

# 铁尾矿制备新型材料研究进展

傅平丰<sup>1,2</sup>, 邓威<sup>1</sup>, 俞泽恩<sup>1</sup>, 张思奇<sup>1,2</sup>, 倪文<sup>1,2</sup>

1. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083;
2. 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083

中图分类号: TD926.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2024)06-0033-11  
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2024.06.004

**摘要** 随着我国绿色发展的实施推进, 铁尾矿的资源化利用显得愈加重要。目前铁尾矿多用作建筑用砂、矿物掺合料等低附加值建筑材料, 其利用潜力尚未充分开发, 制备高附加值新型材料是今后铁尾矿利用研究的重点。综述了铁尾矿制备高附加值新型材料的研究进展, 包括制备微晶玻璃、泡沫陶瓷、复相陶瓷、陶瓷玻化砖、保温隔热材料和电磁吸波建筑材料等新型建筑材料, 絮凝剂、无机复合颜料、白炭黑等铁质化工产品, 以及硅质介孔材料、高品质石英砂和农田土壤改良剂等。通过分析铁尾矿的矿物组成和物理化学性质, 讨论了铁尾矿制备高附加值新型材料所面临的问题。为推动铁尾矿的资源化利用, 建议根据铁尾矿的类型探索其合适的利用途径, 并将大宗利用与高值化利用结合, 在提高铁尾矿综合利用率的同时, 不断提高产品的附加值, 实现铁尾矿资源化的经济和环境等多重效益。

**关键词** 铁尾矿; 资源化; 新型材料; 高值化利用

随着我国矿业与钢铁行业的迅猛发展, 铁矿石的开采量逐年增加, 铁尾矿排放量显著提升<sup>[1]</sup>。铁尾矿是铁矿石经过选矿后排出的固体废弃物, 主要由 Si、Al、Fe、Ca、Mg、O 等元素组成, 其矿物组成多为石英、方解石及角闪石等硅酸盐类矿物<sup>[2-3]</sup>。我国铁矿资源贫矿多, 多种有价成分共生, 因此尾矿产量巨大, 尾矿中伴生较多有价成分。据统计, 每生产 1 t 铁精矿将产生约 3 t 铁尾矿<sup>[4]</sup>。2020 年, 我国铁尾矿排放量约 8.39 亿 t, 而综合利用量仅 3.12 亿 t, 利用率不足 40%<sup>[5-6]</sup>。铁尾矿大量堆存于尾矿库中, 不仅占用土地资源、增加尾矿库运行管理成本, 还带来尾矿库溃坝、土壤污染及沙尘暴等严重的环境风险, 威胁周边生态与居民安全<sup>[7-8]</sup>。近年来, 随着绿色发展的实施推进, 推动大宗工业固废综合利用已成为资源循环与经济可持续发展的重要手段<sup>[9]</sup>。作为典型的工业固废资源, 铁尾矿的合理开发利用对环境保护和资源循环利用具有深远意义。

当前, 铁尾矿利用主要集中在传统建材领域, 其常用于建筑用砂、混凝土骨料、矿物掺合料、免烧砖、水泥熟料、加气混凝土和干混砂浆等产品<sup>[9-11]</sup>。铁尾矿的传统建材化利用能较好地缓解铁尾矿的堆存压力,

但产品附加值较低, 未能充分挖掘铁尾矿的资源潜力<sup>[12-13]</sup>。因此, 拓展铁尾矿在高性能与高附加值新型材料中的应用, 成为了当前研究的热点。本文基于铁尾矿的特性, 系统归纳总结了其在制备高附加值新型材料方面的研究进展, 包括制备微晶玻璃类新型建材、硅质介孔材料、铁质化工产品、高品质石英砂和农田土壤改良剂等。铁尾矿制备高附加值产品材料的深入研究将有助于推动尾矿利用产业的绿色转型与经济效益的提升。

## 1 制备新型建材

### 1.1 微晶玻璃

微晶玻璃是指在玻璃基体上具有微米级晶体的多晶固相材料。微晶玻璃具有低介电损耗、优良的电绝缘性、较高的机械强度及优异的耐化学腐蚀性能, 广泛应用于生产、生活及国防军工等领域<sup>[14]</sup>。铁尾矿富含 Ca、Mg、Al、Si 等氧化物, 与微晶玻璃的制备原料成分基本相似, 配加其他组分原料可用于制备微晶玻璃。铁尾矿制备微晶玻璃的工艺主要包括两个步骤(见图 1): 首先, 将铁尾矿与其他辅助原料混合后在

收稿日期: 2024-10-31

基金项目: 河北省重点研发计划项目(22373809D)

作者简介: 傅平丰(1976—), 浙江诸暨人, 教授, 博士生导师, 主要从事大宗工业固废资源化利用和矿业环境工程等研究工作, E-mail: pffu@ces.ustb.edu.cn。

高温下熔融,随即水淬制取基础玻璃;其次,将基础玻璃干燥、球磨后与成核剂等添加剂混合,并经高温烧结成型得到微晶玻璃。由于铁尾矿矿物成分复杂且各地区尾矿差异较大,制得的微晶玻璃品种多样。铁尾矿含有较多杂质,铁氧化物含量较高,深入探究杂质元素与铁氧化物对微晶玻璃性能的影响是未来研究的重要方向<sup>[15]</sup>。

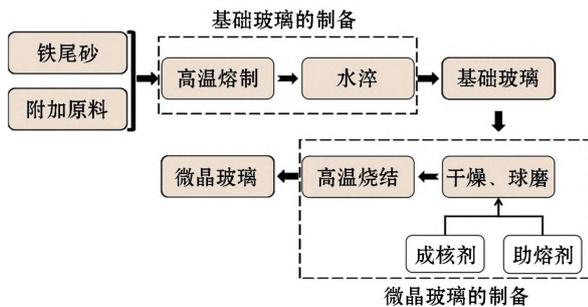


图 1 铁尾矿制备微晶玻璃的工艺流程<sup>[9]</sup>  
Fig. 1 Process flow for the preparation of glass ceramics from iron ore tailings<sup>[9]</sup>

以铁尾矿为原料制备的微晶玻璃,其性能指标可达到甚至优于传统原料制备的微晶玻璃。研究表明,采用传统原料及工艺制备的微晶玻璃,其材料性能因原料成分、晶核剂种类及含量以及热处理工艺的不同而有所差异,总体而言具有以下特点:冲击韧性为 0.5~3.0 kJ/m<sup>2</sup>,抗折强度为 150~200 MPa,硬度为 7~9 GPa,耐酸碱度通常高于 99%<sup>[14-16]</sup>。邓磊波<sup>[17]</sup>系统研究了利用铁尾矿制备微晶玻璃的可行性,其研究表明铁尾矿在优化条件下制备的 FeSi<sub>2</sub>-微晶玻璃性能优异,其冲击韧性达 3.68 kJ/m<sup>2</sup>,显微硬度为 8.37 GPa,密度为 3.04 g/cm<sup>3</sup>,抗弯强度达 210.27 MPa,耐酸度为 97.91%,耐碱度为 98.85%。与传统微晶玻璃相比,其综合性能显著提升,展现出广阔的工业应用前景。韩

茜等人<sup>[18]</sup>以商洛市某铁尾矿为主要原料烧结制备微晶玻璃,1150℃烧结温度下产品的密度为 2.84 g/cm<sup>3</sup>,抗压强度达 132.25 MPa,耐酸碱质量损失率分别为 0.016% 和 0.121%。南宁等人<sup>[19]</sup>以商洛某铁尾矿为主要原料,制得的以透辉石为主晶相的微晶玻璃抗压强度为 164.75 MPa,密度为 2.82 g/cm<sup>3</sup>,耐酸质量损失率为 0.11%,耐碱质量损失率为 0.13%。MENG 等<sup>[20]</sup>使用铁尾矿和电气石制备微晶玻璃,在电气石掺量为 10%、晶化温度 800℃、保温时间 2 h 的条件下,制得的微晶玻璃物理性能最佳,抗弯折强度达 107.03 MPa,密度为 2.66 g/cm<sup>3</sup>。研究发现,电气石能够有效降低结晶活化能,促进铁尾矿的结晶,提高微晶玻璃的抗弯折强度和密度,其相变过程如图 2 所示。

研究表明,不同类型的铁尾矿掺加相应的辅助材料能调配其化学组成,均可制备出 CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> 系或 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> 系微晶玻璃,具有较好的力学性能和耐酸碱性能。但是,铁尾矿的化学组成和矿物组成对制备出的微晶玻璃性能和颜色影响较大,因此,需要梳理清楚铁尾矿组成与微晶玻璃性能之间的内在联系,通过磁选、化学浸出等预处理技术去除铁尾矿中有害组分,或以多固废协同调配出理想的微晶玻璃原料组成,以便工业生产微晶玻璃过程中更好控制产品质量。

### 1.2 泡沫陶瓷

陶瓷材料是一类无机非金属材料,主要成分为 SiO<sub>2</sub> 和少量 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,其成分与高硅铁尾矿相似<sup>[21]</sup>。泡沫陶瓷是使用发泡剂制成的具有多孔结构的陶瓷材料,其中发泡剂是指能够在特定条件下释放气体,从而产生气泡的化学物质。泡沫陶瓷具有轻质、防火、耐高温等特性,广泛应用于保温隔热领域,其孔径范围从纳米级到微米级不等,气孔率在 20%~95% 之间,使用

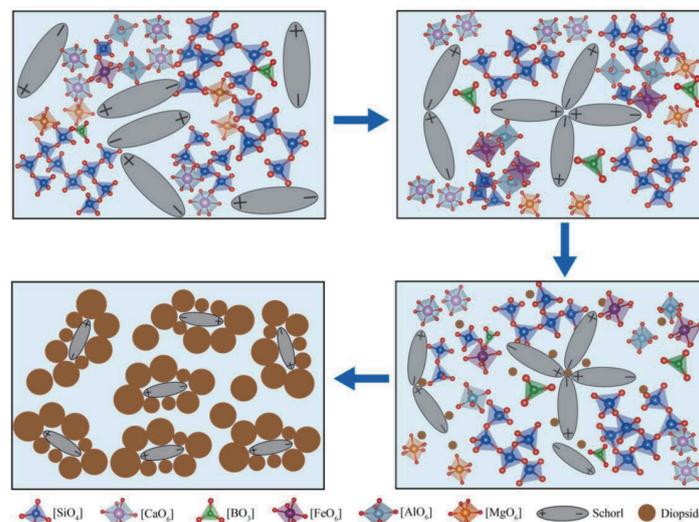


图 2 以铁尾矿和电气石制备微晶玻璃过程中的相变示意图<sup>[20]</sup>  
Fig. 2 Phase transition in sintering glass-ceramics from iron ore tailings and schorl<sup>[20]</sup>

温度可从常温到 1 600 °C 不等<sup>[23]</sup>。

李泽华等<sup>[23]</sup>以铁尾矿、硅藻土和高炉矿渣为原料, 碳化硅为发泡剂, 在铁尾矿掺量为 45% 条件下成功制备出抗压强度为 6.18 MPa、吸水率为 87.5%、体积密度为 0.53 kg/m<sup>3</sup> 的开孔发泡陶瓷。李林等人<sup>[24]</sup>则采用攀西钒钛磁铁矿尾矿为原料, SiC 为发泡剂, 在掺量为 50% 条件下通过高温烧结法制备了抗压强度为 0.68 MPa、体积密度为 0.26 kg/m<sup>3</sup>、吸水率为 56.5% 的泡沫陶瓷。进一步研究发现, 当钒钛磁铁矿尾矿含量从 45% 增加至 55% 时, 材料的抗压强度由 0.41 MPa 升至 0.88 MPa, 铁尾矿含量增加会导致材料气孔的平均孔径减小, 增加泡沫陶瓷的强度。WU 等<sup>[25]</sup>以细颗粒高硅铁尾矿和石墨粉为原料, 以十二烷基磺酸钠和木质素磺酸钠为发泡剂和分散剂, 采用泡沫注凝成形和常压烧结工艺制备了孔隙率为 87.2%、抗压强度为 1.37 MPa、热导率为 0.036 W/(m·K) 的低导热泡沫陶瓷, 具有良好的保温性能。

泡沫陶瓷的烧成温度与其化学组成关系密切, 其原料的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 之比以 0.3~0.5 较为合适, 若铁尾矿中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量较低时, 需要加入铝质校正剂; 泡沫陶瓷原料需有一定量的 Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O、CaO 和 MgO 等助熔成分, 当尾矿中此类成分含量不足, 需要添加助熔剂。因此, 利用铁尾矿制备泡沫陶瓷需要根据铁尾矿的成分进行原料校正。

### 1.3 复相陶瓷

复相陶瓷即陶瓷基复合材料, 是以陶瓷材料为基体, 以高强度纤维、晶须和颗粒为增强体, 通过复合工艺制成的复合材料。复相陶瓷具有耐高温、高强度和刚度、相对质量较轻、抗腐蚀等优点。高硅铁尾矿中石英可用于合成 SiC, 或直接作为骨料用于制备复相陶瓷。

气孔率和机械强度是复相陶瓷的两大主要性能指标。研究表明以传统材料制备的复相陶瓷通常具有气孔率为 1%~20% 和抗压强度为 100~500 MPa 的性能特征<sup>[26]</sup>。尽管铁尾矿成分复杂, 但通过适当的预处理和优化工艺, 其所制备的复相陶瓷同样可以满足上述性能指标。代卫丽等人<sup>[27]</sup>采用固相烧结法, 以预处理后的商洛铁尾矿为原料制备出高性能莫来石复相陶瓷。分析结果显示, 该陶瓷气孔率为 13.40%, 抗压强度为 112.12 MPa, 展现出良好的应用潜力。张淑会等<sup>[28]</sup>以铁尾矿合成的 SiC 粉为原料、采用常压烧结法制备了 SiC-Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>(YAG) 复相陶瓷。SiC 晶体中含有的 Si-C 共价键使材料表现出优异的稳定性和极高的韧性, 所制备的复相陶瓷的抗压强度高达 190.42 MPa。IVANETS 等<sup>[29]</sup>研究表明铁尾矿中的石英作为骨料有助于缩短干燥时间, 减小坯体形变, 改善复相陶瓷的性能, 其开发的管状复相陶瓷膜的平均孔径

为 5.3 μm, 空气渗透系数为 (4.17~4.41)×10<sup>-13</sup> m<sup>2</sup>, 水通量为 (46.3~48.0)×10<sup>-5</sup> m<sup>3</sup>/(h·m<sup>2</sup>·Pa), 机械强度为 2.27~2.53 MPa。

以铁尾矿制备的复相陶瓷其硬度多低于普通复相陶瓷, 主要原因是铁尾矿杂质组成复杂, 引入的杂质组分若调控不恰当, 对复相陶瓷的硬度等力学性能产生负面作用。因此, 铁尾矿使用前需作除杂预处理, 或者补充其他原料作为校正剂, 调控复相陶瓷原料的组成是提高铁尾矿复相陶瓷硬度的关键路径。

### 1.4 陶瓷玻化砖

陶瓷玻化砖, 又称瓷质抛光砖, 是一种高密度、高强度、吸水率低于 0.5% 的建筑装饰材料。利用铁尾矿制造玻化砖是其高效利用的一种途径。玻化砖的制备依赖于含 SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 较高的原料, 并需含有一定量的 K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O、CaO、MgO 等低熔点物质, 而某些铁尾矿满足制备玻化砖的原料成分要求, 且铁尾矿中 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 可作为玻化砖的天然着色剂<sup>[30]</sup>。

焦娟等人<sup>[31]</sup>以武钢程潮铁尾矿为主要原料, 添加自制着色剂制备了黑色陶瓷玻化砖。研究表明, 当铁尾矿与着色剂的质量比为 98.4 : 1.6、球磨时间为 36 h (球、料、水的质量比=2 : 1 : 1)、压制压力为 60 MPa、烧成温度为 1 180 °C 时, 制得的玻化砖吸水率为 0.30%, 断裂模数为 69 MPa, 破坏强度为 1.5 kN。石棋等人<sup>[32]</sup>则利用攀钢铁尾矿, 在球磨 12 h、压制压力 300 kg/cm<sup>3</sup>、烧成温度 1 180 °C 并保温 5 min 的条件下, 制备了以钙长石为主晶相的黑色玻化砖, 其抗折强度高达 46.2~48.7 MPa。陶瓷玻化砖的颜色与铁尾矿中铁矿物含量有关, 通过预处理富集铁矿物或配加相应的无机着色剂, 调整陶瓷玻化砖原料中着色剂的含量, 有利于控制铁尾矿制备的玻化砖外观颜色。

### 1.5 保温隔热材料

保温隔热材料多为轻质的、多孔的纤维材料, 属于无机建筑材料范畴, 其具有耐高温、不燃烧的特点。以铁尾矿为主要原料制备的泡沫混凝土、蒸压加气混凝土和泡沫陶瓷具有特殊的多孔结构和良好的保温性能, 是优质的保温隔热材料。

陈刚等人<sup>[33]</sup>以铁尾矿和铜尾矿为主要原料, 结合秸秆和水泥等材料制备保温砖。测定结果显示其抗压强度大于 23 MPa、质量损失率小于 1.5%、导热系数小于 0.05 W/(m·K)。张立侠等<sup>[34]</sup>以铁尾矿和水泥、粉煤灰、硅灰为原料制备了密度为 600 kg/m<sup>3</sup> 的泡沫混凝土, 展现出良好的保温性能。陈飞旭<sup>[35]</sup>利用铁尾矿制备了干密度为 243.10 kg/m<sup>3</sup> 的泡沫保温材料, 其抗压强度为 0.39 MPa, 导热系数为 0.083 W/(m·K)。此外, 该研究表明, 向泡沫保温材料中加入低导热系数的填料可以进一步降低其导热系数, 得到具有较好保温性

能的铁尾矿复合保温材料。

铁尾矿中  $\text{SiO}_2$  含量高,是制备泡沫混凝土和蒸压加气混凝土的重要硅质原料。研究表明,铁尾矿的掺量、粒度和  $\text{SiO}_2$  含量对制品的力学性能、隔热性能和耐久性等具有较大影响,需要重点予以关注;此外,要调控铁尾矿中重金属含量,降低制品的有毒重金属元素浸出浓度,提高制品在民用建筑中使用的安全性。

### 1.6 电磁吸波建筑材料

电磁吸波建筑材料是一类能够有效吸收并衰减电磁波的功能材料,主要成分包括铁氧化物、碳基材料及聚合物。电磁吸波建筑材料通过导电损耗与磁损耗机制实现电磁波的吸收,广泛应用于减少电磁干扰(EMI)、保护电子设备并优化建筑中的电磁环境。近年来,利用铁尾矿制备电磁吸波建筑材料引起广泛关注<sup>[6]</sup>。铁尾矿中的铁氧化物因其良好的磁性,为吸波材料提供了丰富的基础成分。此外,通过化学改性及复合技术能够增强铁尾矿所制备材料的吸波性能,或是将铁尾矿与导电聚合物结合实现吸波性能优化。

云月厚等<sup>[36]</sup>以包头某铁尾矿为原料,添加 2.0% 磁性物质,在 650 °C 下高温改性,制备出的吸波材料反射率最低达到 -21 dB。邹正等人<sup>[37]</sup>采用含铜铁尾矿和硫酸烧渣来制备具有纳米核壳结构的微波吸收材料,其样品在厚度为 4.5 mm 时,最小反射率可达 -39 dB (17.2 GHz 处)。YAO 等<sup>[38-39]</sup>通过淬火热处理工艺,将铁尾矿制备成 3 mm 厚的微晶玻璃吸波材料,其最小反射率为 -17.61 dB (10.31 GHz 处),并通过添加 ZnO 和 NiO 进一步改性,最小反射率降低至 -34.35 dB,吸波频率范围为 6.70~11.20 GHz。BAI 等<sup>[40]</sup>将具有核壳结构的  $\text{SiO}_2@Fe_3O_4$  纳米复合颗粒作为吸波剂,掺入偏高岭土基质聚合物中改善其吸波性能。其机理如图 3 所示。 $\text{SiO}_2$  的核壳结构提高了  $Fe_3O_4$  在复合材料中的分散性,使吸波剂能够实现介电损耗与磁损耗的协同作用,反射率从 -35.7 dB 进一步降低至 -43.6 dB。

电磁吸波建筑材料的力学性能与电磁波衰减性能协调构建是铁尾矿基建筑材料发展的重大挑战,需要构建出高效电磁吸波建筑材料的工艺设计路线;此外,需加强铁尾矿制备电磁吸波建筑材料理论模型的构建和机理研究,从而开发出高效、经济的铁尾矿多功能电磁吸波建筑材料。

## 2 制备铁质化工产品

铁质化工产品是以铁及其化合物为基础的化学材料。随着环保意识和资源循环利用理念的深入,利用铁尾矿制备铁质化工产品技术逐渐受到重视。铁尾矿富含铁氧化物、铝氧化物和硅酸盐等成分,为铁质化工产品的生产提供了丰富的原料基础。通过适当的物理加工和化学反应,铁尾矿可被转化为高品质

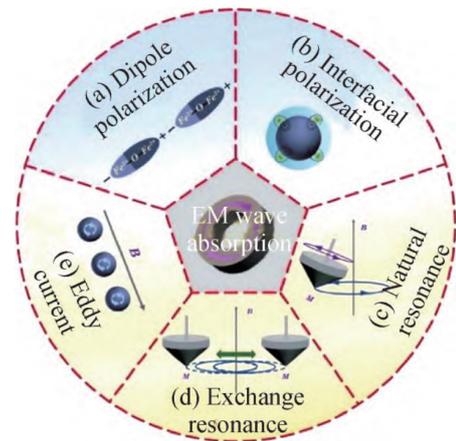


图 3  $\text{SiO}_2@Fe_3O_4$  纳米复合材料的电磁波吸收机理<sup>[40]</sup>

Fig. 3 Electromagnetic wave absorption mechanism of  $\text{SiO}_2@Fe_3O_4$  nanocomposites<sup>[40]</sup>

的絮凝剂、氧化铁颜料和白炭黑等,并广泛应用于涂料、建筑和水土治理等领域。

### 2.1 絮凝剂

絮凝剂是一类能够促进水中悬浮物聚集并沉降的化学物质。铁尾矿富含铁氧化物和铝氧化物,可通过适当的工艺加工制备聚硅酸铝铁和聚氯化铁等絮凝剂,此类絮凝剂可以满足环保和经济效益的双重要求。

杨婷赞等<sup>[41]</sup>以铁尾矿为原料制备聚硅酸铝铁絮凝剂(PSAF),并将其用于皮革废水的处理。当 PSAF 投加量为 250 mg/L、皮革废水 pH 为 8、搅拌时间为 8 min 时,废水中 COD、SS、浊度和总氮的去除率达到最大,分别为 83.2%、93.17%、94.83% 和 51.78%。黄涛等人<sup>[42]</sup>通过铁尾矿酸浸液制备聚氯化铁,应用到高岭土悬浊液的混凝实验中,在聚合温度为 40 °C、pH 为 1.0、聚合时间为 3 h 条件下,铁尾矿酸浸液制备的聚氯化铁盐基度达到 20.91%,符合相关行业标准《水处理剂聚氯化铁》(HG/T 4672—2014)。

铁尾矿制备聚硅酸铝铁和聚氯化铁等絮凝剂主要利用了尾矿中 Si、Al 和 Fe 元素,因此,需选择此 3 种元素含量较高的铁尾矿,或通过预处理工艺富集铁尾矿中的有用元素,提高絮凝剂的质量和产率。

### 2.2 无机复合颜料

铁尾矿中存在大量的铁氧化物和含硅钙矿物,具有较好的显色性,同时铁尾矿的粒度较细,有利于增加颜料的漆膜光泽度,使颜色分布均匀。以铁尾矿制备的无机复合颜料以其优良的耐光性和色彩稳定性受到青睐,且相比于普通建筑涂料而言,其不含甲醛、苯、重金属等有害物质,既经济实惠,又绿色环保。

巩林林<sup>[43]</sup>以铁尾矿、氯化铜、氯化钡和硅酸钠为合成原料,通过水热法制备了硅酸铜钡复合颜料,主

要物相为硅酸铜钡和钙长石的复合物; 铁尾矿中含硅矿物的 Si-O-Si、Si-O-M(M=Al、Mg、Ca 等)键断裂释放出  $\text{SiO}_3^{2-}$ , 为硅酸铜钡相的合成补充了硅源, 使复合颜料中硅酸铜钡相的结晶度相对未添加铁尾矿的颜料提高了 57 百分点; 铁尾矿中未完全反应的矿物作为载体改善了硅酸铜钡颗粒的分散性; 结晶度的提高和分散性的改善了复合颜料反射紫色光的效果, 使其呈现出鲜艳的紫色。GONG 等<sup>[44]</sup> 使用质量分数为 36.1% 的铁尾矿与其他原料混合, 合成出亮紫色铜钡硅酸盐复合颜料。PEREIRA 等<sup>[45]</sup> 使用铁尾矿作为陶瓷着色剂, 分别在透明、哑光和白色釉材料上进行着色实验, 如图 4 所示, 在煅烧的作用下, 铁尾矿使透明、哑光和白色釉的表面呈现出不同的颜色, 在 1 100 °C 时, 颜料的主要物相是赤铁矿和石英, 随着温度的升高, 赤铁矿逐渐分解, 因此颜料可能会发生褪色。

铁尾矿中石英、长石和氧化铁等矿物可与碱和金属盐协同作用制备无机复合颜料, 未完全反应的矿物作为载体可改善颜料颗粒的分散性, 增加颜料反射某些波长光的能力, 改变无机颜料的色彩和色度值。

### 2.3 白炭黑

白炭黑, 又名水合二氧化硅, 化学式为  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , 是一种质轻的超微细粉体, 具有优异的补强、增黏作用, 以及良好的分散、悬浮和振动液化特性, 广泛应用于橡胶、油脂及医药行业<sup>[46]</sup>。近年来, 以高硅铁尾矿为原料制备白炭黑的工艺研究备受关注。制备白炭黑的高硅铁尾矿特征是含有较高的二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )成分, 通常在 80% 以上, 以确保在化学沉淀过程中能够有效转化。铁尾矿资源丰富, 因此在白炭黑生产中具有重要地位。该工艺通常采用高硅铁尾矿作为硅源, 通过化学沉淀法制备白炭黑, 反应如式 (1)~(3) 所示。



表 1 铁尾矿制备的白炭黑的工艺参数和性能

Table 1 Performance parameters of white carbon black prepared from iron tailings with different process conditions

铁尾矿来源	工艺参数	白炭黑性能		
		比表面积/粒径	$\text{SiO}_2$ 含量	其他性能
辽宁某选矿厂 <sup>[47]</sup>	900 °C 下煅烧 5 h, 而后在 100 °C 下加入 NaOH 及 HCl 化学沉淀 6 h	比表面积 108.6 m <sup>2</sup> /g	94.25%	悬浮液 pH=6.94
河北某钢厂 <sup>[48]</sup>	850 °C 下加入 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 碱熔煅烧 2 h, 而后在 60 °C 和 pH=7 条件下充分酸浸	未提及	92.26%	硅元素提取率 86.43%
鞍山钢铁集团 <sup>[49]</sup>	铁尾矿的酸浸渣在 90~120 °C 下加入 NaOH 及 HCl 化学沉淀 8 h	粒径约 150 nm	未提及	$\text{SiO}_2$ 提取率 63.48%
鞍山某选矿厂 <sup>[46]</sup>	500 °C 下加入 NaOH 煅烧 3 h, 而后在 110 °C 下加入 NaOH 及 HCl 沉淀 6 h	比表面积 108 m <sup>2</sup> /g	92.3%	1 000 °C 下灼烧减量 6.16%
河北某选厂 <sup>[50]</sup>	900 °C 下煅烧 5 h, 煅烧后的酸浸渣与 NaOH 在 500 °C 下再次煅烧 50 min, 而后加入 NaCl 及 HCl 充分反应 1 h	粒径 50~100 nm	96.97%	白炭黑产率 96.31%
祁东某尾矿库 <sup>[51]</sup>	回转窑内直接还原后的高硅尾渣在 108 °C 下加入 NaOH 及 HCl 反应 1 h	粒径约 50 nm	99.35%	微观形貌为葡萄状集合体

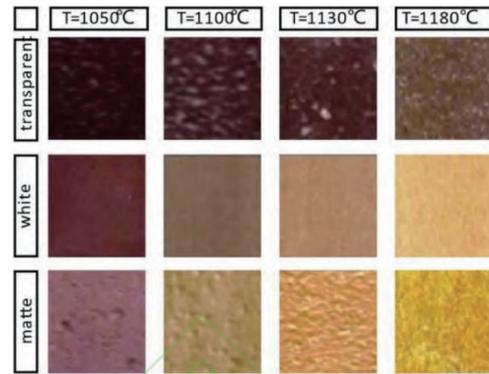


图 4 煅烧作用下铁尾矿对透明、哑光和白色釉材料的表面着色情况<sup>[45]</sup>

Fig. 4 Surface coloration of transparent, matte, and white glaze materials using the iron ore tailings under calcination<sup>[45]</sup>



目前, 铁尾矿制备白炭黑采用的主要方法包括磁选—化学沉淀法、煅烧—酸浸法、酸碱联合法和常压碱浸法等, 其工艺参数及制备的白炭黑性能参数见表 1, 来源不同的铁尾矿均可转化为具有优良性能的白炭黑产品。采用熔盐法可降低铁尾矿中石英与 NaOH 的反应温度, 提高  $\text{SiO}_2$  浸出率; 此外, 为提高白炭黑的纯度, 铁尾矿需进行磁选、酸浸等除铁预处理, 尽可能制取  $\text{SiO}_2$  含量高的铁尾矿作为生产白炭黑的原料。

### 3 制备硅质介孔材料

硅质介孔材料是一类以  $\text{SiO}_2$  为主要成分、具有有序孔道结构的材料, 典型代表为 MCM-41 和 SBA-15。硅质介孔材料不仅能够提高催化反应的效率和选择性, 还可以用于检测环境中微量成分、分离工业废气中的有害成分、提高药物的溶解性和生物利用度、去除水和空气中的重金属和有机溶剂等, 因此被广泛应用于吸附、催化、药物载体和传感器等领域, 如图 5 所示<sup>[52]</sup>。铁尾矿中富含  $\text{SiO}_2$ , 为介孔材料提供了丰富的硅源。近年来, 利用铁尾矿及其他硅酸盐矿物

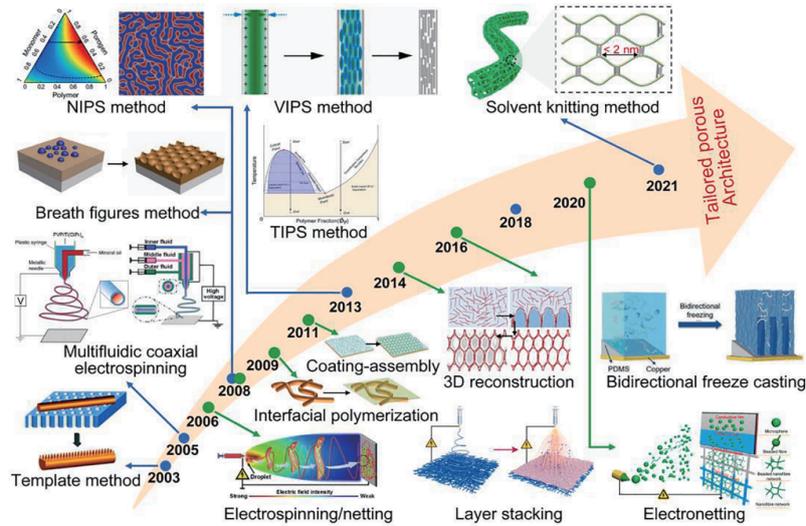


图5 铁尾矿及含硅固废合成介孔材料的进展及应用情况<sup>[52]</sup>

Fig. 5 Advances and applications of mesoporous materials synthesized from iron tailings and silicon-containing solid wastes<sup>[52]</sup>

制备的介孔材料, 凭借较大的比表面积(通常超过  $500 \text{ m}^2/\text{g}$ )、可控孔径( $2\sim 50 \text{ nm}$ )、优良的热和化学稳定性, 受到广泛关注。

许小东<sup>[53]</sup>以铁尾矿制备的硅酸钠溶液为硅源, 采用直接合成法合成了 Si-SBA-15 介孔分子筛。结果显示, 当 HCl 浓度为  $2 \text{ mol/L}$ 、模板剂 P123 与硅的摩尔比为  $1:0.09$ 、水热晶化时间为  $72 \text{ h}$  时, 制备的 SBA-15 具有高达  $685 \text{ m}^2/\text{g}$  的比表面积和  $11.5 \text{ nm}$  的孔径, 且对亚甲基蓝的吸附率达到  $99\%$  以上。吕扬<sup>[54]</sup>使用铁尾矿为硅源, 采用水热法及微波法合成了 MCM-41 介孔分子筛, 结果表明, 水热法下最佳反应条件为温度  $130 \text{ }^\circ\text{C}$ 、反应时间  $60 \text{ h}$ 、模板剂 CTAB 与  $\text{SiO}_2$  的摩尔比为  $0.15:1$ , 此条件下合成的 MCM-41 对  $\text{Ni}^{2+}$ 、 $\text{Co}^{2+}$  和  $\text{Fe}^{2+}$  的吸附率超过  $80\%$ 。FU 等<sup>[55]</sup>通过碱熔盐法在  $500\sim 600 \text{ }^\circ\text{C}$  下从铁尾矿中高效选择性地提取了硅,  $\text{SiO}_2$  提取率约为  $82\%$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  提取率低于  $2\%$ , 利用提取的  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  通过水热法合成了 MCM-41, 其比表面积为  $946.68 \text{ m}^2/\text{g}$ , 介孔体积为  $0.76 \text{ cm}^3/\text{g}$ , 且具有典型的六方结构。NGUYEN 等<sup>[56]</sup>开发了含铁尾矿的离子富集催化剂(MFe-TO15), 在催化降解实验中表现出较高的脱色和矿化效率。IZIDORO 等<sup>[57]</sup>则利用铁尾矿合成了沸石 A, 实验表明该材料对电镀废水中的主要金属具有  $90\%$  以上的吸附率, 尤其对  $\text{Zn}^{2+}$  的去除率达到  $98\%$ 。

铁尾矿杂质较多, 需采用磁选、酸浸等除杂方法制取高硅质原料, 提高介孔材料的原料纯度; 碱熔盐法不仅可降低从铁尾矿中提取  $\text{SiO}_2$  的温度, 还能抑制  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  的浸出, 提高  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  溶液的纯度。

#### 4 制取高品质石英砂

高品质石英砂指含有高含量石英矿物且杂质含量极低的石英砂, 通常应用于玻璃制造、铸造、陶瓷、

电子材料等工业领域。高品质石英砂的重要作用在于其优异的化学稳定性和物理特性, 能够显著提升产品的性能和质量。例如, 在玻璃制造中, 它有助于提高玻璃的透明度和强度; 在铸造中, 提供良好的模具精度和表面光洁度。高硅铁尾矿含有大量石英矿物, 经过进一步分选处理, 可从尾矿中回收  $\text{SiO}_2$  品位达  $99\%$  以上的高品质石英砂。

李肖等人<sup>[58]</sup>使用石英品位为  $75.5\%$  的本溪铁选厂尾矿为原料, 采用磨矿(磨至  $-0.074 \text{ mm}$  占  $90\%$ )、弱磁选 ( $95 \text{ kA/m}$ )、强磁选 ( $640 \text{ kA/m}$ )、石英反浮选及化学提纯工艺流程, 获得了产率为  $20.54\%$ 、石英品位为  $99.93\%$ 、回收率为  $27.19\%$ 、白度为  $94.11\%$ 、耐温为  $1750 \text{ }^\circ\text{C}$  的高纯石英砂。魏黎明等人<sup>[59]</sup>以某巴西进口铁尾矿为原料, 采用泥砂分级、中磁选铁、磨矿精选、强磁除杂、浮选精选及酸浸提纯等工艺, 制备出了  $\text{SiO}_2$  含量为  $99.72\%$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  含量为  $0.039\%$  的优质粗粒石英砂精矿。GULSOY 等人<sup>[60]</sup>根据土耳其 Cine-Ceyhan 铁尾矿的特点, 采用阴、阳离子捕收剂的两段浮选工艺, 捕收剂 Armac TD 用量为  $225 \text{ g/t}$ , 油酸钠用量为  $2000 \text{ g/t}$ , 两段浮选 pH 均为  $5.5\sim 6.5$ , 最终回收了  $\text{TiO}_2+\text{Fe}_2\text{O}_3$  总含量低于  $0.1\%$  的高质量石英。LONG 等<sup>[61]</sup>通过湿式强磁选和两段混合酸浸工艺, 从高硅铁尾矿中提取了品位为  $99.99\%$  的高纯石英砂, 原料总回收率达到  $38.04\%$ , 其中, 两段混合酸浸工艺对磁选提纯石英砂的 Fe、Al 和 Ca 杂质去除率分别达到  $90.45\%$ 、 $78.89\%$  和  $68.15\%$ , 且机理研究监测了整个提纯过程中杂质的迁移过程(图 6), 验证了从高硅铁尾矿中提取高纯石英砂的可行性。

铁尾矿制备高品质石英砂具有工艺简单、原料易得、产品应用广等优势, 是鞍山式铁尾矿等高硅铁尾矿的重要利用方式。但是, 铁尾矿中石英颗粒内杂质赋存状态复杂, 需加强铁尾矿的工艺矿物学研究, 摸

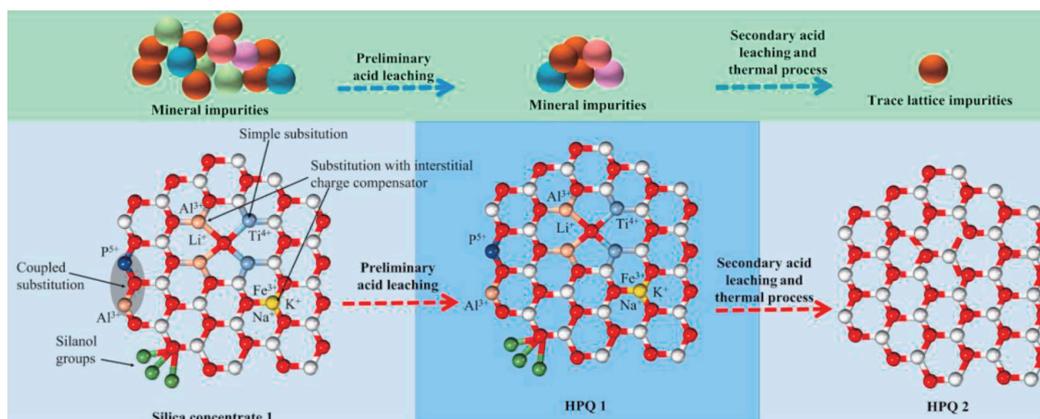


图 6 采用高硅铁尾矿制备高品质石英砂的杂质去除机理<sup>[61]</sup>

Fig. 6 Impurity removal mechanism for producing high purity quartz sand from high-silicon iron tailings<sup>[61]</sup>

清石英矿物颗粒中杂质的含量、种类和赋存形式,为制订合理的提纯方案提供矿物学基础。此外,采用常规的磁选、浮选等物理选矿方法提纯,难以直接获取 SiO<sub>2</sub> 含量 99.9% 以上的高纯石英,需考虑采用酸浸等工艺,进一步降低杂质含量。

## 5 制取农田土壤改良剂

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。利用铁尾矿可制备酸类与碱类土壤改良剂,且改良后对土壤无副作用、无污染,具有较好的发展前景。铁尾矿作为农田土壤改良剂的原理主要依赖其丰富的化学组成,其 Fe、Al、Si 和 Ca 的化合物能显著改善土壤的物理化学性质,增强土壤通气性和透水性,防止土壤板结,促进植物根系的生长。此外,铁尾矿中的一些矿物成分(如石灰石、白云石等)可调节土壤酸碱度,尤其对酸性土壤具有良好的改良效果。铁尾矿还提供了植物所需的微量元素(如 Mn 和 Zn),可以促进作物的生长和产量提高,同时也有助于提高土壤微生物的活性<sup>[62]</sup>。

孙希乐等<sup>[63]</sup>以铁尾矿、云母、白云石为原料,在 1100 °C 下煅烧制得碱类土壤改良剂,实现对酸性土壤的有效改良。杨孝勇<sup>[64]</sup>使用铁尾矿制备复合改良剂,在治理新型盐碱地的过程中,确定改良剂的最佳原料配比为  $m(\text{铁尾矿}) : m(\text{脱硫石膏}) : m(\text{碎秸秆}) : m(\text{生物炭}) : m(\text{有机肥}) = 40 : 10 : 10 : 3 : 3$ 。JIN 等<sup>[65]</sup>验证了采用铁尾矿改良农田土质的可行性和效果,结果表明铁尾矿处理后的土壤表现出较高的含水量,相比于没有铁尾矿处理的对照组提高了 19.20 百分点。此外,铁尾矿的处理使玉米的株高和茎粗显著高于对照组,分别提高 136.82% 和 32.02%,证明了在表层土壤下铺设铁尾矿层来构建农田是一种可行且环保的方式,有助于实现耕地的可持续利用。

铁尾矿配加其他矿物原料,通过煅烧、水热等工艺可制取无机复合肥料;也可与生物质原料、脱硫石膏等直接混合制取土壤改良剂,用于农田土壤和盐碱

地改良。以铁尾矿制取土壤改良剂时,要特别关注铁尾矿的重金属含量和重金属浸出毒性,若重金属超标,需要采取酸浸等预处理工艺对铁尾矿作脱毒处理。

## 6 结论

随着我国绿色发展的推进实施,铁尾矿的资源化利用已取得了显著进展。铁尾矿不仅是固体废弃物,更是“放错了地方的资源”,其成分与天然砂石相似,且富含 Si、Al 等元素,适合用于制备多种高附加值的新材料,如微晶玻璃、泡沫陶瓷等新型建材、硅质介孔材料、铁质化工产品、高品质石英砂、农田土壤改良剂等。

针对铁尾矿的矿物组成和化学性质,铁尾矿高值化利用应重点关注以下几点:一是根据不同类型铁尾矿的特点,探索合适的利用途径和最优利用模式。根据铁尾矿的矿物组成、粒度分布和化学特性,制定针对性的处理技术和高附加值产品方向,通过差异化的利用策略实现最大化经济效益;二是针对利用过程中涉及的复杂化学反应机理,需深入研究杂质和铁氧化物对产品性能的影响,提高产品的纯度和质量;三是需统筹考虑铁尾矿的大宗利用与高值化利用,不断提高铁尾矿基制品的附加值,促进铁尾矿利用产业的健康发展。总体而言,铁尾矿的高值化利用具有重要意义,能有效解决资源浪费和环境污染问题,其前景广阔,但面临技术优化、经济性和标准化等挑战。未来应加强基础研究,注重制备技术研发,提升产品的质量和附加值,同时推动政策与行业标准的完善,以促进铁尾矿在高附加值材料循环经济中的广泛应用。

## 参考文献:

- [1] 潘德安, 逯海洋, 刘晓敏, 等. 铁尾矿建材化利用的研究进展与展望[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(10): 3162-3169+3214.  
PAN D A, LU H Y, LIU X M, et al. Research progress and prospect on utilization of iron tailings for building materials[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(10): 3162-3169+3214.

- [2] 易龙生, 米宏成, 吴倩, 等. 中国尾矿资源综合利用现状[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(3): 79-84.  
YI L S, MI H C, WU Q, et al. Present situation of comprehensive utilization of tailings resources in China[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020, 40(3): 79-84.
- [3] 田尔布, 康海鑫, 连跃宗. 铁尾矿微粉混凝土的力学性能分析[J]. 三明学院学报, 2021, 38(3): 106-112.  
TIAN E B, KANG H X, LIAN Y Z. Research on mechanical properties of steel slag powder road concrete[J]. Journal of Sanming University, 2021, 38(3): 106-112.
- [4] 吴瑞东. 石英岩型铁尾矿微粉及废石对水泥基材料的性能影响及机理[D]. 北京: 北京科技大学, 2020.  
WU R D. Performance and mechanism analysis of quartz-type iron tailings powder and waste rock in cement-based materials[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2020.
- [5] 薛三锋, 石华旺, 王鸿源, 等. 铁尾矿在建筑材料中的应用研究进展[J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38(4): 15-20+30.  
XUE S F, SHI H W, WANG H Y, et al. Research progress on durability of iron tailing concrete and its application in building materials[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2024, 38(4): 15-20+30.
- [6] 宁旭文, 杨浪, 饶峰, 等. 铁尾矿在电磁吸波建筑材料中的研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(3): 925-938.  
NING X W, YANG L, RAO F, et al. Research progress of iron tailings in electromagnetic wave absorbing building materials[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(3): 925-938.
- [7] 李家楣, 欧志华, 赵明明, 等. 尾矿资源综合利用的研究进展[J]. 上海建材, 2024(3): 15-21.  
LI J M, OU Z H, ZHAO M M, et al. Research progress on the comprehensive utilization of tailings resources[J]. Shanghai Building Materials, 2024(3): 15-21.
- [8] ZHANG X L, HAN Y X, SUN Y S, et al. An novel method for iron recovery from iron ore tailings with pre-concentration followed by magnetization roasting and magnetic separation[J]. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2020, 41: 117-129.
- [9] 孙欣, 马艺闻, 姚富兴, 等. 铁尾矿制备矿物材料研究进展[J]. 矿业研究与开发, 2024, 44(9): 252-262.  
SUN X, MA Y W, YAO F X, et al. Research progress on preparation of mineral materials from iron tailings[J]. Mining Research and Development, 2024, 44(9): 252-262.
- [10] 林岩, 郭客, 张东, 等. 利用铁尾矿制备低附加值产品研究进展[J]. 辽宁化工, 2023, 52(1): 128-131.  
LIN Y, GUO K, ZHANG D, et al. Research progress in preparation of low value-added products from iron tailings[J]. Liaoning Chemical Industry, 2023, 52(1): 128-131.
- [11] 崔孝炜, 刘信伟, 邓婉心, 等. 利用铁尾矿制备高强结构材料的试验研究[J]. 矿产保护与利用, 2021, 41(3): 112-117.  
CUI X W, LIU X W, DENG W X, et al. Experimental study on preparation of high strength structural materials with iron ore tailings[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2021, 41(3): 112-117.
- [12] 佟志芳, 范佳乐, 曾庆钊, 等. 利用金属尾矿制备泡沫微晶玻璃的研究现状及展望[J]. 有色金属科学与工程, 2020, 11(2): 34-41.  
TONG Z F, FAN J L, ZENG Q P, et al. Research status and prospect of preparation of foam glass ceramics from metal tailings[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2020, 11(2): 34-41.
- [13] 周怡笛, 王丽娟, 闵鑫, 等. 铁尾矿高值化利用研究进展[J]. 现代矿业, 2022, 38(10): 251-254.  
ZHOU Y D, WANG L J, MIN X, et al. Research progress on the high-value utilization of iron tailings[J]. Modern Mining, 2022, 38(10): 251-254.
- [14] 卿振军. 低膨胀系数基板材料的性能及机理研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.  
QING Z J. Research on properties and mechanism of substrate materials with low thermal expansion coefficient[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.
- [15] 张春霖, 王海, 李静. 尾矿微晶玻璃研究进展概述[J]. 辽宁科技大学学报, 2018, 41(6): 406-411.  
ZHANG C L, WANG H, LI J. Summary of research progress on glass-ceramics made from tailings[J]. Journal of University of Science and Technology Liaoning, 2018, 41(6): 406-411.
- [16] 赵世珍. 垃圾焚烧飞灰制备微晶玻璃及污染物控制机理[D]. 北京: 北京科技大学, 2021.  
ZHAO S Z. Mechanism of pollutant control and glass ceramics made from MSWI fly ash[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2021.
- [17] 邓磊波. 铁尾矿及高炉渣制备玻璃陶瓷的结构与性能研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2024.  
DENG L B. Research on the structure and properties of glass ceramics prepared from iron tailings and blast furnace slag[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2024.
- [18] 韩茜, 张洋. 铁尾矿微晶玻璃的制备及其性能研究[J]. 商洛学院学报, 2015, 29(6): 37-40.  
HAN X, ZHANG Y. A study on properties of microcrystalline glass prepared from iron tailing[J]. Journal of Shangluo University, 2015, 29(6): 37-40.
- [19] 南宁, 刘萍, 孙强强, 等. 利用铁尾矿制备微晶玻璃试验研究[J]. 当代化工, 2019, 48(10): 2199-2201+2205.  
NAN N, LIU P, SUN Q Q, et al. Experimental investigation on synthesis of glass ceramics with iron tailings[J]. Contemporary Chemical Industry, 2019, 48(10): 2199-2201+2205.
- [20] MENG J P, LIU F, SRINIVASAKANNAN C, et al. Synthesis of schorl doped iron ore tailings glass-ceramics with superior performance[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2023, 600: 122034.
- [21] ZHAO S J, FAN J J, SUN W. Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultra-high performance concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 50: 540-548.
- [22] 汪劲刚, 何桂春, 肖志, 等. 钼铌尾矿制备发泡陶瓷研究[J]. 有色金属科学与工程, 2023, 14(5): 651-658.  
WANG J G, HE G C, XIAO Z, et al. Preparation of foamed ceramics from tantalum niobium tailings[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2023, 14(5): 651-658.
- [23] 李泽华, 邢军, 孙晓刚, 等. 利用高炉矿渣和铁尾矿制备开孔发泡陶瓷的研究[J]. 金属矿山, 2022(10): 238-244.  
LI Z H, XING J, SUN X G, et al. Study on preparation of open-cell foamed ceramics from blast furnace slag and iron tailings[J]. Metal Mine, 2022(10): 238-244.
- [24] 李林, 姜涛, 陈超, 等. 攀西钒钛磁铁矿尾矿制备储水泡沫陶瓷的研究[J]. 矿产综合利用, 2020(6): 7-13+6.  
LI L, JIANG T, CHEN C, et al. Study on preparation of water-retaining foam ceramics from vanadium-titanium magnetite tailing[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(6): 7-13+6.
- [25] WU S Z, ZHOU, Y, LI R F, et al. Reaction sintered porous ceramics using iron tailings: Preparation and properties[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2023, 38: 1193-1199.
- [26] 刘振英. 煤矸石制备莫来石复相陶瓷矿相重构及力学性能研究

- [D]. 淮南:安徽理工大学, 2024.
- LIU Z Y. Study on the mineral phase reconstruction and mechanical properties of mullite composite ceramics prepared with coal gangue[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2024.
- [27] 代卫丽, 朱程程, 陈鹏飞, 等. 铁尾矿制备高性能莫来石复相陶瓷的研究[J]. 非金属矿, 2023, 46(2): 47-52.
- DAI W L, ZHU C C, CHEN P F, et al. Study on the preparation of high-property mullite composite ceramic materials using iron tailings[J]. Non-Metallic Mines, 2023, 46(2): 47-52.
- [28] 张淑会, 薛向欣, 吕庆, 等. 利用铁尾矿制备 SiC-Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> 复相陶瓷[J]. 钢铁, 2008(11): 94-98.
- ZHANG S H, XUE X X, LV Q, et al. Preparation of SiC-Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> composite ceramics from iron ore tailings[J]. Iron and Steel, 2008(11): 94-98.
- [29] IVANETS A I, AZAROVA, T A, AGABEKOV, V E, et al. Effect of phase composition of natural quartz raw material on characterization of microfiltration ceramic membranes[J]. *Ceramics International*, 2016, 42: 16571-16578.
- [30] 隋延力, 王继全, 杨芳, 等. 铁尾矿生产陶瓷玻化砖离工业化还有多远[J]. 金属世界, 2014(1): 9-13.
- SUI Y L, WANG J Q, YANG F, et al. How far is it from iron ore tailings to the industrialized production of ceramic tiles[J]. Metal World, 2014(1): 9-13.
- [31] 焦娟, 郭志猛, 刘祥庆, 等. 用程潮铁尾矿制备黑色通体砖[J]. 金属矿山, 2010(12): 167-171+174.
- JIAO J, GUO Z M, LIU X Q, et al. Preparation of black full-body brick with chengchao iron tailings[J]. Metal Mine, 2010(12): 167-171+174.
- [32] 石棋, 崔文豪, 隋延力. 利用攀钢铁尾矿制备黑色玻化砖的研究[J]. 中国陶瓷, 2012, 48(10): 55-57.
- SHI Q, CUI W H, SUI Y L. Study on preparation of black vitrified tile using the pangang iron tailings[J]. China Ceramics, 2012, 48(10): 55-57.
- [33] 陈刚, 蔡国俊, 黄峰, 等. 固废基免烧保温砖的制备及性能研究[J]. 新型建筑材料, 2022, 49(11): 169-173.
- CHENG G, CAI G J, HUANG F, et al. Study on preparation and properties of solid waste based unburned insulating bricks[J]. *New Building Materials*, 2022, 49(11): 169-173.
- [34] 张立侠, 胡晨光, 宋裕增, 等. 利用铁尾矿粉制备保温砌块的研究[J]. 建设科技, 2016(3): 80-81.
- ZHANG L X, HU C G, SONG Y Z, et al. Study on preparation of thermal insulation block from iron tailings[J]. Construction Science and Technology, 2016(3): 80-81.
- [35] 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, 2020.
- CHEN F X. Study on the thermal insulation composite by iron tailings/fly ash/EPS/aerogel[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020.
- [36] 云月厚, 郝显康, 李国栋, 等. 富含稀土白云选铁尾矿制备的微波吸收材料特性研究[J]. 稀土, 2003, 24(2): 68-70.
- YUN Y H, TAI X K, LI G D, et al. Research on the properties of microwave absorption materials made by the tailings of rich rare earth from iron ore dressing in Bayan Obo[J]. Chinese Rare Earths, 2003, 24(2): 68-70.
- [37] 邹正, 宣爱国, 吴元欣, 等. 铜铁尾矿制酸烧渣制备纳米 Fe/SiO<sub>2</sub> 核壳复合粒子的微波吸收性能[J]. 化工学报, 2009, 60(5): 1322-1326.
- ZOU Z, XUAN A G, WU Y X, et al. Preparation of nano Fe/SiO<sub>2</sub> core-shell composite particles from copper/iron ore cinder and their microwave absorption properties[J]. *Journal of the Chemical Industry and Engineering Society of China*, 2009, 60(5): 1322-1326.
- [38] YAO R, LIAO S Y, DAI C L, et al. Preparation and characterization of novel glass-ceramic tile with microwave absorption properties from iron ore tailings[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2015, 378: 367-375.
- [39] YAO R, LIAO S Y, CHEN X Y, et al. Effects of ZnO and NiO on material properties of microwave absorptive glass-ceramic tile derived from iron ore tailings[J]. *Ceramics International*, 2016, 42: 8179-8189.
- [40] BAI B, ZHU Y P, MIAO J F, et al. Electromagnetic wave absorption performance and mechanisms of geopolymer-based composites containing core-shell SiO<sub>2</sub>@Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles[J]. *Ceramics International*, 2022, 48: 2755-2762.
- [41] 杨婷赞, 高翠翠, 王道涵, 等. 铁尾矿基聚硅酸铝铁制备及其对废水的处理[J]. 工业水处理, 1-13 [2024-09-06]. <https://doi.org/10.19965/j.cnki.iwt.2024-0211>.
- YANG T Y, GAO C C, WANG D H, et al. Preparation of polysilicate aluminum iron from iron tailings and treatment of wastewater[J]. Industrial Water Treatment, 1-13 [2024-09-06]. <https://doi.org/10.19965/j.cnki.iwt.2024-0211>.
- [42] 黄涛, 黄自力, 肖硕, 等. 铁尾矿酸浸液制备聚氯化铁的试验研究[J]. 无机盐工业, 2024, 56(2): 121-126.
- HUANG T, HUANG Z L, XIAO S, et al. Experimental study on preparation of polyferric chloride from iron tailings acid leaching solution[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2024, 56(2): 121-126.
- [43] 巩林林. 铁尾矿制备无机复合颜料及性能研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2023.
- GONG L L. Preparation of inorganic composite pigments from iron ore tailings and their properties[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2023.
- [44] 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: 27987-27997.
- [45] PEREIRA O C, BERNARDIN A M. Ceramic colorant from untreated iron ore residue[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 233: 103-111.
- [46] 于洪浩. 鞍山高硅铁尾矿的增值化利用研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2012.
- YU H H. Study on value-added utilization of Anshan iron ore tailings with high silica[D]. Shenyang: Northeastern University, 2012.
- [47] 孙雪妍, 李明宇, 富壮, 等. 辽宁某选厂高硅尾矿制备白炭黑试验研究[J]. 非金属矿, 2023, 46(2): 75-78.
- SUN X Y, LI M Y, FU Z, et al. Experimental study on preparation of precipitated silica using high silicon tailings from liaoning concentrator[J]. Non-Metallic Mines, 2023, 46(2): 75-78.
- [48] 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. Investigating kinetics in preparation of precipitated silica from iron ore tailings[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2022, 43(2): 87-93.
- [49] 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. Micro/nano structure of white carbon black and iron oxide were prepared using iron tailings[J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2016, 35(2): 90-95.

- [ 50 ] 张明熹, 李锋锋, 吕朝霞, 等. 铁尾矿提纯纳米白炭黑的研究[J]. 化工新型材料, 2013, 41(2): 33–35.  
ZHANG M X, LI F F, LYU Z X, et al. Study on preparation of nanosilica from iron tailings[J]. *New Chemical Materials*, 2013, 41(2): 33–35.
- [ 51 ] 黄柱成, 田百洲, 梁之凯, 等. 含硅尾渣常压碱浸及浸出液制备白炭黑的研究[J]. 金属矿山, 2021(4): 215–220.  
HUANG Z C, TIAN B Z, LIANG Z K, et al. Study of leaching silicon-containing slag using alkaline leaching in atmosphere and preparing white carbon black from leachate[J]. *Metal Mine*, 2021(4): 215–220.
- [ 52 ] ZHANG F, SI Y, YU J Y, et al. Electrospun porous engineered nanofiber materials: A versatile medium for energy and environmental applications[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 456: 140989.
- [ 53 ] 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, 2020.  
XU X D. Synthesis and properties of Fe-SBA-15 mesoporous materials from iron tailings[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020.
- [ 54 ] 吕扬. 铁尾矿为原料制备介孔分子筛[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2012.  
LYU Y. Synthesis mesoporous molecular sieve MCM-41 with iron ore tailings[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2012.
- [ 55 ] FU P F, YANG T W, FENG J, et al. Synthesis of mesoporous silica MCM-41 using sodium silicate derived from copper ore tailings with an alkaline molten-salt method[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2015, 29: 338–343.
- [ 56 ] NGUYEN L H, NGO Q N, VAN H T, et al. Reutilization of Fe-containing tailings ore enriched by iron(III) chloride as a heterogeneous Fenton catalyst for decolorization of organic dyes[J]. *RSC Advances*, 2021, 11: 15871–15884.
- [ 57 ] IZIDORO J D C, KIM M C, BELLELLI V F, et al. Synthesis of zeolite A using the waste of iron mine tailings dam and its application for industrial effluent treatment[J]. *Journal of Sustainable Mining*, 2019, 18: 277–286.
- [ 58 ] 李肖, 徐彪, 胡敏捷, 等. 本溪某铁尾矿制备高纯石英砂试验[J]. 现代矿业, 2018, 34(4): 106–108+114.  
LI X, XU B, HU M J, et al. Experiment on preparation of high-purity quartz sand by an iron tailings in benxi[J]. *Modern Mining*, 2018, 34(4): 106–108+114.
- [ 59 ] 魏黎明, 彭少伟, 王兆连, 等. 某高硅巴粗铁尾矿综合回收工艺试验[J]. 现代矿业, 2024, 40(7): 158–162.  
WEI L M, PENG S W, W Z L, et al. Comprehensive recovery process test of a high silicon coarse iron tailings[J]. *Modern Mining*, 2024, 40(7): 158–162.
- [ 60 ] Gulsoy O Y, Can N M, Bayraktar I, et al. Two stage flotation of sodium feldspar—from laboratory to industrial application[J]. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, 2004, 113: 139–144.
- [ 61 ] LONG H L, ZHU D Q, PAN J, et al. Innovative process for the extraction of 99.99% high-purity quartz from high-silicon iron ore tailings[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 31: 2094–2102.
- [ 62 ] 李敏. 铁尾矿土壤化利用过程中重金属污染的植物修复和土壤改良技术[D]. 济南: 山东大学, 2018.  
LI M. Phytoremediation technology on pollution control of heavy metals and soil improvement in utilization of iron tailings[D]. Ji'nan: Shandong University, 2018.
- [ 63 ] 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 the soil conditioner preparation from iron mine tailings and by-product mica powder and dolomite[J]. *Metal Mine*, 2018(6): 192–196.
- [ 64 ] 杨孝勇. 基于铁尾矿的新型盐碱地复合改良剂的研制及应用[D]. 济南: 山东大学, 2020.  
YANG X Y. Development and application of new saline-alkali compound amendment based on iron tailings[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [ 65 ] 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: 20205.

## Research Progress on the Preparation of High-Value Products with Iron Ore Tailings

FU Pingfeng<sup>1,2</sup>, DENG Wei<sup>1</sup>, YU Zeen<sup>1</sup>, ZHANG Siqu<sup>1,2</sup>, NI Wen<sup>1,2</sup>

1. School of Civil and Resources Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of the Ministry of Education for Efficient Mining and Safety of Metal Mines, Beijing 100083, China

**Abstract:** With the implementation of China's green development strategy, the resource utilization of iron ore tailings has become increasingly important. Nowadays, iron ore tailings are widely used to prepare construction materials such as building sand and mineral admixtures. Their resource potential is not fully developed, and the preparation of high-value products would become future research hotspots. This work reviews the research progress on the preparation of high-value novel materials from iron ore tailings, including novel construction materials such as glass-ceramics, foamed ceramics, composite ceramics, black vitrified bricks, thermal insulation composites, and microwave absorbing glass-ceramic tile, siliceous mesoporous materials, high purity quartz sand and agricultural soil amendment. Based on the mineral composition and characteristics of iron ore tailings, the challenges faced in the production of high-value novel materials are discussed. To promote the efficient utilization of iron ore tailings, it is recommended that suitable utilization modes should be explored based on the types of iron ore tailings. Large-scale utilization and high-value utilization should be considered simultaneously in the tailings resource process, to achieve both the high utilization rate of iron ore tailings and added-value of products. Thus, dual economic and environmental benefits can be obtained in resource utilization of iron ore tailings.

**Keywords:** iron ore tailings; resource utilization; novel materials; high-value utilization

引用格式: 傅平丰, 邓威, 俞泽恩, 张思奇, 倪文. 铁尾矿制备新型材料研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2024, 44(6): 33-43.

FU Pingfeng, DENG Wei, YU Zeen, ZHANG Siqu, NI Wen. Research progress on the preparation of high-value products with iron ore tailings[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2024, 44(6): 33-43.

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

E-mail: [kcbh@chinajournal.net.cn](mailto:kcbh@chinajournal.net.cn)