



中国微细粒钛铁矿选矿工艺研究进展

杨耀辉, 谢兵, 张森鹏

(中国地质科学院矿产综合利用研究所, 自然资源部战略性矿产综合利用工程技术创新中心, 四川 成都 610041)

摘要: 从微细粒钛铁矿的矿物特性出发, 详细综述了我国在微细粒钛铁矿选矿工艺方面的研究现状与进展, 探讨了这些特性在选矿过程中造成的主要难题, 系统归纳了现有微细粒钛铁矿预富集与分选方法及设备, 同时指出了该领域当前面临的问题与挑战。此外, 还介绍了几种应用于其他微细粒矿物的选矿技术与设备, 为在微细粒钛铁矿分选中的潜在应用提供了参考。

关键词: 微细粒钛铁矿; 预富集; 选矿工艺; 选矿装备

doi:[10.12476/kczhly.202506270122](https://doi.org/10.12476/kczhly.202506270122)

中图分类号: TD952 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2025) 04-0001-09

引用格式: 杨耀辉, 谢兵, 张森鹏. 中国微细粒钛铁矿选矿工艺研究进展[J]. 矿产综合利用, 2025, 46(4): 1-9.

YANG Yaohui, XIE Bing, ZHANG Senpeng. Research status and progress in beneficiation process of microfine ilmenite in china[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2025, 46(4): 1-9.

钛是一种银白色过渡金属, 金属钛及其合金重量轻、强度高、耐高温、无磁性, 具有良好的可塑性和抗腐蚀能力, 现已广泛应用于航天航空、航海、能源、建筑、交通、医疗和材料等战略新兴领域^[1]; 钛的氧化物“钛白”性质稳定, 具有优良的光学和颜料性能, 广泛用于涂料、橡胶、陶瓷、造纸、纺织等工业^[2]; 钛被称为“战略金属”和“现代金属”^[3]。

钛铁矿 FeTiO_3 是生产金属钛和钛白粉的主要原料, 根据 2024 年美国地质调查局 United States Geological Survey 发布的数据显示^[4], 全球已查清钛资源现有总量约 $7.5 \times 10^8 \text{ t}$, 其中钛铁矿资源约 $6.9 \times 10^8 \text{ t}$, 占全球钛资源总储量的 92% 左右, 现有储量十分丰富。中国的钛铁矿储量, 居世界第一, 但以难选的原生岩矿为主。主要分布在四川

攀西、河北承德、新疆哈密及喀什、陕西汉中、辽宁朝阳、广东兴宁、山东临沂、山西代县及湖北均县等地区。其中, 攀西地区是我国钛铁矿的主要产地, 储量巨大, 具有重要的战略地位^[5]。

攀枝花地区钛资源主要是从选铁尾矿中回收, 尽管已经采用阶磨阶选的选铁流程来避免矿物的过粉碎, 但仍旧不可避免的产生大量微细粒 ($-38 \mu\text{m}$) 钛铁矿。已有研究表明, 当攀西地区钒钛磁铁矿原矿磨矿细度达到 0.074 mm 时, $-38 \mu\text{m}$ 微细粒钛铁矿占比高达 28.74%, 但此时单体占比仅 67.38%^[6]。同时也有研究表明, 在选钛尾矿中仍存在大量微细粒钛铁矿没有得到有效回收, 至少 45% 钛铁矿分布在 $-38 \mu\text{m}$ 粒级中, 直接排入尾矿库, 造成资源的浪费^[7], 因此对微细粒钛铁矿的高效回收利用还仍需科研人员加强技术攻关。本

收稿日期: 2025-06-27

基金项目: 地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项 (2024ZD1003400); 国家重点研发计划青年科学家项目 (2021YFC2900800); 中国地质调查局地质大调查项目 (DD20230204102); 新疆科技厅重大专项 (2023A03003-4)

作者简介: 杨耀辉 (1985-), 男, 博士, 研究员, 主要从事战略性矿产资源综合利用技术研发与产业化示范推广相关工作。

通信作者: 张森鹏 (1998-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事矿物加工工程的工作。

文就我国微细粒钛铁矿的选别工艺现状与研究进展进行细致的梳理和总结,旨在对今后微细粒钛铁矿选矿研究提供参考。

1 微细粒钛铁矿基本性质

1.1 钛铁矿基本性质

钛铁矿的化学式为 FeTiO_3 , 理论上含 TiO_2 品位为 52.64%, 是工业制取海绵钛和钛白粉的主要原料。 Fe-Mg 和 Fe-Mn 间常可形成完全类质同象代替, 形成含镁锰钛铁矿、镁钛矿及红钛锰矿。当以 FeO 为主时, 称为钛铁矿; 以 MgO 为主时称镁钛矿; 以 MnO 为主时称红钛锰矿。钛铁矿属三方晶系, 晶体常呈板状, 集合体呈块状或粒状。其晶体结构与刚玉相似, 即 O^{2-} 作六方最紧密堆积, 堆积层垂直于三次轴, Fe^{2+} 和 Ti^{4+} 交替充填由 O^{2-} 形成的 $2/3$ 八面体空隙数。钛铁矿为钢灰色至铁黑色, 条痕黑色至褐红色, 金属—半金属光泽, 具有弱磁性和弱导电性, 无解理, 仅有时出现 $\{0001\}$ 或 $\{1011\}$ 裂开^[8]。钛铁矿晶格结构见图 1^[9]。

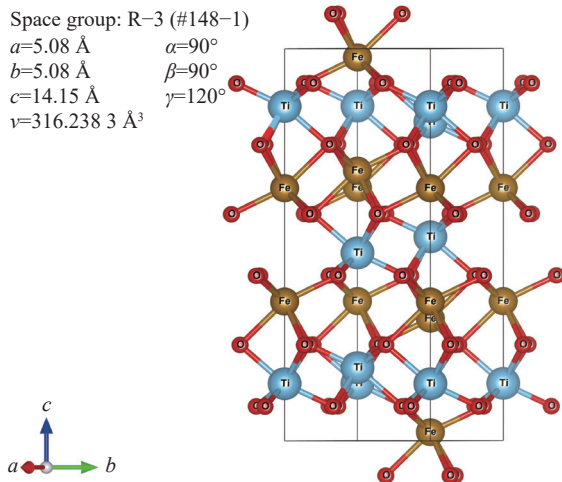


图 1 钛铁矿晶格结构
Fig.1 Ilmenite lattice structure

1.2 微细粒钛铁矿基本性质

近年来,我国经济发展日新月异,大量高品位易选矿产资源日趋匮乏,“贫、细、杂、散”也成为矿产资源的突出特征。对于一些复杂难选的低品位矿石而言,有用矿物嵌布粒度过细且极不均匀,必须将矿石细磨至 $20 \mu\text{m}$ 方能实现单体解离,部分矿物甚至需要细磨至 $10 \mu\text{m}$,从而产生大量微细粒甚至超细粒矿物,微细粒矿物具有质量小、表面电荷大、表面能量高等基本性质,这些

性质对微细粒矿物的磁选和浮选行为产生了显著影响。

矿石粒度过细对磁选回收率的影响主要是^[10]:

- (1) 粒度细, 具有较弱的磁性, 回收微细粒钛铁矿所需的磁场力更高, 常规高梯度磁选机无法满足;
- (2) 颗粒间的相互作用力增强, 使得颗粒在流体中的运动行为变得复杂, 给分选带来困难;
- (3) 表面性质复杂, 容易与脉石矿物等杂质形成混合体, 进一步增加了分选的难度。

矿石粒度过细对浮选的影响主要体现在以下几方面^[11-13]: (1) 质量小、粒度细、动能低, 颗粒与气泡碰撞黏附的概率小, 浮选回收率低; (2) 比表面积大, 脉石矿物与有用矿物之间易发生非选择性团聚, 药剂消耗量大, 选择性差; (3) 在矿浆中的溶解度高, 产生难免离子与捕收剂发生竞争吸附或与捕收剂反应生成沉淀, 影响药剂与矿物之间的相互作用; (4) 改变了矿浆的流变性, 导致浮选矿浆黏度高、气泡过度稳定; (5) 细粒矿泥罩盖在目的矿物表面, 改变矿物的亲疏水性, 增大分选难度。因此, 微细粒矿物的分选一直是选矿研究的热点和难点问题^[14]。

2 微细粒钛铁矿预富集工艺

经过几十年的发展, 主要形成了预富集+浮选的细粒钛铁矿的选矿技术, 其中高效预富集工艺是保证入浮原料品位和最终精矿品位的重要手段, 国内外对微细粒钛铁矿预富集的研究主要集中在重选、磁选和重磁联合这三方面。

严伟平等^[15]对比了直接浮选、脱泥—浮选、“离心选矿机预富集—浮选”、“超导磁选机预富集—浮选”、“强磁预富集—浮选”、“悬振锥面选矿机预富集—浮选”等钛铁矿预富集工艺流程, 结果表明通过预富集工序可以保证钛铁矿的有效回收。

2.1 重选预富集

重选预富集具有操作方便、成本低和环境友好等优点, 重选分离主要是依靠矿物之间的密度差异, 但是随着矿物颗粒粒径减小, 不同矿物之间密度差异会随之减小, 导致重选对细颗粒的分离变得困难。

针对重选预富集的研究主要集中在新型设备方面, 高建安等^[16]采用悬振锥面选矿机对 $19 \mu\text{m}$ 48.30% 的攀钢某选钛厂斜板溢流产品进行预富

集,可以获得品位 22.91%、回收率 38.21% 的钛粗精矿,为后续浮选创造了良好的环境。KGS-II 型选矿机,他是继悬振锥面选矿机后对微细粒矿物高效、绿色回收的又一重要成果,是一种涉及重力和回转力联合作用下连续分选的新型流膜重选设备。邱凯等^[17]采用 KGS-II 型选矿机对 -20 μm 50.87% 的实验样品进行脱泥和初步富集,当原矿中 TiO_2 品位为 16.69% 时,经过“一粗一扫一精”的重选流程,可获得 TiO_2 品位为 25.44%,回收率为 56.29% 的钛粗精矿。经过重选后有近 44% 的泥和脉石矿物被抛出,这使得后续浮选作业的环境变得更为简单。

2.2 磁选预富集

磁选法基于钛铁矿属于弱磁性矿物的特性,利用磁选机在特定磁场中对钛铁矿和脉石矿物进行分离。但钛辉石、橄榄石等脉石矿物也具有一定弱磁性,因此单独采用强磁选法难以回收钛铁矿,一般将强磁选作为浮选工艺的前置工序,以为浮选创造更好的条件为目的。另外与重选法一样,随着矿物颗粒粒径的减小,不同矿物之间的磁性差异也不断减弱,加大了磁选分离的困难。

强磁机具有悠久的历史,第一台能够连续选矿的强磁机研发于 20 世纪 70 年代,经过几十年的发展,为了满足对微细粒矿物的选别需求,逐渐发展出一些新型强磁设备和新工艺,对微细粒矿物的预富集取得了良好的效果。

新设备方面,一方面研究学者在原有设备上进行了改进,以提高精矿指标。和奔流等^[18]采用一种试验型 ZH 组合湿式强磁选机,进行攀枝花某微细粒级钛铁矿分选实验研究。实验结果表明,当操作条件较佳时,经一次粗选即可得到精矿 TiO_2 品位 20.55%、回收率 88.76% 的理想指标。王丰雨等^[19]研制了一种新型 ZQS 高梯度磁选机,相比传统立环式高梯度强磁机,具有磁场分布均匀、选别空间路径长、外力干扰小和运行稳定的特点。并针对 -38+19 μm 粒级的三种不同选厂微细粒钛铁矿进行实验,经一次磁选回收,回收率分别达到 86.80%、82.23% 和 77.78%,取得了良好的效果。

另一方面,研究学者进一步提升磁场强度,研发了超导高梯度设备,针对微细粒矿物回收取得了良好的效果。Shen 等^[20]提出用一种超导磁选机 (SMS) 对超细钛铁矿进行预选。针对 -20 μm

89.95% 的微细粒钛铁矿物料采用超导磁选机,在磁场强度为 2.4 T 和料浆流速 0.17 m/s 情况下,能够取得回收率 90.27% 的优秀指标。Yuan 等^[21]采用超导高梯度磁选工艺,针对攀枝花某选矿厂的废弃超细钛铁矿 (-20 μm),通过一粗一精的预选流程,获得了 TiO_2 品位为 16.03%、回收率为 66.39% 的精矿。研究结果表明,高速料浆和强磁场分别可提高钛铁矿精矿品位和回收率,表明料浆速度和磁场强度的协同作用是提高预选效率的关键技术。

在新工艺方面,一方面研究学者选择在高梯度强磁机的基础上,通过优化磁选工艺来提升微细粒钛铁矿的选别效果。黄会春等^[22]对 TiO_2 品位仅 4.53% 的选钛尾矿 (-19 μm 24.78%),采用 SLon 磁选机粗选—粗精矿磨矿—粗选尾矿分级、细粒级扫选—精选全磁选新工艺,可获得 TiO_2 品位 15.52%、回收率达 55.33% 的钛粗精矿。

另一方面,研究学者选择引入外力来帮助强化磁选分离效果,例如梁雪崑等^[23]采用选择性分散絮凝—高冲次高梯度磁选工艺,以 FX-3 絮凝剂处理攀枝花红格南矿区 TiO_2 品位为 7.01% 的尾矿库细粒钛铁矿,最终取得了钛精矿 TiO_2 品位和回收率分别为 24.93% 和 61.23% 的磁选指标,为微细粒钛铁矿磁选预富集提供了新的思路。

2.3 重选—磁选联合预富集

为了提高对微细粒矿物的分选效果,研究学者创新性地将重选和磁选联合,形成合适的联合工艺或者开发新型复合力场分选设备,取得了一定的效果。

在开发新型复合力场分选设备方面,一方面有研究学者在重选设备的基础上改进,添加磁场,使其具有复合力场。陈晓鸣等^[24]针对 TiO_2 品位 6.28% 的微细粒矿物 (-38 μm 42.68%) 对比了槽内表面涂有磁性耐磨涂层的 BLL-600 磁性螺旋溜槽和普通螺旋溜槽的分选效果,实验结果表明磁性螺旋溜槽能够取得更高的 TiO_2 回收率和更高的处理能力。陈晓鸣等^[25]又采用表面具有磁性耐磨涂层的磁性摇床分选云南武定地区某风化严重的细粒钛铁矿,试验结果表明,在相同的条件下,磁性摇床的分选效果比常规摇床要好。对于 -74+38 μm 的粒级,磁性摇床所得钛精矿品位更高,回收率比常规摇床可提高 26%;对于 -38 μm 的粒级,磁性摇床比常规摇床所得钛精矿品位可提高 8.08%,回收率可提高 18%。

另一方面,也有研究学者在强磁机的基础上改进,增加重选力场,多数以离心力场为主。李敬等^[26]研制了一种周期式离心高梯度磁选工业机,通过采用旋转磁介质动态捕获新模式,可以提高矿浆和矿粒群的松散度,增加磁介质捕获过程的竞争力。采用这种离心高梯度磁选设备对细粒钛铁矿进行试验,与现场脉动高梯度磁选机指标对比,离心高梯度磁选机新设备选择性更高,精矿 TiO_2 品位提高了 5.29%。

也有研究学者在重磁联合工艺方面取得了一定进展。赖启威等^[27]采用 SLon-100 周期式脉动高梯度磁选机和 SL-400 离心机联合工艺,对攀西地区 TiO_2 品位为 4.77% 的选钛尾矿 (-37 μm 30.17%) 进行分选实验,获得了 TiO_2 品位为 30.77%、回收率为 71.04% 的钛精矿,为后续浮选创造了良好的条件。中国地质科学院等^[28]单位创新并应用“精细分级+梯级磁选预富集”联合工艺流程,针对现场二段斜板溢流 (-19 μm 85.02%) 实现窄级别条件下预富集,有效实现尾矿中微细粒钛铁矿的高效回收。

3 微细粒钛铁矿选别工艺

经过科研人员十来年不懈努力的发展,我国在微细粒钛铁矿的选别技术有了巨大的提升,主要表现为其选别粒度下限由十几年前的 -45 μm 下降到现在的 -19 μm ,微细粒钛铁矿的选别技术取得了巨大的突破。常用的微细粒钛铁矿选别工艺包括重选法、磁选法和浮选法。但是由于微细粒钛铁矿粒度细、表面性质复杂等特殊性质,导致采用单一分选方法很难高效回收利用,因此在实际生产中更多采用联合分选方法。

3.1 浮选技术

浮选是钛铁矿最主要的选别方法,主要是通过添加表面活性剂扩大不同矿物颗粒表面物理化学性质的差异,改变矿物颗粒表面的润湿性,使其易于附着于矿浆中泡沫上浮,从而实现矿物颗粒的分离。关于钛铁矿浮选药剂主要集中在捕收剂和调整剂的研究。其中,钛铁矿组合捕收剂的开发和使用正在成为研究的主要方向,主要包括脂肪酸类、螯合类(羟肟酸类、含磷酸类、含砷酸类)及其他类型捕收剂,调整剂主要包括进行矿物表面预处理的活化剂(硫酸、铅离子和铜离子)、脉石矿物的抑制剂(CMC、草酸和水玻璃)等^[8]。随

着矿石性质趋于“贫、细、杂”的特征,对 -19 μm 微细粒矿物的高效选别已成为科研工作的重点。

近年来,针对微细粒钛铁矿浮选回收难的问题,科研工作者们一方面从增大颗粒的表观粒径,使微细粒矿物选择性聚团,从而实现微细粒矿物的常规浮选分离,如:载体浮选、疏水絮凝、选择性絮凝和剪切絮凝浮选等。另一方面则是降低气泡的尺寸,产生更微小的气泡以增加与细粒矿物碰撞黏附的几率,如微泡浮选。

(1) 载体浮选以易浮选粗粒级矿物为载体,负载微细粒级矿物上浮以实现分选,对微细粒矿物有良好的选别效果。朱阳戈等^[29]的研究表明,当粗粒载体比例超过 50% 时,自载体作用显著,能够显著提升 0~20 μm 微细粒钛铁矿的回收率,从 52.56% 提升至 61.96%。这一提升主要得益于捕收剂在矿物表面形成的疏水力,使得微细粒矿物能够黏附于载体上,从而优化了浮选环境。Chen 等^[30]采用疏水玻璃气泡作为载体,以 -19 μm 钛铁矿纯矿物为实验对象,微浮选结果表明,在 pH 值为 6 的条件下,疏水玻璃气泡的存在使细粒钛铁矿的回收率提高了 37.7%。尽管载体浮选方法在实验室研究中取得了显著效果,但在实际应用中仍面临操作难度大和异类载体难以分离回收的难题,故难以应用在实际生产中。

(2) 疏水絮凝浮选、选择性絮凝和剪切絮凝浮选都可统称为絮凝浮选,他们都是通过添加表面活性剂在微细粒矿物表面形成疏水膜,通过疏水作用和静电作用或者相互吸引聚集成团,或通过高分子絮凝剂的架桥作用将目的矿物连接起来,形成絮凝沉降,进而实现目的矿物与脉石矿物的分离。

针对攀枝花某选钛厂分级机溢流颗粒粒度细(-19 μm)、含泥量高的特点,范桂侠等^[31]等开展了微细粒钛铁矿的剪切絮凝浮选工艺研究,在一定的药剂制度下,通过“一粗一扫三精”的闭路浮选柱絮团实验流程处理原矿品位为 8.79% 的微细粒钛铁矿,最终获得品位 45.72%、回收率 51.18% 的钛精矿。王志丰等^[32]采用脱泥和剪切絮凝相结合的浮选工艺,以 MOH 作捕收剂,硫酸、水玻璃为调整剂,剪切时间 40 min,最终得到了 TiO_2 品位为 18.86%、回收率为 73.60% 的钛精矿,浮选效果比直接浮选有明显的改善。Peng 等^[33]对 $d_{90}=22.80 \mu\text{m}$ 的微细粒钛铁矿进行絮凝浮选研究,研

究发现絮凝效果为油酸钠>聚丙烯酰胺>羧甲基纤维素钠>可溶性淀粉。并且在聚丙烯酰胺与油酸钠的复合作用体系中,两种絮凝剂均与钛铁矿表面的 Fe^{3+} 发生反应。先加入聚丙烯酰胺再加入油酸钠,可以阻碍油酸铁沉淀的形成,与只使用一种絮凝剂或其他加药顺序相比,这种加药方法可使浮选回收率提高10%以上。

(3) 微泡浮选

微纳米气泡,是指气泡发生时直径在十微米左右到数百纳米之间的气泡,这种气泡是介于微米气泡和纳米气泡之间,具有常规气泡所不具备的物理与化学特性,如存在时间长、较高的表面(电位和传质效率高的特性)。许多研究表明减小气泡尺寸能提高颗粒与气泡间的碰撞概率、提高浮选速率常数和浮选回收率。微泡浮选法是回收微细矿物比较有研究价值的方法。

微纳米气泡的引入增强了疏水钛铁矿表面的疏水性,促进了疏水钛铁矿颗粒间团聚,而对于亲水矿物几乎没有影响。微纳米气泡水的加入可强化微细粒钛铁矿的浮选分离。中国地质科学院矿产综合利用研究所等单位^[34]针对原矿-19 μm 79.22%、 TiO_2 品位 16.85% 的二段强磁选的斜板溢流样品,采用强磁预富集—微纳米气泡强化浮选钛铁矿新工艺全流程实验获得了 TiO_2 品位 47.44%、 TiO_2 全流程回收率为 62.07% 的钛精矿产品。尽管微泡浮选方法在实验室研究中取得了显著效果,但在实际应用中仍面临操作难度大的难题,故难以应用在实际生产中。

(4) 表面改性技术

为了强化钛铁矿的浮选行为,进一步改善钛铁矿的浮选指标,近年来选矿科研工作者提出了一系列针对钛铁矿的表面改性手段,相关研究也取得了一定的积极进展。尽管不同的钛铁矿表面改性技术活化钛铁矿的浮选机制略有差异,但是总的来说主要集中在以下三个方面^[35]: ①增加钛铁矿表面的活性位点; ②促进钛铁矿表面二价铁离子向三价铁离子转化; ③增加钛铁矿在泡沫层滞留时间增加其捕收概率。

Bai 等^[36]以 $d_{90}=36.15 \mu\text{m}$ 的微细粒钛铁矿为对象,油酸钠为捕收剂,对未经处理或经铅离子处理的微细粒 (-38 μm) 钛铁矿的浮选行为进行了研究。微浮选实验表明, Pb^{2+} 可使浮选回收率提高 12%。并且硫酸处理促进了铁离子的价态跃

迁。 Fe^{3+} 覆盖表面的比例最终由 32.51% 提高到 63.22%。

针对微细粒钛铁矿表面改性的研究较少报道,可能原因是微细粒颗粒表面能较大,对药剂的吸附作用较强,但是选择性较弱,需要提升其对药剂吸附的选择性,而不需要通过表面改性来增加其表面活性作用位点,提升其吸附能力。因此微细粒钛铁矿表面改性研究应针对药剂选择性吸附方面来进行研究。

3.2 联合分选工艺

针对粗、细粒钛铁矿资源的回收,单一的浮选所起到的效果有限,联合选别流程是钛铁矿选矿技术的发展方向,强磁—浮选联合流程可以实现微细粒钛铁矿的有效回收,是现在的主要应用流程也是研究学者主要关注的流程。另外也有一些研究学者在重选—浮选流程取得了一定的进展。

3.2.1 重选—浮选联合分选工艺

对于重选—浮选联合分选,现有论文研究主要集中在悬振+浮选联合分选,其他的少有报道。高建安等^[16]针对 TiO_2 品位 8.50% 的攀钢某选钛厂斜板溢流产品 (-19 μm 48.30%), 采用悬振选矿机+浮选工艺回收细粒级钛铁矿,最终可获得品位 47.1%、回收率 26.07% 的钛精矿。邱凯^[17]针对 TiO_2 品位 18.84% 的微细粒矿物 (-20 μm 50.87%), 采用 KGS-II 型悬振锥面选矿机,通过重选—浮选联合工艺,最终可获得钛精矿中 TiO_2 品位为 47.12%, 回收率为 41.19% 的良好指标。

重选—浮选联合工艺相较于强磁—浮选联合工艺来说,精矿品位和成本有一定优势,但是处理能力和精矿的回收率要较低,因此现在主要还是采用强磁—浮选联合工艺。

3.2.2 强磁—浮选联合工艺

表 1 列出了一些研究学者针对微细粒钛铁矿通过强磁预富集—浮选联合流程所取得的一些技术指标,可以看到通过强磁—浮选流程,都取得了 TiO_2 品位大于 47% 的良好精矿指标。通过磁选预富集,一方面可以提升入浮品位,获得 TiO_2 品位在 15%~25% 之间的钛粗精矿,减少浮选药剂用量; 另一方面可以提前脱除干扰浮选微细粒脉石矿物和矿泥,改善浮选的矿浆环境。在合理的浮选药剂制度下,通过多段精选提高钛精矿的 TiO_2 品位,合理扫选可保证 TiO_2 回收率,最终获得良好的选矿技术指标。

表 1 强磁预富集+浮选工艺处理微细粒钛铁矿技术指标
Table 1 Technical indicators of fine ilmenite treated by strong magnetic pre-enrichment flotation process

选别流程	原矿		精矿	
	物料细度	TiO ₂ 品位/%	TiO ₂ 品位/%	TiO ₂ 回收率/%
强磁预富集+浮选 ^[37]	-19 μm 79.22%	16.31	47.44	62.89
强磁预富集+浮选 ^[38]	-19 μm 53.20%	12.37	45.56	47.10
强磁预富集+浮选 ^[39]	-19 μm 71.18%	15.85	47.29	58.41
强磁预富集+浮选 ^[40]	-19 μm 54.84%	19.94	48.18	72.43
强磁预富集+浮选 ^[41]	-38 μm 95.00%	9.16	44.89	70.59

无论是重选—浮选联合分选，还是磁选—联合分选，这类联合工艺都能取得良好的选矿指标，但是由于采用多种设备联合，导致整个微细粒钛铁矿选矿存在工艺流程长、工艺复杂和投资成本大等问题。

4 其他微细粒分选技术和设备

近年来，随着矿产资源的日渐枯竭，难以选别的微细粒矿物未来必定成为资源提取的主体，除了上面几节提到的微细粒钛铁矿中用到的设备和技术外，还有研究学者在其他微细粒矿物上所用的分选设备和技术，值得研究学者借鉴参考，并有望在今后微细粒钛铁矿分选方面作出一些贡献。

马梦绮等^[42]报道了一种由澳大利亚学者 Galvin 所研制的 Reflux Classifier(回流分级机，简称 RC)作为一种新型重力分选设备进入到矿物加工设备行列。该设备由液固流化床与倾斜通道组成，主要依靠流化水和沉降来使颗粒分离。该设备在细煤颗粒分选^[43]、细粒铬铁矿分选^[44]和细粒锆石颗粒回收^[45]中取得了良好的效果。

ZHOU M 等^[46]发明了一种磁性水力旋流器以用来分选-38 μm 的磁性颗粒，与传统的水力旋流器相比，附着的永久（钕铁硼）磁铁将磁铁矿颗粒集中到下流，使超细（-5 μm）磁铁矿和两种尺寸分布的细磁铁矿（-38 μm）的回收率平均分别提高了 15.4%、5.6% 和 2.0%。HU Z C 等^[47]发明了一种新型气动干式高强度磁选机（PDHIMS），较大磁场强度为 2 T，通过气流作用和强磁场作用，能够实现微细粒不同磁性颗粒的分离。通过对微细粒赤铁矿的分选实验，结果表明，这种新型设备能够实现-13 μm 的赤铁矿颗粒与脉石颗粒的高选择性分离。

已有众多学者在微细粒锂辉石、白钨矿、磷

灰石等氧化矿石的矿浆流变性与浮选之间的关系做出研究，通过宏观的流变特性调控，能够准备把握微细粒颗粒间的相互聚集/分散状态，从而在最合适的流变特性下，获得良好的浮选指标^[48]。

5 结论与展望

（1）针对微细粒钛铁矿预富集工艺和设备，现阶段主要研究方向一是将重力、磁力和离心力等有效结合，形成能使微细粒矿物有效分离和富集的复合力场。例如：离心高梯度磁选机是离心力、磁力和重力等相互叠加；磁力螺旋溜槽和磁性螺旋溜槽是通过重力、磁力、摩擦力等相互配合。另一个是采用超导等手段进一步增强高梯度磁选机的磁场强度，增强对微细粒钛铁矿的分选效果。不足之处在于：新型设备的复合力场需要更加复杂的机械设备来实现，设备程度越复杂越容易造成生产过程的稳定性下降及维护成本升高，加之选矿厂工作环境恶劣，对新型设备提出更高要求。将来选矿工作者面临更加“贫细杂”的矿石，需要从根本上探索新的分选理论，开发更先进的设备。

（2）针对微细粒钛铁矿选别的方法和技术一方面是浮选的新技术，其中主要为微泡浮选开始应用在微细粒钛铁矿浮选中，但仍处于研究的初步阶段，还需要进一步研究。另一方面联合分选技术仍然主要集中在强磁—浮选联合技术，有大量的报道取得了良好的选矿指标，该联合流程已经十分成熟，但也面临着流程长、复杂程度高的缺点，还需要从浮选入手，取得技术上的突破，从而简化工艺流程，降低生产成本。

（3）本文仅仅总结了微细粒钛铁矿选别的一些设备和技术，还有许多应用在其他微细粒矿物中的新设备和新技术，如矿浆流变性、RC 重选设备和 PDHIMS 等今后有望用于微细粒钛铁矿选别。

参考文献：

- [1] MENG Q Y, YUAN Z T, YU L, et al. Selective depression of titanite in the ilmenite flotation with carboxymethyl starch[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 440:955-962.
- [2] 张晓伟, 张万益, 童英, 等. 全球钛矿资源现状与利用趋势[J]. *矿产保护与利用*, 2019, 39(5):68-75.
- ZHANG X W, ZHANG W Y, TONG Y, et al. Current situation and utilization trend of global titanium resources[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2019, 39(5):68-75.
- [3] 刘应冬, 魏友华, 陈超, 等. 攀枝花钒钛磁铁矿尾矿资源特征及综合利用建议[J]. *矿产综合利用*, 2023, 44(4):35-41.
- LIU Y D, WEI Y H, CHEN C, et al. Tailings resource characteristics and multipurpose utilization suggestions of Panzhihua vanadium-titanium magnetite, SW China[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2023, 44(4):35-41.
- [4] U.S. Geological Survey, 2024, Mineral commodity summaries 2024: U.S. Geological Survey, 212 p.
- [5] 朱志敏, 林建, 张国礼, 等. 攀西钒钛磁铁矿尾矿中战略性矿产及其综合利用[J]. *矿产综合利用*, 2023, 44(4):42-49.
- ZHU Z M, LIN J, ZHANG G L, et al. Comprehensive utilizations of the strategic mineral resources from vanadium titano-magnetite tailings in the Panxi Region, SW China[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2023, 44(4):42-49.
- [6] 王利珍, 姜楚灵, 朱家祥, 等. 攀西某钒钛磁铁矿中钛的赋存状态研究[J]. *矿冶工程*, 2024, 44(5):84-88.
- WANG L Z, JANG C L, ZHU J X, et al. Occurrence state of titanium in vanadium-titanium magnetite ore from Panxi Region[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2024, 44(5):84-88.
- [7] 蔡先炎, 李硕, 陈勇, 等. 攀西某钒钛磁铁矿入库尾矿工艺矿物学及有价资源回收探索试验研究 [C]. 第十四届中国钢铁年会, 中国重庆, 2023:102-108.
- CAI X Y, LI S, CHEN Y, et al. Exploring experimental study on mineralogy and valuable resource recovery of inbound tailings of a vanadium titanium magnetite in Panxi [C]. The 14th China Iron and Steel Annual Conference, Chongqing, China, 2023:102-108.
- [8] 余攀, 丁湛, 李春龙, 等. 我国钛铁矿矿石浮选药剂研究进展[J]. *矿产保护与利用*, 2020, 40(2):82-87.
- YU P, DING Z, LI C L, et al. Research progress on flotation agents of ilmenite in China[J]. *Conservation and Utilization of Mineral*, 2020, 40(2):82-87.
- [9] DOWNS R T, HALL-WALLACE M. The American Mineralogist crystal structure database[J]. *American Mineralogist*, 2003, 88(1):247-250.
- [10] 李丽匣, 申帅平, 袁致涛, 等. 微细粒钛铁矿磁选回收率低原因分析[J]. *中国矿业*, 2018, 27(11):138-144.
- LI L X, SHEN S P, YUAN Z T, et al. Loss mechanism of fine-grained ilmenite in magnetic separation[J]. *China Mining Magazine*, 2018, 27(11):138-144.
- [11] 陈文胜, 付君浩, 韩海生, 等. 微细粒矿物分选技术研究进展[J]. *矿产保护与利用*, 2020, 40(4):134-145.
- CHEN W S, FU J H, HAN H S, et al. Advance in the separation of ultrafine minerals[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2020, 40(4):134-145.
- [12] 杜凤梅, 王金玮, 齐晓娜. 微细粒矿物分选技术研究进展[J]. *世界有色金属*, 2021(11):178-179.
- DU F M, WANG J W, QI X N. Research progress on separation technology of fine minerals[J]. *World Nonferrous Metals*, 2021(11):178-179.
- [13] 常自勇, 李玉娇, 沈政昌, 等. 微细粒矿物浮选捕收剂的应用及其机理研究进展[J]. *工程科学学报*, 2023, 45(11):1807-1819.
- CHANG Z Y, LI Y J, SHEN Z C, et al. Advancements in the application and mechanism of fine-grained mineral flotation collectors[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2023, 45(11):1807-1819.
- [14] FARROKHPAY S, FILIPPOV L, FORNASIERO D. Flotation of Fine Particles: A Review[J]. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2021, 42(7):473-483.
- [15] 严伟平, 李维斯, 杨耀辉, 等. 攀西地区超微细粒级钛铁矿资源选矿工艺研究[J]. *矿产综合利用*, 2023(4):55-61.
- YAN W P, LI W S, YANG Y H, et al. Research on mineral processing technology of ultrafine ilmenite resources in Panzhihua-Xichang Area[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2023(4):55-61.
- [16] 高建安, 张雨田, 纪翠琴. 攀钢选钛厂微细粒级钛铁矿回收新工艺研究[J]. *矿山机械*, 2016, 44(11):58-62.
- GAO J A, ZHANG Y T, JI C C. Research on new process of recovering fine ilmenite from titanium beneficiation plant of Panzhihua steel group[J]. *Mining & Processing Equipment*, 2016, 44(11):58-62.
- [17] 邱凯. 攀枝花微细粒钛铁尾矿再选新工艺研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018.
- QIU K. Research on new process of re-separation of ultrafine ilmenite tailings in Panzhihua [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2018.
- [18] 和奔流, 袁铭泽, 陈俊, 等. 某微细粒级钛铁矿组合湿式强磁选试验研究[J]. *资源信息与工程*, 2020, 35(6):59-61+66.
- HE B L, YUAN M Z, CHEN J, et al. Experimental study on combined wet high intensity magnetic separation of a fine

- fraction ilmenite[J]. *Resource Information and Engineering*, 2020, 35(6):59-61+66.
- [19] 王丰雨, 徐晓衣, 梁焘茂, 等. 攀枝花超细粒级钛铁矿磁选富集方法[J]. *钢铁钒钛*, 2021, 42(2):79-85.
- WANG F Y, XU X Y, LIANG T M, et al. Magnetic separation and enrichment method of ultrafine-grained vanadium-bearing titanomagnetite in Panxi region[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2021, 42(2):79-85.
- [20] SHEN S P, YUAN Z T, LIU J T, et al. Preconcentration of ultrafine ilmenite ore using a superconducting magnetic separator[J]. *Powder Technology*, 2020, 360:1-9.
- [21] YUAN Z T, ZHAO X, LU J, et al. Innovative pre-concentration technology for recovering ultrafine ilmenite using superconducting high gradient magnetic separator[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2021, 31(6):1043-52.
- [22] 黄会春, 陈禄政, 熊涛, 等. 攀西某选钛尾矿强磁回收微细粒钛铁矿的新工艺试验研究[J]. *金属矿山*, 2023(10):100-104.
- HUANG H C, CHEN L Z, XIONG T, et al. Experimental study on new high gradient magnetic separation process for recovery of ultra-fine ilmenite from a titanium tailings in Panxi region[J]. *Metal Mine*, 2023(10):100-104.
- [23] 梁雪莹, 叶国华, 胡渝杰, 等. 微细粒级钛铁矿的选矿预处理研究[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2023(3):70-75.
- LANG X Y, YE G H, HU Y J, et al. Study on beneficiation pretreatment of fine-grained ilmenite[J]. *Nonferrous Metals(Mineral Processing Section)*, 2023(3):70-75.
- [24] 陈晓鸣, 严鹏, 陈力行. 磁性螺旋溜槽回收细粒钛铁矿试验[J]. *金属矿山*, 2014(3):132-135.
- CHEN X M, YAN P, CHEN L X. Experiments on fine ilmenite recovery with magnetic spiral chute[J]. *Metal Mine*, 2014(3):132-135.
- [25] 陈晓鸣, 严鹏, 陈力行. 磁性摇床在回收细粒钛铁矿中的应用[J]. *矿冶*, 2015, 24(1):71-73+80.
- CHEN X M, YAN P, CHEN L X. Application of magnetic shaking table in recovery of fine ilmenite[J]. *Mining and Metallurgy*, 2015, 24(1):71-73+80.
- [26] 李敬, 官长平, 任祥君, 等. 离心高梯度磁选工业机精选细粒钛铁矿的试验研究[J]. *中国钨业*, 2020, 35(4):26-32.
- LI J, GUAN C P, REN X J, et al. Experimental study on the separation of fine ilmenite by centrifugal high gradient magnetic separator[J]. *China Tungsten Industry*, 2020, 35(4):26-32.
- [27] 赖启威, 陈禄政, 熊涛, 等. SL 离心机从攀西选钛尾矿中分选微细钛铁矿试验[J]. *有色金属工程*, 2023, 13(10):53-60.
- LAI Q W, CHEN L Z, XIONG T, et al. Experiment on separation of ultra-fine ilmenite from titanium tailings in Panxi Region[J]. *Nonferrous Metals*, 2023, 13(10):53-60.
- [28] 杨耀辉, 严伟平, 宋军, 等. 超微细粒级 (小于 19 μ m) 钛铁矿高效回收关键技术成功研发并应用[J]. *科技成果管理与研究*, 2023, 18(4):80-82.
- YANG Y H, YAN W P, SONG J, et al. Key technologies for efficient recovery of ultrafine ilmenite (less than 19 μ m) successfully developed and applied[J]. *Management and Research on Scientific & Technological Achievements*, 2023, 18(4):80-82.
- [29] 朱阳戈, 张国范, 冯其明, 等. 微细粒钛铁矿的自载体浮选[J]. *中国有色金属学报*, 2009, 19(3):554-560.
- ZHU Y G, ZHANG G F, FENG Q M, et al. Autogenous-carrier flotation of fine ilmenite[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2009, 19(3):554-560.
- [30] CHEN P, CHEN Y C, LIU H, et al. Novel approach for fine ilmenite flotation using hydrophobized glass bubbles as the buoyant carrier[J]. *Minerals (Basel, Switzerland)*, 2021, 11(3):231.
- [31] 范桂侠, 曹亦俊. 微细粒钛铁矿和钛辉石的剪切絮凝浮选行为[J]. *中国矿业大学学报*, 2015, 44(3):532-539+572.
- FAN G X, CAO Y J. The shear flocculation flotation behaviors of micro fine ilmenite and titanite[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2015, 44(3):532-539+572.
- [32] 王志丰, 郭海宁, 陈杜娟, 等. 某微细粒钛铁矿浮选试验研究[J]. *甘肃冶金*, 2016, 38(1):5-8.
- WANG Z F, GUO H N, CHEN D J, et al. Rerearch on the flotation of some micro-fine ilmenite[J]. *Gansu Metallurgy*, 2016, 38(1):5-8.
- [33] PENG Y, XIAO J H, DENG B, et al. Study on separation of fine-particle ilmenite and mechanism using flocculation flotation with sodium oleate and polyacrylamide[J]. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 2019, 56:161-172.
- [34] 严伟平. 微纳米气泡强化微细粒钛铁矿浮选分离的应用基础研究[R]. 成都:中国地质科学院矿产综合利用研究所, 2022.
- YAN W P. Fundamental research on micro-nano bubble enhanced flotation separation of ultrafine ilmenite[R]. Chengdu: Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS, 2022.
- [35] ZHAI J H, CHEN P, SUN W, et al. A review of mineral processing of ilmenite by flotation[J]. *Minerals Engineering*, 2020, 157:106558.
- [36] BAI S J, YU P, DING Z, et al. New insights into lead ions activation for microfine particle ilmenite flotation in sulfuric

acid system: Visual MINTEQ models, XPS, and ToF-SIMS studies[J]. *Minerals Engineering*, 2020, 155:106473.

[37] 严伟平. 攀西某微细粒难选钛铁矿的选矿新工艺研究[J]. 有色金属工程, 2020, 10(8):76-82.

YAN W P. Study on new beneficiation technology for a refractory ultrafine ilmenite ore in Panxi[J]. *Nonferrous Metals*, 2020, 10(8):76-82.

[38] 邓建, 杨耀辉, 严伟平, 等. 攀西某超微细粒物料中钛铁矿选矿回收实验研究[J]. 矿产综合利用, 2023(4): 27-34.

DENG J, YANG Y H, YAN W P, et al. Recovery of ilmenite from an ultrafine fine particle material in Panxi. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2023(4): 27-34.

[39] 李维斯, 陈攀, 杨耀辉, 等. 新型捕收剂 TZ-1 浮选微细粒钛铁矿实验研究[J]. 矿产综合利用, 2022(2):86-91.

LI W S, CHEN P, YANG Y H, et al. Experimental study on flotation of the fine ilmenite with a new collector TZ-1[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022(2):86-91.

[40] 安登极. 攀西钒钛磁铁矿细泥中钛铁矿的可选性研究[J]. 矿冶工程, 2020, 40(1):69-72.

AN D J. Floatability of ilmenite in slime generated from vanadium-titanium magnetite in Panzhihua[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2020, 40(1):69-72.

[41] 曹玉川, 黄光耀, 刘星. -38 μm 粒级钛铁矿高效回收试验研究[J]. 矿冶工程, 2012, 32(4):48-50.

CAO Y C, HUANG G Y, LIU X. Study on high-efficiency recovery of ultrafine ilmenite(-38 μm)[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2012, 32(4):48-50.

[42] 马梦绮, 张志远, 荆隆隆, 等. Reflux Classifier 分离细颗

粒的技术发展与应用前景[J]. 有色金属(选矿部分), 2024(1): 106-115.

MA M Q, ZHANG Z Y, JING L L, et al. Development and application prospect of Reflux Classifier for fine particles separation[J]. *Nonferrous Metals(Mineral Processing Section)*, 2024(1):106-115.

[43] KOPPARTHI P, AWASTHI A, SACHINRAJ D, et al. Beneficiation of coal fines using the Reflux™ Classifier[J]. *Minerals Engineering*, 2019, 136:110-119.

[44] GALVIN K P, IVESON S M, ZHOU J, et al. Influence of inclined channel spacing on dense mineral partition in a REFLUX™ Classifier. Part 1: Continuous steady state[J]. *Minerals Engineering*, 2020, 146:106112.

[45] GALVIN K P, ZHOU J, SUTHERLAND J L, et al. Enhanced recovery of zircon using a REFLUX™ classifier with an inclined channel spacing of 3 mm[J]. *Minerals Engineering*, 2020, 147:106148.

[46] ZHOU M, FARKAS L A, KOKKILIC O, et al. An investigation into processing fine magnetite using a magnetic hydrocyclone[J]. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 2023, 62(3):497-501.

[47] HU Z C, LU D F, WANG Y H, et al. A novel pneumatic dry high-intensity magnetic separator for the beneficiation of fine-grained hematite[J]. *Powder Technology*, 2024, 433:119216.

[48] SAJJAD M, OTSUKI A. correlation between flotation and rheology of fine particle suspensions [J/OL]. *Metals*, 2022, 12(2):270.

Research Status and Progress in Beneficiation Process of Microfine Ilmenite in China

YANG Yaohui, XIE Bing, ZHANG Senpeng

(Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS, Technology Innovation Center for Comprehensive Utilization of Strategic Mineral Resources, Ministry of Natural Resources, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: Starting from the intrinsic properties of microfine ilmenite, this paper provides a detailed overview of the current research status and advancements in the beneficiation process of microfine ilmenite, discussing the primary challenges these properties pose during beneficiation. The review further summarizes existing methods and equipment for pre-concentration and separation of microfine ilmenite, while addressing current issues and challenges in the field. Additionally, several beneficiation technologies and equipment used for other microfine minerals are introduced, providing references for their potential application in microfine ilmenite processing.

Keywords: microfine ilmenite; pre-concentration; beneficiation process; mineral processing equipment