

煤矸石中钛资源的富集及提取技术研究进展及展望

钱苏皖¹, 孔德顺^{1,2}, 高源³, 嵇囡囡¹

(1. 大连大学 环境与化学工程学院, 辽宁 大连 116622;
2. 六盘水师范学院 化学与材料工程学院, 贵州 六盘水 553004;
3. 中国矿业大学 化工学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:从煤矸石中回收钛资源, 具有固废高值化与资源安全保障的双重意义。本文系统综述了煤矸石中钛的赋存特性及其对富集和提取工艺的影响, 重点分析了酸浸、碱熔、焙烧—浸出等主流湿法冶金技术的适用条件与技术瓶颈, 并与物理分选及生物浸出、离子液体萃取等新兴绿色提取技术进行对比, 展望了未来研究方向, 为实现煤矸石中钛资源的经济、环保与高效回收提供参考。

关键词:煤矸石; 钛; 提取; 富集; 湿法冶金; 赋存状态; 研究进展; 展望

中图分类号:TF803.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2617(2026)04-0476-08

DOI:10.13355/j.cnki.sfyj.2026.04.003

在“双碳”战略推动下, 工业固体废弃物的源头减量与高值化利用已成为我国实现可持续发展的必由之路。煤矸石是煤炭生产中产生的常见固废, 占原煤产量的 10%~20%, 目前我国积存煤矸石已超过 10×10^9 t, 且每年还会排出约 1×10^9 t, 其长期堆存不仅侵占土地资源, 还会通过风化、自燃、淋溶等途径释放重金属及酸性渗滤液, 对周边水体、土壤及大气环境构成持久性威胁, 甚至诱发滑坡、泥石流等地质灾害, 环境与安全风险突出^[1]。传统的填埋、铺路或低热值发电等方式难以实现其大规模消纳与资源价值提升, 亟需探索新的资源化路径。

另一方面, 钛作为关键战略金属, 广泛应用于航空航天、海洋工程、国防军工及生物医药等关键领域^[2]。我国虽为钛资源大国, 但钛原料对外依存度高达 60%, 资源安全保障面临严峻挑战^[3]。目前, 对煤矸石中钛回收的研究已取得了初步进展, 但现有研究多侧重于单项技术工艺的开发, 缺乏对不同技术路线适用条件、富集和提取效率与

技术瓶颈的系统性综述与对比分析; 加之工艺设计未充分结合物料特征, 导致技术普适性差, 难以实现工业化应用。因此, 本文系统综述了煤矸石中钛的赋存特性及其对湿法提取工艺的影响, 重点分析了酸浸、碱熔、焙烧—浸出等主流湿法技术及新兴绿色技术的适用条件与技术经济瓶颈, 展望了未来发展方向, 以期为推动煤矸石中钛资源的经济、环保、高效回收提供技术参考。

1 煤矸石中钛的赋存特性

煤矸石中钛氧化物(TiO_2)的赋存特性受地质成因、沉积环境及煤化作用控制, 主要分为矿物态与非矿物态两类: 矿物态 TiO_2 以金红石、锐钛矿和板钛矿为主, 作为碎屑或自生矿物存在于煤矸石中, 其中金红石因化学稳定性较高, 成为矿物态 TiO_2 主要载体^[4]; 非矿物态 Ti 常以类质同象形式赋存于黏土矿物或黄铁矿晶格中, 难以通过物理方法分离^[5]。在分布特征上, TiO_2 具有显著的选择性富集特点, 由于含钛矿物具有密度高、硬度大等特

收稿日期: 2025-11-18; 修订日期: 2025-12-05

基金项目: 2025 年度贵州省科学技术协会协同创新研究专项(QKX2025-ZX-099); 六盘水市科技计划项目(52020-2019-01-02)。

第一作者简介: 钱苏皖(2003—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为固体废弃物资源化利用及环境保护。

通信作者简介: 孔德顺(1974—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为固体废弃物资源化利用及环境保护。E-mail: kongdeshun518@163.com。

嵇囡囡(1981—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为环境评价与管理、产业生态。E-mail: jinannan@dlu.edu.cn。

点, TiO_2 通常在细粒级中含量较高;此外, TiO_2 含量还与煤矸石矿物组成密切相关, 常在高岭石、石英及黏土矿物含量较高的煤矸石中富集, 这一现象说明它们具有共同的物源与沉积背景^[6]。深入理解 TiO_2 的赋存形态与分布规律, 是实现其高效分离与高值化利用的重要基础。

钛矿物的嵌布粒度微细也是其共性特征, 这种微细粒嵌布需细磨才能实现单体解离, 但过磨又会增加能耗和泥化, 对后续浸出固液分离造成困难^[7]。钛矿物的嵌布类型可分为单体解离型、毗连连生型、包裹体型、浸染状分布型(图 1)^[8]。其中, 包裹体和浸染状分布的钛矿物回收难度最大, 是制约整体回收率提升的关键。

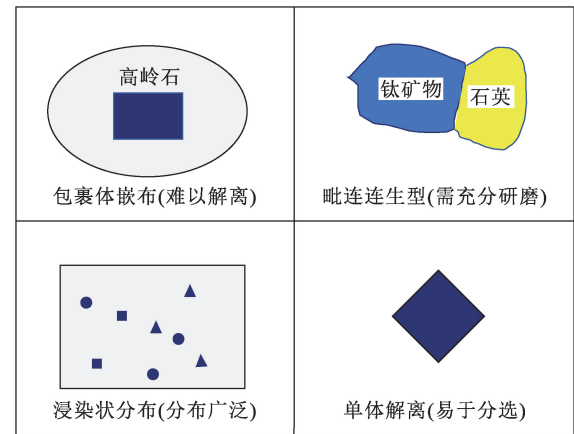


图 1 钛矿物嵌布类型示意^[8]
Fig. 1 Schematic diagram of dissemination pattern of titanium minerals^[8]

煤矸石中钛复杂的赋存状态决定了其资源化必须采用“矿物学特征导向”的工艺路线。对于以独立矿物形式存在的钛, 若粒度较粗、解离度高, 可考虑“物理预富集—湿法提纯”的联合流程以降低酸耗; 而对于微细粒嵌布、特别是以类质同象或包裹体形式存在的钛, 则更适合采用“直接强化浸出”或“活化焙烧—常压浸出”的主体技术路线^[9]。因此, 在实验室研究与工业实践中, 对目标煤矸石进行系统的工艺矿物学研究, 是设计经济、高效湿法提取工艺不可或缺的先决条件。

2 煤矸石中钛的富集与提取技术

2.1 物理分选预富集技术

针对煤矸石中钛矿物嵌布粒度细、共生关系

复杂的特点, 重选、磁选与浮选及其联合工艺已成为研究与应用的重点。

2.1.1 重选

重选主要是利用钛矿物与石英、高岭石等主要脉石矿物间的显著密度差进行分选。摇床与螺旋溜槽在处理粗粒级钛矿物时效果稳定, 采用摇床联合磁选处理某弱磁选尾矿时可获得 TiO_2 品位为 40.81%、钛回收率为 18.47% 的钛精矿^[10]。因此, 重选常被视为预抛尾和回收粗粒级产品的首选工艺。

2.1.2 磁选

磁选, 特别是高梯度磁选(HGMS), 是回收弱磁性钛铁矿的有效方法。HGMS 能产生高强度、高梯度的磁场, 有效捕获微细粒弱磁性矿物。Yuan Z. T. 等^[11]研究了一种选择性磁性包覆方法, 通过在钛铁矿表面定向沉积磁铁矿, 显著增强其磁性, 而脉石矿物(如辉石)则不受影响, 从而使混合矿物磁选后 TiO_2 回收率提高 36%。对于无磁性的锐钛矿与金红石, 常规磁选无效, 须引入表面磁化焙烧等预处理手段, 将其转化为强磁性的磁铁矿或钛磁铁矿, 再进行磁选分离, 这为处理复杂钛矿物组合提供了新思路。

2.1.3 浮选

浮选是回收细粒嵌布钛矿物最具前景的方法, 其核心在于开发高选择性药剂体系, 即捕收剂和调整剂。煤矸石中钛矿物的浮选药剂体系见表 1。捕收剂主要有苯乙烯膦酸、羟肟酸、油酸类等。苯乙烯膦酸等对锐钛矿和金红石选择性优异, 可在 $\text{pH}=3.0\sim6.5$ 时通过化学吸附形成五元环螯合物; 羟肟酸对多种钛矿物均具有良好捕收能力; 油酸类则更适用于钛铁矿, 但对脉石矿物选择性较差。调整剂主要有水玻璃、六偏磷酸钠等。水玻璃可有效抑制硅酸盐脉石; 六偏磷酸钠作为矿浆分散剂, 可减少细泥对分选的影响^[12-13]。

表 1 煤矸石中钛矿物的浮选药剂体系
Table 1 Flotation reagent systems for titanium minerals in coal gangue

钛矿物类型	捕收剂	调整剂	最佳 pH 操作范围	参考文献
锐钛矿	苯乙烯膦酸	草酸	弱酸性至中性	[14]
金红石	羟肟酸	水玻璃	弱酸性至中性	[15-16]
钛铁矿	油酸	六偏磷酸钠	酸性至弱碱性	[17]

单一的物理分选方法难以应对煤矸石中钛矿物的复杂性,而“重选-磁选-浮选”联合流程通过工艺协同,可实现钛资源的梯级回收与最大化利用,即重选预抛尾并回收已解离的粗粒钛矿物,磁选分选出钛铁矿,浮选最终富集细粒级的锐钛矿与金红石^[18]。

物理预富集的目标是为湿法冶金提供“精料”。通过物理分选能提升 TiO_2 品位,显著减少后续酸浸处理的物料量,从而大幅降低酸耗、能耗及废渣产生量,提升全流程的经济性与环境友好性。未来研究应更注重工艺矿物学与分选流程的深度耦合,并开发针对微细粒钛矿物的高效-低耗浮选药剂与选择性絮凝等新技术,进一步提高预富集效率,为湿法提取奠定坚实的原料基础。

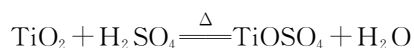
2.2 湿法冶金提取技术

2.2.1 酸浸法

酸浸法是基于矿物在酸液中的化学溶解实现目标金属分离的经典湿法冶金技术。针对煤矸石的特性,主要分为硫酸、盐酸及混合酸浸出体系。

2.2.1.1 硫酸浸出

硫酸浸出法因其技术成熟、成本相对较低,应用最为广泛。其核心反应为:



影响浸出效果的关键操作参数包括硫酸浓度、反应温度、浸出时间、液固体积质量比。为有效破坏硅酸盐脉石对钛矿物的包裹,常引入氟化物(如 NaF 、 NH_4F)作为助溶剂。与传统酸浸方法相比,采用氟化铵($[\text{NH}_4^+]$ - $[\text{F}^-]$)溶液浸出体系能显著提高钛浸出率,在优化条件下,钛浸出率可达 92.83%^[19]。

2.2.1.2 盐酸浸出

盐酸浸出体系浸出效率较高,这得益于其更强的酸性,以及 Cl^- 对 Ti^{4+} 特有的配合作用,可能生成 $[\text{TiCl}_6]^{2-}$ 配合物等,促进反应正向进行:



但盐酸固有的高挥发性和强腐蚀性对反应设备的材质(如石墨、搪瓷或高级合金)和密封系统要求苛刻,投资与运营成本较高。Liu C. L. 等^[20]研究表明,盐酸浸出钛的过程中会受到多种因素

共同影响,在优化的微波功率(800 W)、酸矸比(1.5 : 1)和辐射时间(1.25 h)条件下,钛浸出率可达 81.25%,说明热活化与酸浸协同作用可提高钛浸出效果。

2.2.1.3 混合酸浸出

混合酸浸出法可协同不同酸介质的优势。在硫酸-盐酸混合体系中, H_2SO_4 可优先与硅酸盐或氧化物反应生成可溶性硫酸盐,同时释放出结合态的钛组分; HCl 则凭借更强的配合能力促进 Ti^{4+} 形成稳定配合物,从而抑制水解沉淀,提高溶液中钛的稳定性与浓度^[21]。

硫酸浸出法仍是当前最具工业化基础的工艺,但其高能耗、设备易腐蚀,以及废酸与重金属废水处理困难等问题制约了其应用发展,因此需积极探寻绿色替代浸出介质。低共熔溶剂(DES)因具有蒸汽压低、毒性小、可生物降解及设计灵活特性而备受关注,在优化条件下,DES 对模拟煤矸石样品中钛的提取率能进一步提高,优于传统无机酸体系^[22]。

未来酸浸技术的发展应聚焦于 DES、有机酸等绿色浸出剂持续开发;将绿色体系与微波、超声波等外场能量耦合,提升反应动力学;探索“以废治废”模式,利用其他工业废酸,构建废酸回收循环工艺。

2.2.2 碱熔—水浸法

碱熔—水浸法是一种通过高温碱熔将难溶钛矿物转化为可溶性钛酸盐,再经水浸提取的强烈预处理方法。其核心反应为:



熔融产物经水浸后,其中的钛以钛酸钠形式进入溶液,后续可通过酸解获得目标钛产品。如 Manhique 等^[23]针对低品位钛矿物进行碱熔—水浸研究,结果表明,在控制熔融温度为 850 °C、停留时间为 60 min 条件下进行碱熔,之后在最佳液固体积质量比下进行水浸,可获得约 80% 的钛回收率。

碱熔法虽分解效率高,但存在高能耗、高碳排放、高试剂消耗及严重二次污染等问题,制约了其工业化应用。为推进绿色冶金,未来需着力于根本性工艺改进:一是反应过程强化,探索机械活化预处理与低温碱熔的耦合,如尝试通过高能球磨降低钛铁矿与 NaOH 的反应温度;二是构建“以废治废”协同系统,利用铝业赤泥或电厂碱性废渣作为部分碱源,既能处理固废、降低成本,又符合

循环经济原则;三是能源系统集成,在规划时将碱熔单元与工业余热相结合。

综上所述,除非能与上述系统性创新解决方案紧密结合,否则碱熔—水浸法在处理煤矸石这类低价值大宗固废时的工业化前景十分有限。

2.2.3 焙烧—浸出法

焙烧—浸出法是一种通过热化学预处理改变目标矿物化学形态或物理结构,从而显著提升后续浸出效率的联合工艺。针对煤矸石中钛的赋存特性,根据焙烧氛围与添加剂的不同,主要分为活化焙烧与氯化焙烧。

2.2.3.1 活化焙烧

活化焙烧是通过热致相变或晶格畸变破坏锐钛矿和金红石等钛矿物的稳定晶体结构,达到增强其化学活性的目的。Lu P. 等^[24]研究表明,在对含钛物料进行硫酸浸出前进行焙烧,随焙烧温度升高,钛浸出率显著提高^[24],工艺流程如图 2 所示。Wang X. L. 等^[25]研究结果表明,硫酸铵焙烧可使物料中的铁、铝等杂质元素转化为可溶性硫酸盐而被去除,同时破坏钛矿物的稳定晶格,实现活化目的。这种硫酸化焙烧策略能在实现高效活化的同时,避免直接使用高浓度硫酸,环境风险更可控。

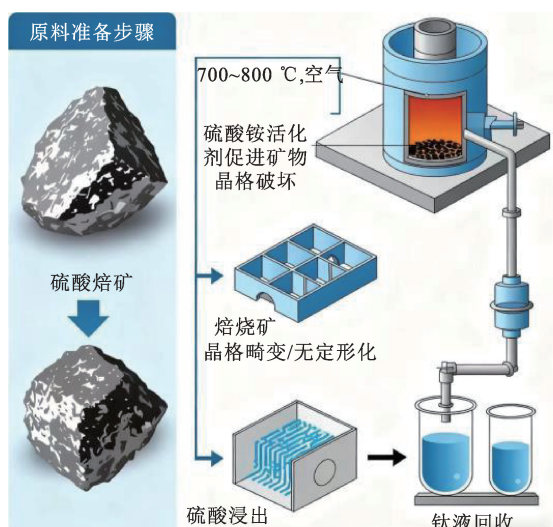


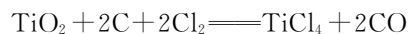
图 2 钛矿物活化焙烧—硫酸浸出回收工艺流程^[24]

Fig. 2 Process flowchart for recovery of titanium minerals via activation roasting—sulfuric acid leaching^[24]

2.2.3.2 氯化焙烧

氯化焙烧是一种在还原剂(如碳)和氯化剂

(如 Cl_2 、 CaCl_2 或 NaCl) 等作用下,将钛氧化物转化为易挥发性 TiCl_4 的火法-湿法耦合工艺,其核心反应为:



生成的 TiCl_4 蒸气经冷凝捕集后,是生产海绵钛或氯化法钛白粉的高纯度原料^[26]。该方法优势在于流程短、反应动力学快、产品附加值较高,但工业化应用受限于高温,能耗较大,且过程涉及 Cl_2 、 CO 等有毒气体,以及强腐蚀性的 TiCl_4 ,对反应器的材质、系统的密封性及尾气处理要求苛刻,导致投资与运维成本高昂,工艺流程如图 3 所示。Lu P. F. 等^[27]研究表明,杂质氯化物(如 FeCl_3)的共挥发与沉积是导致系统堵塞和产品污染的关键问题之一。

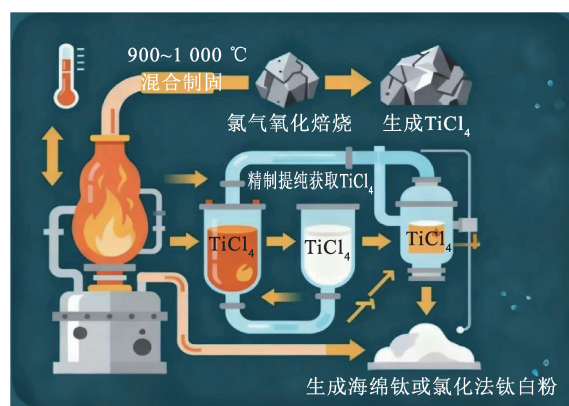


图 3 氯化焙烧制备高纯 TiCl_4 工艺流程^[26]

Fig. 3 Process flowchart of preparing high-purity TiCl_4 via chlorination roasting^[26]

焙烧—浸出法,特别是非氯化路径,能将煤矸石中难溶钛矿物进行有效提取,但高能耗制约了其绿色发展。未来技术的发展应聚焦于新型活化机制与能量输入方式的创新:一方面,研发新型复合活化剂,使形成低温共熔物的 $\text{NaOH}-\text{Na}_2\text{CO}_3$ 混合碱,或原位生成 HF 的 $\text{CaF}_2-\text{H}_2\text{SO}_4$ 等固体氟源,在低温下高效断裂硅钛键;另一方面,推进外场强化焙烧,尝试利用微波的体相加热与选择性活化特性,诱导矿物产生微裂缝,改善浸出动力学^[28]。将微波或机械活化与温和浸出工艺耦合,有望构建“低温高效”的短流程,从根本上降低工艺的碳足迹与环境负荷。

煤矸石提钛的主要湿法冶金技术对比结果见表 2。

表 2 煤矸石提钛的主要湿法冶金技术对比
Table 2 Comparison of major hydrometallurgical techniques for titanium extraction from coal gangue

方法	适用矿石类型	钛浸出率/%	主要优点	主要缺点	参考文献
硫酸浸出	大多数钛矿物	~92	成本较低,可大规模工业化应用	易腐蚀设备,酸耗大,废酸处理困难	[19,29]
盐酸浸出	金红石、钛铁矿	~81	流程简洁,对设备要求较低	挥发损失大,腐蚀性强	[20,30]
碱熔—水浸	难处理钛矿	~80	流程简单,适合工业化放大	能耗高,碱耗大	[4,23]
活化焙烧—浸出	难溶钛矿物	>85	技术成熟,可大规模工业化	能耗较高,工艺较复杂	[31-32]
氯化焙烧	所有钛矿物	>80	多金属协同回收	技术局限、环境污染风险	[33-35]

注:钛浸出率均为优化条件下所得。

2.3 新兴绿色提取技术

2.3.1 生物浸出

生物浸出是利用特定微生物(如氧化亚铁硫杆菌、黑曲霉等)的代谢产物(有机酸、无机酸等)溶解钛矿物。Ma J. J. 等^[36]研究表明,真菌 *Aspergillus niger* 产生的草酸、枸橼酸等有机酸对锐钛矿的浸出率较高,其核心优势在于反应条件极其温和(常温常压)、能耗极低且环境友好,但浸出周期过长,通常需 10~20 d,浸出率也偏低,未来的突破有赖于高效菌种的选育与过程强化。

2.3.2 离子液体萃取

离子液体因其蒸汽压低、热稳定性好、溶解能力强、结构可设计等优点,被视为“可设计的绿色溶剂”。磷酸类离子液体在钛的液-液萃取中具有高选择性和萃取率,如 Martínez-Ponce 等^[37]用三己基十四烷基磷鎓氯化物和三己基十四烷基磷鎓双磷酸盐等磷鎓基离子液体萃取钛。结果表明:该离子液体能从酸性硫酸盐介质中快速、高效地萃取四价钛,且在 2 min 内即可达到萃取平衡状态,效率较高;虽然其存在成本高昂、黏度大等缺陷,但其在高纯钛化学品制备领域具有独特应用前景。

2.3.3 物理场强化浸出

物理场强化浸出是通过外场能量从微观尺

度强化浸出过程。研究表明,微波处理可在数分钟内使煤矸石中的含钛矿物(如金红石、锐钛矿等)发生局部结构畸变,从而促进酸或其他浸出剂的浸出效果^[38]。相关研究已证实,超声波处理可大幅提升多种难处理氧化物矿物的金属回收效率,其机制涉及物理破碎与化学反应协同增强^[39]。

生物浸出、离子液体萃取与物理场强化等新兴技术正推动湿法冶金向智能化、低碳化发展,但单一技术难以独立实现煤矸石工业化高效处理。未来突破有赖于多技术系统集成与优势互补。可探索的耦合模式包括:“物理场-生物”耦合,通过微波或超声波预处理破坏矿物结构,优化生物浸出反应环境;“物理场-绿色溶剂”耦合,利用超声波空化效应强化低共熔溶剂等体系的传质,实现温和高效提取;“生物-化学”精炼,以生物浸出实现初步溶出,再采用功能化离子液体选择性分离钛等有价元素,构建绿色闭环工艺。工艺开发应回归煤矸石矿物学特性本源,遵循“赋存状态导向”原则进行定制化设计,以平衡技术可行性与经济合理性,推动实验室创新走向工业应用。

煤矸石提钛新兴技术的对比分析见表 3。煤矸石提钛的全工艺路线如图 4 所示。

表 3 煤矸石提钛新兴技术的对比分析
Table 3 Comparative analysis of emerging green technologies for titanium extraction from coal gangue

技术类型	原理特点	主要优势	发展瓶颈	参考文献
生物浸出	微生物代谢产酸溶解	环境友好,能耗低,良好的选择性	周期长,效率不稳定,菌种适应性	[36,40-41]
离子液体萃取	绿色溶剂选择性分离	高选择性,可循环,产品纯度高	成本高,黏度大,毒性数据不全	[37,42]
微波辅助	分子水平选择性加热	高效节能,高效环保,选择性活化	设备投资大,穿透深度有限	[38,43-44]
超声波辅助	空化效应刷新界面	强化传质,降低反应条件	规模化困难,能耗高	[39]

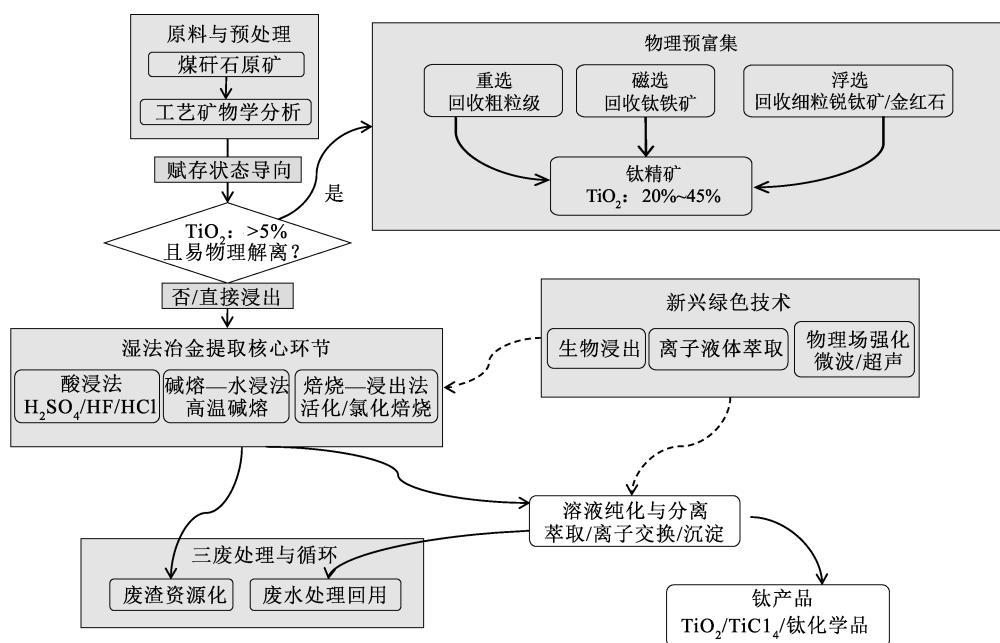


图 4 煤矸石提钛的全工艺路线

Fig. 4 Flowchart of comprehensive process for titanium extraction from coal gangue

3 结论与展望

煤矸石中钛资源的湿法提取是实现固废高值化与战略资源保障的重要途径。钛的赋存状态显著影响技术路径选择,湿法冶金是核心手段,绿色化是未来方向。对于高钛煤矸石,物理预富集与湿法提取联合工艺具有较好可行性;而对于低钛煤矸石,现有技术经济性普遍较差。

今后的研究可聚焦以下方向:1)开发适用于低品位煤矸石的绿色浸出体系,推进低共熔溶剂、有机酸等绿色试剂应用,降低环境负荷;2)推进微波、超声等外场强化技术与短流程工艺耦合,实现低温高效提取,降低能耗;3)探索“以废治废”模式,利用工业废酸、碱性固废等降低试剂成本,提升低品位资源利用经济性;4)加强全流程优化与多目标决策,集成生命周期评价与技术经济分析,推动工艺从“可行”向“绿色、经济、高效”跨越。通过多学科交叉与全链条创新,有望实现煤矸石中钛资源从“实验室潜力”向“工业可行性”的跨越,最终达成“变废为宝”与“环境增值”的双重目标。

参考文献:

- [1] 竹涛,武新娟,邢成,等.煤矸石资源化利用现状与进展[J].煤炭科学技术,2024,52(1):380-390.
Zhu Tao, Wu Xinjuan, Xing Cheng, et al. Current situation

and progress of coal gangue resource utilization[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 380-390.

- [2] 孙仁斌,王秋舒,元春华,等.全球钛资源形势分析[J].中国矿业,2019,28(6):1-6.
Sun Renbin, Wang Qiushu, Yuan Chunhua, et al. Analysis of global titanium resources situation[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(6): 1-6.
- [3] 罗衡,严建喜,杨斌,等.新疆某钛铁矿重选粗精矿浮选提质试验[J].工程建设,2024,56(11):1-8.
Luo Heng, Yan Jianxi, Yang Bin, et al. Flotation upgrading experiment on gravity separation rough concentrate of an ilmenite from Xinjiang[J]. Engineering Construction, 2024, 56(11): 1-8.
- [4] Luo Jun, Li Guanghui, Jiang Tao, et al. Conversion of coal gangue into alumina, tobermorite and TiO_2 -rich material[J]. Journal of Central South University, 2016, 23(8): 1883-1889.
- [5] 孙逢帅,代世琦,王磊,等.基于煤矸石中锂、镓元素赋存状态的高梯度磁选预富集试验[J].洁净煤技术,2024,30(1):154-162.
Sun Fengshuai, Dai Shiqi, Wang Lei, et al. Pre-concentration test of high gradient magnetic separation based on occurrence state of lithium and gallium elements in coal gangue[J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(1): 154-162.
- [6] Du Jinsong, Ma Aiyuan, Wang Xingan, et al. Review of the preparation and application of porous materials for typical coal-based solid waste[J]. Materials, 2023, 16(15): 5434.
- [7] 申帅平,袁致涛,马龙秋,等.攀西微细粒钛铁矿工艺矿物学特征[J].东北大学学报(自然科学版),2019,40(4):

- 580-584.
- Shen Shuaiping, Yuan Zhitao, Ma Longqiu, et al. Mineralogy features of micro-fine ilmenite in panxi region[J]. Journal of Northeastern University (Nature Science), 2019, 40(4): 580-584.
- [8] Boeva N M, Shipilova E S, Makarova M A, et al. Forms of titanium occurrence in bauxite[J]. Doklady Earth Sciences, 2025, 523(1): 22.
- [9] Nguyen T H, Lee M S. A review on the recovery of titanium dioxide from ilmenite ores by direct leaching technologies [J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2018, 40(4): 231-247.
- [10] 史耘澎, 梁斌, 李世维, 等. 某钛铁矿磁选-重选联合工艺回收钛、铁实验研究[J]. 矿业工程, 2025, 45(4): 68-72.
- Shi Yunpeng, Liang Bin, Li Shiwei, et al. Experimental study on recovery of titanium and iron from an ilmenite ore by combined magnetic separation-gravity separation process[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025, 45(4): 68-72.
- [11] Yuan Zhitao, Zhao Xuan, Meng Qingyou, et al. Effect of selective coating of magnetite on improving magnetic separation of ilmenite from titanaugite[J]. Minerals Engineering, 2020, 149: 106267.
- [12] Chen Qian, Kasomo R M, Li Hongqiang, et al. Froth flotation of rutile: an overview[J]. Minerals Engineering, 2021, 163: 106797.
- [13] Deng Lanqing, Zhu Liangdi, Fei Lingyun, et al. Froth flotation of ilmenite by using the dendritic surfactant 2-decanoylamino-pentanedioic acid[J]. Minerals Engineering, 2021, 165: 106861.
- [14] Gong Guichen, Liu Jie, Han Yuexin. Comprehensive investigation of the adsorption of 2-carboxyethylphenylphosphonic acid on cassiterite[J]. Separation Science and Technology, 2020, 56(13): 2194-2203.
- [15] Cao Miao, Gao Yude, Bu Hao, et al. Study on the mechanism and application of rutile flotation with benzohydroxamic acid[J]. Minerals Engineering, 2019, 134: 275-280.
- [16] Zhang Guofan, Gao Yawen, Chen Wei, et al. The role of water glass in the flotation separation of fine fluorite from fine quartz[J]. Minerals, 2017, 7(9): 157.
- [17] Liu Weijun, Zhang Jie, Wang Weiqing, et al. Flotation behaviors of ilmenite, titanaugite, and forsterite using sodium oleate as the collector[J]. Minerals Engineering, 2015, 72: 1-9.
- [18] 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(4): 42-49.
- Zhu Zhimin, Lin Jian, Zhang Guoli, et al. Strategic minerals in vanadium-titanium magnetite tailings from the Panxi area and their comprehensive utilization[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2023(4): 42-49.
- [19] Zheng, Fuqiang, Guo Yufeng, Chen Feng, et al. Fluoride leaching of titanium from Ti-bearing electric furnace slag in $[\text{NH}_4^+][\text{F}^-]$ solution[J]. Metals, 2021, 11(8): 1176.
- [20] Liu Chenglong, Xia Jupei, Fan Hui, et al. Ti leaching differences during acid leaching of coal gangue based on different thermal fields[J]. Waste Management, 2020, 101: 66-73.
- [21] Yan Zhengpei, Zheng Shili, Zhang Ying, et al. Sodium carbonate roasting and mild acid leaching of vanadium titanomagnetite concentrates: vanadium extraction and residue sodium decrease[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024, 185: 1132-1144.
- [22] Yang Chenye, Zhao Jianying, Mu Panpan, et al. Research on extraction of valuable metals from solid waste by deep eutectic solvents: a review[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2025, 197: 107008.
- [23] Manhique A J, Focke W W, Madivate C. Titania recovery from low-grade titaniferous minerals[J]. Hydrometallurgy, 2011, 109(3/4): 230-236.
- [24] Lu Ping, Zhou Xu, Liu Shuangyu, et al. Analysis of the oxidation behavior of TiBN and optical properties of oxidation products[J]. Ceramics International, 2024, 50(9): 16017-16026.
- [25] Wang Xinlin, Wu Jiaming, Ma Qingshui, et al. Iron conversion and ammonium salt calcination whitening process and mechanism of pre-calcined coal gangue[J]. Chemical Engineering Science, 2024, 287: 119802.
- [26] Fan Zhiyu, Wang Long, Zhang Renyun, et al. Research and application mechanism of chlorination roasting for polymetallic minerals and waste[J]. Minerals Engineering, 2025, 232: 109493.
- [27] Lu Pengfei, Liu Qi, Bao Hongliang, et al. Effect of FeCl_3 in NaCl-MgCl_2 molten salts on the corrosion behavior of 316 stainless steel at 600 °C [J]. Corrosion Science, 2023, 212: 110961.
- [28] Ghaderi S, Zhang Wencai. Microwave-assisted leaching of olivine: investigation of leaching characteristics and kinetics of Mg, Si, Fe, Co, and Ni[J]. Minerals Engineering, 2025, 228: 109344.
- [29] Zheng Qinwen, Zhou Yi, Liu Xin, et al. Environmental hazards and comprehensive utilization of solid waste coal gangue[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2024, 34(2): 223-239.
- [30] Alkan G, Schier C, Gronen L, et al. A mineralogical assessment on residues after acidic leaching of bauxite residue (red mud) for titanium recovery [J]. Metals, 2017, 7(11): 458.
- [31] Zheng Guangya, Xia Jupei, Liu Chenglong, et al. Dissolution of aluminum and titanium during high-temperature acidification of coal gangues and relative kinetics[J]. Energy Sources: A, 2019, 45(2): 5411-5424.
- [32] Xu Fanghong, Xiao Jin, Ye Shengchao, et al. Closed-loop

- cleaning treatment system-resource recovery of coal gangue[J]. *Energy Sources: A*, 2024, 46(1): 5236-5253.
- [33] Xu Xianqing, Guo Zhengqi, Tian Xiaoman, et al. Synergetic recovery of rutile and preparation of iron phosphate from titanium-extraction tailings by a co-leaching process[J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 344: 127234.
- [34] Wu Hao, Yang Jingyi, Huang Lijinhong, et al. Full-components utilization: study on simultaneous preparation of sodalite and separation of yttrium from coal gangue by chlorination roasting process[J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 332: 125802.
- [35] Chu Guanrun, Wang Lin, Liu Weizao, et al. Indirect mineral carbonation of chlorinated tailing derived from Ti-bearing blast-furnace slag coupled with simultaneous dechlorination and recovery of multiple value-added products[J]. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 2018, 9(1): 52-66.
- [36] Ma Juanjuan, Li Shuyan, Wang Jinxi, et al. Bioleaching rare earth elements from coal fly ash by *Aspergillus niger* [J]. *Fuel*, 2023, 354: 129387.
- [37] Martínez-Ponce M Á, Ortiz Lara N, Avila-Rodríguez M, et al. Selective extraction of Ti(IV) from acidic sulfate media by phosphonium-based ionic liquids and stripping with sulfuric acid[J]. *Hydrometallurgy*, 2023, 221: 106136.
- [38] Patel A, Arora N, Pruthi V, et al. A novel rapid ultrasonication-microwave treatment for total lipid extraction from wet oleaginous yeast biomass for sustainable biodiesel production[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, 51: 504-516.
- [39] Rosselló J M, Dellavale D, Bonetto F J. Stable tridimensional bubble clusters in multi-bubble sonoluminescence (MBSL)[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2015, 22: 59-69.
- [40] Jia Yan, Ruan Renman, Qu Jingkui, et al. Multi-scale and trans-disciplinary research and technology developments of heap bioleaching[J]. *Minerals*, 2024, 14(8): 808.
- [41] Srichandan H, Mohapatra R K, Parhi P K, et al. Bioleaching approach for extraction of metal values from secondary solid wastes: a critical review[J]. *Hydrometallurgy*, 2019, 189: 105122.
- [42] Kang Chao, Yang Shengchao, Qiao Jinpeng, et al. Extraction of valuable critical metals from coal gangue by roasting activation-sulfuric acid leaching[J]. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 2024, 44(11): 1810-1827.
- [43] Guo Xuan, Ren Jun, Xie Chuanjin, et al. A comparison study on the deoxygenation of coal mine methane over coal gangue and coke under microwave heating conditions[J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 100: 45-55.
- [44] Lan Xijie, Liu Shuhong, Jing Yuan. Microwave activation of coal gangue for Al compound [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 592(1): 012023.

Research Progress and Prospects in Enrichment and Extraction Technologies of Titanium Resources from Coal Gangue

QIAN Suwan¹, KONG Deshun^{1,2}, GAO Yuan³, JI Nannan¹

- (1. *School of Environment and Chemical Engineering, Dalian University, Dalian 116622, China;*
 2. *School of Chemical and Materials Engineering, Liupanshui Normal University, Liupanshui 553004, China;*
 3. *School of Chemical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China*)

Abstract: Recovery of titanium from coal gangue is significant for both high-value utilization of solid waste and resource security. This review systematically examines the occurrence of titanium in coal gangue and its influence on enrichment and extraction processes. It focuses on the applicable conditions and technical bottlenecks of mainstream hydrometallurgical techniques, such as acid leaching, alkali fusion, and roasting-leaching. Comparisons are made with physical sorting and emerging green technologies, including bioleaching and ionic liquid extraction. Future research directions are also discussed, aiming to provide a reference for the economical, environmentally friendly, and efficient recovery of titanium resources from coal gangue.

Key words: coal gangue; titanium; extraction; enrichment; hydrometallurgy; occurrence state; research progress; prospect