

鲁银鹏, 孟郁苗, 黄小文, 等. 宁芜盆地玢岩型铁矿尾矿元素与矿物组成特征[J]. 岩矿测试, 2024, 43(2): 259-269. DOI: [10.15898/j.ykcs.202210120194](https://doi.org/10.15898/j.ykcs.202210120194).

LU Yinpeng, MENG Yumiao, HUANG Xiaowen, et al. Element and Mineral Characteristics of Tailings in the Porphyry-Type Iron Deposit from Ningwu Basin[J]. Rock and Mineral Analysis, 2024, 43(2): 259-269. DOI: [10.15898/j.ykcs.202210120194](https://doi.org/10.15898/j.ykcs.202210120194).

宁芜盆地玢岩型铁矿尾矿元素与矿物组成特征

鲁银鹏¹, 孟郁苗^{2*}, 黄小文², 王丛林³, 杨秉阳³, 谭侯铭睿², 谢欢²

(1. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059;

2. 中国科学院地球化学研究所, 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081;

3. 安徽马钢矿业资源集团南山矿业有限公司, 安徽 马鞍山 243033)

摘要: 宁芜盆地玢岩型铁矿是中国重要的铁资源来源, 其尾矿成分复杂, 而对复杂尾矿进行高效综合利用的前提是充分了解其工艺矿物学特征。本文以宁芜盆地和尚桥铁矿床尾矿样品为研究对象, 在常规 X 射线荧光光谱 (XRF)、电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS)、粉晶 X 射线衍射 (XRD) 分析的基础上, 借助综合矿物分析仪 (TIMA), 对尾矿的矿物与化学组成、元素赋存状态、矿物粒度分布、嵌布关系以及解离度和连生关系进行分析。结果表明: 尾矿的主量元素为 SiO_2 (47.18%~50.08%)、 Fe_2O_3 (15.40%~17.91%) 和 Al_2O_3 (12.12%~13.34%); 微量元素中 Cu、Zn、V 含量较高, 但均未达到其工业品位; 矿物组成主要为钠长石 (23.26%~24.58%)、赤铁矿和磁铁矿 (17.30%~21.99%) 以及石英 (15.31%~17.08%), 总体以脉石矿物为主, 金属矿物较少。Si 主要赋存于石英 (平均值为 33.89%) 与钠长石 (平均值为 33.75%) 中; Fe 主要赋存于赤铁矿和磁铁矿 (平均值为 73.56%) 中; 有害元素 S 主要赋存于黄铁矿中 (平均值为 96.86%)。尾矿粒度较细, 主要分布于 50~2000 μm ; 矿物嵌布关系较为复杂且嵌布粒度较细; 矿物解离度较低, 大部分低于 10%, 单体颗粒较少, 连生关系复杂。宁芜盆地玢岩型铁矿尾矿与中国其他类型铁矿尾矿相比, 具有高铝的特征, 黄铁矿含量相对较高。

关键词: 铁矿尾矿; 玢岩型铁矿; X 射线荧光光谱; 电感耦合等离子体质谱; 粉晶 X 射线衍射; 综合矿物分析仪; 元素赋存状态; 矿物组成

要点:

(1) 宁芜盆地玢岩型铁矿尾矿具有高铝的特征, 黄铁矿含量相对较高。

(2) 宁芜盆地玢岩型铁矿尾矿中铁氧化物含有大量杂质元素导致 X 射线衍射分析结果误差较大。

(3) TIMA 可以直接获取复杂铁矿尾矿的矿物组成、元素赋存状态、粒度分布以及矿物解离度与连生关系。

中图分类号: P595; P579

文献标识码: B

中国的铁矿石资源相对丰富, 总储量位居世界第四, 但绝大部分铁矿石属于贫矿甚至是超贫矿, 在贫铁矿资源开发过程中会产生大量的铁矿尾矿^[1-2]。虽然自 2014 年以后铁矿尾矿产生量在逐渐减少, 但

2020—2021 年中国铁矿尾矿产量仍占尾矿总产量的 51%^[3-4]。尾矿的大量堆存不仅占用土地资源, 还会排放潜在的有毒元素, 造成土壤有害重金属元素含量超标^[5-6]。随着铁矿尾矿堆存所带来的问题

收稿日期: 2022-10-12; 修回日期: 2024-01-05; 接受日期: 2024-02-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42073043); 贵州省科技计划项目 (黔科合基础-ZK[2023] 重点 050); 中国科学院“百人计划”项目

第一作者: 鲁银鹏, 地球化学专业。E-mail: 2319699036@qq.com。

通信作者: 孟郁苗, 博士, 副研究员, 主要从事非传统稳定同位素地球化学及低温矿床成因研究。
E-mail: mengyumiao@vip.gyig.ac.cn。

日益严重,对铁矿尾矿的治理与综合利用也愈发受到关注^[7]。中国铁矿尾矿总体上具有品位低、粒度细、共生关系复杂、易泥化的特点,但不同类型的铁矿尾矿也具有一定的差异,因此若要选择出最合适的资源化途径,实现对铁矿尾矿的无害化处理与高效综合利用,必须充分了解不同类型铁矿尾矿的工艺矿物学特征^[8-10]。

长江中下游成矿带是中国重要的铁、铜、金多金属成矿带之一,其中宁芜盆地玢岩型铁矿是中国重要的铁来源,玢岩型铁矿在国际上也被称为铁氧化物-磷灰石矿床(Iron oxide-apatite deposits)或基鲁纳型(Kiruna-type)铁矿^[11]。前人对玢岩型铁矿尾矿作了大量研究,目前国内外研究侧重于尾矿中有价组分的回收试验。Wanhainen等^[12]对瑞典北部某玢岩型铁矿尾矿中稀土元素的提取进行了研究;Peelman等^[13]利用湿法冶金从瑞典基鲁纳地区玢岩型铁矿尾矿中回收稀土元素;梁朝杰^[14]对安徽省姑山铁矿尾矿开展了磁化焙烧及磁选试验研究;李广等^[15]对江苏省梅山铁矿尾矿开展了浮选铁试验研究;丁开振等^[16]对安徽省马钢罗河铁矿尾矿的强磁-反浮选工艺开展了研究。在对尾矿中有价组分的回收试验过程中,前人均对玢岩型铁矿尾矿的化学成分、矿物组成等进行了一定的分析,分析结果表明玢岩型铁矿尾矿中Si、Fe、Al的含量较高,主要含铁矿物为赤铁矿,脉石矿物主要为长石、石英、黑云母、绿泥石、角闪石等硅酸盐矿物。

和尚桥铁矿是宁芜盆地玢岩型铁矿的典型代表,其成矿具有多阶段的特征^[17]。本文针对和尚桥铁矿尾矿进行工艺矿物学研究,但由于铁矿尾矿成分复杂,常规工艺矿物学分析手段所得到的信息相对有限。综合矿物分析仪(TIMA)是一款自动矿物分析扫描电镜,结合了背散射图像(BSE)与能谱(EDX),具有快速、高效的扫描系统和强大的分析功能,可以获得岩矿样品的全岩化学及矿物组成、元素赋存状态、矿物共生组合与解离度等信息^[18-19]。因此,本文在常规X射线荧光光谱、电感耦合等离子体质谱、粉晶X射线衍射分析的基础上,借助综合矿物分析仪,对尾矿的矿物与化学组成、元素赋存状态、矿物粒度分布、嵌布关系以及解离度和连生关系开展研究,为矿产资源的综合利用提供参考。

1 研究区概况

和尚桥铁矿位于安徽省马鞍山市雨山区向山镇,在马鞍山市南东方向约11km,向山镇南西方向约

4.5km^[20]。和尚桥铁矿尾矿堆积在东山铁矿采坑边缘的尾矿堆场,目前东山铁矿开采殆尽,采坑已作为和尚桥铁矿尾矿砂排放点,开展治理回填工作。采坑北侧为铁路转载台及矿石卸矿线、南山矿自用铁路线、凹山选厂等;西侧为采场总出入口,建有南山矿业公司生产保障车间水泵房;南侧和东侧均为村落与农田,其中东侧分布有018县道^[21-23]。

和尚桥铁矿矿区内出露大王山组地层,矿体赋存于闪长玢岩中,矿石与围岩呈渐变过渡,矿床的矿化带与蚀变带的形态、产状受闪长玢岩的原生层节理控制^[17]。矿石矿物主要为磁铁矿,其次为赤铁矿、褐铁矿和黄铁矿及少量菱铁矿。而脉石矿物主要为钠长石,其次为绿泥石、石英、阳起石、方解石等。矿石主要为他形-半自形结构,次为交代格状结构、自形晶结构等。矿石构造主要为浸染状构造,次为脉状、角砾状构造等^[24]。

2 实验部分

2.1 样品与制备

本次研究对和尚桥铁矿2个尾矿样品进行分析。2个尾矿样品分别采集于尾矿堆的上部与下部,以避免可能的重力分选效应。样品为灰白色,肉眼可见大量淡色矿物及少量暗色矿物,矿物粒径小于2mm,为粗砂到泥。每个样品采集2kg左右,采用经典四分法取样进行制靶和磨制粉末。将每个样品平均分为2份,编号分别为DS-1-A、DS-1-B、DS-2-A、DS-2-B。

2.2 样品测试

样品的所有分析测试工作均在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成。

2.2.1 X射线荧光光谱分析

采用ARL Perform'X 4200型X射线荧光光谱仪(XRF,美国ThermoFisher公司)进行样品主量元素分析。测试条件为:最大电压70kV,最大电流140mA,光谱室环境为真空。采用玻璃熔融制样,大部分氧化物的相对误差小于±1%。具体步骤为:在瓷坩埚中称取约0.7g的已烘干样品(105℃,5h),向其中加入约7g四硼酸锂助熔剂,将其搅拌均匀后倒入铂金坩埚中并加入适量脱模剂溴化碘和氧化剂硝酸锂。再将铂金坩埚置于1200℃高温熔炉中完成对样品的熔融,最后将其倒入铂金模具中制成玻璃片,以备上机测试。

2.2.2 电感耦合等离子体质谱分析

采用PlasmaQuant MS Elite型电感耦合等离子

体质谱仪 (ICP-MS, 德国耶拿分析仪器公司) 进行样品微量元素分析。仪器工作条件为: 等离子体气流速 9.0L/min, 辅助气流速 1.00L/min, 等离子体射频功率 1300W, 详细分析方法参照 Qi 等^[25]。具体步骤为: 在带不锈钢外套的聚四氟乙烯密封溶样装置中称取 50mg 样品, 加入 1mL 氢氟酸和硝酸, 加盖进行密封, 在 185℃ 烘干箱中加热 24h, 取出样品并冷却后, 将其置于电热板上低温蒸干, 加入 1mL 硝酸后再蒸干。最后加入 1mL 500ng/mL 的 Rh 内标、2mL 硝酸和 3mL 蒸馏水, 重新加盖密封, 放入 140℃ 烘箱中加热 5h 至残渣溶解。待冷却后取 0.4mL 溶液于 15mL 离心管中并稀释至 8~10mL 进行 ICP-MS 测定。岩石标样 BCR-1、GBPG-1 以及 GSD-1 作为质控样。大部分元素的相对误差小于±10%。

2.2.3 粉晶 X 射线衍射分析

采用 Empyrean 型粉晶 X 射线衍射仪 (XRD, 荷兰帕纳科公司) 分析样品的矿物组成, 测角仪可控最小步进为 0.0001°。测试条件为: 铜靶 K α 辐射, 工作电压 40kV, 工作电流 40mA, 扫描范围在 5°~70°。具体步骤为: 将样品粉末放入铝制样品架内, 置于样品台的插槽内, 根据设定的条件, 对测试样品的 X 射线粉晶衍射图谱进行采集。然后运用全自动分析软件, 根据不同矿物具有不同衍射强度对衍射图谱进行分析, 来判定出样品的主要组成矿物^[26]。

2.2.4 综合矿物分析分析

采用 TESCAN TIMA-X 型综合矿物分析仪 (TIMA, 捷克 TESCAN 公司) 对样品化学与矿物组成、元素赋存状态、矿物解离与连生关系、粒度分布等进行分析。TIMA 主机为一台场发射扫描电镜, 在其基础上搭载四台能谱仪, 扫描速度和精度更高。测试条件为: 工作电压 25kV, 工作电流 8.61nA, 束斑大小 64.71nm, 工作距离 15mm。具体步骤为: 首先对样品光薄片喷碳处理, 将镀碳的样品放入 TIMA 中, 利用软件进行校准与对焦, 随后 TIMA 会根据设定的焦距参数对整个样品进行全自动扫描, 测试完成

后, TIMA 软件自动对每个区块内所获取的 BSE 图像和 EDS 数据进行拼合统计, 对比自带的矿物数据库, 获得不同的物相, 实现矿物准确鉴定^[19]。

3 结果与讨论

3.1 和尚桥铁矿尾矿的化学组成

3.1.1 主量元素特征

尾矿主量元素的含量是综合利用的重要指标。和尚桥铁矿尾矿的 XRF 分析结果 (表 1) 表明, 两个样品主量元素含量差异不大, 说明尾矿中物质含量与分布较均匀。尾矿中 SiO₂ 含量最高, 在 47.18%~50.08% 之间, 平均含量为 48.62%, 为主要成分; Fe₂O₃ 和 Al₂O₃ 含量较高, Fe₂O₃ 含量在 15.40%~17.91% 之间, 平均含量为 16.65%, Al₂O₃ 含量在 12.12%~13.34% 之间, 平均含量为 12.74%; Na₂O、S、MgO、CaO 含量较低, 均低于 10%, 其平均含量分别为 3.98%、3.57%、3.14%、3.07%; 而 K₂O、TiO₂、P₂O₅、MnO 含量更低, 均低于 1%, 其平均含量分别为 0.81%、0.63%、0.47%、0.35%。TIMA 分析结果表明, 尾矿中主要元素为 O、Si、Fe, 平均含量依次为 33.92%、18.12%、15.15%, 其次为 Al、S、Na、Mg、Ca, 平均含量依次为 4.53%、2.83%、1.98%、1.89%、1.65%, 还含有少量 K、P、H、Ti, 其余为含量低于 1% 的元素, 包括 F、C、B、Zr 等。按其成分特点, 和尚桥铁矿尾矿为高铝型铁矿尾矿^[9]。XRF 与 TIMA 分析结果基本一致, 表明 XRF 与 TIMA 元素分析可以较准确地得到玢岩型铁矿尾矿的主量元素组成。

3.1.2 微量元素特征

和尚桥铁矿尾矿含有 40 余种微量元素 (表 2), 其中碱土金属元素 Ba、Sr 和过渡金属元素 Cu、Zn、V 的含量较高, 其变化范围分别为 302~340 μ g/g、269~308 μ g/g、137~189 μ g/g、141~152 μ g/g、89~129 μ g/g。根据地质矿产行业标准《铜、铅、锌、银、镍、钼矿地质勘查规范》(DZ/T 0214—2002) 和《钒矿

表 1 和尚桥铁矿尾矿主量元素 XRF 分析结果

Table 1 Analytical results of major elements in tailings of the Heshangqiao Fe deposit determined by XRF.

样品编号	主量元素 (%)										
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	S	MgO	CaO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
DS-1-A	49.94	15.59	13.25	4.09	3.439	3.06	2.67	0.87	0.599	0.488	0.340
DS-1-B	50.08	15.40	13.34	4.12	3.484	3.05	2.78	0.85	0.614	0.497	0.333
DS-2-A	47.18	17.91	12.23	3.82	3.467	3.23	3.40	0.77	0.621	0.455	0.369
DS-2-B	47.28	17.71	12.12	3.90	3.888	3.23	3.43	0.75	0.666	0.458	0.358

表2 和尚桥铁矿尾矿微量元素 ICP-MS 分析结果

Table 2 Analytical results of trace elements in tailings of the Heshangqiao Fe deposit determined by ICP-MS.

样品编号	微量元素 (μg/g)															
	Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Rb	Sr	Y	Zr	Nb
DS-1-A	16	1.9	11	89	9.5	72	23	156	143	13	10	38	279	17	84	3.0
DS-1-B	15	1.9	11	90	8.3	78	25	189	143	14	11	36	299	16	87	3.2
DS-2-A	15	2.0	12	119	11	73	25	142	141	14	11	33	269	17	88	3.0
DS-2-B	14	2.1	12	129	11	74	26	137	152	14	13	32	308	19	94	3.1
样品编号	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
DS-1-A	2.6	340	28	41	5.1	18	3.5	0.77	3.2	0.47	2.5	0.47	1.4	0.22	1.5	0.26
DS-1-B	2.6	302	30	43	5.1	19	3.6	0.82	3.2	0.48	2.6	0.50	1.5	0.22	1.5	0.27
DS-2-A	2.6	322	30	50	5.6	20	4.0	0.87	3.4	0.53	2.9	0.54	1.6	0.24	1.6	0.29
DS-2-B	2.6	317	30	48	6.0	21	4.0	0.85	3.6	0.52	3.0	0.55	1.6	0.27	1.8	0.31
样品编号	Hf	Ta	Pb	Th	U	Ge	Mo	Ag	Cd	In	Sn	Sb	W	Tl	Bi	
DS-1-A	2.1	1.1	19	4.7	1.8	5.0	1.4	0.28	0.27	0.15	1.9	1.1	189	0.25	3.5	
DS-1-B	2.1	0.78	17	4.7	1.1	5.0	1.2	0.40	0.21	0.16	1.4	1.0	222	0.24	2.9	
DS-2-A	2.2	0.62	16	5.0	1.1	5.5	1.2	0.23	0.23	0.19	2.7	1.2	185	0.23	2.3	
DS-2-B	2.5	0.54	16	5.3	1.1	6.2	1.1	0.22	0.21	0.20	1.9	1.3	149	0.24	2.5	

地质勘查规范》(DZ/T 0322—2018), Cu、Zn、V 的最低工业品位分别为 0.4%、1%、0.6%, 和尚桥铁矿尾矿中 Cu、Zn、V 均未达到其工业品位。W 含量异常高, 可能是因为制备粉末样品的容器中含有钨钢, 样品在制备过程中受到一定的污染。ICP-MS 具有灵敏度高、干扰少、检出限低和线性范围宽等特点^[27], 而 TIMA 矿物化学分析是基于能谱的分析, 对于含量过低的元素检测误差很大甚至不能检测出来^[19]。因此, 对于玢岩型铁矿尾矿微量元素的分析测试主要依靠 ICP-MS。

3.2 和尚桥铁矿尾矿的矿物组成

在矿物众多分析测试方法中, XRD 是应用最广泛的矿物学基础分析方法之一^[28]。和尚桥铁矿尾矿的 XRD 分析结果显示其主要组成矿物为钠长石 (55%~66%)、石英 (13%~15%)、绿泥石 (3%~6%)、黄铁矿 (3%~4%)、菱铁矿 (4%~8%)、白云母 (6%~11%), 其平均含量分别为 62%、14%、5%、3%、6%、8%。尾矿中大部分为脉石矿物, 以钠长石和石英为主, 金属矿物的含量较低。但 XRD 分析结果并未检测出赤铁矿或磁铁矿, 可能是因为这些铁氧化物中含有大量的 Si、Ca、Mg 等杂质元素, 使得其 X 射线衍射特征不同于标准矿物而无法识别。

TIMA 矿物分析结果 (表 3) 显示和尚桥铁矿尾矿由 30 余种矿物组成, 主要矿物为钠长石 (平均含量 23.92%)、赤铁矿/磁铁矿 (平均含量 19.65%, 代表赤铁矿和磁铁矿含量总和, 下同)、石英 (平均含量 16.19%)、斜长石 (平均含量 9.35%)、黄铁矿 (平均含

量 6.32%), 其次为黑云母 (平均含量 4.39%)、斜绿泥石 (平均含量 3.56%)、阳起石 (平均含量 3.42%)、鲕绿泥石 (平均含量 2.97%)、白云母 (平均含量 2.17%), 还含有少量镁铝石榴子石、高岭石、磷灰石、钛闪石等; 其他各矿物含量均低于 0.1%, 这些矿物总平均含量为 0.76%。在 TIMA 分析中, 由于样品中赤铁矿/磁铁矿含有大量杂质元素, 大部分铁氧化物的 EDS 谱峰偏离了标准矿物, 导致无法自动识别, 需要手动辨认, 这也证实了在 XRD 分析中未检测出赤铁矿/磁铁矿的原因。在这些无法自动识别的矿物中, Si、Fe 含量均很高, 但在手动辨认时将其全部识别为赤铁矿/磁铁矿, 因此 TIMA 所识别的赤铁矿/磁铁矿不是纯的赤铁矿/磁铁矿, 其中 Si 含量可以达到 2%~3%, 所测得的赤铁矿/磁铁矿含量应比实际偏高一些。磷灰石含量较低, 可能是样品来自不同蚀变带, 代表不同蚀变阶段。玢岩型铁矿的围岩蚀变具有较强的分带性, 由早到晚、从上到下可分为三个带: 下部浅色蚀变带, 蚀变产物主要为钠长石、方柱石、钾钠长石等; 中部深色蚀变带, 蚀变产物主要为石榴子石、透辉石、磷灰石、阳起石和硬石膏等; 上部浅色蚀变带, 主要发育有黄铁矿化、碳酸盐化、硬石膏化、硅化和泥化等^[11]。由和尚桥铁矿尾矿矿物组成来看, 样品主要来自下部浅色蚀变带, 属于早期钠化蚀变阶段, 磷灰石主要是中部深色蚀变带的组成矿物。

通过对比 XRD 与 TIMA 的分析结果, 表明对于情况复杂的玢岩型铁矿尾矿, XRD 分析结果的误差

表3 和尚桥铁矿尾矿矿物含量 TIMA 分析结果

Table 3 Mineral content of tailings of the Heshangqiao Fe deposit determined by TIMA.

矿物名称	含量 (%)		平均含量 (%)	矿物名称	含量 (%)		平均含量 (%)
	DS-1	DS-2			DS-1	DS-2	
钠长石	23.26	24.58	23.92	磷灰石	0.89	0.90	0.90
赤铁矿/磁铁矿	17.30	21.99	19.65	钛闪石	0.76	0.70	0.73
石英	15.31	17.08	16.19	方解石	0.37	0.71	0.54
斜长石	10.20	8.50	9.35	黝帘石	0.46	0.56	0.51
黄铁矿	8.26	4.37	6.32	黑电气石	0.47	0.48	0.48
黑云母	5.08	3.71	4.39	透辉石	0.24	0.66	0.45
斜绿泥石	4.31	2.80	3.56	针铁矿	0.43	0.34	0.39
阳起石	2.87	3.96	3.42	正长石	0.30	0.36	0.33
鲕绿泥石	3.50	2.45	2.97	磁黄铁矿	0.46	0.13	0.30
白云母	2.07	2.27	2.17	绿柱石	0.20	0.20	0.20
镁铝石榴子石	1.69	0.86	1.41	其他矿物总和	0.77	0.74	0.76
高岭石	0.78	1.62	1.20				

较大,无法对尾矿中的主要矿物赤铁矿/磁铁矿进行识别;而TIMA分析结果相对更加精确,且其分析矿物的检出限更低,可以应用于分析出一些含量较低的矿物。

3.3 和尚桥铁矿尾矿元素的赋存状态

目前XRF、ICP-MS等全岩化学分析测试技术虽能获取元素的含量,但无法获取元素的赋存状态,TIMA则可以直接对元素赋存状态进行分析^[19]。和尚桥铁矿尾矿中含量较高的有价元素为Si、Fe,对其进行赋存状态分析。分析结果(表4)表明,Si绝大部分赋存于石英(含量平均占比为33.89%)与钠长石

表4 和尚桥铁矿尾矿元素赋存状态 TIMA 分析结果

Table 4 The occurrence state of elements in tailings of the Heshangqiao Fe deposit determined by TIMA.

矿物名称	Si 含量占比 (%)		矿物名称	Fe 含量占比 (%)	
	DS-1	DS-2		DS-1	DS-2
石英	32.46	35.32	赤铁矿/磁铁矿	66.51	80.60
钠长石	33.24	34.26	黄铁矿	21.13	10.66
斜长石	14.40	11.70	斜绿泥石	2.78	1.72
阳起石	3.34	4.49	鲕绿泥石	2.25	1.50
黑云母	4.48	3.19	阳起石	1.35	1.78
斜绿泥石	2.77	1.76	黑云母	1.80	1.25
白云母	1.98	2.12	针铁矿	1.49	1.13
鲕绿泥石	2.25	1.53	磁黄铁矿	1.59	0.44
镁铝石榴子石	1.60	0.80	黑电气石	0.41	0.40
高岭石	0.77	1.56	钛铁矿	0.24	0.17
钛闪石	0.67	0.60	其他	0.46	0.34
透辉石	0.29	0.76			
正长石	0.41	0.48			
其他	1.34	1.42			

(含量平均占比为33.75%)中,其次赋存于斜长石(含量平均占比为13.05%)中,少量赋存于阳起石、黑云母、斜绿泥石、白云母、鲕绿泥石中。而Fe则绝大部分赋存于赤铁矿/磁铁矿(含量平均占比为73.56%)中,其次赋存于黄铁矿(含量平均占比为15.90%)中,少量赋存于斜绿泥石、鲕绿泥石、阳起石、黑云母、针铁矿、磁黄铁矿中。有害元素S主要分布在黄铁矿中(含量平均占比为96.86%),因此对尾矿进行降硫,主要除去尾矿中的黄铁矿^[29]。

3.4 和尚桥铁矿尾矿矿物的粒度分布

样品中目标矿物的粒度组成和分布特点是判别选矿难度、磨矿细度和解离界限的初步依据^[30]。根据自然粒级标准粒度划分规则对不同粒级的含量进行统计(表5),尾矿以2000~500 μm 的粗砂粒级(40.12%)和500~250 μm 的中砂粒级(35.07%)为主,其次为250~50 μm 的细砂粒级(20.20%)。而钠长石、赤铁矿/磁铁矿和石英粒度分布相似,以2000~500 μm 的粗砂粒级(含量分别为34.01%、25.48%、27.99%),500~250 μm 的中砂粒级(含量分别为27.31%、27.41%、25.68%)和250~50 μm 的细砂粒级(含量分别为24.66%、29.44%、29.21%)为主,其次为50~5 μm 的粉砂粒级(含量分别为13.83%、17.32%、16.90%)。尾矿粒度以粗砂到细砂为主,在粗砂、中砂、细砂分布较均匀。

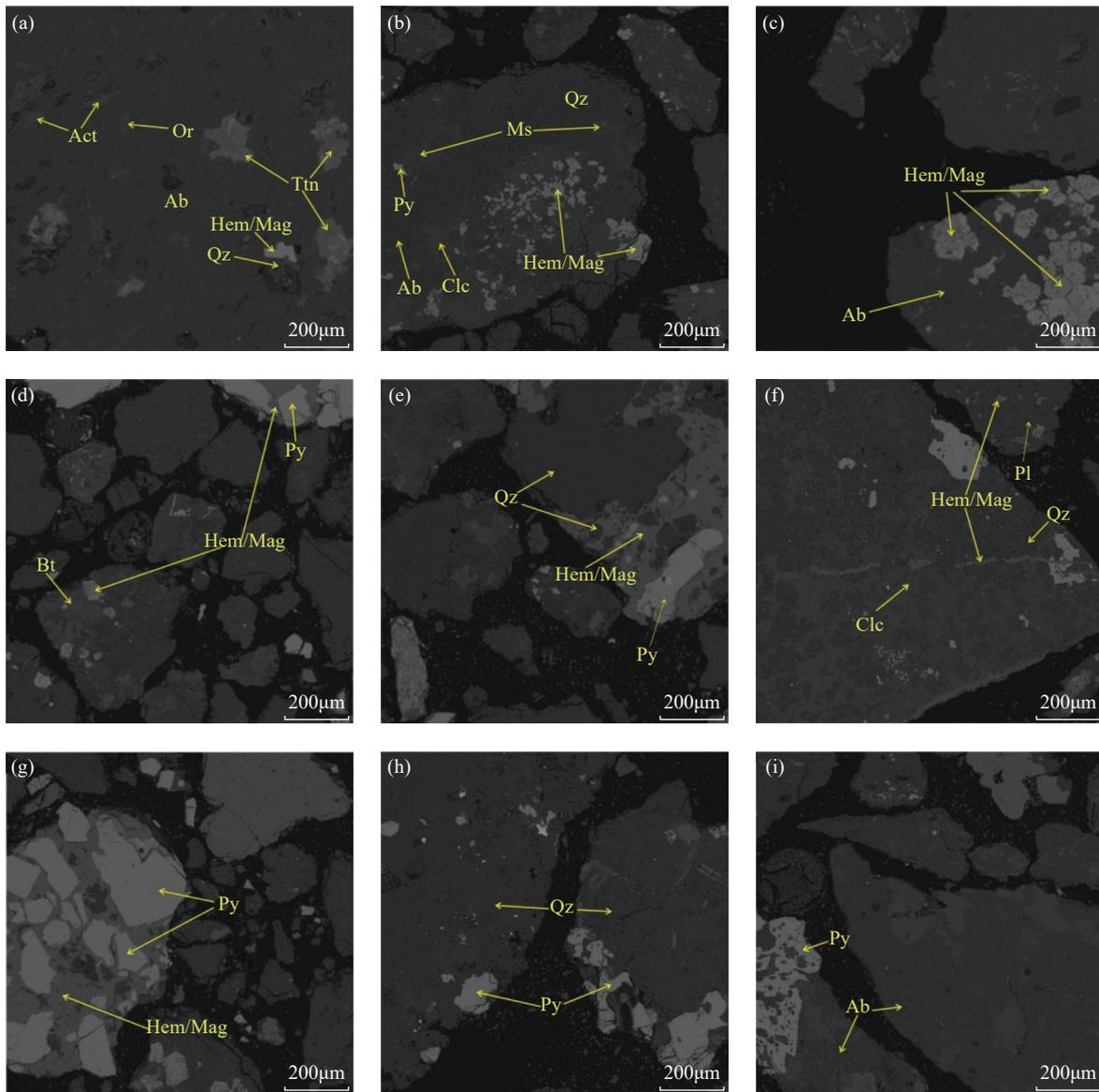
3.5 和尚桥铁矿尾矿矿物的嵌布特征

和尚桥铁矿尾矿中脉石矿物主要为钠长石和石英,钠长石颗粒中(图1a)嵌布有榍石、石英、赤铁矿/磁铁矿、正长石、阳起石等矿物;石英颗粒中

表 5 和尚桥铁矿尾矿及主要矿物钠长石、赤铁矿/磁铁矿、石英的粒度分布 TIMA 分析结果统计

Table 5 Statistics of particle size distribution of tailings, albite, hematite/magnetite and quartz from the Heshangqiao Fe deposit determined by TIMA.

矿物名称	不同粒径矿物在尾矿中的质量占比 (%)					
	>2000 μm 砾	2000 ~ 500 μm 粗砂	500 ~ 250 μm 中砂	250 ~ 50 μm 细砂	50 ~ 5 μm 粉砂	<5 μm 泥
尾矿	0	40.12	35.07	20.20	4.10	0.51
钠长石	0	34.01	27.31	24.66	13.83	0.19
赤铁矿/磁铁矿	0	25.48	27.41	29.44	17.32	0.35
石英	0	27.99	25.68	29.21	16.90	0.22



Ab—钠长石；Qz—石英；Act—阳起石；Or—正长石；Hem/Mag—赤铁矿/磁铁矿；Ttn—榍石；Py—黄铁矿；Clc—斜绿泥石；Ms—白云母；Bt—黑云母；Pl—斜长石。a—钠长石嵌布关系；b—石英嵌布关系；c, d, e, f—赤铁矿/磁铁矿嵌布关系；g, h, i—黄铁矿嵌布关系。

图1 和尚桥铁矿尾矿矿物嵌布关系背散射图像

Fig. 1 Backscattering images of mineral dissemination relationship of tailings in the Heshangqiao Fe deposit showing that the mineral dissemination relationship in the tailings is more complex and the dissemination size is finer.

(图 1b) 嵌布有白云母、赤铁矿/磁铁矿、黄铁矿、钠长石、斜绿泥石等矿物。矿石矿物主要为赤铁矿/磁铁矿和黄铁矿, 赤铁矿/磁铁矿嵌布特征为: 以粒状嵌布在钠长石、石英、斜长石、黑云母等矿物中(图 1 中 c, d); 紧密嵌布于黄铁矿与石英边缘(图 1e); 以细脉状嵌布在石英与斜绿泥石的裂隙中(图 1f)。黄铁矿嵌布特征为: 以粒状嵌布在赤铁矿/磁铁矿中(图 1g); 紧密嵌布于石英与钠长石边缘(图 1 中 h, i)。尾矿中矿物嵌布关系较为复杂且嵌布粒度较细。

3.6 和尚桥铁矿尾矿矿物的解离度与连生关系

矿物解离度的研究是工艺矿物学的重要内容, 其解离度是再分选和再提取的重要指标, 只有当有用矿物的解离度达到一定程度时, 才能够进行有效地分离与富集^[31]。矿物解离度为某一矿物单体颗粒的质量占该矿物总质量的百分率, 由 TIMA 解离度分析(图 2)表明, 按照质量比, 57.96% 钠长石、77.35% 赤铁矿/磁铁矿、68.76% 石英的解离度均小于 10%, 普遍偏低。由钠长石、赤铁矿/磁铁矿、石英与其他矿物的连生关系(图 3)可以看出, 钠长石主要与斜长石(23.86%)、鲕绿泥石(20.06%)、石英(18.01%)连生, 其单体颗粒仅占 3.32%; 赤铁矿/磁铁矿主要与鲕绿泥石(26.36%)、针铁矿(16.12%)、石英(13.29%)、斜绿泥石(13.07%)连生, 其单体颗粒仅占 1.71%; 石英主要与赤铁矿/磁铁矿(17.9%)、钠长石(17%)、鲕绿泥石(12.47%)连生, 其单体颗粒仅占 5%。尾矿中矿物单体颗粒较少, 矿物相互浸染, 连生关系复杂。

3.7 宁芜盆地玢岩型铁矿与不同类型铁矿尾矿工艺矿物学特征对比

按照铁矿尾矿的成分特点, 可将中国单金属类

铁矿尾矿分为高硅型铁矿尾矿、高铝型铁矿尾矿、高钙镁型铁矿尾矿、低钙镁铝硅型铁矿尾矿(表 6)^[9]。宁芜盆地玢岩型铁矿尾矿元素以 Si、Fe 和 Al 为主, 属于高铝型铁矿尾矿, 主要矿物为钠长石、赤铁矿/磁铁矿、石英、斜长石和黄铁矿, 尾矿在 50~2000 μm 粒级占比较大。冀东司家营铁矿是典型的沉积变质型铁矿(BIF 型铁矿), 其 Si、Fe 含量较高, Al 含量较低, 表现为高硅高铁低铝的特点, 属于高硅型铁矿尾矿, 主要矿物为石英、阳起石、透辉石、长石, 粒度集中在 50~350 μm 之间, 石英解离度较高, Fe 元素则大部分赋存于透辉石、赤铁矿和阳起石

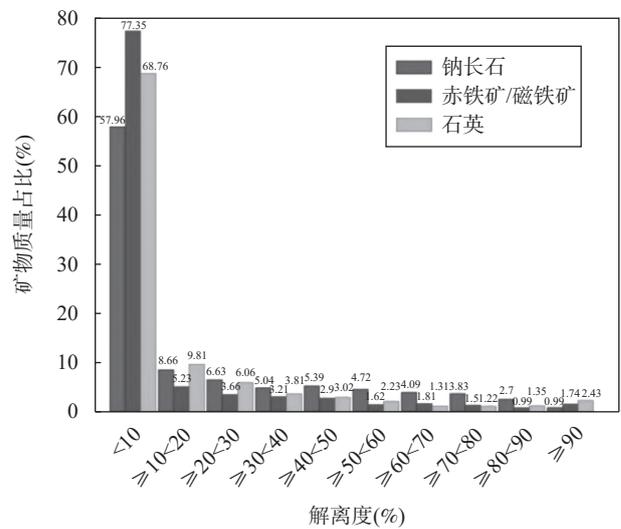
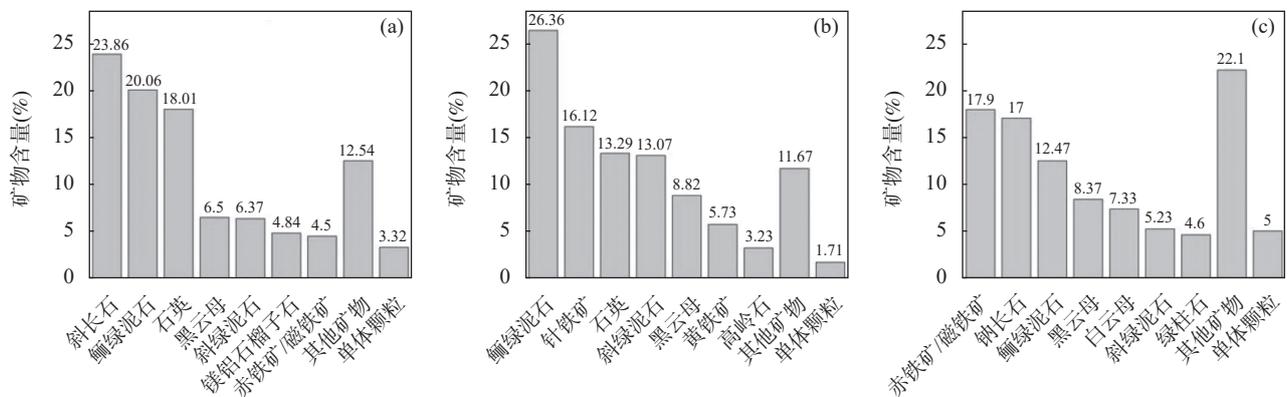


图2 和尚桥铁矿尾矿中的钠长石、赤铁矿/磁铁矿、石英的解离度 TIMA 分析结果

Fig. 2 Dissociation degree of albite, hematite/magnetite and quartz in tailings of the Heshangqiao Fe deposit determined by TIMA.



a—钠长石与其他矿物的连生关系; b—赤铁矿/磁铁矿与其他矿物的连生关系; c—石英与其他矿物的连生关系。

图3 和尚桥铁矿尾矿中钠长石、赤铁矿/磁铁矿、石英的连生关系 TIMA 分析结果

Fig. 3 Intergrowth relationship of albite, hematite/magnetite and quartz in tailings of the Heshangqiao Fe deposit determined by TIMA.

表 6 中国不同类型单金属类铁矿尾矿工艺矿物学特性^[9, 32-35]

Table 6 Process mineralogy characteristics of different types of monometallic iron tailings in China.

单金属类铁矿尾矿类型	元素含量特征	主要矿物组成	尾矿粒度主要分布	铁主要赋存矿物
高硅型	Si、Fe 含量较高, Al 含量较低	石英、阳起石、透辉石、长石	集中在 50 ~ 350 μm	透辉石、赤铁矿
高铝型	Si、Fe 和 Al 含量较高	钠长石、赤铁矿/磁铁矿和石英	集中在 50 ~ 2000 μm	赤铁矿/磁铁矿、黄铁矿
高钙镁型	Si、Ca 和 Mg 含量较高	方解石、钠长石和白云母	集中在 3 ~ 155 μm	赤铁矿
低钙镁铝硅型	Si、Ca、Mg 和 Al 含量都较低	云母、石英、方解石、斜长石、重晶石	集中在 75 μm 以下	赤铁矿、菱铁矿

中^[32]。邯邢西石门“矽卡岩型”铁矿尾矿元素以 Si、Ca、Mg 为主,属于高钙镁型铁矿尾矿,矿物组成以方解石、钠长石和白云母为主,铁矿物主要为赤铁矿,粒度分布主要在 3 ~ 155 μm 之间^[33]。甘肃镜铁山铁矿元素中的 Si、Ca、Mg 和 Al 含量都较低,属于低钙镁铝硅型铁矿尾矿,矿物组成主要为云母、石英、方解石、斜长石、重晶石等,铁矿物主要有镜铁矿、褐铁矿和菱铁矿,其中的铁主要以赤褐铁矿的形式存在,75 μm 以下粒级累计含量达到 81.43%^[34-35]。

宁芜盆地玢岩型铁矿尾矿与其他三种类型的铁矿尾矿相比,元素 Al 与 S 含量相对较高,矿物钠长石与黄铁矿含量也相对较高,粒度分布范围相对较广。这四种类型铁矿尾矿粒度大多都较细,其中 Fe 均主要以赤铁矿的形式存在。

4 结论

在常规 XRF、ICP-MS、XRD 分析基础上,运用 TIMA 研究了和尚桥铁矿尾矿元素与矿物特征。结

果表明,和尚桥铁矿尾矿主要元素为 Si、Fe、Al,为高铝型铁矿尾矿。矿物主要是钠长石、赤铁矿/磁铁矿和石英,总体上以脉石矿物为主,金属矿物含量较低,与前人研究结果基本一致。此外,有价元素 Si 主要赋存于石英与钠长石中,Fe 主要赋存于赤铁矿/磁铁矿中;尾矿中矿物粒度主要分布在 50 ~ 2000 μm 之间;矿物嵌布粒度较细,单体颗粒较少,解离度较低,连生关系复杂。宁芜盆地玢岩型铁矿尾矿与中国其他不同类型铁矿尾矿相比,其元素 Al、S 和黄铁矿含量相对较高,尾矿粒度分布范围较广,这些不同类型铁矿尾矿中铁主要赋存矿物均为赤铁矿。

研究结果显示,玢岩型铁矿尾矿矿物组成复杂, TIMA 作为新技术虽能给出比常规分析方法更多的信息,但对于其无法自动识别的矿物如含有大量 Si、Ca、Mg 等杂质元素的铁氧化物矿物,仍然需要人工辨认,存在一定误差。因此,将玢岩型铁矿尾矿研究透彻,需要联合采用多种分析手段,下一步有必要对玢岩型铁矿尾矿进一步开展多角度探究。

Element and Mineral Characteristics of Tailings in the Porphyry-Type Iron Deposit from Ningwu Basin

LU Yinpeng¹, MENG Yumiao^{2*}, HUANG Xiaowen², WANG Conglin³, YANG Bingyang³,
TANHOU Mingrui², XIE Huan²

(1. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry; Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China;

3. Nanshan Mining Co., Ltd., Anhui Ma Steel Mining Resources Group, Ma'anshan 243033, China)

HIGHLIGHTS

- (1) The tailings of porphyrite-type iron deposit in Ningwu Basin are characterized by high contents of aluminum, and pyrite.
- (2) The iron oxides in the tailings of porphyrite-type iron deposit in Ningwu Basin contain large amounts of impurity elements, which leads to a large error in XRD analysis.
- (3) TIMA can directly obtain the mineral composition, element occurrence, particle size distribution, mineral dissociation degree and intergrowth relationship of complex iron tailings.

ABSTRACT: The porphyrite-type iron deposit in Ningwu Basin is an important source of iron resources in China, and the premise for the efficient and comprehensive utilization of its complex tailings is a thorough understanding of their mineral processing characteristics. In order to provide a reference for the comprehensive utilization of porphyrite-type iron deposit tailings in Ningwu Basin, the process mineralogy characteristics were explored by using the combined methods of X-ray fluorescence spectrometry (XRF), inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS), X-ray diffractometry (XRD), and TESCAN integrated mineral analyzer (TIMA). The results show that the tailings are composed of mainly Si, Fe and Al. The mineral compositions are mainly albite, hematite, magnetite and quartz. Silicon mainly occurs in quartz and albite, whereas Fe mainly occurs in hematite/magnetite. The tailings have a fine particle size and low mineral liberation degree. Compared to other types of iron deposit tailings in China, these tailings are characterized by a high content of Al and a relatively high proportion of pyrite.

KEY WORDS: iron tailings; porphyrite-type iron ore; X-ray fluorescence spectrometry; inductively coupled plasma-mass spectrometry; X-ray diffractometry; TESCAN integrated mineral analyzer; the occurrence state of elements; mineral composition

参考文献

- [1] 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. Current situation and existing problems of comprehensive utilization of iron tailings in China[J]. *Modern Mining*, 2012, 27(9): 1-3.
- [2] Wan H, Yi P, Luukkanen S, et al. Recovering iron concentrate from low-grade siderite tailings based on the process mineralogy characteristics[J]. *Minerals*, 2022, 12(6): 676.
- [3] 刘文博, 姚华彦, 王静峰, 等. 铁尾矿资源化综合利用现状[J]. *材料导报*, 2020, 34(S1): 268-270.
Liu W B, Yao H Y, Wang J F, et al. Current status of comprehensive utilization of iron tailings[J]. *Materials Reports*, 2020, 34(S1): 268-270.
- [4] 陈邢, 于峰, 曹越, 等. 铁尾矿粉-脱硫灰胶凝材料的制备及性能研究[J]. *硅酸盐通报*, 2023, 42(1): 180-187.
Chen X, Yu F, Cao Y, et al. Preparation and properties of iron tailings powder-desulfurization ash cementitious material[J]. *Bulletin of the Chinese Silicate Society*, 2023, 42(1): 180-187.
- [5] Alfonso P, Ruiz M, Zambrana R N, et al. Process

- mineralogy of the tailings from Llallagua: Towards a sustainable activity[J]. *Minerals*, 2022, 12(2): 214.
- [6] 杨杰,董静,宋洲,等.鄂西铜铅锌尾矿库周边农田土壤-水稻重金属污染状况及风险评价[J]. *岩矿测试*, 2022, 41(5): 867-879.
- Yang J, Dong J, Song Z, et al. Heavy metal pollution characteristics and risk assessment of soil and rice in farmland around the copper-lead-zinc tailing, Western Hubei Province[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2022, 41(5): 867-879.
- [7] 曹惠昌,郑竞,高淑玲.我国铁尾矿综合利用研究进展[J]. *现代矿业*, 2011, 27(10): 68-71.
- Cao H C, Zheng J, Gao S L. Research progress on comprehensive utilization of iron tailings in China[J]. *Modern Mining*, 2011, 27(10): 68-71.
- [8] 蒋京航,叶国华,胡艺博,等.铁尾矿再选技术现状及研究进展[J]. *矿冶*, 2018, 27(1): 1-4.
- Jiang J H, Ye G H, Hu Y B, et al. Present situation and research progress of iron tailings reconcentration technology[J]. *Mining & Metallurgy*, 2018, 27(1): 1-4.
- [9] 刘鹏,刘磊,田馨,等.我国铁尾矿工艺矿物学特性及其资源化技术研究进展[J]. *矿产保护与利用*, 2022, 42(3): 169-178.
- Liu P, Liu L, Tian X, et al. Reviews of the process mineralogy characteristics and comprehensive utilization technology of iron ore tailings in China[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resource*, 2022, 42(3): 169-178.
- [10] 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. Research progress on comprehensive utilization of iron tailings[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resource*, 2022, 42(3): 155-168.
- [11] 赵新福,曾丽平,廖旺,等.长江中下游成矿带矽岩铁矿研究新进展及对矿床成因的启示[J]. *地学前缘*, 2020, 27(2): 197-217.
- Zhao X F, Zeng L P, Liao W, et al. An overview of recent advances in porphyrite iron (iron oxide-apatite, IOA) deposits in the middle-lower Yangtze River metallogenic belt and its implication for ore genesis[J]. *Earth Science Frontiers*, 2020, 27(2): 197-217.
- [12] Wanhainen C, Pålsson B I, Martinsson O, et al. Rare earth mineralogy in tailings from Kiirunavaara iron ore, Northern Sweden: Implications for mineral processing[J]. *Minerals & Metallurgical Processing*, 2017, 34(4): 189-200.
- [13] Peelman S, Kooijman D, Sietsma J, et al. Hydrometallurgical recovery of rare earth elements from mine tailings and WEEE[J]. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2018, 4(3): 367-377.
- [14] 梁朝杰.姑山尾矿磁化焙烧及磁选试验[J]. *现代矿业*, 2014, 30(9): 83-84, 87.
- Liang C J. Magnetic roasting and magnetic separation test of Gushan tailings[J]. *Modern Mining*, 2014, 30(9): 83-84, 87.
- [15] 李广,王化军,孙体昌,等.梅山铁矿尾矿浮选铁的试验研究[J]. *湿法冶金*, 2015, 34(3): 173-175.
- Li G, Wang H J, Sun T C, et al. Flotation of iron minerals from Meishan iron tailings[J]. *Hydrometallurgy of China*, 2015, 34(3): 173-175.
- [16] 丁开振,王小玉,胡炳胜,等.马钢罗河尾矿强磁-反浮选工艺研究[J]. *现代矿业*, 2019, 35(11): 14-19.
- Ding K Z, Wang X Y, Hu B S, et al. Research on strong magnetic-reverse flotation process of Luohe tailings in Masteel[J]. *Modern Mining*, 2019, 35(11): 14-19.
- [17] 段超,李延河,毛景文,等.宁芜和尚桥铁氧化物-磷灰石矿床(IOA)成矿过程研究:来自磁铁矿 LA-ICP-MS原位分析的证据[J]. *岩石学报*, 2017, 33(11): 3471-3483.
- Duan C, Li Y H, Mao J W, et al. Study on the ore-forming process of the Heshangqiao IOA deposit in Ningwu ore district: Insight from magnetite LA-ICP-MS *in-situ* analysis data[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(11): 3471-3483.
- [18] 谢小敏,李利,袁秋云,等.应用TIMA分析技术研究 Alum 页岩有机质和黄铁矿粒度分布及沉积环境特征[J]. *岩矿测试*, 2021, 40(1): 50-60.
- Xie X M, Li L, Yuan Q Y, et al. Grain size distribution of organic matter and pyrite in Alum shale by TIMA and its paleo-environmental significance[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2021, 40(1): 50-60.
- [19] 陈倩,宋文磊,杨金昆,等.矿物自动定量分析系统的基本原理及其在岩矿研究中的应用——以捷克泰思肯公司TIMA为例[J]. *矿床地质*, 2021, 40(2): 345-368.
- Chen Q, Song W L, Yang J K, et al. Principle of automated mineral quantitative analysis system and its application in petrology and mineralogy: An example from TESCAN TIMA[J]. *Mineral Deposits*, 2021, 40(2): 345-368.
- [20] 郑意,刘文胜,李杰,等.和尚桥铁矿隔离堤边坡治理复垦实践[J]. *现代矿业*, 2022, 38(3): 223-225.
- Zheng Y, Liu W S, Li J, et al. Practice of reclamation and treatment of isolation dike slope in Heshangqiao iron mine[J]. *Modern Mining*, 2022, 38(3): 223-225.

- [21] 朱末琳,武飞. 东山铁矿剩余资源开发利用论证[J]. 矿业工程, 2014, 12(6): 1-3.
Zhu M L, Wu F. Demonstration of exploration and utilization of remaining resources of Dongshan iron mine[J]. Mining Engineering, 2014, 12(6): 1-3.
- [22] 徐嘉辰,寿震宇,曾霄祥,等. 东山铁矿露天采场改建尾矿库边坡稳定性研究[J]. 金属矿山, 2016(7): 175-178.
Jia C, Shou Z Y, Zeng X X, et al. Study on the slope stability of the tailing pond built at open-pit stope in Dongshan iron mine[J]. Metal Mine, 2016(7): 175-178.
- [23] 武飞. 安徽马鞍山东山铁矿 I 区剩余资源开发方案可行性论证[J]. 现代矿业, 2017, 33(11): 79-82.
Wu F. Discussion on the development feasibility of the remaining resources of I area in Dongshan iron mine in Ma'anshan City, Anhui Province[J]. Modern Mining, 2017, 33(11): 79-82.
- [24] 刘义云. 和尚桥铁矿石选矿试验研究[J]. 现代矿业, 2013, 29(5): 172-173.
Liu Y Y. Experimental study on beneficiation of Heshang-qiao iron ore[J]. Modern Mining, 2013, 29(5): 172-173.
- [25] Qi L, Hu J, Gregoire D C. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. *Talanta*, 2000, 51: 507-513.
- [26] 张凤英,张文捷,刘春丽. X射线粉晶衍射(XRD)法在粘土矿物岩矿鉴定中的应用[J]. 低碳世界, 2018(9): 279-281.
Zhang F Y, Zhang W J, Liu C L. Application of X-ray powder diffraction (XRD) method in the identification of clay mineral rock[J]. *Low Carbon World*, 2018(9): 279-281.
- [27] 何袖辉,唐帅帅,程江,等. 碳酸钠-氧化锌半熔电感耦合等离子体质谱法测定地球化学样品中的碘[J]. 岩矿测试, 2022, 41(4): 606-613.
He X H, Tang S S, Cheng J, et al. Determination of iodine in geochemical samples by ICP-MS with sodium carbonate-zinc oxide semi-melting[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2022, 41(4): 606-613.
- [28] 刘金,王剑,王桂君,等. 利用电子探针和X射线衍射研究准噶尔盆地风城组淡钡钛石矿物学特征[J]. 岩矿测试, 2022, 41(5): 764-773.
Liu J, Wang J, Wang G J, et al. Analysis of mineralogical characteristics of leucosphenite from the Fengcheng Formation in the Junggar Basin by electron probe microanalyzer and X-ray diffractometer[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2022, 41(5): 764-773.
- [29] 杨召群,揣新,张宏光,等. 某铁矿超细碎尾矿工艺矿物学研究[J]. 现代矿业, 2019, 35(10): 135-138.
Yang Z Q, Qi X, Zhang H G, et al. Study on ultrafine tailings process mineralogy in an iron ore[J]. *Modern Mining*, 2019, 35(10): 135-138.
- [30] 秦玉芳,李娜,王其伟,等. 白云鄂博选铁尾矿稀土的工艺矿物学研究[J]. 中国稀土学报, 2021, 39(5): 796-804.
Qin Y F, Li N, Wang Q W, et al. Technological mineralogy of rare earth in Bayan Obo iron tailings[J]. *Journal of the China Society of Rare Earths*, 2021, 39(5): 796-804.
- [31] 张燕,宋志娇,陈翠华,等. 重庆城口高燕锰矿床矿物解离度与工艺粒度研究[J]. 地质论评, 2016, 62(1): 285-286.
Zhang Y, Song Z J, Chen C H, et al. Study on the liberation degree and processing size of mineral in Gaoyan Mn deposit, Chengkou, Chongqing[J]. *Geological Review*, 2016, 62(1): 285-286.
- [32] 李德先,王锦,张长青,等. 冀东司家营铁矿尾矿特征及综合利用建议[J]. 地质学报, 2022, 96(4): 1460-1468.
Li D X, Wang J, Zhang C Q, et al. Tailings characteristics and comprehensive utilization suggestions of the Sijiaying iron ore deposit in Eastern Hebei Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(4): 1460-1468.
- [33] 韩波,孙熠,李月明,等. 高掺量高钙型铁尾矿建筑瓷砖的制备及性能研究[J]. 中国陶瓷, 2023, 59(6): 68-73.
Han B, Sun Y, Li Y M, et al. Study on preparation and properties of building tiles with high content and high calcium iron tailings[J]. *China Ceramics*, 2023, 59(6): 68-73.
- [34] 袁晨光,黄自力,刘楚玉,等. 酒钢镜铁矿尾矿中铁矿物再回收试验研究[J]. 烧结球团, 2023, 48(1): 98-105.
Yuan C G, Huang Z L, Liu C Y, et al. Experimental research on recovery of iron minerals from specularite tailings in JISCO[J]. *Sintering and Pelletizing*, 2023, 48(1): 98-105.
- [35] 刘金长,张双爱. 酒钢尾矿再利用实验室试验研究[J]. 金属矿山, 2017(12): 185-188.
Liu J C, Zhang S A. Laboratory research on recycling of ore tailing in JISCO[J]. *Metal Mine*, 2017(12): 185-188.