

文章编号: 1004-4051(2024)02-0115-10

DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20230593

## 铁尾矿特性分析及其利用技术现状和展望

杜鑫<sup>1</sup>, 傅国辉<sup>2</sup>, 褚会超<sup>1</sup>, 杨晓峰<sup>1</sup>, 付亚峰<sup>1</sup>, 董振海<sup>1</sup>,  
刘剑军<sup>1</sup>, 满晓霏<sup>1</sup>, 智慧<sup>1</sup>

(1. 鞍钢集团北京研究院有限公司, 北京 102200;  
2. 鞍钢集团矿业有限公司, 辽宁鞍山 114043)

**摘要:** 铁尾矿是我国矿山固废体量最大的组成部分, 目前仍面临着综合利用率低、产品附加值不高等问题。由于不同类型矿山尾矿的特性差异较大, 且不同应用领域对原料的要求也不相同, 因此, 有必要对铁尾矿的原料特性及利用技术进行概括, 并对该领域的发展前景进行评估, 为铁尾矿和其他大宗固废的合理化利用提供借鉴。本文首先分析了我国不同地区、不同矿种以及不同选矿工艺排放尾矿的特性差异, 包括元素组成、有价组分以及粒度等。其次从大宗利用和高值化应用两个方面对铁尾矿利用技术现状进行了概括。铁尾矿的大宗利用技术包括尾矿再选和制备建筑材料等, 其中尾矿再选以提取铁精矿、有价金属元素以及高品质非金属矿为主。铁尾矿作为建材原料时, 其应用方向可以概括为胶结型材料、烧结型建材以及熔制型材料, 高值化应用以制备功能性非金属矿物材料为主。选矿工艺、设备以及人工智能等新技术的发展, 对提高尾矿品质具有重要作用。在上游提高铁尾矿品质的同时, 通过产业链上下游协同攻关, 根据不同分选工艺排放铁尾矿的特性差异, 进行针对性的应用研究, 将有望真正解决铁尾矿高附加值利用不高的问题。

**关键词:** 铁尾矿; 固废处理; 矿物材料; 资源利用; 减量化

**中图分类号:** TD98 **文献标识码:** A

## Characteristics analysis of iron tailings and current status and prospects of its utilization technology

DU Xin<sup>1</sup>, FU Guohui<sup>2</sup>, CHU Huichao<sup>1</sup>, YANG Xiaofeng<sup>1</sup>, FU Yafeng<sup>1</sup>,  
DONG Zhenhai<sup>1</sup>, LIU Jianjun<sup>1</sup>, MAN Xiaofei<sup>1</sup>, ZHI Hui<sup>1</sup>

(1. Ansteel Beijing Research Institute Co., Ltd., Beijing 102200, China;  
2. Ansteel Group Mining Co., Ltd., Anshan 114043, China)

**Abstract:** Iron tailings are the largest component of solid waste in China, and currently face problems such as low comprehensive utilization rate and low added value of products. Due to the significant differences in the characteristics of tailings from different types of mines and the varying requirements for raw materials in different application fields, it is necessary to summarize the raw material characteristics and application technologies of iron tailings, and to evaluate the development prospects of this field, providing reference for the rational utilization of iron tailings and other bulk solid waste. Firstly, analyzes the differences in the characteristics of tailings discharged from different regions, minerals, and beneficiation processes in China, including elemental composition, valuable components,

收稿日期: 2023-08-17 责任编辑: 刘硕

基金项目: 鞍钢集团矿业有限公司科技研发项目资助(编号: 2021-科 A25)

第一作者简介: 杜鑫(1994—), 男, 博士, 研究方向为尾矿资源高效利用, E-mail: dxcmub@163.com。

引用格式: 杜鑫, 傅国辉, 褚会超, 等. 铁尾矿特性分析及其利用技术现状和展望[J]. 中国矿业, 2024, 33(2): 115-124.

DU Xin, FU Guohui, CHU Huichao, et al. Characteristics analysis of iron tailings and current status and prospects of its utilization technology[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(2): 115-124.

and particle size. Then, the current status of iron tailings application technology is summarized from two aspects: bulk utilization and high-value application. The bulk utilization technology of iron tailings includes tailings re-selection and preparation of building materials, among which tailings re-selection mainly focuses on extracting iron concentrate, valuable metal elements, and high-quality non-metallic minerals. When iron tailings are used as building materials, their application directions can be summarized as cementitious materials, sintered building materials, and melted materials. High value applications mainly focus on the preparation of functional non-metallic mineral materials. The development of new technologies such as mineral processing technology, equipment, and artificial intelligence plays an important role in improving the quality of tailings. At the same time as improving the quality of iron tailings upstream, through collaborative research between upstream and downstream of the industrial chain, targeted application research will be conducted based on the differences in the characteristics of iron tailings discharged by different sorting processes, which is expected to truly solve the problem of low utilization of high added value of iron tailings.

**Keywords:** iron tailings; solid waste treatment; mineral material; resource utilization; reduction

## 0 引言

矿山尾矿是矿石开采和加工过程中,产生的含有用目标组分较低或无经济价值的部分<sup>[1]</sup>。2010—2020年,全球采矿业累计生产的尾矿量从140.0亿t增加到222.6亿t<sup>[2]</sup>。我国现有尾矿库超12 000座,尾矿堆存量超200亿t,主要来源于黑色金属矿采选业和有色金属矿采选业,包括铁尾矿、铜尾矿和其他有色金属尾矿。尾矿库占用大量土地<sup>[3]</sup>,堆存过程中产生的废水、废气不仅会持续污染环境<sup>[4-5]</sup>,而且有溃坝危险<sup>[6-7]</sup>,尾矿堆存在空间上和时间上都对社会造成巨大的负面压力。近年来,我国很多地区已停止新尾矿库的规划建设,矿山企业正面临着“一库难求”、尾矿无处可排被迫停产的严峻形式。

我国是世界第一大钢铁生产国和消费国,铁矿石进口量长期占需求量的百分之八十左右,始终面临着铁矿石供给对外依存度高的问题。未来一段时间内,要突破原料供给壁垒,迅速增加自给产能,必然会导致更多铁尾矿的产生<sup>[8]</sup>。目前,我国铁尾矿的累积量已达到60亿t<sup>[9]</sup>,各地区企业和高校在铁尾矿源头减量化、资源化、无害化方面进行了多方向的研究攻关,取得了显著的科研成果及技术转化生产储备<sup>[10-11]</sup>。但是,我国铁尾矿的综合利用率仍在20%左右,距离我国尾矿综合利用率的平均水平32.7%,以及2021年国家发展和改革委员会在《“十四五”循环经济发展规划》中提出的大宗固废60%利用率目标有较大距离。此外,我国在铁尾矿资源化利用方面还存在着产品附加值不高等问题。因此,未来很长一段时期内,铁尾矿的综合处理仍将是我国矿山尾矿处理的重点问题。

本文分析了铁尾矿与其他矿山尾矿的特性差异,以及不同分选工艺阶段排放铁尾矿的特性差异。从

大宗利用和高值化利用两个角度,对铁尾矿现有的利用技术进行了梳理。从下游应用角度对铁尾矿高值化利用的难点进行了分析,同时对先进技术的发展对于提高铁尾矿原料品质的影响进行了展望,旨在为铁尾矿及其他矿山尾矿的高值化利用提供借鉴。

## 1 我国不同地区矿山尾矿特点

我国幅员辽阔,不同地区的矿山尾矿在矿物组分和化学成分上有较大差异。根据相关统计,2021年我国尾矿产量为13.08亿t,其中,铁尾矿5.43亿t,铜尾矿3.31亿t。辽宁鞍本地区、河北地区以及四川攀枝花地区为我国铁矿资源储量及产量较大的地区。**表1**为我国上述地区铁尾矿以及国内其他典型尾矿的主要元素含量情况。与其他尾矿相比,铁尾矿具有硅含量高、铁含量高的特点。辽宁鞍本地区为我国铁矿石储量最丰富的地区,其铁尾矿中硅以石英为主,且有害金属含量低。四川省攀枝花地区是国内第二大铁矿区,铁尾矿中硅含量相对较低,但铁元素和钛元素含量相对较高。

除元素组成及矿物组分随地域差异变化外,不同分选工艺段排出的铁尾矿在粒度和成分上同样存在较大差异。我国铁矿石通常需要经过磁选、重选、浮选以及再选等联合工艺进行分步分选,因此,在不同工艺阶段排出的尾矿在性质上也有较大差异。**表2**为我国鞍山地区某选矿厂不同工艺阶段排放铁尾矿的粒度组成和主要元素含量。由**表2**可知,重选工艺阶段排出的铁尾矿粒度相对较粗, $D_{50}$ 可以达到105.46  $\mu\text{m}$ 。强磁铁尾矿和再选铁尾矿粒度最细,一般达到38  $\mu\text{m}$ 以下,有部分相对较粗的颗粒可以达到100  $\mu\text{m}$ 以上。在化学成分方面,浮选铁尾矿和重选铁尾矿的铁含量较高,达到14%~20%,相应的二

表1 我国不同地区和类型尾矿主要元素含量特征

Table 1 Characteristics of main element content in tailings of different regions and types in China

尾矿类型	产地	主要组成元素含量				有价金属	
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TFe	其他
铁尾矿	鞍山市 <sup>[12]</sup>	79.05	1.84	0.34	1.17	10.54	—
铁尾矿	河北省 <sup>[13]</sup>	80.00	4.10	2.01	1.98	5.41	—
铁尾矿	四川省 <sup>[14]</sup>	38.93	10.75	5.46	11.04	14.64	4.81(TiO <sub>2</sub> )
铜尾矿	江西省 <sup>[15]</sup>	66.65	14.49	3.52	2.08	3.80	0.059(Cu)
粉煤灰	内蒙古自治区 <sup>[16]</sup>	34.87	50.97	2.25	0.13	1.91	—
煤矸石	内蒙古自治区 <sup>[17]</sup>	36.90	38.98	0.00	0.03	0.33	—

单位: wt%

氧化硅含量较低。强磁铁尾矿以及再选铁尾矿中的铁含量较低,一般低于10%,相应的二氧化硅含量可以达到80%左右。因此,在实际应用中,应根据不同应用领域对原料粒度和成分的要求,选择不同工艺阶段的尾矿进行利用。

表2 鞍山地区选矿厂不同工艺阶段排放铁尾矿粒度和组分分析

Table 2 Particle size and component analysis of iron tailings at different process stages in Anshan District

分选工艺阶段尾矿	粒度/ $\mu\text{m}$			主要成分/(wt%)	
	D10	D50	D90	TFe	SiO <sub>2</sub>
浮选铁尾矿	12.32	57.17	134.72	14~18	72
重选铁尾矿	12.29	105.46	234.55	15~20	70
强磁铁尾矿	3.12	36.24	113.82	7~9	81
再选铁尾矿	4.61	32.10	116.36	9~11	78

## 2 铁尾矿大宗利用技术现状

目前,铁尾矿大宗利用的方向主要为尾矿再选和制备建筑材料。尾矿再选通常以提取合格的铁精矿、贵金属和优质非金属矿物为主。根据制备工艺的不同,以铁尾矿为原料,制备的建筑材料可以分为胶结型建材、烧结型建材以及熔制型材料等。

### 2.1 尾矿再选

铁尾矿的成分主要包括SiO<sub>2</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、MgO和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,部分区域尾矿中还含有少量的Co、Cu、Ni等有色金属以及稀土元素。通过相应的再选技术对铁尾矿中的金属矿或非金属矿进行回收再利用,不仅可以提高资源利用率,还可以为企业创造更多的经济增长点。

1)回收铁精矿。近年来,我国利用重选、磁选、浮选等常规方法的联合工艺进行了多项铁尾矿再选研究,典型的回收铁精矿工艺及精矿指标见表3。李彩霞等<sup>[18]</sup>通过磨矿-强磁选-弱磁选-反浮选工艺,获得了全铁品位63.83%、回收率55.32%的铁精矿。于汉晟等<sup>[19]</sup>对岚县田野铁尾矿进行了再磨再选试验,

采用永磁强磁选预富集、弱磁选-磨矿-弱磁选-反浮选流程回收强磁性矿物,获得了铁品位64.61%的铁精矿。刘兴全等<sup>[20]</sup>对某厂贫磁铁尾矿进行了铁回收试验,采用2次磁选-1粗1精3扫闭路反浮选流程,获得了品位65.43%、金属回收率14.80%的精矿。

表3 我国铁尾矿再选提取铁精矿工艺及精矿指标

Table 3 Process and concentrate indicators for the re-selection and extraction of iron concentrate from iron tailings in China

再选工艺	再选精矿		文献
	TFe/(wt%)	回收率/%	
磨矿-强磁选-弱磁选-反浮选	63.83	55.32	[18]
弱磁选-磨矿-弱磁选-反浮选	64.61	—	[19]
磁选-反浮选	65.43	14.80	[20]
悬浮磁化焙烧-磁选工艺	65.01	89.07	[21]
悬浮磁化焙烧-磨矿-磁选	61.50	93.32	[22]

依靠传统选矿工艺回收铁精矿时,存在着回收率较低的问题。磁化焙烧工艺可以将弱磁性赤铁矿和菱铁矿转化为强磁性磁铁矿,有效解决铁回收率低的问题。这项创新技术是回收难选铁矿石的一次重大飞跃,但磁化焙烧需要在高温和还原气氛下进行,操作成本相对较高。随着悬浮磁化焙烧、微波还原以及磁选等新技术对能耗、成本和分选效果的不断优化,磁化焙烧将有望更多地应用于铁尾矿再选的实际生产中。

2)回收有价金属。由于铁尾矿中有价金属、稀贵金属等有价成分稀缺且价值较高,相应的回收技术也发展较快。ZHAI等<sup>[23]</sup>从基础研究到工业应用,系统探讨了尾矿中钛资源的综合回收,采用“脱硫-一次粗选-三精”的工艺流程,获得产率26.62%、品位47.25%、回收率68.89%的钛精矿,在工业调试后,获得了总产量14.56万t、品位47.02%的钛精矿。夏青等<sup>[24]</sup>利用浮选法从某磁铁尾矿中获得了含钼46.89%、回收率68.96%的钼精矿和含锌45.30%、回收率66.64%的锌精矿。随着生态环保要求的提高,

部分研究者利用绿色、经济、安全的生物浸出法实现了对铁尾矿中有价金属的提取。孟志强等<sup>[25]</sup>公开了一种利用黑曲霉菌从铁尾矿中提取钴的微生物浸出方法,具有分离效率高、分离精度高、资金投入少和操作成本低等优点。

3)回收非金属矿。铁尾矿中的主要矿物组分一般以非金属矿物为主。随着科技的发展,非金属矿凭借在高科技领域中独特的应用性能,其资源价值获得了越来越多的认可。GIRI等<sup>[26]</sup>在某铁尾矿回收铁后产生的废石中发现,酸不溶性残留物为高岭石,该类非金属矿物资源具有较大表面积,有望在废水处理中大规模应用。LI等<sup>[27]</sup>采用超导高梯度磁选机,从一种高硅型铁尾矿中提取石英, SiO<sub>2</sub>品位可达 98.56±0.13%,经过进一步酸浸处理后,精矿纯度可以达到 99.92±0.01%。

## 2.2 建筑材料

根据制备工艺的不同,铁尾矿应用于建筑材料时可以分为三大类:①胶结型建筑材料,包括混凝土掺合料、机制砂、路基建筑用石料以及地质聚合物等;②烧结型建筑材料,主要有水泥、陶瓷以及建筑用砖等;③熔制型建筑材料,包括微晶玻璃和熔融玻璃等。其中,制备胶结型建筑材料和烧结型建筑材料都是铁尾矿大宗消纳的主要方向。得益于绿色低碳的生产工艺,利用矿山尾矿制备地聚物类建筑材料已成为近年来尾矿利用的研究热点。

### 2.2.1 胶结型建筑材料

1)传统胶结型建筑材料。我国基建事业发展快,体量大,基建用混凝土对砂石料的需求强劲。铁尾矿因化学组分及矿物组成与混凝土用砂相似,可直接作为机制砂代替天然砂用于混凝土的细骨料<sup>[28]</sup>。粒度是铁尾矿用做混凝土细骨料的主要指标。粒度大于 0.6 mm 的铁尾矿可直接满足混凝土用砂的需求,因此,用于混凝土的铁尾矿主要为采场围岩、采场磁选抛出尾矿以及磨矿工艺之前预抛出的粗粒级尾矿。

-0.6 mm 级细粒尾矿主要来源于多次解离-分选工艺后的尾矿,是铁尾矿综合利用的难点。如何将细粒级铁尾矿掺入混凝土中发挥特殊的作用成为近年来研究的热点。胡新军等<sup>[29]</sup>研究了粒度在-0.600~+0.075 mm、含量为 83.7% 的铁尾矿对制备 C30 型混凝土和 C50 型混凝土的影响,与基准混凝土相比,掺有铁尾矿的混凝土力学性能高、弹性模量大,干燥收缩性能好。对铁尾矿进行改性处理,可以进一步提高其在混凝土中的应用性能。王荣林等<sup>[30]</sup>将铁尾矿微粉放入球磨机,进一步研磨至 45 μm 筛余量为

17.7%,同时通过在研磨过程中加入表面活性剂和碱性激发剂对其进行改性处理,使得改性铁尾矿微粉在掺量为掺合料总量的 40%~60% 时,可替代粉煤灰应用于中高强混凝土中。

将铁尾矿制备成胶凝材料,用于矿山采空区充填是目前最大程度消纳铁尾矿的途径。山东科技大学提出的尾矿“粗粒制砂-细粒充填”分级分质利用技术,通过粗粒尾矿分级回收、微细粒尾矿膏体浓缩、微细粒膏体尾矿胶结充填及其流变特性研究,实现低品位铁矿山的无尾排放,年增经济效益 2 000 万元以上。为了提高铁尾矿在充填用胶结材料中的掺量,多数研究者将铁尾矿与多源固废进行相容性研究,通过化学和机械活化等方式激发铁尾矿的潜在活性。海龙等<sup>[31]</sup>进行了粉煤灰改良铁尾矿膏体充填材料试验研究,研究表明,掺入粉煤灰可以提升膏体充填材料流动性和强度。

将铁尾矿与其他固废协同处理,还可以应用于公路软土地基处理。该方法不仅可以消耗大量的铁尾矿,减轻对生态环境的影响,还可以降低道路工程造价,节约工程建设成本。目前,我国铁尾矿作为道路建筑材料仍处于起步阶段,主要应用形式有铁尾矿基胶凝材料软土改良体、固化铁尾矿砂复合路基和铁尾矿砂垫层等<sup>[32]</sup>。王文杰<sup>[33]</sup>制备了不同掺量的水泥铁尾矿碎石混合料,研究其适用性,结果表明,当铁尾矿掺量为 25% 时,制备的水泥稳定碎石可用于重载交通基层。

2)新型地质聚合物材料。地质聚合物是一种新型的无机聚合物型材料。凭借绿色低碳的制备工艺,利用铁尾矿制备地质聚合物材料迅速成为当前的研究热点<sup>[34-35]</sup>。地质聚合过程可以简单地概括为固体铝硅酸盐矿物与高浓度的氢氧化钠水溶液或硅酸盐溶液间发生的溶解-缩聚反应,其反应机理如图 1 所示。以硅铝酸盐为主要成分的尾矿,首先在强碱的作用下发生部分溶解,形成硅胶-氧化铝低聚物,然后进行缩聚,并在缩聚过程中与其他未溶解的固体材料形成牢固的键合,最终形成稳定的无机材料。该材料由 AlO<sub>4</sub> 和 SiO<sub>4</sub> 四面体结构单元组成三维立体网状结构,具有优良的机械性能、耐酸碱及耐高温性能,可完全代替传统的建筑材料。

利用尾矿制备地质聚合物材料时,主要问题为原料中的硅和铝以结晶度较高的晶体矿物形式存在,导致其在碱性条件下溶解度较低<sup>[36]</sup>。为了提高尾矿的反应性,常通过机械活化、热活化和碱性熔合等方法对原料进行预处理,进而达到降低反应凝结时间,提高制品机械强度等目的<sup>[37]</sup>。

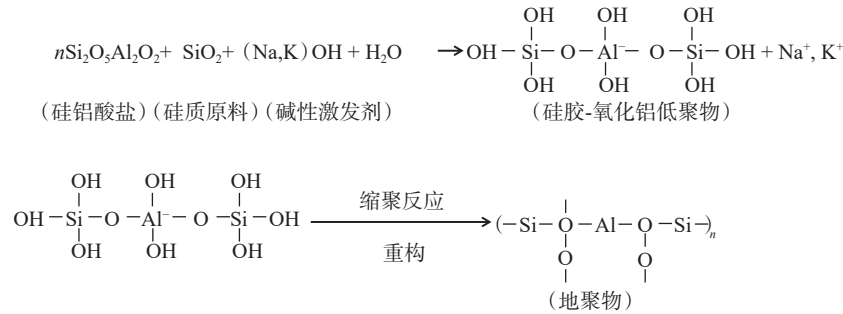


图1 地质聚合物合成机理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of mechanism of geopolymer synthesis

### 2.2.2 烧结型建筑材料

1) 建筑用砖。目前,国内在利用铁尾矿生产传统建筑砖方面已进入工业化阶段,研究热点向制备具有强度高、轻质以及多孔性能的功能性材料为主,例如轻质保温砖、蒸压砖、免烧砖、仿古砖等建筑装饰面砖。代文彬等<sup>[38]</sup>以金属尾矿(铁尾矿和铝尾矿)为骨料,以水泥和粉煤灰为胶凝材料,在掺入群青颜料后,实现了蒸养砖的仿古青色化效果。刘俊杰等<sup>[39]</sup>以包头某铁尾矿为原料制备了轻质免烧砖,7 d的抗压强度可以达到12.14 MPa,满足《烧结普通砖》(GB 5101—2003)中MU10砖的强度等级要求。

2) 水泥熟料。由于铁尾矿的化学特性和矿物特性,将价格低廉的铁尾矿作为制备水泥的原料,不仅可以降低碳排放,还可以降低生产成本,带来巨大的经济效益。罗力等<sup>[40]</sup>以某铁尾矿、石灰石为原料制备硅酸盐水泥熟料,经1350℃烧结制备的硅酸盐水泥,其物理性能可以满足42.5水泥强度等级。史伟等<sup>[41]</sup>在利用铁尾矿制备水泥过程中,铁尾矿的添加量达到39.1%,制得的贝利特水泥3 d、28 d的强度指标达到了PI42.5R水泥的要求。铁尾矿不仅可以同时提供传统水泥所需的黏土矿物和铁质矿物,其独特的资源特性还可以产生特殊的应用性能。赵武魁等<sup>[42]</sup>在研究中发现,利用铁尾矿取代砂岩及部分钢渣进行生料配料生产熟料,不仅可以改善生料易磨性和易烧性,还可以降低生产成本和熟料中六价铬含量。王宏霞等<sup>[43]</sup>的研究表明,铁尾矿取代铁粉煅烧水泥熟料,有助于熟料矿相发育,使熟料具有较高的水化活性,其强度超过铁粉配制的水泥。

### 2.2.3 熔制型材料

铁尾矿中的SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO等是制备微晶玻璃的主要成分,通过高温熔融的方式,可以直接将铁尾矿制备成玻璃类材料。随着铁尾矿制备微晶玻璃工艺逐渐成熟,近年来的相关研究同样以提高材料的功能性为主,因此,微晶玻璃同样为利用矿山尾矿制备高附加值材料的重点方向之一<sup>[44-45]</sup>。南宁等<sup>[46]</sup>以

铁尾矿为主要原料,采用烧结法制备的微晶玻璃抗压强度达到158.32 MPa,密度为2.74 g/cm<sup>3</sup>,热膨胀系数为6.8×10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup>。曹月明等<sup>[47]</sup>利用高镁质铁尾矿制备出以镁橄榄石透辉石为主晶相的微晶玻璃,该类微晶玻璃不仅体现出良好的机械性能,而且具有较好的耐酸碱性。

## 3 铁尾矿高值化利用技术现状

铁尾矿以非金属矿物为主,通过特定的制备工艺制备具有一定特性功能的矿物材料,成为近年来探索较多的尾矿高值化利用方向,例如多孔材料、功能性填料、功能性陶瓷以及土壤修复等。

### 3.1 制备多孔材料

由于铁尾矿具有硅含量高的特性,以铁尾矿为硅源,替代硅酸钠、正硅酸乙酯等纯化工原料,可以制备具有特殊孔道结构的多孔材料,包括介孔二氧化硅和纳米孔材料等<sup>[48]</sup>。以多孔材料为载体,可以进一步制备出具有特殊吸附、捕收或催化性能的高附加值功能性材料。YU等<sup>[49]</sup>以铁尾矿为硅源,十六烷基三甲基溴化铵为模板,合成了MCM-41型分子筛,比表面积达到527 m<sup>2</sup>/g,孔径为2.65 nm。HAN等<sup>[9]</sup>通过碱熔工艺破坏铁尾矿中硅酸盐矿物的晶体结构,成功地将铁尾矿转化为介孔二氧化硅材料。ZHANG等<sup>[50]</sup>以高硅铁尾矿为原料,通过水热无模板法合成了A型沸石多孔材料,并研究了制备最佳离子交换性能材料的合成工艺。DONG等<sup>[51]</sup>通过一步水热法从铁尾矿中制备了介孔硅酸锌复合材料,复合材料中存在明显的介孔和特殊的层状结构,表现出优异的吸附性能。

与常用纯化工硅基原材料相比,铁尾矿中含有丰富的铁元素组分。通过对铁尾矿中的铁源进行综合利用设计,对载体表面进行改性及修饰,可制备具有不同吸附特性或催化性能的功能性分子筛,用于吸附-催化污染物的降解<sup>[52]</sup>。许小东<sup>[53]</sup>以铁尾矿为硅源分别制备了SBA-15和Fe-SBA-15两种介孔分子筛,两者均对常见水系污染物展现出良好的吸附能力。LI等<sup>[54]</sup>

利用铁尾矿作为铁和硅的来源制备了 Fe-MCM-41 分子筛,结果表明,除去模板后, MCM-41 的骨架中加入了  $\text{Fe}^{3+}$  离子,形成了四面体。从铁尾矿中提取的 Fe-MCM-41 被证实可在可见光照射下具有显著的吸附能力和较高的光催化活性。

### 3.2 制备功能性填料

铁尾矿具有粒度细的特点,粒度一般可以达到  $-45\ \mu\text{m}$  级。经过再磨再回收工艺处理的尾矿,粒度可达微米级。由于具有高硅的特性,可以通过化学法作为制备白炭黑的硅源。张明熹等<sup>[55]</sup>以  $\text{SiO}_2$  含量 64.35% 的铁尾矿为原料成功制备了准球形纳米级白炭黑,  $\text{SiO}_2$  的回收率可达 97.41%。于洪浩等<sup>[56]</sup>以铁尾矿和 NaOH 为原料,利用化学沉淀法成功制备了  $\text{SiO}_2$  纯度为 92.3% 的无定型白炭黑,其他物化指标均达到了行业标准。通过纯化-改性处理,可用于高密度聚乙烯复合填充料、环氧树脂和聚丙烯复合材料用填料以及建筑涂料用填料等。

### 3.3 制备功能性陶瓷

以铁尾矿为原料,通过复配其他无机非金属材料,可以制备出具有特殊性能的功能陶瓷材料,例如具有过滤吸附性能的陶瓷、具有催化降解功能陶瓷、相变储热陶瓷以及泡沫陶瓷等。李泽华等<sup>[57]</sup>利用铁尾矿与多种矿山固体废物协同制备发泡陶瓷,得到最优产品的体积膨胀率为 36.2%、显气孔率为 53.4%。代卫丽等<sup>[58]</sup>利用商洛地区铁尾矿中富镁、富钙的特性,采用常压烧结法制备的莫来石-石英复相陶瓷,气孔率为 26.1%,抗压强度为 156.3 MPa。

### 3.4 生态修复

将粒度较细的铁尾矿应用于矿山修复及土壤改良,已逐步成为尾矿高值化应用的新方向。首先,铁尾矿因其特有的理化性质,在用作土壤改良剂时,可以在改善土壤结构、提高土壤透气透水性方面体现出特殊的效果。其次,铁尾矿中含有的 Si、Mg、K、Fe、P 等(中)微量有益元素,有利于植物生长,铁尾矿中的硅酸盐矿物还可用作固化和稳定土壤中的重金属元素。鞍钢集团矿业有限公司利用铁尾矿在我国东北地区盐碱地改良研究中获得了较好的应用<sup>[59]</sup>。徐庆荣等<sup>[60]</sup>以铁尾矿和水中污泥为原料,对内蒙古荒漠化草原矿区地表进行修复,解决了表土不足的问题。

## 4 铁尾矿综合利用问题及未来发展展望

### 4.1 铁尾矿综合利用的难点分析

由于尾矿再选会产生几乎等量的次生尾矿,无法直接解决尾矿堆存问题,因此,铁尾矿的消纳利用途径最终均指向制备非金属矿物材料。非金属矿物

材料不仅是大宗建筑材料的原料,也是支撑现代高温、高压、高速工业等高新技术产业发展的原辅材料和多功能材料<sup>[61]</sup>。非金属矿物材料不仅对原料的纯度有一定的要求,同时对其粒度、形貌、孔隙结构以及表面或界面特性等性质均有特定的要求<sup>[62]</sup>。纯度越高,粒度分配越好,形貌更规则以及表面性质更稳定的非金属矿原料,其价格在销售中会呈指数型增长。利用铁尾矿制备非金属矿物材料的成本和价值将直接决定铁尾矿综合利用的可行性。表 4 概括了目前铁尾矿可制备相应产品的市场价格情况。由表 4 可知,与传统的制砖用黏土以及砂石骨料等大宗利用途径相比,将铁尾矿加工制备成具有不同功能的矿物材料,可以大大提高其经济价值。此外,产品的功能性越优越,市场价格越高。以制备高纯石英为例,普通玻璃用石英砂( $\text{SiO}_2$  含量 98%~99%)价格在 200 元/t 左右,当纯度达到 99.9% 以上时,价格可以达到上千元。

表 4 铁尾矿制备产品市场价格

Table 4 Market price of preparation products of iron tailings

产品	价格/(元/t)
砖原料	20~40
砂石骨料	80~120
石英	200~2 000
玻璃-陶瓷	300~2 000
多孔材料	2 000~8 000
填料	4 500~6 000

由于我国在非金属矿物材料深加工方向的科研发展起步较晚,人们对非金属矿物资源的认识较少。以在高附加值应用中扮演着重要角色的石墨、石英为例,因技术门槛高,相关资源的应用仍主要集中在低端产品中竞争。在尾矿综合利用方式的长期探索中,由于对尾矿制备非金属矿物材料的基础理论、资源特点、技术要求和产品开发及市场、生产设备工艺等方面情形了解较少,从开采到加工都未能从“有用资源”的角度去保护原始矿物中的非金属矿物资源。因此,有必要根据下游的应用要求,尽可能从源头设计生产工艺,保护矿物中非金属矿物的资源特性,为下游应用提供高品质的非金属矿物原料。

### 4.2 铁尾矿综合利用的发展展望

由于我国的铁矿资源长期存在着品位低、嵌布粒度较细的问题,加工过程中通常需要将粒度研磨至  $38\ \mu\text{m}$  以下才能得到有效解离。随着物料被反复研磨,原矿中的非金属矿物首先会因粒度过细无法满足部分应用要求;同时,铁质以及其他研磨介质等

元素,在强烈的机械化学作用下,与非金属矿物表面发生吸附浸染,进而使矿物表面特性发生变化,同样会影响下一步的综合利用。在选矿加工过程中,通过改变选别工艺,尽可能在常规分选工艺前端将矿物中非金属矿物组分的品质进行控制并分离,将有助于提高尾矿的综合应用价值。

随着选矿技术向低能耗、精细化的方向发展,以高压辊破碎解离为代表的高效破碎技术,使矿物在解离过程中更多沿矿物晶界或缺陷部位优先解离,不仅降低能耗节约成本,同时可以改善磨矿对非金属矿物的过度研磨问题<sup>[63-64]</sup>。磁选粗精矿再磨等新工艺的发展以及磨矿介质的不断优化,同样对保护金属矿产中非金属矿物的物料特性起到积极作用。以旋流器、弛张筛以及高梯度磁选<sup>[65]</sup>等为代表的精细分级分选工艺技术可以使不同性质的物料更高效地得到分离,减少后续工艺处理量的同时,使尾矿中的非金属矿物资源更具有市场价值。

智能识别和人工智能等前沿技术的快速发展,同样对提高尾矿中非金属矿物组分的品质产生了积极影响<sup>[66]</sup>。图2为基于智能识别和大数据计算进行选矿作业的示意图。由图2可知,通过对单个颗粒的识别及分离,可以更精确地实现有用矿物与沸石的分离,在实现抛尾的同时,避免了沸石因进入选矿系统而破坏其矿物资源特性。酒钢镜铁山桦树沟块矿采用的智能预选抛废工艺,可以将采矿中混入的13%围岩尽数选出,围岩抛出率99%,抛废尾矿品位9.85%<sup>[67]</sup>。安徽霍邱环山铁矿引入的智能光电分选机,让矿石进入后续磨矿与选别流程前的抛废比达到15%~30%,提前排废不仅减少了磨矿与选别作业量,而且预抛出的废石硬度更大,可以作为砂石骨料售卖,对尾矿的综合利用起到关键性作用。

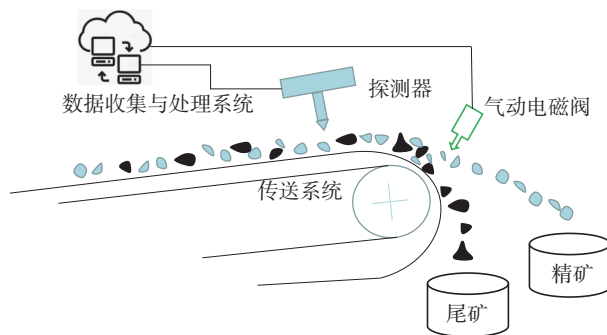


图2 智能选矿作业原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of intelligent mineral processing

## 5 结论

基于我国铁尾矿资源特性、开发利用技术现状以及面临的难点,要实现矿山尾矿的综合、高效利用,

有必要从以下几个方面综合施策。

1)从采选源头保护好非金属矿物的资源特性,将是现代化选矿尾矿综合处理的首要难题。精细化、智能化选矿是最大程度保留金属矿中非金属矿物资源特性的利器。高压辊磨、高压脉冲等高效的解离工艺,以光电智能分选为代表的预先抛废工艺等都将有助于尽可能把大多数非金属矿物资源在研磨工艺前抛出,最大程度保护其非金属矿物资源的原始特性。

2)根据不同分选工艺排放铁尾矿的特性差异,针对性地进行应用研究,使尾矿中不同的非金属矿物资源能够真正实现物尽其用、变废为宝。

3)加大尾矿中非金属矿物资源的应用研究。通过产业链上下游协同攻关、统筹规划、协同优化,充分利用矿物资源,支撑我国能源结构、产业结构升级转型。

## 参考文献(References):

- [1] 顾晓薇,艾莹莹,赵昀奇,等.铁尾矿资源化利用现状[J/OL].中国有色金属学报:1-29[2024-01-29].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1238.TG.20220112.1844.002.html>.  
GU Xiaowei, AI Yingying, ZHAO Yunqi, et al. Status quo of resource utilization of iron ore tailings[J/OL]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals: 1-29[2024-01-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1238.TG.20220112.1844.002.html>.
- [2] HAN X Y, WANG F, ZHAO Y, et al. Recycling of iron ore tailings into magnetic nanoparticles and nanoporous materials for the remediation of water, air and soil: a review[J]. Environmental Chemistry Letters, 2022, 21(2): 1005-1028.
- [3] NOYD R K, PFLEGER F L, NORLAND M R, et al. Native plant productivity and litter decomposition in reclamation of taconite iron ore tailing[J]. Journal of Environment Quality, 1997, 26(3): 682-687.
- [4] GRILO C F, CHASSAGNE C, QUARESMA V D S, et al. The role of charge reversal of iron ore tailing sludge on the flocculation tendency of sediments in marine environment[J]. Applied Geochemistry, 2020, 117: 104606.
- [5] NIE Y N, ZHANG A X, GAO Y, et al. Chemical speciation of heavy metals in particle-size fractions of iron tailings in Miyun reservoir of Beijing[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 38(8): 87-93, 100.
- [6] EBD A, MAN B, FBDO B, et al. Trace metals in Rio Doce sediments before and after the collapse of the Fundo iron ore tailing dam, Southeastern Brazil[J]. Chemosphere, 2021, 262: 127879.
- [7] VALERIANO C D M, NEUMANN R, ALKMIM A R, et al. Sm-Nd and Sr isotope fingerprinting of iron mining tailing deposits spilled from the failed SAMARCO Fundo dam 2015 accident at Mariana, SE-Brazil-ScienceDirect[J]. Applied Geochemistry, 2019(106): 34-44.
- [8] LEONG Y K. Controlling the rheology of iron ore slurries and tailings with surface chemistry for enhanced beneficiation performance

- and output, reduced pumping cost and safer tailings storage in dam-science[J]. *Minerals Engineering*, 2021, 166(1): 106874.
- [ 9 ] HAN X Y, WANG Y P, ZHANG N, et al. Facile synthesis of mesoporous silica derived from iron ore tailings for efficient adsorption of methylene blue[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021, 617(5): 126391.
- [ 10 ] MALTSEV Y, MALTSEVA S, MALTSEVA I. Diversity of cyanobacteria and algae during primary succession in iron ore tailing dumps[J]. *Microbial Ecology*, 2022, 83: 408-423.
- [ 11 ] LI S, WU J L, HUO Y L, et al. Profiling multiple heavy metal contamination and bacterial communities surrounding an iron tailing pond in Northwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 752(2): 141827.
- [ 12 ] 杨晓峰, 苏兴强, 张廷东. 鞍山铁尾矿特性及综合利用前景[J]. *矿业工程*, 2008, 6(5): 47-49.  
YANG Xiaofeng, SU Xingqiang, ZHANG Tingdong. Features of Anshan iron ore tailings and future of their comprehensive utilization[J]. *Mining Engineering*, 2008, 6(5): 47-49.
- [ 13 ] 王海霞, 来有邦, 张朔. 某选厂铁尾矿综合利用试验研究[J]. *现代矿业*, 2022, 38(1): 176-178.  
WANG Haixia, LAI Youbang, ZHANG Shuo. Experimental study on comprehensive utilization of iron tailings in a concentrator[J]. *Modern Mining*, 2022, 38(1): 176-178.
- [ 14 ] 宁娅娟. 攀枝花白马铁尾矿选钛工艺研究[J]. *金属矿山*, 2013(12): 61-65, 69.  
NING Yajuan. Titanium concentration from Baima iron tailing in Panzhihua[J]. *Metal Mine*, 2013(12): 61-65, 69.
- [ 15 ] 张兆阳. 德兴铜矿尾矿中铜硫组分的开发利用[J]. *矿业快报*, 2008(12): 103-104.  
ZHANG Zhaoyang. Development and utilization of copper sulfur components in tailings of Dexing Copper Mine[J]. *Express Information of Mining Industry*, 2008(12): 103-104.
- [ 16 ] 李文清, 邹萍, 池君洲, 等. 用盐酸从循环流化床粉煤灰中浸出氧化铝[J]. *湿法冶金*, 2020, 39(2): 110-113.  
LI Wenqing, ZOU Ping, CHI Junzhou, et al. Leaching of aluminum from circulating fluidized bed fly ash using hydrochloric acid[J]. *Hydrometallurgy of China*, 2020, 39(2): 110-113.
- [ 17 ] 贾敏. 煤矸石综合利用研究进展[J]. *矿产保护与利用*, 2019, 39(4): 46-52.  
JIA Min. The current situation research on comprehensive utilization of Coal Gangue[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2019, 39(4): 46-52.
- [ 18 ] 李彩霞, 刘桂祺, 徐铜林, 等. 高硅型铁尾矿选矿试验研究[J]. *非金属矿*, 2021, 44(2): 68-71.  
LI Caixia, LIU Guiqi, XU Tonglin, et al. Experimental study on beneficiation and purification of high silicon iron tailings[J]. *Non-Metallic Mines*, 2021, 44(2): 68-71.
- [ 19 ] 于汉晟, 徐建红, 许俊. 岚县田野铁矿尾矿回收再磨再选试验研究[J]. *现代矿业*, 2021, 37(2): 123-127.  
YU Hansheng, XU Jianhong, XU Jun. Experimental study on recovery, grinding and reparation of iron ore tailings in Lanxian Field[J]. *Modern Mining*, 2021, 37(2): 123-127.
- [ 20 ] 刘兴全, 陈小艳, 孙景新, 等. 某贫磁铁矿尾矿再选工艺研究[J]. *现代矿业*, 2020, 36(9): 148-149, 169.  
LIU Xingquan, CHEN Xiaoyan, SUN Jingxin, et al. Study on process for reconcentration of lean magnetite tailings[J]. *Modern Mining*, 2020, 36(9): 148-149, 169.
- [ 21 ] YUAN S, ZHOU W T, HAN Y X, et al. Efficient enrichment of iron concentrate from iron tailings via suspension magnetization roasting and magnetic separation[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2020, 22(1): 1152-1162.
- [ 22 ] QIU G Q, NING X A, SHEN J H, et al. Recovery of iron from iron tailings by suspension magnetization roasting with biomass-derived pyrolytic gas[J]. *Waste Management*, 2023, 156: 255-263.
- [ 23 ] ZHAI J H, WANG H B, CHEN P, et al. Recycling of iron and titanium resources from early tailings: from fundamental work to industrial application[J]. *Chemosphere*, 2020, 242: 125178.
- [ 24 ] 夏青, 梁治安, 杨秀丽, 等. 某选铁尾矿中低品位铜, 锌分选回收试验研究[J]. *有色金属工程*, 2020, 10(5): 81-88.  
XIA Qing, LIANG Zhian, YANG Xiuli, et al. Experimental research on separation and recovery of low-grade molybdenum and zinc from an iron ore dressing tailings[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2020, 10(5): 81-88.
- [ 25 ] 孟志强, 石志祥, 孔德帅. 一种用于铁尾矿钴元素微生物浸出方法[P]. CN113201648A.
- [ 26 ] GIRI S K, DAS N N, PRADHAN G C. Magnetite powder and kaolinite derived from waste iron ore tailings for environmental applications[J]. *Powder Technology*, 2011, 214(3): 513-518.
- [ 27 ] LI Y K, LI S Q, ZHAO X, et al. Separation and purification of high-purity quartz from high-silicon iron ore tailing: an innovative strategy for comprehensive utilization of tailings resources[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, 169: 142-148.
- [ 28 ] 王成伟. 铁尾矿分级处理生产机制砂技术及工程应用[C]. 第七届全国绿色公路技术交流会, 2021.
- [ 29 ] 胡新军, 胡胜雄, 马海军, 等. 大掺量铁尾矿砂在预拌混凝土中的试验研究[J]. *建材世界*, 2023, 44(1): 8-11, 37.  
HU Xinjun, HU Shengxiong, MA Haijun, et al. Experimental study of iron-tailing sand with large content in ready-mixed concrete[J]. *The World of Building Materials*, 2023, 44(1): 8-11, 37.
- [ 30 ] 王荣林, 席雅允, 冯建, 等. 改性铁尾矿微粉对中高强混凝土性能的影响研究[J]. *矿业研究与开发*, 2023, 43(1): 32-37.  
WANG Ronglin, XI Yayun, FENG Jian, et al. Influence of modified iron tailings powder on the properties of medium and high strength concrete[J]. *Mining Research and Development*, 2023, 43(1): 32-37.
- [ 31 ] 海龙, 程同俊, 徐博, 等. 粉煤灰改良铁尾矿膏体充填材料试验研究[J]. *黄金科学技术*, 2022, 30(5): 724-732.  
HAI Long, CHENG Tongjun, XU Bo, et al. Experimental study on the paste filling material of iron tailings improved by fly ash[J]. *Gold Science and Technology*, 2022, 30(5): 724-732.
- [ 32 ] 林煜宏, 潘荣建, 兰素恋. 铁尾矿协同多源固废在公路软土地基处理中的应用[J]. *西部交通科技*, 2022(11): 87-89.  
LIN Yuhong, PAN Rongjian, LAN Sulian. The application of iron tailings collaborative multisource solid waste in soft soil foundation treatment of highway[J]. *Western China Communications Science & Technology*, 2022(11): 87-89.
- [ 33 ] 王文杰. 铁尾矿作为路面基层材料的适应性研究[J]. *山西建筑*,

- 2023, 49(2): 147-151.
- WANG Wenjie. Study on adaptability of iron tailings as pavement base material[J]. *Shanxi Architecture*, 2023, 49(2): 147-151.
- [34] DCESD K, LF D S, FDCJ M, et al. Iron ore tailing-based geopolymer containing glass wool residue: A study of mechanical and microstructural properties[J]. *Construction and Building Materials*, 2019(30): 375-385.
- [35] FRANCIS A. K, SANJAY K. SHABIBI D, et al. Utilisation of iron ore mine tailings for the production of geopolymer bricks[J]. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2016, 30(2): 92-114.
- [36] NOUREDDINE O, MOSTAFA B, TIKOU B, et al. Alkaline dissolution potential of aluminosilicate minerals for the geosynthesis of mine paste backfill[J]. *Materials Today Communications*, 2020, 24: 101221.
- [37] JIAO X K, ZHANG Y M. Thermal stability of a silica-rich vanadium tailing based geopolymer[J]. *Construction & Building Materials*, 2013, 38(1): 43-47.
- [38] 代文彬, 王晓明, 谭皓伟, 等. 铁尾矿仿古蒸养青砖的配料工艺研究[J]. *混凝土与水泥制品*, 2018(9): 47-52.
- DAI Wenbin, WANG Xiaoming, TAN Haowei, et al. Process research on batching of artificial antique grey brick with iron tailing using steam curing[J]. *China Concrete and Cement Products*, 2018(9): 47-52.
- [39] 刘俊杰, 梁珏, 曾宇, 等. 利用铁尾矿制备免烧砖的研究[J]. *矿产综合利用*, 2020(5): 136-141.
- LIU Junjie, LIANG Jue, ZENG Yu, et al. Preparation of baking-free bricks by iron tailings[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(5): 136-141.
- [40] 罗力, 张一敏, 包申旭. 利用铁尾矿制备硅酸盐水泥熟料[J]. *非金属矿*, 2016, 39(3): 50-52.
- LUO Li, ZHANG Yimin, BAO Shenxu. Utilization of iron tailings for the preparation of portland cement clinker[J]. *Non-Metallic Mines*, 2016, 39(3): 50-52.
- [41] 史伟, 张一敏, 陈铁军, 等. 用低硅铁尾矿制备贝利特水泥[J]. *金属矿山*, 2012(7): 165-168.
- SHI Wei, ZHANG Yimin, CHEN Tiejun, et al. Preparation of belite cement utilizing iron tailings with low silica content[J]. *Metal Mine*, 2012(7): 165-168.
- [42] 赵武魁, 杜平. 铁尾矿砂取代砂岩及部分钢渣煅烧熟料的实践[J]. *新世纪水泥导报*, 2021, 27(5): 26-29.
- ZHAO Wukui, DU Ping. Practice of replacing sandstone and some steel slag calcined clinker with iron tailings sand[J]. *Cement Guide for New Epoch*, 2021, 27(5): 26-29.
- [43] 王宏霞, 张文生, 叶家元. 铁尾矿替代铁粉制备硅酸盐水泥熟料的研究[C]//中国硅酸盐学会水泥分会第六届学术年会, 2016.
- [44] CHENG H, WU Y W, ZHANG H, et al. Phase, magnetism and thermal conductivity of glass ceramics from iron ore tailings[J]. *Journal of Central South University*, 2014, 21(9): 3456-3462.
- [45] 杨博宇, 张雪峰. 微波加热法制备尾矿微晶玻璃的研究[J]. *中国陶瓷*, 2018, 54(2): 63-67.
- YANG Boyu, ZHANG Xuefeng. Preparation of tailing glass-ceramics by microwave heating treatment[J]. *Chinese Ceramics*, 2018, 54(2): 63-67.
- [46] 南宁, 崔孝炜, 孙强强, 等. 铁尾矿制备微晶玻璃的研究[J]. *矿产综合利用*, 2022(3): 47-50.
- NAN Ning, CUI Xiaowei, SUN Qiangqiang, et al. Investigation on preparation of glass-ceramics with iron tailings[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022(3): 47-50.
- [47] 曹月明, 张凯熙, 葛阳阳, 等. 利用高镁质铁尾矿制备一种微晶玻璃[J]. *中国陶瓷工业*, 2022, 29(3): 22-25.
- CAO Yueming, ZHANG Kaixi, GE Yangyang, et al. Study on preparation of a glass-ceramic using high magnesium iron tailings[J]. *China Ceramic Industry*, 2022, 29(3): 22-25.
- [48] HAN X Y, WANG F, ZHAO Y, et al. Recycling of iron ore tailings into magnetic nanoparticles and nanoporous materials for the remediation of water, air and soil: a review[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2023, 21(2): 1005-1028.
- [49] YU H H, XUE X X, HUANG D W, et al. Synthesis of mesoporous silica materials(MCM-41) from iron ore tailings[J]. *Materials Research Bulletin*, 2009, 44(11): 2112-2115.
- [50] ZHANG C Q, LI S Q. Utilization of iron ore tailing for the synthesis of zeolite A by hydrothermal method[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2018, 20(3): 1605-1614.
- [51] DONG G Y, TIAN G Y, GONG L L, et al. Mesoporous zinc silicate composites derived from iron ore tailings for highly efficient dye removal: structure and morphology evolution[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2020(1): 110352.
- [52] DENG Y X, XU X D, WANG R, et al. Characterization and photocatalytic evaluation of Fe-loaded mesoporous MCM-41 prepared using iron and silicon sources extracted from iron ore tailing[J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2020, 11(4): 1491-1498.
- [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(北京), 2019.
- [54] LI X, YU H H, HE Y, et al. Synthesis of Fe-MCM-41 using iron ore tailings as the silicon and iron source[J]. *Journal of Analytical Methods in Chemistry*, 2012(15): 928720.
- [55] 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 Mingxi, LI Fengfeng, LYU Chaoxia, et al. Study on preparation of nanosilica from iron tailing[J]. *New Chemical Materials*, 2013, 41(2): 33-35.
- [56] 于洪浩, 薛向欣, 贺燕, 等. 熔盐法从铁尾矿中制取高纯白炭黑[J]. *化工学报*, 2009, 60(8): 2124-2129.
- YU Honghao, XUE Xiangxin, HE Yan, et al. Preparation of high purity precipitated silica from iron ore tailings by molten salt method[J]. *Journal of the Chemical Industry and Engineering Society of China*, 2009, 60(8): 2124-2129.
- [57] 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 Zehua, XING Jun, SUN Xiaogang, et al. Study on preparation of open-cell foamed ceramics from blast furnace slag and iron tailings[J]. *Metal Mine*, 2022(10): 238-244.
- [58] 代卫丽, 刘嘉宁, 罗帅, 等. 利用铁尾矿制备轻质莫来石复相陶瓷[J]. *非金属矿*, 2022, 45(3): 72-75, 81.
- DAI Weili, LIU Jianing, LUO Shuai, et al. Preparation of mullite multiphase ceramics using iron tailings[J]. *Non-Metallic Mines*, 2022, 45

- (3): 72-75, 81.
- [ 59 ] 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 Congxiang, LIU Runhua, LIU Shuangan, et al. Study and application of technology of improving soda saline-alkaline land with iron tailings[J]. Mining Engineering, 2016, 14(1): 39-41.
- [ 60 ] 徐庆荣, 谭辉. 利用铁尾矿对荒漠化草原矿区废弃地进行生态修复研究[J]. 现代矿业, 2022, 38(9): 24-27.  
XU Qingrong, TAN Hui. Study on ecological restoration of desertified grassland mining wasteland using iron tailings[J]. Modern Mining, 2022, 38(9): 24-27.
- [ 61 ] 郑水林. 中国非金属矿加工业发展现状[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2006(3): 3-8.  
ZHENG Shuilin. Developing status and trend on non-metallic minerals processing industry in China[J]. China Non-Metallic Mining Industry Herald, 2006(3): 3-8.
- [ 62 ] 郑水林. 非金属矿物材料的加工与应用[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2002(4): 3-7.  
ZHENG Shuilin. Processing and application of non-metallic minerals materials[J]. China Non-metallic Mining Industry Herald, 2002(4): 3-7.
- [ 63 ] 王中才, 陈兴, 韦东, 等. 高压辊磨对大冶铁矿碎磨能耗及分选的影响[J]. 矿冶工程, 2023, 43(2): 81-85.  
WANG Zhongcai, CHEN Xing, WEI Dong, et al. Influence of high pressure roller grinding on energy consumption and separation in Daye Iron Mine[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023, 43(2): 81-85.
- [ 64 ] 王中才. 金山店铁矿高压辊磨-预选试验研究[J]. 现代矿业, 2022, 38(9): 111-114.  
WANG Zhongcai. Experimental study on high pressure roller mill-preselection in Jinshandian iron mine[J]. Modern Mining, 2022, 38(9): 111-114.
- [ 65 ] 陈剑, 张春浩. SLon立环脉动高梯度磁选机在矿山尾矿综合利用中的应用[J]. 矿冶, 2020, 29(2): 85-90.  
CHEN Jian, ZHANG Chunhao. Application of SLon vertical ring and pulsating HGMS separators for comprehensive utilization of tailings[J]. Mining and Metallurgy, 2020, 29(2): 85-90.
- [ 66 ] 第旺平, 吴志虎. 智能光电选矿预选抛废技术研究及应用[J]. 有色金属(选矿部分), 2021(1): 117-121.  
DI Wangping, WU Zhihu. Preconcentration and discarding technology of intelligent photoelectric dressing equipment[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2021(1): 117-121.
- [ 67 ] 黄开伟, 陈铁军, 展仁礼, 等. 镜铁山V矿体铁矿石智能与强磁干式联合预选试验研究[J]. 金属矿山, 2022(3): 99-104.  
HUANG Kaiwei, CHEN Tiejun, ZHAN Renli, et al. Experimental research on the intelligent and high magnetic dry combined pre-selection for V-Ore body iron ore in Jingtieshan[J]. Metal Mine, 2022(3): 99-104.