

高效软件平台。

4.3 受天气与空域限制

自然环境与政策因素对无人机航测的影响程度较大。大风、降雨、大雾等天气情形会直接影响飞行安全以及数据质量，甚至造成作业中断。空域管理政策或许会对飞行区域与时间加以限制，造成作业安排的不确定性加大。空域申请流程繁琐，审批所需时间久，降低了作业的及时性与灵活性^[4]。即便处于可飞行区域，限高、限飞时段等限制条件或许也会存在，对作业范围造成了进一步的限制，这些因素让项目管理难度攀升，还易引发作业成本攀升以及进度滞后。

4.4 续航能力有限

续航能力是影响无人机航测效率的关键所在。消费级及工业级无人机续航时长有限，难以胜任大范围、长时间的连续作业要求，需频繁进行起降或更换电池操作，这不仅造成作业效率降低，进而提升了操作难度系数，身处偏远地区作业之际，充电和电池储备也可能演变成难题。即便部分固定翼无人机续航时长可观，但起降场地有不足，灵活性也欠佳，增强续航能力需从电池技术、动力系统、机身设计等多方面进行优化，同时借助作业规划优化，减少无意义飞行时间，续航问题若被解决将直接增进无人机航测的实用性与竞争力。

5 优化策略

5.1 完善技术标准体系

构建统一的无人机航测技术标准体系，是推动行业步入规范化的根基。标准体系需覆盖设备性能指标、数据采集规范、处理流程、成果质量评价等范畴，厘清各项技术参数与质量要求，依照行业发展实际情形，按时刷新标准内容，适应技术进步以及应用需求。依靠标准统一，可提升不同机构成果间的一致性与可比性，实现数据共享与互操作。制定标准也应借鉴国际先进经验，助力国内技术标准与国际接轨同步，增进行业竞争力水平。在标准实施阶段，应加大监督与评估力度，保证各单位切实执行，以此提升整体作业质量。

5.2 提升数据处理智能化水平

推动智能化技术应用乃是降低数据处理门槛、提升处理效率的关键。应当进一步加大自动化、智能化数据处理软件的研发投入，从原始数据直至最终成果的半自动化或全自动化处理。采用人工智能与机器学习算法，提高影像匹配、点云分类、特征提取等环节的自动化水平，降低人工介入^[5]。依靠云计算技术构建分布式数据处理平台，实现海量数据的高效存储及运算，弱化对本地硬件的依赖。凭借技术创新，优化处理流程、缩减处理周期，助更多机构高效实现数据处

理任务，促进技术全面普及。

5.3 加强空域协调与天气应对

鉴于空域限制状况，建立高效的空域申请与协调机制，优化审批环节，增强作业机动性。行业协会需与相关部门增进沟通，推动出台契合无人机航测特点的空域管理相关政策，助力实现合法合规作业。强化气象监测与预报力度，凭借实时气象数据改进作业计划，避开恶劣天气阶段。在作业期间配备应急方案，防范突发天气变动，降低作业中断概率。依靠政策协调与技术手段结合，将空域与天气因素对作业的影响降至最低限度。

5.4 提高无人机续航能力

提升续航能力得借助多技术路径协同推进。须着重开展电池技术研发，增强能量密度与充放电效率。探索太阳能辅助动力、混合动力等新型动力系统，让飞行时间变长。从机身设计角度来看，运用轻量化材料与气动优化削减能耗，规整作业规划，减少无意义飞行路径，加大单位时间里作业的效率。针对大规模作业，可运用多机协同跟自动换电技术，达成连贯作业，续航能力若提升将直接加大无人机航测的实用性和竞争力，扩充其应用规模。

6 结论

地形测绘中无人机航测技术展现出突出的应用优势，可有效提高测绘效率以及数据精度，增进在不同环境下的适应性，降低作业面临的风险，还可为多源数据融合给予支撑。该技术于标准化建设、数据处理、空域管理及续航能力等方面依旧面临挑战。依靠完善技术标准体系、提高数据处理智能化水准、加强空域协调及天气应对举措、提升续航能力以及推动多技术融合应用等策略，可有效应对现有状况，更充分挖掘无人机航测技术的潜力。未来伴随技术持续进步与行业不断发展，无人机航测在地形测绘领域将发挥更关键的作用，推动地形测绘朝向更高精度、更高效率、更广泛应用的方向挺进。

参考文献

- [1] 王泽阳.无人机航测及地理信息技术在地形测绘中的应用[J].大众标准化,2025,(18):169-171.
- [2] 亓峰,卢雪玉.无人机航测技术在复杂地形测绘中的应用研究[J].坦克装甲车辆,2025,(16):83-84.
- [3] 宗瑜航.地形测绘中无人机航测技术运用探究[J].低碳世界,2025,15(05):49-51.
- [4] 魏涛,韩磊.无人机航测技术在复杂地形测绘中的精度分析[J].北斗与空间信息应用技术,2025,(02):87-89+106.
- [5] 姚祥飞.无人机航测技术在矿山地形测绘领域的运用阐述[J].中国金属通报,2025,(04):130-132.

Research on High-Efficiency Beneficiation Technology and Process Optimization of Super-Poor Magnetite

Yong Wang

Xinjiang Nonferrous Metals and Metallurgy Design & Research Institute Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

Abstract

China's iron ore resources are characterized by their low grade, high impurity, and fine particle size, with ultra-poor magnetite reserves accounting for over 70% of the country's total iron ore reserves. As high-grade ores gradually deplete, the development and utilization of low-grade magnetite have become a crucial direction for achieving sustainable development in the steel industry. Due to their low iron content, fine dissemination, complex gangue, and difficult separation, ultra-poor magnetite has emerged as a focal point and challenge in mineral processing technology. Based on a systematic review of domestic and international research achievements, this paper combines process practices from typical mining areas to provide an overview from five aspects: ore characteristics, separation mechanisms, key technological advancements, process flow optimization, and green development directions. The study identifies the integrated use of wet-dry combined separation, high-pressure roll milling dry separation, combined strong magnetic and reverse flotation, and intelligent control systems as core approaches for the efficient utilization of ultra-poor magnetite.

Keywords

ultra-poor magnetite; mineral processing technology; dry separation; wet separation; process flow optimization

超贫磁铁矿高效选矿技术及工艺流程优化研究

王勇

新疆有色冶金设计研究院有限公司，中国·新疆乌鲁木齐 830000

摘要

中国铁矿资源贫、杂、细特征显著，超贫磁铁矿储量占全国铁矿总量的70%以上。随着高品位矿石逐渐枯竭，开发利用低品位磁铁矿已成为实现钢铁工业可持续发展的重要方向。超贫磁铁矿因铁品位低、嵌布细、脉石复杂、分选困难而成为选矿技术的重点与难点。本文在系统梳理中国外相关研究成果的基础上，结合典型矿区的工艺实践，从矿石特征、分选机理、关键技术进展、工艺流程优化与绿色化发展方向五个方面进行综述。研究指出，干湿联合选别、高压辊磨干选集成、强磁与反浮选组合以及智能控制系统的应用是实现超贫磁铁矿高效利用的核心途径。

关键词

超贫磁铁矿；选矿技术；干选；湿选；工艺流程优化

1 引言

超贫磁铁矿通常指全铁(TFe)含量低于30%、伴生矿物复杂且嵌布细的铁矿类型。这类矿石在中国、俄罗斯、印度、澳大利亚等国家分布广泛，是未来铁矿资源开发的重要潜力区。受限于矿石性质，传统弱磁选工艺在选别超贫磁铁矿时回收率低、能耗高，且选矿用水量大、尾矿排放压力重，难以满足当前绿色低碳的政策导向。近年来，随着高梯度磁选、干式磁选、高压辊磨与智能控制技术的发展，超贫磁铁矿的分选效率和资源利用率显著提高。本文旨在对近年超贫

磁铁矿选矿技术的发展现状与优化方向进行系统总结与综合分析。

2 矿石特征与可选性分析

2.1 矿石物质组成与嵌布特征

超贫磁铁矿的矿物学特征决定了其选矿工艺的复杂程度和经济可行性^[1]。研究表明，此类矿石多形成于岩浆晚期分异或岩浆热液交代阶段，受构造运动及后期氧化作用影响明显，具有铁含量低、矿物组合复杂、嵌布粒度细微等典型特征。金属矿物以磁铁矿、钛铁矿为主，伴生少量赤铁矿、褐铁矿及黄铁矿；非金属矿物主要为石英、长石、绿泥石、方解石、榍石及少量磷灰石。磁铁矿多呈半自形粒状或不规则粒状分布，部分与钛铁矿、赤铁矿交代连生，构成“复合体”结构，是造成磁性差异减弱的重要原因。

显微镜与X射线衍射分析结果显示，矿石结构致密，

【作者简介】王勇（1984-），男，中国新疆昌吉人，本科，副高级工程师，从事矿物加工工程，矿山安全与管理研究。

粒度分布极细。磁铁矿单体粒度多在 0.02 ~ 0.15 mm 之间, -0.074 mm 粒级含量约占总量的 60% ~ 70%, 部分矿物颗粒细至 10 μm 以下, 单体解离率低于 80%。这类细粒结构导致矿物间的包裹关系明显, 磁铁矿常被石英、长石等非金属矿物包裹, 而钛铁矿又沿磁铁矿晶边呈条带状镶嵌, 使分选难度显著增加。物理性质测试表明, 矿石密度约 3.0 g/cm³, 普氏硬度系数 12 ~ 14, 属中等偏硬矿石, 破碎能耗较高。矿体在空间上多呈透镜状、层状或似脉状展布, 沿接触带或构造裂隙延伸, 内部脉石分布均匀, 矿石整体表现为浸染状构造。

表 1 超贫磁铁矿典型物理性质与化学组成特征

项目	含量 / 数值	特征说明
TFe (全铁)	25% ~ 28%	铁品位低, 属典型超贫矿
TiO ₂	3% ~ 5%	含钛较高, 伴生钛铁矿
SiO ₂	35% ~ 40%	脉石矿物主要成分
Al ₂ O ₃	10% ~ 12%	多来源于长石、黏土矿物
CaO	约 5%	方解石及榍石成分
MgO	约 8%	绿泥石、角闪石等贡献
硫、磷	< 0.2%	对冶炼有一定影响
密度	约 3.0 g/cm ³	中等密度矿石
硬度 (普氏)	12 ~ 14	中等偏硬, 磨矿能耗较高
-0.074 mm 粒级含量	60% ~ 70%	嵌布细密, 单体解离困难

由表 1 可见, 该类矿石化学成分以高硅、高铝、低铁为主要特征, 且伴生 Ti、Mg 等元素, 说明脉石含量高、矿物复杂、可选性差。

2.2 化学组成与可选性分析

化学成分是评价超贫磁铁矿可选性的重要指标。化学分析结果表明, 该类矿石 TFe 一般为 25% ~ 28%, SiO₂ 约为 35% ~ 40%, Al₂O₃ 为 10% ~ 12%, CaO 约 5%, MgO 约 8%, TiO₂ 含量在 3% ~ 5% 之间, 硫与磷含量通常小于 0.2%。这种高硅、高铝、低铁的化学特征表明脉石含量高、可选性差, 同时矿石氧化程度较高, 部分磁铁矿已转化为赤铁矿或褐铁矿, 需在强磁场或反浮选条件下实现富集^[2]。

在矿物化学结构上, 磁铁矿中常含 Ti、Mg、Al 等元素的类质同象替代, 使磁化率降低, 表现出弱磁性特征; 钛铁矿与磁铁矿间存在连续固溶体, 界面模糊, 难以在低磁场下有效分离。能谱分析 (EDS) 结果显示, 磁铁矿晶体中 TiO₂ 含量约 0.8% ~ 1.5%, 部分样品达 3%, 说明矿物间存在明显的元素混入与共生关系。由于这种固溶状态导致磁差减弱, 单一磁选难以实现高品位回收。磁性测试结果进一步揭示, 超贫磁铁矿中磁铁矿与钛铁矿的磁化率差异仅为 10⁻⁴ 量级, 弱磁选难以区分二者; 而在高梯度磁选条件下 (磁场强度 1.5 ~ 1.8 T), 磁铁矿可被有效捕获, 钛铁矿与脉石随尾矿排出, 从而显著改善精矿品位。与此同时, 反浮选技术通过调节矿浆 pH 值并采用石英抑制剂, 可实现铁与硅的高效分离。

3 超贫磁铁矿选矿技术现状

3.1 干式选矿技术的应用与进展

干式磁选作为贫矿预选的重要环节, 因节水、低耗、流程简短而被广泛用于矿石初步富集和预抛尾环节。其基本原理是在强磁场中分离磁性矿物和非磁性脉石, 以提高入磨品位。近年来, 永磁筒式干选机、立环干式磁选机以及高梯度电磁干选设备得到改进, 磁场强度可达 1.6 ~ 1.8 T。试验研究表明, 当矿石粒度控制在 -8 mm 以下时, 干选可使 TFe 由原矿 27% 提高至 35% 左右, 预先抛弃 60% 以上的脉石物质, 铁回收率稳定在 85% 以上。然而, 干选在处理细粒级矿物时效率显著下降, 主要受限于颗粒磁化率差减弱和空气动力干扰。为此, 研究者提出了“高压辊磨—干选一体化”技术, 通过层压粉碎形成新的微裂隙, 改善矿物表面磁化率差异, 提高细粒磁选效率。该技术能耗仅为传统湿磨的 60%, 成为当前干旱及缺水地区超贫矿选矿的首选方案^[3]。

3.2 湿式磁选与反浮选联合工艺

湿式磁选技术仍是精矿提纯的主导方法, 尤其适用于细粒级铁矿物的分选。典型工艺为“一粗一精选”或“一粗两精选”, 通过控制磁场强度与磨矿细度, 精矿 TFe 可稳定在 60% 左右, 铁回收率达 85% ~ 90%。在此基础上, 反浮选技术被引入精矿提纯环节, 通过使用淀粉、石灰等抑制剂抑制石英、长石等脉石, 实现铁与硅的有效分离。反浮选的核心在于化学选择性与 pH 值调控, 其应用显著改善了精矿品位与脱硅效率。此外, 阶段磨矿—磁选—反浮选联合流程在国内外多个选矿厂实践中取得良好效果。该流程在第一阶段实现初步富集, 第二阶段通过再磨强化单体解离, 第三阶段利用浮选药剂控制脉石行为, 使得精矿品位可达 61% ~ 63%, 铁回收率超过 87%。这类干湿结合的复合工艺不仅提高了选矿效率, 也有效降低了单位能耗与药剂成本。

3.3 高压辊磨干选集成系统的创新应用

高压辊磨 (HPGR) 技术的引入代表了超贫磁铁矿选矿流程的重要变革。其利用层压粉碎原理在颗粒内部形成微裂纹, 使矿物沿晶界解离而非整体破碎, 显著减少磨矿能耗。将高压辊磨与干选系统集成后, 形成“破碎—分级—干选”闭路循环流程, 不仅节能降耗, 还提高了磁铁矿的解离效率。实践数据表明, 采用 HPGR 集成系统后, 精矿 TFe 提高 3 ~ 5 个百分点, 铁回收率可提升至 90%, 而能耗降低 15% ~ 20%。此外, 该系统结构紧凑、自动化程度高, 适用于处理规模 50 万 ~ 200 万吨/年的选矿项目, 尤其在西北干旱地区得到广泛应用。目前的研究方向集中于 HPGR 辊面结构优化、压力分布均匀化以及与磁场耦合机制的协同控制。一些研究团队通过引入智能控制系统, 对辊压参数和给矿量进行动态调节, 实现了能耗最优与回收率最大化的双重目标。这种智能化、连续