.43%。

6.5 调质剂

以铁尾矿为调质剂可改变高炉渣的成纤性能,如洪陆阔等^[83]发现随着铁尾矿的掺入,调质渣从短渣特性转变成长渣特性,调质渣的黏度提高;在高炉渣制备矿渣纤维中加入铁尾矿,不仅能提高高炉渣的成纤性能,还能提高产率。

6.6 制备3D打印材料

3D打印是一种逐层打印物料的快速成型技术,速度快,操作简单,而铁尾矿中的铁等金属含量较多,在3D打印材料中掺入适量铁尾矿不仅能提高物料的强度,还能降低原料所需成本。如李新健^[84]以铁尾矿与铜尾矿为原料制得铜/铁胶凝材料,其抗压抗折强度良好,并且打印了房屋、背景墙,验证了其在建筑3D打印中的应用可行性。

7 结论

随着近年来研究的不断深入,铁尾矿资源的再利用有了重大突破,制备材料的技术与方法也在不断完善,但是仍然存在着一些问题需要解决,不同地区的尾矿成分差异较大,需要具体问题具体分析,保证铁尾矿二次资源利用最大化。

(1)推动铁尾矿资源制备高性能材料也是发展趋势之一,目前我国在铁尾矿综合利用方面进行了大量的研究与实验工作,铁尾矿制备水泥、混凝土、砖瓦等建筑材料取得了较大的进展,能极大地降低原料所需成本,但是铁尾矿资源利用向高附加值方向发展仍存在较多技术瓶颈,一方面是机理研究不够明确,另一方面是难以脱离实验室的环境,今后应进行更深入

的理论研究,同时结合实际对生产技术的不足之处进一步完善。

(2)由于尾矿的特点为有用成分较低,很多企业将其视为废弃物,在思想行动上比较被动,因此政府应该制定一些激励政策,让企业积极主动对尾矿进行二次利用,制定合理的整体规划。

(3)相对于国外,我国对尾矿的二次利用起步较晚,技术需要进一步优化。今后应以现有研究为基础,加大科研力度,更大范围地发掘铁尾矿综合利用的领域,积极鼓励技术创新,推动对尾矿资源的再利用。

参考文献:

- [1] 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 H. Research progress and prospect of comprehensive utilization of tailings resources in China[J]. Resource Information and Engineering, 2022, 37(3): 102-104.
- [2] 邓文,江登榜,杨波,等.我国铁尾矿综合利用现状和存在的问题[J].现代矿业,2012,27(9):1-3.
DENG W, JIANG D B, YANG B, et al. The current situation and existing problems of comprehensive utilization of iron tailings in China[J]. Modern Mining, 2012, 27(9): 1-3.
- [3] 张淑会,薛向欣,金在峰.我国铁尾矿的资源现状及其综合利用[J].材料与冶金学报,2004(4):241-245.
ZHANG S H, XUE X X, JIN Z F. Resource status and comprehensive utilization of iron tailings in China[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2004(4): 241-245.
- [4] 郭丽东,朱磊.某磁铁矿选矿工艺试验研究[J].包钢科技,2018,44(3):27-30.
GUO L D, ZHU L. Experimental study on beneficiation process of a magnetite[J]. Baotou Steel Science and Technology, 2018, 44(3): 27-30.
- [5] CHAO L, SUN H, BAI J, et al. Innovative methodology for comprehensive utilization of iron ore tailings Part 1. The recovery of iron from iron ore tailings using magnetic separation after magnetizing roasting[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 174(1-3).
- [6] 戴惠新,赵泓铭,戴菲,等.云南某铁尾矿铁综合回收[J].矿冶,2018,27(5):14-17+29.
DAI H X, ZHAO H M, DAI F, et al. Comprehensive recovery of iron tailings from Yunnan[J]. Mining and Metallurgy, 2018, 27(5): 14-17+29.
- [7] 李素.复配捕收剂对某铁尾矿浮选回收钛铁矿的研究[D].武汉:武汉理工大学,2020.
LI S. Study on recovery of ilmenite by flotation of iron tailings with compound collector [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020.
- [8] 邹锋,殷志刚,陈思竹.攀枝花白马选铁尾矿综合回收利用研究[J].矿产综合利用,2020(6):19-25.
ZOU F, YIN Z G, CHEN S Z. Research on comprehensive recovery and utilization of iron tailings from Baima in Panzhihua[J]. Comprehensive Utilization of Mineral Resources, 2020(6): 19-25.
- [9] 郭艳华,杨俊龙,柏亚林,等.海水条件下秘鲁某选铁尾矿回收铜硫铁试验研究[J].有色金属(选矿部分),2022(4):74-79.
GUO Y H, YANG J L, BAI Y L, et al. Experimental study on recovery of copper and sulfur iron from an iron-sorting tailings in Peru under seawater conditions[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing

- Section), 2022(4): 74–79.
- [10] 刘志国, 郭素红. 从某细粒铁尾矿中回收钴资源的选矿试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2021(1): 83–87+100.
LIU Z G, GUO S H. Experimental study on recovery of cobalt from a fine-grained iron tailings[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2021(1): 83–87+100.
- [11] JIA Q M, LI F, WANG H. Experimental study on the recovery of the zinc from iron tailings in Hebei[J]. Advanced Materials Research, 2013, 2216: 641–642.
- [12] 张浩. 承德金盈矿业有限公司选铁尾矿选磷试验[J]. 现代矿业, 2021, 37(10): 133–134.
ZHANG H. Test of phosphorus separation from iron tailings of Chengde Jinying Mining Co., LTD[J]. Modern Mining, 2021, 37(10): 133–134.
- [13] 王丽明, 李宏静, 白春霞, 等. 白云鄂博某选厂选铁尾矿中稀土和萤石的综合回收试验研究[J]. 矿产保护与利用, 2002, 42(6): 52–59.
WANG L M, LI H J, BAI C X, et al. Experimental study on comprehensive recovery of rare earth and fluorite from iron tailings in Bayan Obo Processing plant[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2002, 42(6): 52–59.
- [14] 李俊旺, 田明君, 呼振峰, 等. 安徽铁尾矿浮选回收云母试验研究[J]. 中国矿业, 2023, 32(2): 143–149.
LI J W, TIAN M J, HU Z F, et al. Experimental study on flotation recovery of mica from iron tailings in Anhui[J]. China Mining, 2023, 32(2): 143–149.
- [15] 许晗, 徐彪, 陈煊年. 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 X. Experimental study on quartz recovery from Nanfen iron tailings[J]. Mining Engineering, 2017, 15(5): 21–24.
- [16] 刘春光, 王丽明, 李宏静. 从内蒙古某铁选厂尾矿回收萤石研究[J]. 矿产保护与利用, 2022, 42(6): 60–65.
LIU C G, WANG L M, LI H J. Study on recovery of fluorite from tailings of an iron concentrator in Inner Mongolia[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022, 42(6): 60–65.
- [17] 吴迪, 王洪岭, 孟庆波, 等. 内蒙古某多金属尾矿回收萤石实验研究[J]. 矿产综合利用, 2022(6): 155–158+166.
WU D, WANG H L, MENG Q B et al. Experimental study on recovery of fluorite from tailings of a polymetallic mine in Inner Mongolia[J]. Comprehensive Utilization of Mineral Resources, 2022(6): 155–158+166.
- [18] 张帆, 管俊芳, 李小帆, 等. 磷矿选矿工艺和药剂的研究现状[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2014(4): 25–28.
ZHANG F, GUAN J F, LI X F, et al. Research status of mineral processing technology and reagents for phosphate rock[J]. China Non-Metallic Mineral Industry Guide, 2014(4): 25–28.
- [19] 霍松洋, 宋瑞杰, 罗世勇, 等. 承德某铁尾矿回收磷、钛的试验研究[J]. 世界有色金属, 2017(1): 35–36.
HUO S Y, SONG R J, LUO S Y, et al. Experimental study on recovering phosphorus and titanium from an iron tailings in Chengde[J]. World Nonferrous Metals, 2017(1): 35–36.
- [20] LIU S X, WEI S. The preparation and micro mechanism of brick materials with iron tailings in Tanshan area[J]. Advanced Materials Research, 2013, 2526: 753–755.
- [21] 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(542): 208–213.
NAN X J, WANG S, LIU L W, et al. Study on hydration characteristics of pervious brick prepared from roasted iron tailings[J]. Metal Mine, 2021(542): 208–213.
- [22] 王梓. 铁尾矿陶粒及免烧砖的制备及性能[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2022.
WANG Z. Preparation and properties of iron tailings ceramsite and baking-free brick [D]. Maanshan: Anhui University of Technology, 2022.
- [23] 刘俊杰, 梁钰, 曾宇, 等. 利用铁尾矿制备免烧砖的研究[J]. 矿产综合利用, 2020(225): 136–141.
LIU J J, LIANG Y, ZENG Y et al. Study on preparation of fire-free brick from iron tailings[J]. Comprehensive Utilization of Mineral Resources, 2020(225): 136–141.
- [24] WU C, HONG Z, YIN Y, et al. Mechanical activated waste magnetite tailing as pozzolanic material substitute for cement in the preparation of cement products[J]. Construction and Building Materials, 2020, 252(C).
- [25] LIGNG H H, J J L, B S K, et al. Optimizing 1-hydroxyethylidene-1, 1-diphosphonic acid and mechanically-activated iron ore tailings to prepare low-cost and retarded magnesium oxysulfate cement[J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 17.
- [26] 易忠来, 孙恒虎, 李宇. 热活化对铁尾矿胶凝活性的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(12): 5–7+34.
YI Z L, SUN H H, LI Y. Effect of thermal activation on gelling activity of iron tailings[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(12): 5–7+34.
- [27] 杨鹏博. 铁尾矿活化工艺及其制备建筑用砖试验研究[D]. 唐山: 华北理工大学, 2020.
YANG P B. Experimental study on activation process of iron Tailings and its preparation of building bricks[D]. Tanshan: North China University of Science and Technology, 2020.
- [28] 易龙生, 吴倩, 米宏成, 等. 利用铁尾矿制备发泡水泥[J]. 非金属矿, 2021, 44(1): 1–4.
YI L S, WU Q, MI H C, et al. Preparation of foamed cement from iron tailings[J]. Non-metallic Ore, 2021, 44(1): 1–4.
- [29] 叶飞. 粉煤灰和铁尾矿砂对混凝土抗压强度及微观结构影响试验研究[J]. 福建建设科技, 2023(5): 56–58+69.
YE F. Experimental study on the influence of fly ash and iron tailings on compressive strength and microstructure of concrete[J]. Fujian Construction Science and Technology, 2023(5): 56–58+69.
- [30] 袁益欣, 朱倩, 陈记豪, 等. 铁尾矿砂再生混凝土的力学性能试验研究[J]. 河南科技, 2022, 41(4): 78–81.
YUAN Y X, ZHU Q, CHEN J H, et al. Experimental study on mechanical properties of recycled concrete with iron tailings[J]. Henan Science and Technology, 2022, 41(4): 78–81.
- [31] DUAN Y J, SUN J H, et al. Mix design and strength properties of full iron tailings concrete[J]. Journal of physics. Conference Series, 2020, 1637(1).
- [32] 齐晓然. 钒钛铁尾矿微粉作为掺合料制备预拌混凝土的研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2019.
LIN X R. Study on preparation of ready-mixed concrete from vanadium and titanium iron tailings fine powder as admixture [D]. HanDan: Hebei University of Technology, 2019.
- [33] 王绍熙. 铁尾矿复合胶凝材料的制备及性能研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2022. WANG S X. Study on preparation and properties of composite cementing material of iron tailings [D]. HanDan: Hebei University of Technology, 2022.
- [34] WANG C H, XU C X, LI W H, et al. Preparation and properties of novel multi-component refractory cementitious materials[J]. Construction and Building Materials, 2023, 393: 132033.

- [35] 姜楠. 化学激发对铁尾矿胶凝特性及环保的影响[J]. [陕西水利](#), 2019(9): 214-217.
JIANG N. Effect of chemical stimulation on the gelation characteristics and environmental protection of iron tailings[J]. [Shaanxi Water Conservancy](#), 2019(9): 214-217.
- [36] WANG Z, CHEN H J, Yu C H, et al. Utilizing iron tailing, sludge and fly ash to prepare ceramics[J]. *Current Materials Science*, 2020, 13.
- [37] YU C H, PEI L Z, MAO Y J, et al. Preparation and characterization of the ceramics with microscale pores from iron tailing and fly ash[J]. *Micro and Nanosystems*, 2021, 13(4).
- [38] 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.
- [39] 李育彪, 潘梦真, 蹇守卫, 等. 低硅铁尾矿制备轻质陶粒试验研究[J]. [矿产保护与利用](#), 2022, 42(6): 73-80.
LI Y B, PAN M Z, JIAN S W, et al. Experimental study on preparation of light ceramics from low-silicon iron tailings[J]. [Conservation and Utilization of Mineral Resources](#), 2022, 42(6): 73-80.
- [40] 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 damping and sound insulation properties of Iron ore tail sand filled particles [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2016.
- [41] 常宁. 钒钛磁铁尾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. Study on the preparation of sound insulation plate from vanadium and titanium magnet tailings composite cementing material [D]. Handan: Hebei University of Technology, 2020.
- [42] 石春华. 微纳铁尾矿砂吸隔声板的制备及其性能研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2020.
SHI C H. Study on the preparation and properties of micro-nano iron tail sand sound absorber plate [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2020.
- [43] 王鹏听. 微纳铁尾矿砂/SiO₂气凝胶保温隔热建筑新材料的制备及其参数影响规律[D]. 南昌航空大学, 南昌: 2020.
WANG P X. Preparation of a new thermal insulation building material with micro-nano iron tailings/SiO₂ aerogel and its parameter influence [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2020.
- [44] 陈永亮, 石磊, 杜金洋, 等. 铁尾矿轻质保温墙体材料的制备及性能研究[J]. *建筑材料报*, 2019, 22(5): 721-729.
CHEN Y L, SHI L, DU J Y, et al. Preparation and properties of lightweight insulation wall materials for iron tailings[J]. *Journal of Building Materials*, 2019, 22(5): 721-729.
- [45] 喻振贤, 李汇, 姜玉凤, 等. 铁尾矿制备阻燃型轻质保温墙体材料的研究[J]. *新型建筑料*, 2013, 40(4): 30-33+36.
YU Z X, LI H, JIANG Y F, et al. Research on preparation of flame-retardant lightweight insulation wall material from iron tailings[J]. *New Building Materials*, 2013, 40(4): 30-33+36.
- [46] 兰阳, 朱孝钦, 周新涛, 等. 尾矿回收的研究与应用[J]. [化工矿物与加工](#), 2017, 46(4): 76-81.
LAN Y, ZHU X Q, ZHOU X T, et al. Research and application of tailings recovery[J]. [Chemical Minerals and Processing](#), 2017, 46(4): 76-81.
- [47] 吴松泽, 周洋, 李润丰, 等. 铁尾矿及其反应烧结多孔陶瓷的制备与性能研究[J/OL]. *无机材料学报*: 1-10[2023-06-07].
WU S Z, ZHOU Y, LI R F, et al. Study on preparation and properties of porous ceramics from iron tailings and their reaction sintering [J/OL]. *Journal of Inorganic Materials*: 1-10[2023-06-07].
- [48] WANG H, SHANG J, YANG X. Study on preparation technology and properties of tiutai porous ceramics[J]. *Ceramic Sciences and Engineering*, 2018, 1(1).
- [49] 黎邦城, 石棋, 胡海明, 等. 程潮铁尾矿制备泡沫陶瓷的研究[J]. [中国陶瓷](#), 2014, 50(9): 82-86.
LI B C, SHI Q, HU H M, et al. Research on preparation of foam ceramics from Chengchao iron tailings[J]. [China Ceramics](#), 2014, 50(9): 82-86.
- [50] MENG J P, PENG J, SRINIVASAKANNAN C, et al. Preparation and properties of endothermic functional ceramics with iron tailings as raw materials[J]. [Materials Research Express](#), 2020, 7(5): 055501.
- [51] WANG C L, Z Z R, Y C Z, et al. Effects of heat treatment system on mechanical strength and crystallinity of CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ glass-ceramics containing coal gangue and iron ore tailings[J]. *Journal of New Materials for Electrochemical Systems*, 2019, 22(2): 70-78.
- [52] LU X W, ZENG Z, LIU Y, et al. Crystallization characteristics and properties of glass ceramics derived from iron tailing[J]. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2022, 8(3): 1117-112.
- [53] MENG J P, LIU F, Srinivasakannan Chandrasekar, et al. Synthesis of schorl doped iron ore tailings glass-ceramics with superior performance[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2023, 600: 122034.
- [54] 李彬, 郁世刚, 隋智通, 等. 铁尾矿黑色玻璃材料的研制[J]. [硅酸盐通报](#), 1998(1): 57-59.
LI B, YU S G, SUI Z T, et al. Preparation of black glass materials from iron tailings[J]. [Bulletin of Silicate](#), 1998(1): 57-59.
- [55] YIN H R, MA M, BAI J, et al. Fabrication of foam glass from iron tailings[J]. *Materials Letters*, 2016, 185511-513.
- [56] 王梦婵, 张惠灵, 陈永亮, 等. 利用低硅铁尾矿制备地质聚合物的研究[J]. [中国矿业](#), 2019, 28(8): 170-176.
WANG M C, ZHANG H L, CHEN Y L, et al. Preparation of geopolymers from low-silicon iron tailings[J]. [China Mining](#), 2019, 28(8): 170-176.
- [57] 刘益良, 李祥涛, 黄兴鹏, 等. 纤维增强铁尾矿砂水泥基充填材料实验研究[J]. [北华航天工业学院学报](#), 2023, 33(2): 10-12.
LIU Y L, LI X T, HUANG X P, et al. Experimental study on fiber-reinforced iron tail sand cement-based filling materials[J]. [Journal of Beichina Institute of Astronautics and Astronautics](#), 2023, 33(2): 10-12.
- [58] 王剑云, 柯懿耘, 温建峰, 等. 微生物菌体对砂浆疏水性能的提升及机理分析[J]. [硅酸盐学报](#), 2023, 51(5): 1165-1173.
WANG J Y, KE Y Y, WEN G F, et al. Improvement and mechanism analysis of hydrophobic properties of mortar by microbe[J]. [Journal of Silicate Science](#), 2023, 51(5): 1165-1173.
- [59] V POORNIMA, R VENKATASUBRAMANI, V SREEVIDYA, et al. Effect of microbial solution on compressive strength, water absorption and sorptivity of cement mortar incorporated with metakaolin[J]. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2020, 872(1): 012173.
- [60] 杨光磊, 刘凯. 掺黏土铁尾矿砂路基填筑路用性能研究[J]. [山西建筑](#), 2022, 48(15): 13.115-118.
YANG G L, LIU K. Mixed clay ore iron tail road subgrade filling study[J]. [Journal of Shanxi Architecture](#), 2022, 48(15): 13.115-118.
- [61] 韦奔. 唐山市农村公路路面典型结构研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.
WEI B. Study on typical structure of rural road pavement in Tangshan city [D]. Xian: Chang'an University, 2008.
- [62] 张智豪, 李波, 李鹏, 等. 改良铁尾矿用于道路基层材料的研究[J]. [中外公路](#), 2018, 38(3): 274-278.

- ZHANG Z H, LI B, LI P, et al. Research on improving iron tailings for road base materials[J]. *Zhongba Road*, 2018, 38(3): 274–278.
- [63] 刘圣洁, 唐亮, 赵硕, 等. 铁尾矿沥青混合料的路用性能[J]. 山东交通学院学报, 2023, 31(3): 81–86.
- LIU S J, TANG L, ZHAO S, et al. Road performance of iron tailings asphalt mixture[J]. *Journal of Shandong Jiaotong University*, 2023, 31(3): 81–86.
- [64] 赵连平, 郝绍菊, 马竞. 铁尾矿沥青混合料基本性能及老化耐久性研究[J]. *矿产综合利用*, 2022(4): 111–118.
- ZHAO L P, HAO S J, MA J. Study on basic properties and aging durability of asphalt mixture of iron tailings[J]. *Comprehensive Utilization of Mineral Resources*, 2022(4): 111–118.
- [65] JIANG P, CHEN L J, LI N, et al. Study on the mechanical properties of fiber-modified iron tailings stabilized by lime and fly ash based on energy analysis[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, 17.
- [66] 刘代俊, 邱礼有, 蒋绍志, 等. 磷矿资源加工研究进展: 5. 利用磷铁尾矿直接生产复合肥的MUSP新工艺[J]. *磷肥与复肥*, 2009, 24(4): 18–19.
- LIU D J, QIU L Y, JIANG S Z et al. Research progress of phosphate mineral resources processing: 5. New MUSP process for direct production of compound fertilizer from phosphorus iron tailings[J]. *Phosphate and Compound Fertilizer*, 2009, 24(4): 18–19.
- [67] 赵淑芳, 王浩明, 高玉倩, 等. 开发含高硅铁尾矿硅肥试验研究初探[J]. *矿产综合利用*, 2018(5): 126–130.
- ZHAO S F, WANG H M, GAO Y Q, et al. Preliminary study on the development of silicon fertilizer in tailings containing high silicon iron[J]. *Comprehensive Utilization of Mineral Resources*, 2018(5): 126–130.
- [68] 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 of magnetized compound fertilizer[J]. *Phosphate and Compound Fertilizer*, 2014, 29(2): 13–15.
- [69] 李丁. 缓释磁化复混肥料研制及肥效研究与应用[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2014.
- LI D. Development and fertilizer efficiency research and application of slow release magnetized compound fertilizer [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2014.
- [70] 张丛香, 刘润华, 刘双安, 等. 利用铁尾矿改良苏打盐碱地技术研究与应用[J]. *矿业工程*, 2016, 14(1): 39–41.
- ZHANG C X, LIU R H, LIU S G, et al. Research and application of improving soda saline-alkali land with iron tailings[J]. *Mining Engineering*, 2016, 14(1): 39–41.
- [71] 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 preparation of soil conditioner from iron tailings and by-products mica powder and dolomite[J]. *Metal Mine*, 2018(6): 192–196.
- [72] JIN W J, WEI Z, LIU X, et al. Effects of constructing farmland with large amounts of iron tailings as soil reconstruction materials on soil properties and crop growth[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 20205–20205.
- [73] 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(北京), 2019.
- XU X D. Synthesis of Fe-SBA-15 mesoporous materials from iron tailings and their properties [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019.
- [74] 林志祥. 铁尾矿中有价元素的提取及合成改性SBA-16介孔分子筛[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.
- LIN Z X. Extraction of valuable elements from iron tailings and synthesis of modified SBA-16 mesoporous molecular sieve [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017.
- [75] LU C, ZHANG S L, WANG J, et al. Efficient activation of peroxymonosulfate by iron-containing mesoporous silica catalysts derived from iron tailings for degradation of organic pollutants[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 446(P1).
- [76] GAO L, WANG L H, LI S, et al. Highly active fenton-like catalyst derived from solid waste-iron ore tailings using wheat straw pyrolysis[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2022, 29(21): 31577–31577.
- [77] 韩云龙, 李迎根, 郑昭, 等. 铁矿石尾矿粉催化还原 NO 的实验研究[J]. *过程工程学报*, 2018, 18(2): 350–355.
- HAN Y L, LI Y G, ZHENG Z, et al. Experimental study on catalytic reduction of NO by iron ore tailings powder[J]. *Chinese Journal of Process Engineering*, 2018, 18(2): 350–355.
- [78] 任明昊, 谢贤, 李博琦, 等. 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 M H, XIE X, LI B Q, et al. Iron tailings comprehensive utilization research progress [J]. *Journal of Minerals, the Protection and Use, and* 2022 (3): 155–168. DOI: 10.13779/j.carol carroll nki issn1001–0076.2022.03.022.
- [79] 唐伟博. 改性多孔陶粒在水处理中的应用研究[D]. 景德镇: 景德镇陶瓷大学, 2020.
- TANG W B. Application of modified porous ceramics in water treatment [D]. Jingdezhen: Jingdezhen Ceramic University, 2020.
- [80] 任康辉. 铁尾矿—生物炭复合材料的制备及Cr(VI)吸附性能研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2023.
- REN K H. Study on the preparation and Cr (VI) adsorption properties of iron tailings and biochar composites [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2023.
- [81] 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. Preparation of micro/nano-structured white carbon black and iron oxide from iron tailings[J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2016, 35(2): 90–95.
- [82] 张鹏, 陈星月, 任志峰, 等. 铁尾矿煅烧酸浸法制备白炭黑及动力学研究[J]. *钢铁钒钛*, 2022, 43(2): 87–93.
- ZHANG P, CHEN X Y, REN Z F, et al. Study on preparation of white carbon black by calcination and acid leaching of iron tailings and its kinetics [J]. *Iron and Steel, Vanadium and Titanium*, 2022, 43(2): 87–93.
- [83] 洪陆阔, 孙彩娇, 武兵强, 等. 以铁尾矿为调质剂改善高炉渣成纤性研究[J]. *金属矿山*, 2017(8): 209–212.
- HONG L K, SUN C J, WU B Q, et al. Study on improving fiber formation of blast-furnace slag with iron tailings as tempering agent[J]. *Metal Mine*, 2017(8): 209–212.
- [84] 李新健. 铜/铁尾矿制备3D打印建筑材料及性能研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- LI X J. Research on 3D printing construction materials and properties of copper/iron tailings [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.

Research Progress of Comprehensive Utilization of Iron Tailings

YIN Chen, BAI Limei, LI Shaoying, ZHAO Liucheng, MA Yuxin, SHAN Haoxuan

North China University of Technology, Tangshan 063000, China

Abstract: At present, the storage capacity of iron tailings in China has reached over one billion tons. Not only the potential safety hazards of tailing dam and environments pollution will be produced, but also a large number of valuable components will be wasted. It does not meet the requirements of the country to build a resource-saving and environment-friendly society. Therefore, how to realize comprehensive utilization of secondary resources has become a research hotspot at present. In this paper, the classification of iron tailings is introduced first. Then, the research status of valuable elements recovery from iron tailings, the preparation of construction and filling materials, decorative materials, the preparation of fertilizers, soil amendments, chemical products are systematically summarized. Finally, the future development prospects of iron tailings utilization are discussed and the relevant suggestions are puts forward.

Keywords: iron tailings; secondary utilization; valuable element; building material; fertilizer catalyst; chemical product

引用格式: 尹琛, 白丽梅, 李绍英, 赵留成, 马玉新, 单浩轩. 铁尾矿综合利用研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(6): 41–53.

YIN Chen, BAI Limei, LI Shaoying, ZHAO Liucheng, MA Yuxin, SHAN Haoxuan. Research progress of comprehensive utilization of iron tailings[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(6): 41–53.

投稿网址: <http://kcbhyly.xml-journal.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn