

综述与专论

我国攀西铁钒钛共伴生资源综合利用转型升级思考

姜涛, 郭宇峰*, 李光辉, 陈凤, 王帅, 杨凌志, 李兆祥,
任雨莽, 问悦凯, 郑宇, 李广, 张艺曦

(中南大学资源加工与生物工程学院, 湖南长沙 410083)

摘要: 铁钒钛资源是全球公认的战略矿产, 对我国国防、经济及科技的发展均具有战略意义。攀西是我国最大、世界重要的铁钒钛资源基地, 已建成了完整的铁钒钛产业链, 但仍存在钒钛综合利用率低、高端产品少、生产能耗高、固废产量大等问题。围绕攀西铁钒钛共伴生资源高效清洁利用, 笔者系统分析了攀西铁钒钛资源利用现状, 提出了攀西铁钒钛资源综合利用转型升级方向, 包括工艺技术创新、产品迭代升级、清洁能源利用、固废处理强化和选冶流程再造等五个方面, 大力推动我国钒钛产业高效化、高端化、绿色化和智能化发展, 实现国家“双碳”目标, 保障我国铁钒钛资源与基础原材料的安全供给。

关键词: 攀西铁钒钛共伴生资源; 工艺技术创新; 产品迭代升级; 清洁能源利用; 固废处理强化; 选冶流程再造

中图分类号: TF111, TD98

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2025)06-0001-19

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2025.06.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Reflections on the transformation and developments of the comprehensive utilization of vanadium-titanium resources in Panxi

JIANG Tao, GUO Yufeng*, LI Guanghui, CHEN Feng, WANG Shuai, YANG Lingzhi, LI Zhaoxiang,
REN Yuqiao, WEN Yuekai, ZHENG Yu, LI Guang, ZHANG Yixi

(School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: Iron-vanadium-titanium resources are globally recognized as strategic mineral resources and of critical importance to national defense, economic development, and technological advancement. The Panxi region, hosting China's largest and a world-significant iron-vanadium-titanium resource base, has established a complete industrial chain for these metals. However, it still faces challenges such as low comprehensive utilization rates of vanadium and titanium, an insufficient share of high-end products, high energy consumption in production, and significant solid waste generation. Focusing on the efficient and clean utilization of vanadium-titanium resources in the Panxi region, this paper systematically analyzes the current state of resource utilization and proposes key directions for transformation and upgrading. These directions encompass five major aspects: technological and process innovation, product iteration and upgrading, utilization of clean energy, strengthening of solid waste management, and reengineering of beneficiation and metallurgical process flows. The proposed strategies aim to promote the efficient, high-value, green, and intelligent development of China's vanadium and titanium industry.

收稿日期: 2025-11-17; 修回日期: 2025-11-27; 接受日期: 2025-11-28

基金项目: 国家自然科学基金卓越研究群体项目(72088101)。

作者简介: 姜涛, 1963年出生, 男, 博士, 教授, 中国工程院院士, 长期从事矿产资源精加工与提取冶金等研究工作, E-mail: jiangtao@csu.edu.cn; *通讯作者: 郭宇峰, 1970年出生, 男, 教授, 主要从事烧结球团、直接还原与熔融还原及复杂矿石提取与利用等研究工作, E-mail: yfguo@csu.edu.cn。

Such progress will contribute to achieving the national “dual-carbon” goals and ensure the secure supply of iron-vanadium-titanium resources and related raw materials for the country.

Key words: vanadium–titanium resources in Panxi, technological and process innovation, product iteration and upgrading, utilization of clean energy, strengthening of solid waste treatment, reengineering of beneficiation and metallurgical process flows

0 引言

钒和钛是重要的战略金属,在航空航天、能源化工、国防及生命医学等关键领域发挥着不可替代的作用。钒作为“金属维生素”可显著提升钢材强度与韧性^[1-3];钛则以密度低、强度高、耐腐蚀性强和氧化物白度高著称^[4-6]。作为全球公认的战略矿产资源,钒钛已被多国列为需管控的关键资源^[7-9]。我国在《战略性矿产资源产业高质量发展纲要(2020~2035)》与《中国制造 2025》中将其列为先进基础材料和关键战略材料,对建设制造强国、实现“双碳”战略目标及推动战略性新兴产业发展具有重要意义。

钒钛资源主要赋存在钒钛磁铁矿中。全球钒钛磁铁矿资源总量在 400 亿 t 以上,其中钛储量约 25 亿 t(按 TiO₂ 计),钒储量约 1.6 亿 t(按 V₂O₅ 计),主要分布在中国、俄罗斯和南非等国^[10]。其中,中国钒钛磁铁矿探明储量居世界首位,占总量的 45%,远景储量超 300 亿 t^[11]。我国钒、钛资源主要赋存在钒钛磁铁矿中^[12],分布在四川攀西、河北承德、辽宁朝阳、陕西汉中等地区^[13]。其中攀西地区是中国最大、世界重要的钒钛磁铁矿资源基地,已探明储量达 95.35 亿 t,占全国的 83%,且仍具备约 147 亿 t 的储量增长空间^[14]。

攀西地区自 20 世纪 60 年代以来持续开展钒钛磁铁矿利用研究。在突破国外“呆矿”论断,成功实现钒钛磁铁矿的钢铁冶炼后^[15],攀西钒钛产业已实现了钒、钛的有效回收及产品制备,使钒和钛回收率分别提升至 44%(从原矿到 V₂O₅)和 29%(从原矿到钛精矿)^[16]。在技术层面,攀西钒钛相关企业已形成涵盖钒钛磁铁矿采选、钒钛资源提取、钒钛初级产品制备及二次钒钛资源回收的全流程技术体系^[17]。整体来看,攀西地区已成为我国重要的钒钛新材料产业基地,建立了比较完整的铁-钒-钛资源利用产业链^[18]。

尽管攀西地区资源储量丰富并形成完整的利用产业链,但整体资源综合利用率偏低。现有主流工艺“高炉-转炉”法回收铁、钒时,钛组分大多进入高炉渣难以有效回收;硫酸法钛白粉工艺难以生产

高端钛产品,且伴生大量石膏等固体废弃物^[19];同时,现有综合利用过程产生大量高炉渣、钢渣、提钒尾渣等固体废弃物,多使用填埋方式处理,环境压力大。在“双碳”背景下,基于攀西钒钛磁铁矿资源特性,优化现有工艺流程、开发高效低碳的综合利用新技术,对提升资源利用率、保障国家钒钛供应链安全、推动产业绿色高质量发展具有重大意义。笔者旨在系统分析当前钒钛资源利用现状与关键问题,探讨新技术路径,为实现钒钛磁铁矿的高价值综合利用提供参考。

1 攀西铁钒钛资源利用现状

当前攀西地区钒钛资源综合利用体系主要存在“低、少、高、大”四大问题:综合利用率低、高端产品少、生产能耗高、固废产量大。这四大问题相互关联,共同制约了该地区资源优势向产业与经济优势的充分转化。攀西地区现有钒钛磁铁矿综合利用流程如图 1 所示。

1.1 综合利用率低

攀西现有钒钛磁铁矿选矿技术体系按选取顺序可被分为“选铁”和“选钛”两大流程^[20]。钒钛磁铁矿原矿经阶段磨矿-磁选后获得的钒钛磁铁精矿产率约 42%,Fe 回收率达 71.50%。选铁尾矿经“高梯度磁选-重选-浮选-二次精选”处理选出钛精矿^[21]。现有选矿技术对原矿中 Ti 的总体回收率不高,尤其是微细粒级($\leq 19 \mu\text{m}$)钛铁矿在传统重选、磁选流程中损失严重^[22]。选矿主要产品钒钛磁铁精矿冶炼过程中,Ti 元素几乎以非晶态微晶相形式赋存于高炉渣中^[23],难以经济有效回收,是导致钛资源利用率降低的另一主要原因。

钒主要以类质同象形式赋存于钒钛磁铁精矿中,在高炉-转炉流程中约 90% 进入铁水中,铁水经氧化吹炼后,约 80% 的 V 元素以尖晶石(FeV₂O₄)形式进入钒渣,后续进一步提钒制备钒产品。尽管攀西地区主流的“钙化焙烧-酸浸法”避免了钠污染和高毒性废气生成,但钒酸钙在酸中有限的溶解度使其钒回收率低于传统钠化焙烧法^[24]。

目前,攀西地区铁的综合利用率约为 70%,钒和钛的综合利用率分别约为 44% 和 29%,钒、钛及

伴生稀贵金属在选冶各环节中的损失直接导致钒钛综合利用率偏低, 高战略价值的钒和钛元素在现有利用流程中存在严重浪费的问题。共伴生的镍、钴和钨、镓、铂族元素等稀贵金属尚缺乏成熟工业化手段^[22], 资源利用率低, 大量有价值组分流失在尾矿、高炉渣等废弃物中。如何降低钒钛磁铁矿尾矿残余有价值元素量和提升炉渣中钒、钛回收效率是制约钒钛资源高效利用的瓶颈问题。

1.2 高端产品少

2024 年, 中国钒产量约为 16.5 万 t(按 V_2O_5 计), 其中攀西地区产量占比超 45%。近 5 年来, 得益于提钒技术的进步, 钒资源在储能、合金、功能材料等领域的应用比例已由不足 10% 提升至约 25%。然而, 仍有超 70% 的钒资源以低附加值产品形式应用, 现

有技术尚不能实现钒资源的高附加值、高效率利用。

2020 年以来, 钛产量持续高速增长, 2024 年钛白粉和海绵钛的产能增长率均在 14% 以上。尽管攀西地区拥有中国近 91% 的钛资源储量, 2025 年四川钛白粉产能占比仅为 18.8%, 海绵钛产量占比在 21% 左右。钛产品中, 中低端硫酸法钛白粉占全钛白粉产量的 85% 以上(见图 2), 高端的氯化法钛白粉、高纯钛以及钛合金薄板、焊管、高质量钛合金等高附加值产品产能较低, 高度依赖进口, 对外依存度大于 85%(见表 1)。攀西地区钛资源钙镁含量高, 高端产品少的问题更加突出。攀西地区的钛产品产能和高端钛产品占比远低于其钛资源储量占比, 和攀西巨大的资源储量不匹配, 地区资源优势未能转化为产业优势。

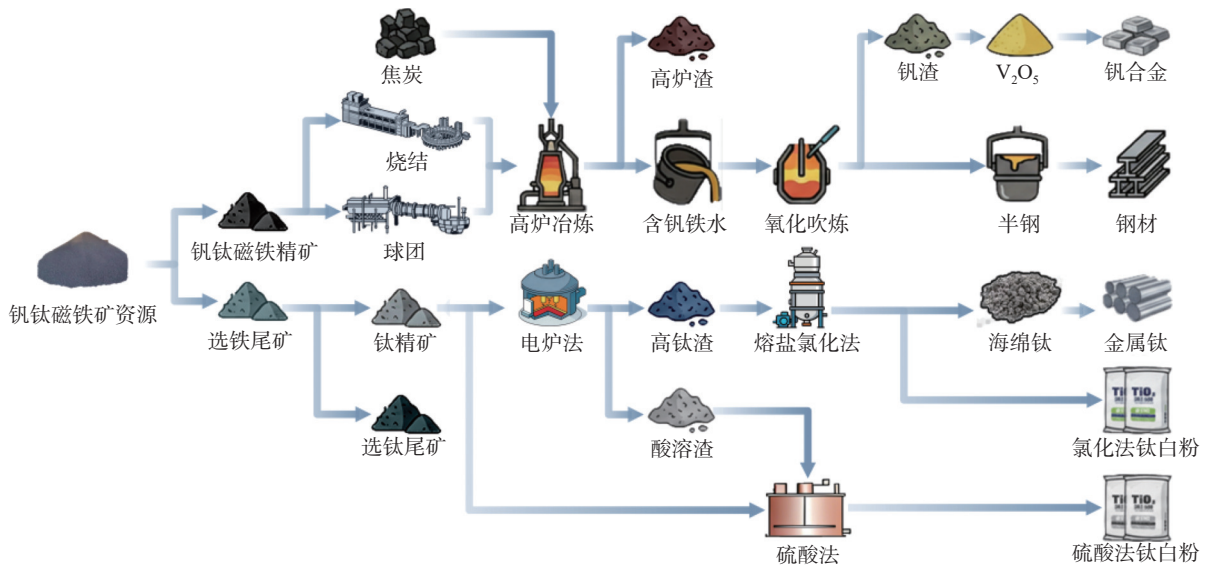
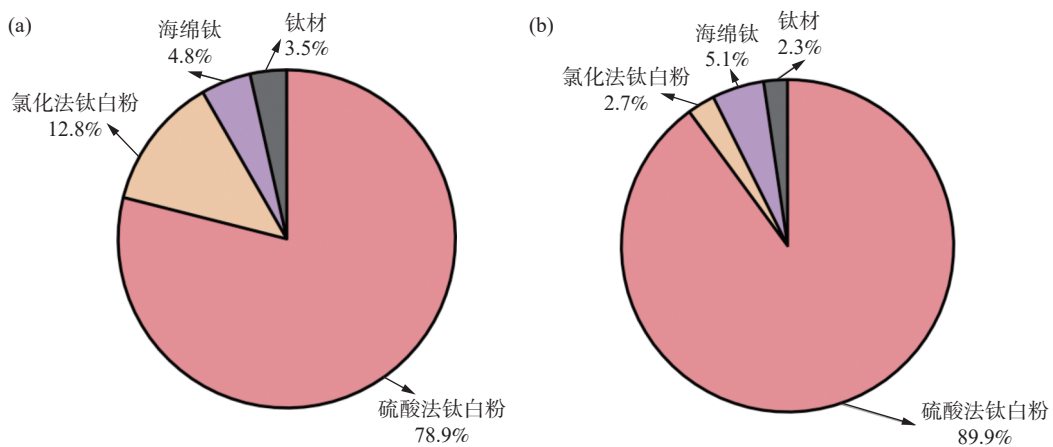


图 1 攀西地区现有钒钛磁铁矿综合利用流程

Fig. 1 Present utilization processes for vanadium-titanium magnetite (VTM) in PanXi



(a) 全国; (b) 攀西地区

图 2 2023 年全国和攀西地区的主要钛产品结构(数据来源: Mysteel)

Fig. 2 Proportion of major titanium products in China&Panxi (2023)

表1 2024年我国钛产品进出口量汇总
Table 1 Summary of China's titanium product import and export volume in 2024

商品名称	进口数量/万t	出口数量/万t
其他锻轧钛及钛制品	75.5	411.6
钛板、片、带、箔 ^①	107.1	146.6
钛条、杆、型材及异型材	378.3	1074.6
钛丝	27.9	133.9
钛板、片、带 ^②	106.5	973.1
钛管	33.2	396.3
其他未锻轧钛	21.9	137.4
钛粉末	11.4	57.4
海绵钛	10.1	595.3
钛白粉	9203.8	190208.2

注: ①厚度≤0.8 mm; ②厚度>0.8 mm。(数据来源: 中国海关)

整体来看, 现有攀西钒钛产业结构存在显著短板, 低端产能过剩问题突出, 呈现出“初级产品产能大、高端产品占比少”的不合理局面。

1.3 生产能耗高

攀西钒钛磁铁矿的传统综合利用工艺生产能耗高, 与国家“双碳”目标存在明显差距。如上所述, 钒钛磁铁矿难以通过单一选矿方法实现铁、钛、钒的有效分离, 需多阶段磨矿配合磁选、重选、浮选等多种选矿工艺组合^[25], 才能获得钒钛磁铁精矿和钛精矿, 增加了选矿流程、提高了生产能耗。

主要选矿产品之一钒钛磁铁精矿在“高炉-转炉”传统冶炼过程中, 钒钛含量高, 还原难度高, 焦比和综合能耗大。钒钛磁铁矿冶炼焦比约 620 kg/t, 较普通铁矿高约 70 kg/t 以上, 综合能耗高出 10% 以上; 单位粗钢碳排放量约为 2.15 t/t, 较普通铁矿石冶炼高出近 20%^[26]。而转炉产生的钒渣目前仍以“焙烧-浸出”工艺为主, 需经高温(600~1 250 ℃)长时间焙烧, 将钒尖晶石转换为可溶性钒酸盐^[27], 是全流程能耗的重要组成部分之一。

另一选矿产品钛精矿现有的两类主流利用技术能耗普遍偏高。硫酸法直接制备钛白粉工艺受攀西钛精矿成分复杂、杂质含量高等因素影响, 通常需进行预氧化焙烧等前置处理, 并在酸解、固液分离、溶液净化以及废酸浓缩回用等多个环节消耗大量蒸汽和电力, 整体流程长、系统能耗集中且难以降低^[28]; 第二类工艺使用电炉冶炼钛精矿生产高钛渣, 再用熔盐氯化法生产钛白粉及海绵钛, 该技术前端电炉冶炼需在高温条件下进行, 电耗和碳耗显著^[29], 后续熔盐氯化过程又需维持高温并配套高能耗的氯气制备与循环回收系统, 总体能耗水平居

高不下。

综上所述, 攀西钒钛磁铁矿品位低、共生关系复杂和矿物嵌布粒度细的资源禀赋特性和以高温碳热还原、钙化焙烧及长流程湿法分离为特征的传统路径叠加, 使攀西综合利用体系能耗与碳排放量高, 亟需通过流程重构和关键环节技术升级实现降耗减排。

1.4 固废产量大

大量固体废弃物的产生及其处置问题, 是攀西钒钛磁铁矿利用路线实现绿色低碳化的另一关键瓶颈。钒钛磁铁矿资源开采选别过程中产生细粒尾矿, 磁铁精矿冶炼流程产生高钛型高炉渣和钢渣, 钒渣提钒工序衍生提钒尾渣及盐副产物, 钛精矿利用工艺伴生钛石膏、熔盐氯化渣或废盐等。近年来我国钒钛工业每年产生数亿吨钒钛磁铁矿尾矿, 尾矿堆存量超 6 亿 t; 钛石膏年产量已超 3 000 万 t, 累计堆存量超 2 亿 t, 而综合利用率普遍低于 10%; 钒产业每年约产生 100 万 t 提钒尾渣、24 万 t 的钒烟灰及钒污泥, 其中的有价组分含量相当甚至超过低品位原生矿^[30]。大量高品位固废以“低门槛建材化+堆存”为主的方式处置, 造成了资源的隐性流失, 固废减量与资源化压力突出。攀西地区集中了我国重要的钒钛产能, 也是上述固体废弃物的重要集中区。其中仅攀枝花市的尾矿、钛石膏、冶炼废渣合计年产生量 6 500 万 t 以上(见表 2)。其利用方式以生产建筑材料为主, 表观综合利用率仅 17.19%。

表2 2024年攀枝花市钒钛资源综合利用固废主要种类产生及堆存情况

Table 2 Solid waste generation from comprehensive VTM utilization in Panxi

种类	产生量/万t	综合利用量/万t	堆存量/万t
尾矿	5 534.7	481.3	1 831.4
钛石膏	533.1	96.9	439.4
冶炼废渣(包括高炉钒渣、熔盐氯化渣等)	545.3	477.1	75.3
钒污泥	17.4	11.2	6.2
化工废物	81.4	37.0	47.0

数据来源: 攀枝花生态环境局^[31]

上述固废难以利用, 长期大量堆存占用土地资源, 并带来重金属与酸性组分渗漏等环境风险, 显著增加钒钛磁铁矿利用的环境负荷^[32-35]。每年亿吨级的固废排放量和较低的资源化利用水平已成为攀西钒钛产业在“双碳”约束下实现产业绿色低碳化发展的核心短板之一, 也为后续从源头减量、过程协同利用与末端高值化处置等方面重构工艺体系提供了方向。

2 铁钒钛共伴生资源利用转型升级技术途径

2.1 工艺技术创新

目前及未来长时间阶段,我国攀西钒钛资源利用仍将以“阶磨-阶选”选铁选钛工艺为主,选铁后钒钛磁铁精矿以高炉法冶炼为主流技术。该利用流程中,钒钛资源利用率低、工艺能耗高,应强化选铁选钛工艺和提高高炉冶炼效率,实现现有流程的工艺技术创新。

2.1.1 强化选矿工艺高效除杂

“预分选抛尾-阶段磨矿-阶段选矿”的选铁选钛工艺是目前钒钛磁铁矿的主要分选流程。传统预分选工艺以干式磁选机为主,分选效率低,抛尾不彻底,对低铁品位钒钛磁铁矿抛尾效果差。采用磁-重-浮等联合分选技术进行钛铁矿分选,对粒径小于 $19\ \mu\text{m}$ 的微细级钛铁矿浮选效果差,难以回收。针对目前钒钛磁铁矿选矿工艺流程中的问题,强化选矿工艺高效除杂是提高我国钒钛资源利用率和资源回收率的关键途径。

针对预分选抛尾效率低的问题,四川龙蟒矿冶有限责任公司、长沙矿冶研究院等企业采取的多梯度复合干式磁选和多磁极大包角磁系^[13]、ZCLA外磁式重磁拉选矿机等^[36-37]大大提高了抛尾效率,矿石铁品位显著提高。该技术在难选铁矿上的成功应用为钒钛磁铁矿预选工艺提供了新思路。

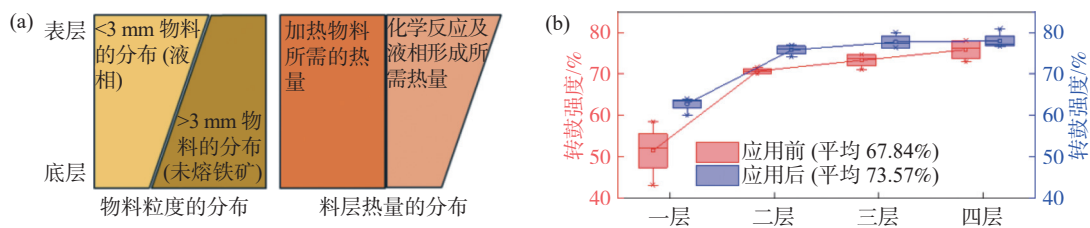
钛铁矿选矿过程中,小于 $19\ \mu\text{m}$ 的微细粒钛铁矿在浮选过程中易发生异相凝聚现象,粒度过细导致矿物间的可浮性差异变小,分选难度大。为提高选钛工艺中钛铁矿回收率,目前研究集中于强化预

选工艺及开发新型浮选药剂^[38-44]。中南大学与攀钢联合研发出国内首台适用于钒钛磁铁矿浮选原矿深度预富集装备重选柱,创新钛铁矿预选工艺流程,基于钛铁矿与脉石矿物间密度、磁性差异,将干涉沉降的流化床分选和倾斜通道层流剪切技术相结合,通过开发高精度大流量预选装备及高效预选工艺流程,提升钛铁矿入浮品位和生产效益^[45]。同时,中南大学开发出钒钛矿中性矿浆(无酸无肿)浮选技术,新型捕收剂在浮选密地钛铁矿中,浮选精矿 TiO_2 品位大于47%、回收率大于84%,实现了钛铁矿的绿色高效浮选分离。

2.1.2 强化高炉炉料制备

高炉法是我国钒钛磁铁精矿冶炼的主要方法,烧结矿和球团矿是其核心炉料^[46-47]。由于钒钛磁铁精矿钒钛含量高、冶金性能差,因此强化钒钛磁铁矿烧结矿和球团矿的制备成为高炉顺行的关键环节^[48-49]。

钒钛磁铁矿烧结过程中易生成还原性差、脆性强、强度低的钙钛矿相,且液相不足,进一步使烧结矿强度降低、能耗上升。中南大学开发出超高料层低碳均质烧结技术(图3),解决了“蓄热效应”导致的烧结层上部热量不足、下部热量过剩的固有难题,使得热尽其效、风尽其用,是提升钒钛磁铁矿烧结质量、降低能耗与碳排放、实现资源高效利用的技术方向。该技术应用于湖南华菱湘潭钢铁有限公司烧结机,实现了1050 mm超高料层烧结稳定运行,固体燃料总消耗较传统工艺降低6.4%,三年累计减排 CO_2 、CO分别达24.4万t和14万t,成为了烧结提质、降耗、减排的有效新途径^[50-51]。



(a)超高料层均质烧结技术; (b)均质烧结应用效果

图3 超高料层低碳均质烧结技术示意及应用效果

Fig. 3 Ultra-high layer homogeneous sintering technology and application results of homogeneous sintering

钒钛磁铁矿球团的 FeO 含量高、氧化度低、结晶程度差,导致成品球团的强度难以满足工业生产的要求;还原过程中膨胀和粉化现象严重,攀西球团还原膨胀率达24.8%,低温还原粉化率 $\text{RDI}_{6.3\ \text{mm}}$ 为58.8%, $\text{RDI}_{4.75\ \text{mm}}$ 为71.1%, $\text{RDI}_{0.425\ \text{mm}}$ 高达22.9%^[52]。近年来,研究人员开展了钒钛磁铁矿球团强化制备

的全流程基础研究,改善了酸性球团矿冶金性能,并大力发展熔剂性球团,提高高炉冶炼效率。研究表明,原料预处理等方式能有效改善矿粉粒度分布与表面活性,显著提升生球性能,为高质量球团制备奠定了基础^[53]。强化钒钛磁铁矿氧化固结行为,酸性球团强度和冶金性能明显提升^[54]。同时,为提升球

团入炉比例,加速开发钒钛磁铁矿熔剂性球团,钙镁熔剂添加强化钒钛磁铁矿球团氧化固结、还原粉化及软熔滴落等性能,目前攀钢钒钛磁铁矿球团入炉比提升至55%以上^[55]。

钒钛磁铁矿高炉炉料强化制备已成为其工艺技术创新的关键路径。超高料层低碳均质烧结技术显著改善烧结矿质量并降低能耗与碳排放;改善酸性球团熔剂性能,大力发展熔剂性球团,提高高炉冶炼效率,为高比例钒钛磁铁矿高炉冶炼奠定炉料基础。

2.1.3 高比例钒钛磁铁矿高炉冶炼

发展高比例钒钛磁铁矿高炉冶炼是钒钛磁铁矿高炉法发展方向,目前研究主要包括开发高炉新渣型制度、提高炉渣 TiO₂ 品位,优化高炉炉料结构、提升钒钛磁铁矿球团入炉比例等。

钒钛磁铁矿高炉冶炼中,高 TiO₂ 炉渣存在黏度高、泡沫化、渣铁分离困难等问题,传统 CaO-MgO-SiO₂ 渣系难以满足冶炼需求,严重制约钒钛磁铁矿入炉比例。开发熔化温度低、流动性好、稳定性高、TiO₂ 活度低的新渣型制度能提高炉渣 TiO₂ 品位,推动高比例钒钛磁铁矿高炉冶炼。相关研究表明,调控 MgO/Al₂O₃ 比、引入渣系改良剂或优化矿渣温度等方式,改善炉渣流动性、促进钛相选择性结晶,为构建有利于渣铁分离和有价元素回收的新渣型制度提供基础^[56-60]。

目前,高炉冶炼钒钛磁铁矿炉料结构主要为高碱度烧结矿配加酸性球团^[61-64],攀钢西昌高炉烧结矿入炉比大于40%^[65-67]。钒钛磁铁矿烧结矿强度低、质量差、制备过程能耗高,而球团矿品位高、还原性能好、制备过程碳排放量低。优化高炉炉料结构为全钒钛磁铁矿球团矿配加高碱度普通矿烧结矿,

提升钒钛磁铁矿球团矿入炉比例,推动全钒钛磁铁矿球团冶炼,降低炉料制备能耗及碳排放量,有效提高高炉冶炼效率。

新渣型制度与高比例球团矿冶炼的协同优化,将重塑我国钒钛磁铁矿的高炉冶金路径,构建第二代钒钛磁铁矿高炉冶炼技术,为攀西资源工艺技术创新提供关键性技术支撑。

2.2 产品迭代升级

攀西铁钒钛共伴生资源受限于钙镁杂质高等问题,导致了钒钛产业存在“高潜力资源与低附加值产品”的矛盾。大力发展沸腾氯化法,开发氟化法钛白粉等新产品,解决攀西高钙镁型钛资源利用难题,实现钒钛产品从“中低端供给”向“高端引领”转型。

2.2.1 高钙镁型钛资源沸腾氯化法制备高端钛产品

沸腾氯化法具有氯化效率高、TiCl₄ 产量大、固废排放量少的优点,是国内外高端钛产品制备的首选工艺,但沸腾氯化法需严格控制原料钙镁杂质含量(CaO+MgO<1.5%)^[68]。然而,我国攀西钛资源钙镁杂质含量高,采用传统除杂工艺难以制备合格的沸腾氯化原料。发展高钙镁型钛资源沸腾氯化法制备高端钛产品,亟需制备出化学成分合格的沸腾氯化炉料。

攀钢提出“氧化还原改性—盐酸浸出”制备人造金红石的技术路线(如图4所示)^[69]。该方法通过流态化强氧化和还原工艺改性攀枝花钛精矿,形成金红石网状结构,同时产生的微裂纹和孔洞显著提高了钙镁杂质的浸出效率,制备出 TiO₂ 为 90.2%、CaO+MgO 为 0.66% 的人造金红石,流程浸出效率高、除杂能力强、盐酸实现循环利用。在此基础上开展了 5 kt/a 规模人造金红石的扩大试验,实现连续稳定运行。

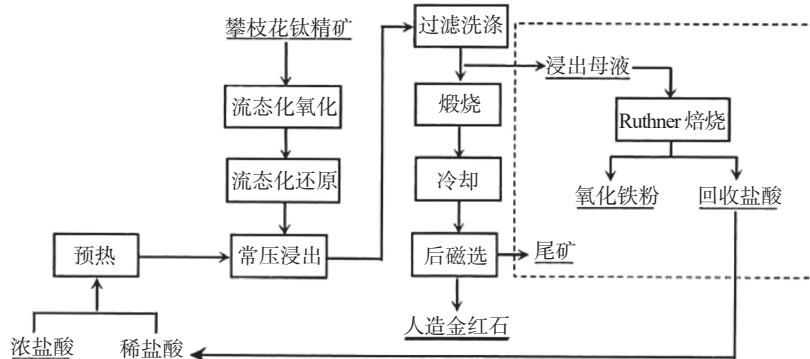


图4 钛精矿盐酸法制备人造金红石技术^[69]

Fig. 4 Technology for preparing artificial rutile from ilmenite concentrate by hydrochloric acid method^[69]

目前国内外电炉钛渣除杂制备沸腾氯化炉料的工业化应用技术是加拿大 QIT 公司研发的 UGS 渣

生产技术。电炉钛渣经过氧化-还原后再酸浸得到 UGS 渣,最终钛渣中 TiO₂ 含量大于 94%, CaO 含

量 < 0.2%, MgO 含量 < 1.0%^[70]。中南大学采用淬冷氧化-深度除杂技术处理高钙镁电炉钛渣(见图 5), 制备出 TiO₂ 为 94.36%, CaO+MgO 为 0.46% 的 UGS 渣, 比加拿大 UGS 渣工艺流程更短, 能耗更低。

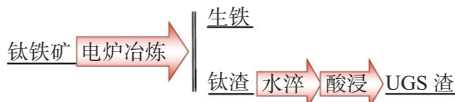


图 5 钛铁矿深度除杂制备沸腾氯化炉料

Fig. 5 Deep impurity removal from ilmenite to prepare boiling chlorination furnace charge

上述沸腾氯化炉料制备技术能高效脱除钙镁杂质, 流程短、能耗低, 为我国使用攀西高钙镁型钛资源制备高端钛产品提供了原料保障。

2.2.2 氟化法钛白粉制备技术

钛白粉工业化制备工艺主要包括硫酸法与氯化法。硫酸法对我国高钙镁型钛资源具有较强适应性, 但其生产过程中会产生大量废副产物, “三废” 排放量巨大, 资源循环利用效率低, 环保问题已成为制约该工艺可持续发展的关键因素。相较而言, 氯化法在废副产物控制和过程清洁化方面具有优势, 且产品质量更高, 但其对原料品位与杂质控制要求严格, 导致其难以直接适配我国攀西地区高钙镁钛型资源。针对上述钛资源禀赋与工艺适配性的矛盾, 中南大学开发出氟化法钛白粉生产工艺路线^[71-72]。该

方法是继硫酸法与氯化法之后正在发展的一类新型钛白粉制备技术, 具有反应能力强、反应条件温和、对原料无特殊要求等特点, 可直接处理中低品位钛铁矿、钒钛磁铁矿以及成分复杂的钛渣。同时, 含氟试剂具备较好的循环再生与闭路运行潜力, 有利于实现过程的封闭化与资源高效回用, 不产生“三废”, 实现清洁生产目标。氟化法有望同时缓解现有钛白粉制备工艺在原料适应性与环境污染方面的瓶颈, 具备工程放大的现实前景与产业战略价值, 对推动我国攀西地区钛资源绿色升级转型与可持续发展具有重大意义。

氟化法钛白粉制备工艺路线如图 6 所示。该法首先利用含氟试剂对钛资源进行浸出, 使钛组分选择性进入液相; 随后通过调整浸出液的 pH 值, 脱除铁、锰、钒、铬等杂质; 再进一步调整溶液 pH 值, 使钛以沉淀形式生成前驱体, 该前驱体经脱氟脱铵、煅烧转型后可制备锐钛型或金红石型 TiO₂ 粉体。该工艺过程中, 钛溶出率高, 可实现选择性浸出钛, 后续除杂工艺简单。整体工艺采用密闭操作, 含氟试剂在系统内循环利用, 基本不产生外排污染物, 对环境的影响较小。氟化法能充分适应我国钛资源特征, 是未来钛工业实现绿色化与高质量发展的重要方向之一。目前, 中南大学已与龙佰集团达成战略合作意向, 计划开展氟化法钛白工业试验研究, 推动该工艺向工程化与产业化应用迈进。

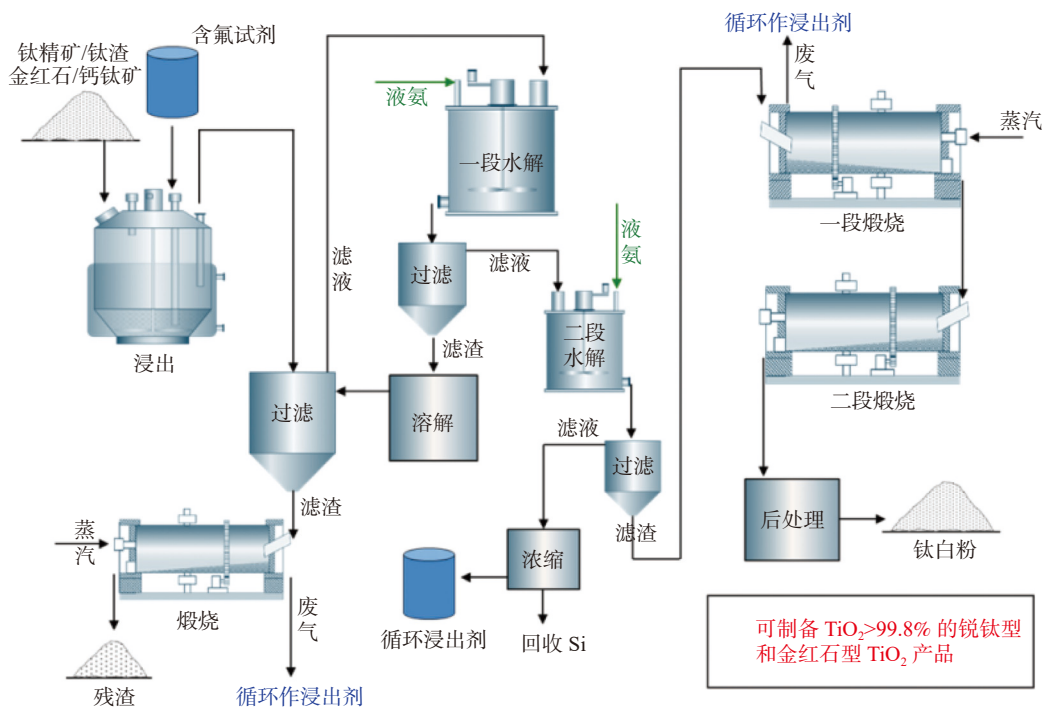


图 6 氟化法钛白粉制备技术路线

Fig. 6 Schematic diagram of the fluorination process for titanium dioxide production

2.3 清洁能源利用

将清洁能源应用于攀西地区,是解决钒钛磁铁矿利用碳排放量大的有效途径。四川省已明确将“优化钒钛资源综合开发用能结构,开展氢冶金先行先试,提高清洁能源使用比重”作为重点任务。开发生物质还原、氢冶金等技术,能从源头上减少碳排放量^[73],促进钒钛资源清洁高效利用。

2.3.1 生物质还原零碳流程

生物质作为一种可再生的清洁能源,在钢铁冶金中的应用具有显著的环境友好性^[74]。由于生物质是碳中性的,使用生物质替代化石燃料,可以从源头上减少钢铁生产过程中的温室气体排放^[75]。

生物质在高炉-转炉长流程中的应用如图7所示,在炼铁到炼钢的多个关键工序中,生物质资源展现出巨大的应用潜力^[76]。在炼铁环节,生物质可以替代部分化石燃料,用于高炉喷吹、烧结和球团生产。将生物质经水热碳化或蒸汽爆破后作为还原剂或燃料,直接喷入高炉,可以有

效降低焦炭消耗和二氧化碳排放^[77]。在烧结过程中,生物质经热解后可以替代部分焦粉或无烟煤作为烧结燃料,从而减少烧结过程中的碳排放^[78]。此外,生物质还可以用于制备生物质基粘结剂,替代传统的膨润土,用于球团生产,提高球团的强度和还原性能^[79]。

生物质在钒钛磁铁矿短流程还原阶段的应用如图8所示,主要为直接还原和复合还原两种工艺。直接还原是指将生物质作为唯一的还原剂与钒钛磁铁矿混合,在高温下进行还原反应。这种工艺的优点是流程简单,但存在还原速率慢、金属化率低等问题^[80]。为了提高还原效率,通常采用复合还原工艺,即联合使用生物质和其他还原剂(如煤、焦炉煤气、氢气等)^[81]。例如,可以先将生物质与钒钛磁铁矿混合进行预还原,然后再用焦炉煤气或氢气进行深度还原^[82]。复合还原工艺可发挥不同还原剂的协同作用,提高还原速率和金属化率,实现钒钛磁铁矿的高效、低碳还原。

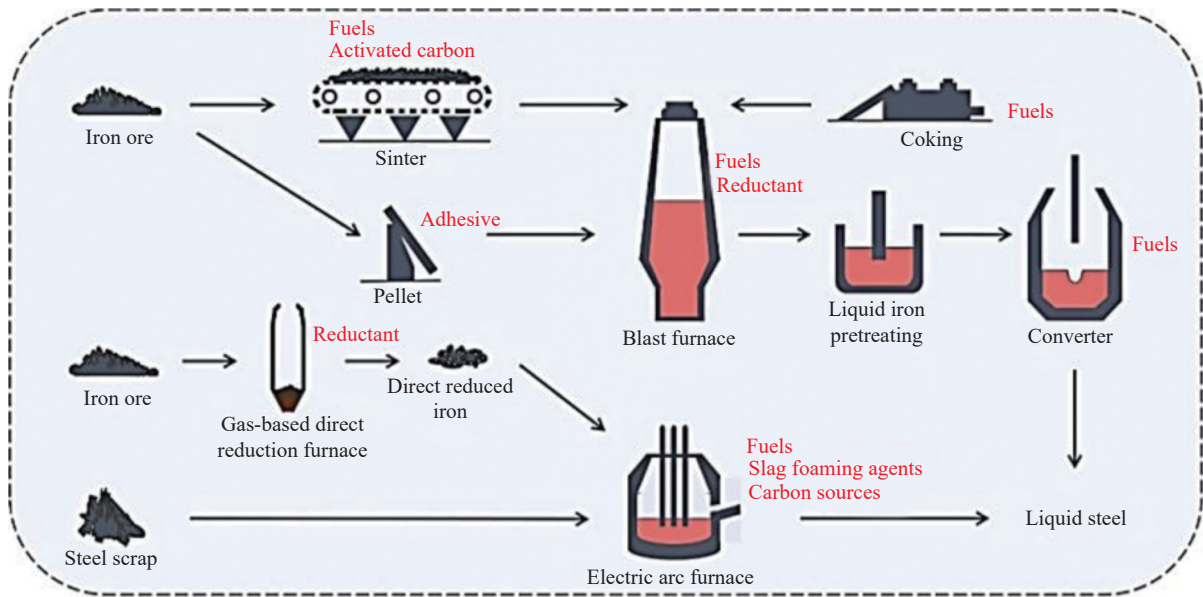


图7 生物质在高炉-转炉长流程中的应用
Fig. 7 Application of biomass in the blast furnace - basic oxygen furnace route

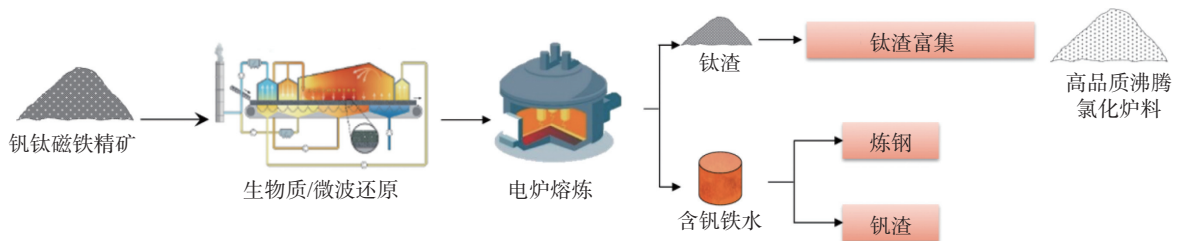


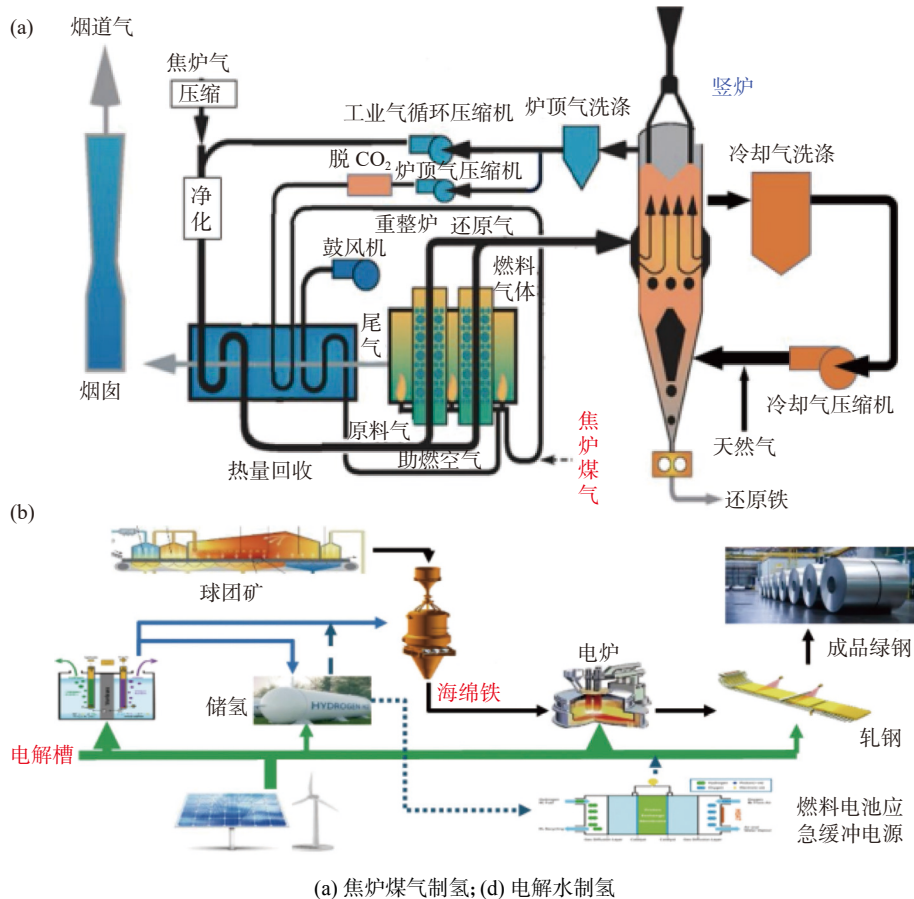
图8 生物质在短流程还原中的应用
Fig. 8 Application of biomass in short-process reduction

生物质还原钒钛磁铁矿具有诸多优势,但目前生物质还原技术的应用尚处于起步阶段,在实际应用中仍面临诸多技术挑战。由于生物质中的固定碳含量和热值通常低于焦炭,其还原能力不足,生物质还原产物的金属化率相对较低^[83]。在生物质还原过程中,由于生物质挥发分的释放,容易导致球团或烧结矿的粉化和爆裂,影响还原过程的稳定性^[83]。此外,生物质还原技术的预处理和运输成本较高,还原工艺的设备投资也相对较高,与传统的工艺相比,尚不具备明显的竞争优势。但随着生物质预处理工艺的优化,新型还原工艺的研发,碳税等环保政策的实施,生物质还原的低碳优势将逐渐显现,其经济性也将得到改善。因此,从长远来看,生物质还原技术在钒

钛磁铁矿冶炼领域具有广阔的应用前景。

2.3.2 氢能低碳冶金流程

氢能还原是钢铁工业实现碳中和的重要技术路线之一,与传统碳热还原相比,具有零碳排放的潜力^[84]。如图 9 所示,目前氢基还原工艺氢气来源主要为焦炉煤气制氢与电解水制氢。近年来,中国在氢冶金领域取得了一系列重要进展,一些钢铁企业已经开始建设氢基竖炉中试产线,并取得了初步的成功。河钢集团在张宣科技公司建设的全球首例 60 万 t 富氢气体直接还原氢冶金示范工程,采用焦炉煤气作为还原气体,通过变压吸附技术将其中的氢气提纯,然后通入竖炉进行直接还原。此外,湛江钢铁也投产了国内首套百万吨级氢基竖炉,中国钢研也建成了纯氢多稳态竖炉示范工程。



(a) 焦炉煤气制氢; (d) 电解水制氢
图 9 主流氢冶金工艺流程
Fig. 9 Process flow diagram of hydrogen-based metallurgy

焦炉煤气生产直接还原铁是我国现阶段最现实、可行的氢冶金路径。我国焦炉煤气的产量巨大,且存在大量的富余。将焦炉煤气作为氢冶金的还原剂,具有显著的环境优势与成本优势,不仅可以有效利用这些富余的能源,减少环境污染,同时降低了制氢过程中的能耗与设备投资。电解水制氢-氢基竖

炉直接还原工艺是目前最受关注的氢冶金技术之一^[85]。该工艺利用可再生能源(如风能、太阳能)发电,通过电解水制取氢气,然后将氢气通入竖炉,对铁矿石进行直接还原^[86]。相关研究表明,电解水制氢-氢基竖炉直接还原工艺的全流程二氧化碳排放量约 300 kg/t_钢,相较于传统的高炉-转炉流程的

1 800 ~ 2 000 kg/t_钢排放量降低了 84%^[87]。如果整个工艺过程中所使用的电力全部来自可再生能源,则可实现从制氢到还原全过程的零碳排放^[88]。

尽管氢冶金技术在攀西钒钛磁铁矿冶炼领域的应用前景广阔,但仍面临一些挑战^[89]。从技术成熟度来看,氢冶金技术,特别是电解水制氢-氢基竖炉直接还原工艺尚不够成熟,在原料适应性、工艺参数优化、设备制造、能源供应等方面,仍需要进一步的研究和攻关。随着技术的不断进步和政策的支持,氢冶金技术将在攀西钒钛磁铁矿冶炼领域发挥越来越重要的作用,为实现中国钢铁工业的“双碳”目标做出重要贡献。

2.4 固废处理强化

传统攀西资源综合利用工艺流程存在固废排放量大、种类多、资源化率低的问题。其中典型固体废弃物包括高炉钛渣、提钒尾渣及熔盐氯化渣等。开发固废清洁资源化处置技术是攀西资源利用转型升级的必然要求。

2.4.1 高炉钛渣

钒钛磁铁矿“高炉-转炉”冶炼过程中,钛氧化物性质稳定较难还原而进入炉渣,形成高钛型高炉

渣和钢渣,炉渣中的 TiO₂ 含量达 20% ~ 25%,具有较高的回收价值^[90]。截至目前,我国“高炉-转炉”冶炼产生的含钛炉渣已达 9 000 多万 t,且每年仍然以超过 300 万 t 的速度增长,资源化利用前景广阔。高钛型炉渣中钛弥散于钙钛矿、钛辉石、尖晶石等复杂共生矿相中,性质极为稳定,导致其资源化利用困难^[91]。目前已开发的资源化利用方法,如酸浸法^[92]、碱熔盐煅烧法^[93]、铝热法^[94]等均难以经济、高效地回收高炉钛渣中的钛资源。

攀钢集团基于“TiO₂ 选择碳化、TiC 优先氯化”的特点,突破了碳化电炉熔渣泡沫化、氯化炉粘结失流、尾渣水化活性难激发等系列技术难题,开发了高温碳化-低温氯化-尾渣资源化的高炉钛渣资源化利用全流程技术体系^[95],其主要工艺流程如图 10 所示。在高温碳化阶段,高炉钛渣中钛负载物相于 1 400 ~ 1 600 °C 下能与碳发生反应,形成 TiC 及 Ti(C,N),降低钛氯化反应难度,增大钛/钙镁氯化反应差异性。在低温氯化阶段,400 ~ 600 °C 范围内,氯气能规避杂质组分的不利影响,选择性地与 TiC 发生反应,形成低沸点的 TiCl₄,实现了钛的定向高效分离,产生的氯化尾渣经水淬活化-煅烧-细磨后可用作水泥原料。

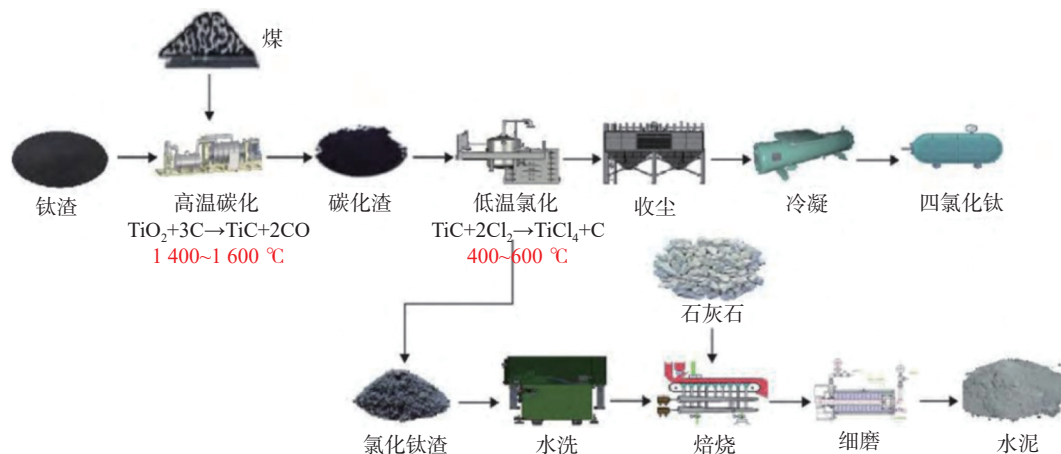


图 10 高炉钛渣高温碳化-低温氯化工艺

Fig. 10 High temperature carbonization-low temperature chlorination process for blast furnace titanium slag

依托高温碳化-低温氯化工艺,攀钢建成了 10 万 t 级高钛型高炉渣提钛生产线,已稳定运行超过 3 年并达产达效, TiCl₄ 生产成本低于行业平均水平^[96]。高炉钛渣全量化利用后,攀西资源的钛综合利用率由 28% 提升至 60%,完善了我国钛产业体系,保障了钛资源供应链安全和可持续发展。

2.4.2 提钒尾渣

我国约有 80% 的钒产品以转炉钒渣为原料,采用钠化焙烧-浸出工艺得到钒液及提钒尾渣^[97]。随着五氧化二钒产量的提高,我国每年产生的提钒尾

渣将近百万吨,其中攀钢和承钢每年排放量达 60 多万 t。提钒尾渣中含有铁、钒、铬、锰等有价金属元素,具有较高的回收价值^[98]。提钒尾渣中以铁元素为主(含量大于 40%),钒、铬、锰含量相对较低,且随着转炉钒渣提钒的技术进步,提钒尾渣中钒、铬含量将进一步降低,单独提取价值进一步压缩。因此将提钒尾渣并入高炉炼铁工艺,可实现铁、钒、铬、锰元素的同时回收,实现提钒尾渣的资源化利用^[89]。然而提钒尾渣中钠含量过高,直接返回炼铁工序将导致烧结、高炉冶炼过程的碱负荷增大,必须经脱

碱处理才能用作高炉炼铁原料^[99]。

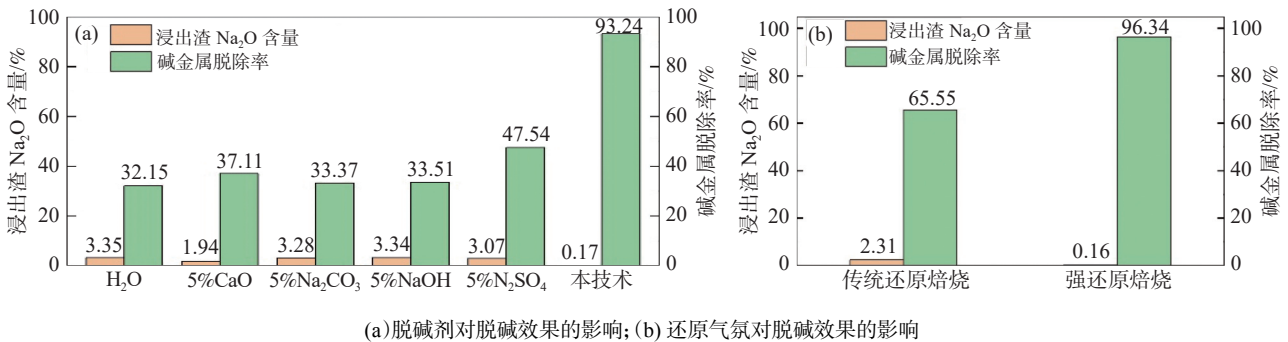
提钒尾渣中钠元素主要以复杂固溶体形式赋存于绿辉石、霓石、方钠石和黑钛铁钠矿中,传统方法采用的脱碱剂包括 H₂O、CaO、Na₂CO₃、NaOH、H₂SO₄ 等^[100],但其应用于提钒尾渣脱碱过程,碱金属脱除率均低于 50%,残渣中 Na₂O 含量均高于 1%,难以满足炼铁炉料要求。中南大学基于提钒尾渣中碱金属元素赋存特点,开发出提钒尾渣强还原气氛下活化焙烧-碱浸脱碱技术^[101]。如图 11 所示,与常规脱碱剂相比,中南大学提出的提钒尾渣活化焙烧技术,碱金属脱除率可达 93.24%,终渣 Na₂O 含量为 0.16%;强还原气氛下,碱金属脱除率由传统气氛的 65.55% 提高至 96.34%。该技术的开发为提钒尾渣并入高炉炼铁工艺,回收其中铁、钒、铬、锰等有价值元素奠定了基础。

2.4.3 熔盐氯化渣

熔盐氯化工艺原料适应性强,可处理我国高钙镁型钒原料^[102]。攀钢集团以熔盐氯化法为主,已自主研发 240 t/a 大型熔盐氯化炉^[103]。然而,熔盐氯化法生产过程产生大量熔盐氯化渣,其排渣量高达 400 kg/t TiCl₄。从上世纪引进熔盐氯化法至今,大量熔盐氯化渣堆存,且攀钢钛业、龙佰禄丰钛业等熔盐氯化产线持续排盐。熔盐氯化渣中可溶性组分大于 80%,属《一般工业固体废弃物贮存和填埋污染控制标准》(GB18599-2020) 规定的禁埋之列,开发

熔盐氯化渣无害化、资源化利用方法迫在眉睫。但熔盐氯化渣成分极为复杂,含有十余种金属氯化盐、氧化物、石油焦等^[104],现有资源化处理工艺包括水溶-碱中和^[105]、水溶-除杂-蒸发结晶^[106]、水溶-除杂-萃取^[107] 及电解法^[108] 等,存在处理流程长,工艺复杂,回收产品经济价值较低等问题,难以经济高效地实现熔盐氯化渣的无害化、资源化利用。若能解决废熔盐处理问题,我国高钙镁钛资源更适合采用熔盐氯化法生产 TiCl₄,实现攀西钒钛资源的高端利用。

中南大学基于氯化钠的溶解、熔化及挥发特性,开发熔盐氯化渣矿相转化法,加入相转化添加剂,强化氯化钠与其余物相的分离特性差异,实现氯化钠的选择性分离^[109-110],其工艺流程如图 12 所示。相转化法可一步实现熔盐氯化渣的高效脱毒,残渣减量 70%,NaCl 回收及返回熔盐氯化炉循环使用。分离后的相转化残渣中钒、钼、铈等稀土元素及铁、锰有价值元素富集三倍以上。此外,在相转化过程中可调控稀土元素以简单氧化物形式定向富集于相转化残渣中,有利于后续稀土元素选择性提取。熔盐氯化渣矿相转化技术开发将有效解决大量熔盐氯化渣处置的难题,并实现资源循环利用,推动熔盐氯化技术的新发展,保障我国高端钛产品生产原料的安全可靠供应,解决我国高钙镁钛资源规模化高端利用难题,促进我国高端钛产业快速发展。



(a)脱碱剂对脱碱效果的影响; (b) 还原气氛对脱碱效果的影响

图 11 钠化提钒尾渣活化焙烧-浸出脱碱技术效果^[101]

Fig. 11 Achievements of sodium-based vanadium tailings activation roasting-leaching and dealkalization technology^[101]

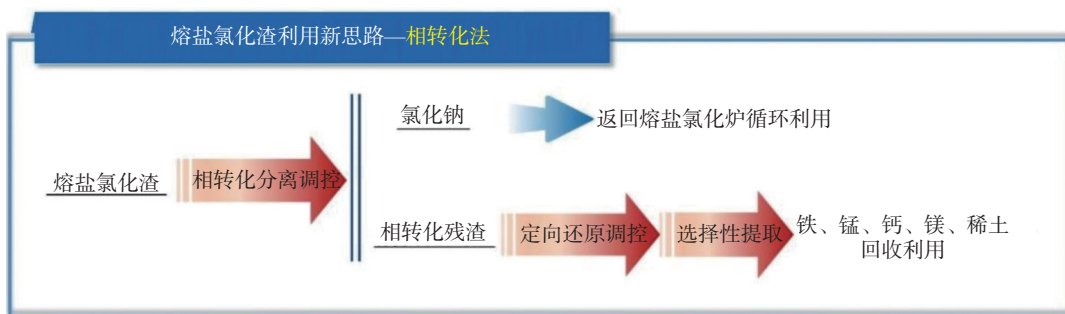


图 12 熔盐氯化渣相转化工艺

Fig. 12 Molten salt chlorination residue phase transformation process

2.5 选冶流程再造

针对攀西钒钛磁铁矿现有利用流程钒钛元素利用率低、高端产品少、绿色利用体系不完善等问题,中南大学提出变革现有工艺流程,高效利用攀西钒钛资源的利用思路。当前技术路线分为两类途径:一是局部颠覆流程,发展钒钛磁铁精矿氢冶金-电炉短流程替代高炉流程,解决现有高炉流程钛难以回收利用的问题;二是全面颠覆流程,从钒钛磁铁矿石选矿工艺入手,推动铁钒钛的共选共冶,提高钒钛元素回收率。

2.5.1 局部颠覆流程—钒钛磁铁精矿氢基竖炉-电炉法

在“双碳”目标推动下,钢铁行业亟待低碳转型。针对钒钛磁铁矿传统高炉冶炼中钛元素难以回收的问题,研究提出采用氢基还原-电炉熔炼新工艺,如图13所示。该工艺以氢气替代碳作为还原剂,能从根本上大幅降低碳排放。氢还原过程温和可控,对钒、钛等元素选择性还原能力

更强,有利于其高效富集。后续电炉熔炼无需配加普通矿,所得含钛电炉渣中TiO₂品位可提升至约50%,远高于含钛高炉渣,可直接作为钛白生产原料。同时,含钒铁水可顺利提取钢铁与钒制品。此项革新不仅契合低碳发展方向,更通过氢冶金的选择性优势,成功解决了钒钛磁铁精矿中钒回收率低,钛无法利用的难题,显著提升了钒钛磁铁矿的综合回收率与经济效益。

中南大学已对该工艺开展了多年研究,开发出了低还原粉化球团制备技术,获得了满足氢基竖炉要求的球团^[111-113];开发电炉冶炼钒钛走向控制技术,提高了电炉渣中TiO₂含量,实现钒在铁水中的富集^[114-115]。该技术与高炉法对比,钛回收率从0提高到90%以上,钒的回收率提高10%。为确保工艺可行,中南大学联合重钢矿业公司合作,分别在墨西哥和南非完成了氢基直接还原-电炉熔炼工艺流程工业试验,证明了其工业应用可行。

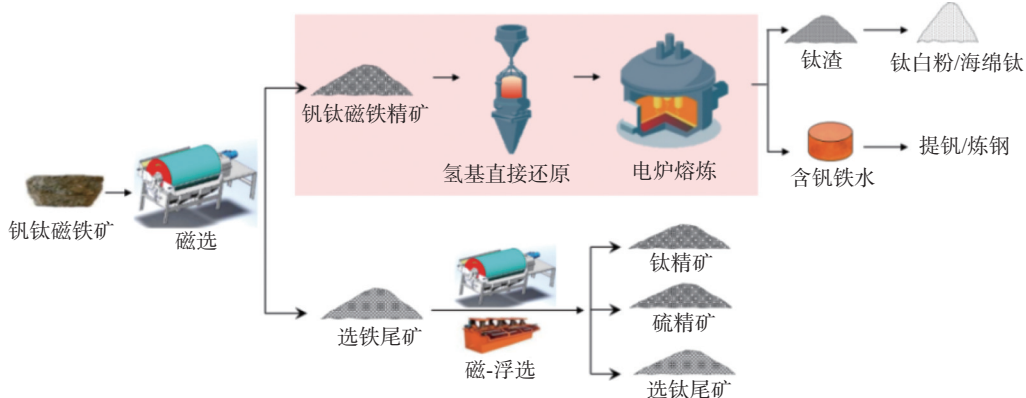


图13 局部流程颠覆示意
Fig. 13 Schematic diagram of local process modification

2.5.2 全面颠覆流程—铁钒钛共选共冶

现有钒钛磁铁矿石利用工艺通过磁-浮选将钛与钒铁元素分离。工业上为提高钛铁矿与钒钛磁铁精矿分选效率,强化了磨矿工艺,微细粒钛铁矿难以浮选回收,钛元素损失严重。分选后钒钛磁铁精矿中钛元素进入高炉钛渣难以回收利用,造成约52%的钛资源损失。分选后另一产品钛精矿中含铁杂质约34%,严重影响钛的提取与利用,降低钛产品质量。此外,高炉冶炼过程中含钒铁水捕钒率低,提钒流程复杂,钒损失严重。提高我国攀西地区钒钛磁铁矿综合利用率关键在于实现各元素间的充分分离与高效回收,

亟需革新现有工艺路线,彻底改善目前钒钛磁铁矿石元素分离回收难度高的困局。

中南大学^[116]前期研究中,通过革新选矿流程,将传统的钒钛磁铁精矿和钛精矿合二为一,无需过度磨矿,有利于提升抛尾效率。铁钒钛的混合精矿采用氢冶金-电炉短流程实现铁、钒、钛的绿色高效分离提取。该工艺突破了钒钛磁铁矿利用传统工艺,从选矿源头改变元素走向,充分富集钒、钛元素,建立了更加高效清洁的钒钛磁铁矿石利用体系。具体工艺流程如图14所示,在钒钛磁铁矿选矿过程中实现铁钒钛的氧化物混合精矿和硫化物混合精矿。

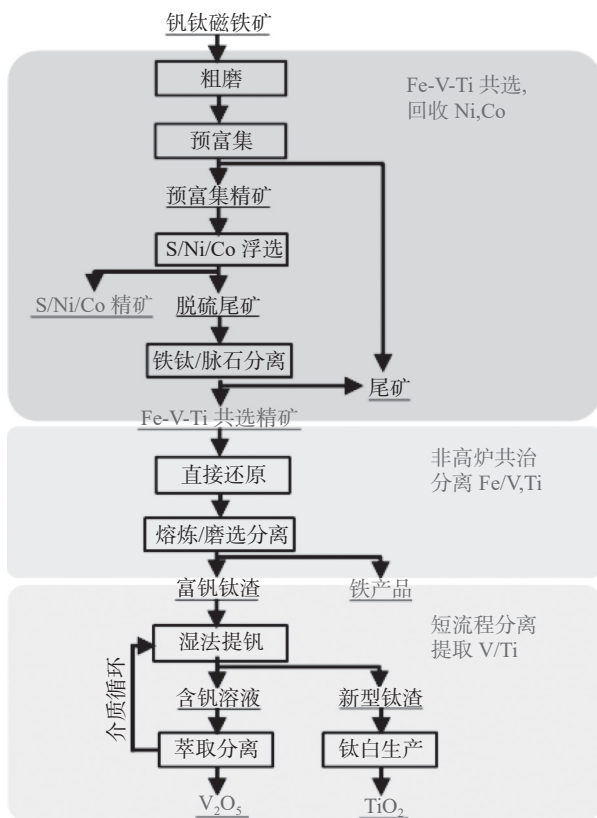


图 14 钒钛磁铁矿石铁钒钛共选共冶示意流程

Fig. 14 Schematic diagram of the co-selection and co-smelting process of Fe/V/Ti in vanadium-titanium magnetite

与现有流程相比, 新流程经一次抛尾, 尾矿 TFe 品位相当, TiO₂ 品位从 3% ~ 4% 降至 1% ~ 2%, 抛尾效率显著提高。铁钒钛氧化物精矿采用直接还原—电炉熔炼流程处理, 通过调控金属元素走向, 使钒钛元素在渣中富集, 随后采用清洁高效的方式获得钒钛制品。

3 结论

我国攀西钒钛磁铁矿是巨大资源宝库, 也是极难回收利用的资源; 经过近六十年攀钢人和全国冶金工作者的共同攻关和努力, 先后实现了铁、钒、钛回收和利用的历史性突破, 建成了完整的产业链和我国最重要的钒钛新材料产业基地。

攀西钒钛资源的开发利用存在钒钛综合利用率低、高端产品少、生产能耗高、固废产量大等问题; 攀西资源未来的利用方向是进一步提高资源利用率、开发高端新型钒钛产品、实现低碳绿色化生产, 推动行业智能化转型。

针对攀西钒钛资源高效清洁利用所面临的挑战, 亟需从工艺技术创新、产品迭代升级、清洁能源利用、固废处理强化和选冶流程再造等五个方面进行转型升级, 大力推动我国钒钛产业高效化、高端化、绿色化和智能化发展。

参考文献

[1] YUAN Z Z. Metallic materials(3rd ed)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2019. (袁志钟. 金属材料学(第 3 版)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2019.)

[2] ZHANG X Y, ZHANG Y, DAI C D, *et al.* Effect of Nb, V and Ti microalloying on microstructure and mechanical properties of hot stamping steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2025, 50(8): 14-20. (张翔宇, 张宇, 代春荣, 等. 钒钒钛微合金化对热成形钢组织与力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2025, 50(8): 14-20.)

[3] GUO F X, ZHANG J F, ZHAO Y L, *et al.* Effect of micro-Ti treatment on microstructure and mechanical properties of V microalloyed steel[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2011, 32(3): 21-24. (国富兴, 张俊粉, 赵英利, 等. 微钛处理对钒微合金钢组织与力学性能的影响[J]. 钢铁钒钛, 2011, 32(3): 21-24.)

[4] LIU S F, SONG X, XUE T, *et al.* Application and development of titanium alloys and titanium matrix composites in aerospace[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2020, 40(3): 77-94. (刘世锋, 宋玺, 薛彤, 等. 钛合金及钛基复合材料在航空航天的应用和发展[J]. 航空材料学报, 2020, 40(3): 77-94.)

[5] QIAN J, WANG Y, LI Y. The application of titanium and titanium alloys on foreign vessels[J]. Ship Science and Technology, 2016, 38(11): 1-6,19. (钱江, 王怡, 李瑶. 钛及钛合金在国外舰船上的应用[J]. 舰船科学技术, 2016, 38(11): 1-6,19.)

[6] KAN Y Y, SU F Z, XU X R, *et al.* Application status of industrial titanium and titanium alloy materials[J]. Shanghai Chemical Industry, 2023, 48(6): 58-61. (阚延勇, 苏方正, 徐曦荣, 等. 工业用钛及钛合金材料的应用现状[J]. 上海化工, 2023, 48(6): 58-61.)

[7] NASSAR N T, DAVID P, ALLEN S M, *et al.* Methodology and technical input for the 2025 U. S. list of critical minerals—assessing the potential effects of mineral commodity supply chain disruptions on the U. S. economy: 2025-1047[R]. U. S. Geological Survey, 2025.

[8] Department of Industry, Science and Resources. Critical minerals strategy 2023–2030[R]. Canberra: Commonwealth of

- Australia, 2023.
- [9] Regulation (EU) 2024/1252 of the European Parliament and of the Council of 11 April 2024 establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials[A]. 2024.
- [10] YANG Y H, HUI B, YAN S Q, *et al.* Overview of global vanadium-titanium magnetite resources and progress in comprehensive utilization[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2023(4): 1-11.
(杨耀辉, 惠博, 颜世强, 等. 全球钒钛磁铁矿资源概况与综合利用研究进展[J]. *矿产综合利用*, 2023(4): 1-11.)
- [11] YAN W P, ZHANG B Y, YANG Y H, *et al.* Overview and progress in comprehensive utilization technology of vanadium titanium magnetite resources in China[J]. *Metal Mine*, 2024(11): 70-80.
(严伟平, 张博远, 杨耀辉, 等. 中国钒钛磁铁矿资源概况及综合利用技术进展[J]. *金属矿山*, 2024(11): 70-80.)
- [12] CHI R A, QIN Z H, GUO W D, *et al.* Current situation of vanadium resources and research progress of vanadium extraction technology[J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2025: 0-22.
(池汝安, 覃哲昊, 郭文达, 等. 钒资源现状及提钒技术研究进展分析[J]. *有色金属 (选矿部分)*, 2025: 0-22.)
- [13] WANG L P, WANG H, GAO Q, *et al.* Distribution of titanium resources and current production status in China[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2004(1): 265-267.
(王立平, 王镭, 高颀, 等. 我国钛资源分布和生产现状[J]. *稀有金属*, 2004(1): 265-267.)
- [14] LIAO R Y Z, GONG X B, HUANG D Z, *et al.* Distribution characteristics and enrichment mechanism of vanadium-titanium resources in Sichuan[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2025, 45(S2): 32-38.
(廖阮颖子, 龚晓波, 黄德智, 等. 四川钒钛资源分布特征与富集机制研究[J]. *四川地质学报*, 2025, 45(S2): 32-38.)
- [15] WANG H M, SHENG S X. Ten years of blast furnace smelting of high-titanium vanadium-titanium magnetite at Pangang[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 1980(4): 4-16, 62.
(王宏民, 盛世雄. 攀钢高钛型钒钛磁铁矿高炉冶炼十年[J]. *钢铁钒钛*, 1980(4): 4-16, 62.)
- [16] ZHENG X, DU L, LI S, *et al.* A novel method for efficient recovery of ilmenite by high gradient magnetic separation coupling with magnetic fluid[J]. *Minerals Engineering*, 2023, 202: 108279.
- [17] ZHU Z M, LIN J, ZHANG G L, *et al.* Strategic minerals in Panxi vanadium-titanium magnetite tailings and their comprehensive utilization[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2023(4): 42-49.
(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.)
- [18] YANG S L, MA L, WANG J, *et al.* Application status and development direction of comprehensive utilization technologies for Panxi titanium resources[J]. *China Nonferrous Metallurgy*, 2024, 53(6): 2-12.
(杨绍利, 马兰, 王军, 等. 攀西钛资源综合利用技术应用现状及发展方向[J]. *中国有色冶金*, 2024, 53(6): 2-12.)
- [19] GUO W G, LUO D P, XIANG J R, *et al.* Current situation of China's titanium dioxide industry and policy recommendations for disposal and utilization of titanium gypsum[J]. *Modern Chemical Industry*, 2025, 45(1): 7-12.
(郭卫广, 罗大鹏, 向璟荣, 等. 我国钛白粉行业现状及钛石膏处置利用政策建议[J]. *现代化工*, 2025, 45(1): 7-12.)
- [20] MEI Y, SHAN Y K, HE K H. Distribution features of vanadium-titanomagnetite in Panxi regions and its mining and beneficiating techniques[J]. *Journal of Xichang University (Natural Science Edition)*, 2023, 37(1): 58-65.
(梅燕, 单永奎, 何科瀚. 攀西钒钛磁铁矿分布特征及采矿选矿技术[J]. *西昌学院学报 (自然科学版)*, 2023, 37(1): 58-65.)
- [21] WANG A W, LIU J S, ZHOU G H, *et al.* Study on optimal process flow and equipment of a 200 kt titanium beneficiation plant in Panzhihua[R]. Pangang Group Company Limited, 2005.
(王安五, 刘吉实, 周光华, 等. 攀枝花20万吨选钛厂最佳工艺流程及装置的研究[R]. 攀钢集团矿业公司, 2005.)
- [22] ZHANG L, WANG C F. Research progress on beneficiation technologies and comprehensive utilization of vanadium-titanium magnetite resources[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2023, 43(5): 127-137.
(张礼, 王长福. 钒钛磁铁矿资源选矿技术及综合利用研究进展[J]. *矿产保护与利用*, 2023, 43(5): 127-137.)
- [23] YANG S P, FENG Y B, WANG M, *et al.* Occurrence form and phase crystallization performance of titanium in high-titanium blast furnace slag[J]. *Iron and Steel*, 2025, 60(4): 179-189.
(杨双平, 冯宇波, 王苗, 等. 含钛高炉渣钛的赋存形式及物相结晶性能计算[J]. *钢铁*, 2025, 60(4): 179-189.)
- [24] CHANG F Z, ZHAO B B, LI L J, *et al.* Research status and prospect of vanadium extraction from vanadium titanomagnetite[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2018, 39(5): 71-78.
(常福增, 赵备备, 李兰杰, 等. 钒钛磁铁矿提钒技术研究现状与展望[J]. *钢铁钒钛*, 2018, 39(5): 71-78.)
- [25] PANAYOTOVA M, DIMITROV I, SOFRONIEVA A. Initial characterization of titanium- and vanadium-rich magnetite from the Manastir Heights in southeast Bulgaria[J]. *Minerals*, 2025, 15(9).
- [26] ZHANG S, ZHANG J, WANG Z, *et al.* Advancements in oxygen blast furnace technology and its application in the smelting of vanadium-titanium magnetite: a comprehensive review[J]. *Minerals Engineering*, 2024, 212: 108732.
- [27] WANG Y, WANG Y, LI Y, *et al.* A review on vanadium extraction techniques from major vanadium-containing

- resources[J]. *Rare Metals*, 2024, 43(9): 4115-4131.
- [28] LIU B, CHEN Y, YANG P, *et al.* Critical metals recovery from titanium dioxide waste acids (TDWA): a brief review[J]. *Minerals Engineering*, 2025, 234.
- [29] ZHANG J L, ZHENG F Q, GUO Y F, *et al.* Recent development and prospects of research on preparation of boiling chlorination burden from electric furnace titanium slag by impurity removal[J]. *Rare Metals and Cemented Carbides*, 2021, 49(1): 23-29.
(张金来, 郑富强, 郭宇峰, 等. 电炉钛渣除杂制备沸腾氯化炉料研究现状及展望[J]. *稀有金属与硬质合金*, 2021, 49(1): 23-29.)
- [30] WU F, REN Y, CHEN D, *et al.* Recovery methods and application prospects of transition metals from bulk solid waste generated in the phosphorus chemical and vanadium titanium industries[J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 375: 133836.
- [31] Release of information on prevention and control of environmental pollution by solid waste in Panzhihua City in 2024[EB/OL]. [2025-12-16]. <http://sthjj.panzhihua.gov.cn/zfxxgk/hbyw/trygtfw/gtfwhjgl/10216334.shtml>.
(攀枝花市 2024 年固体废物污染环境防治信息发布内容[EB/OL]. [2025-12-16]. <http://sthjj.panzhihua.gov.cn/zfxxgk/hbyw/trygtfw/gtfwhjgl/10216334.shtml>.)
- [32] GAN C, CUI S, WU Z, *et al.* Multiple heavy metal distribution and microbial community characteristics of vanadium-titanium magnetite tailing profiles under different management modes[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 429.
- [33] YU X, KANG X, LI Y, *et al.* Rhizobia population was favoured during in situ phytoremediation of vanadium-titanium magnetite mine tailings dam using *Pongamia pinnata*[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 255.
- [34] CHENG J, LI H, GAO D, *et al.* Our journey in greenization of vanadium extraction from vanadium slag in China[J]. *Transactions of the Nonferrous Metals Society of China*, 2025, 35(4): 1306-1324.
- [35] JU J, FENG Y, LI H, *et al.* A sustainable method for Ti, Al and Mg recovery from titanium-bearing blast furnace slag coupled with CO₂ sequestration by leaching residue[J]. *JOM*, 2023, 75(2): 358-369.
- [36] ZENG S L, ZHANG Z G, ZHOU R, *et al.* Application of ZCLA separator in commercial test of preconcentration of iron ore from Meishan iron mine[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2020, 40(4): 57-59.
(曾尚林, 张祖刚, 周润, 等. ZCLA 选矿机应用于梅山铁矿预选工业试验研究[J]. *矿冶工程*, 2020, 40(4): 57-59.)
- [37] LIU A P, YI D Q, ZHANG Z G, *et al.* Application of ZCLA magnetic separator in Meishan gravity concentration branch's 2-0.5 system[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2020, 40(6): 59-61.
(刘安平, 衣德强, 张祖刚, 等. ZCLA 型磁选机在重选 2-0.5 系统的应用[J]. *矿冶工程*, 2020, 40(6): 59-61.)
- [38] YAN W P. Study on new beneficiation technology for a refractory ultrafine ilmenite ore in Panxi[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2020, 10(8): 76-82.
(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.)
- [39] SHEN S, YUAN Z, LIU J, *et al.* Preconcentration of ultrafine ilmenite ore using a superconducting magnetic separator[J]. *Powder Technology*, 2020, 360: 1-9.
- [40] 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 titanium tailings in Panxi region[J]. *Metal Mine*, 2023(10): 100-104.
(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.)
- [41] 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.
(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.)
- [42] 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 Engineering*, 2023, 13(10): 53-60.
(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.)
- [43] WANG F Y, XU X Y, LIANG T M, *et al.* Magnetic separation and enrichment method of ultrafine-grained ilmenite in Panxi region[J]. *Mineral Resources Protection and Utilization*, 2020, 40(2): 55-59.
(王丰雨, 徐晓衣, 梁焱茂, 等. 攀枝花超细粒级钛铁矿磁选富集方法[J]. *矿产保护与利用*, 2020, 40(2): 55-59.)
- [44] LIANG 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.
(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.)
- [45] Panzhihua Iron and Steel Group. Pangang's new titanium beneficiation equipment achieves major breakthrough in efficient TiO₂ concentration[EB/OL]. 2025[2025-11-28]. https://www.panyan.cn/xwzx_gsdt/010011500015921.html.

- (攀钢集团. 攀钢选钛新装备高效富集 TiO₂ 取得重要突破[EB/OL]. 2025[2025-11-28]. https://www.panyan.cn/xwzx_gsdt/010011500015921.html.)
- [46] DENG J, XUE X, LIU G G. Current situation and development of comprehensive utilization of vanadium-bearing titanomagnetite at Pangang[J]. *Journal of Materials and Metallurgy*, 2007, 6(2): 5.
(邓君, 薛逊, 刘功国. 攀钢钒钛磁铁矿资源综合利用现状与发展[J]. *材料与冶金学报*, 2007, 6(2): 5.)
- [47] PENG Y J, LÜ C. Current status and progress in comprehensive utilization of vanadium-titanium magnetite[J]. *Mining Research and Development*, 2019, 39(5): 130-135.
(彭英健, 吕超. 钒钛磁铁矿综合利用现状及进展[J]. *矿业研究与开发*, 2019, 39(5): 130-135.)
- [48] GELDENHUYS I J, REYNOLDS Q G, AKDOGAN G. Evaluation of titania-rich slag produced from titaniferous magnetite under fluxless smelting conditions[J]. *JOM*, 2020, 72(10): 3462-3471.
- [49] TANG J, CHU M S, XUE X X. Optimized use of MgO flux in the agglomeration of high-chromium vanadium-titanium magnetite[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 2015, 22(4): 371-380.
- [50] LIU J. Fundamental and application research of double-layer iron ore sintering with ultra-high bed[D]. Changsha: Central South University, 2023.
(刘杰. 铁矿超高料层双层烧结工艺的基础与应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2023.)
- [51] XIONG L. Study and application of optimizing layer structure in ultra-high layer iron ore sintering[D]. Changsha: Central South University, 2022.
(熊林. 铁矿超高料层烧结的料层结构优化研究与应用[D]. 长沙: 中南大学, 2022.)
- [52] LIU K. The fundamental research on behavior and control of reduction swelling and degradation of vanadium-titanium magnetite pellets[D]. Changsha: Central South University, 2023.
(刘阔. 钒钛磁铁矿球团还原膨胀及粉化行为与调控的基础研究[D]. 长沙: 中南大学, 2023.)
- [53] WANG S. Fundamental research on the activation of vanadium titanomagnetite by high pressure roller mill and strengthening the preparation of pellet[D]. Changsha: Central South University, 2022.
(王殊. 高压辊磨活化钒钛磁铁矿及强化球团矿制备的基础研究[D]. 长沙: 中南大学, 2022.)
- [54] CHEN X L, HUANG Y S, FAN X H, *et al.* Oxidation roasting behavior and concretion properties of vanadium-titanium magnetite pellet[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2016, 47(2): 359-366.
(陈许玲, 黄云松, 范晓慧, 等. 钒钛磁铁矿球团氧化焙烧行为和固结特性[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2016, 47(2): 359-366.)
- [55] FAN X H, XIE L B, GAN M, *et al.* Roasting characteristics of magnesium pellets and mechanism of strengthening concretion[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2013, 44(2): 449-455.
(范晓慧, 谢路奔, 甘敏, 等. 高镁球团焙烧特性及其固结强化机理[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2013, 44(2): 449-455.)
- [56] ZHANG S J, XU Y L, XIE J Y, *et al.* Effect of blast furnace slag main components on its melting characteristics and viscosity properties[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2016, 6(6): 50-54.
(张士举, 胥有利, 谢金洋, 等. 高炉渣主要组分对其熔化特性及黏度的影响[J]. *有色金属工程*, 2016, 6(6): 50-54.)
- [57] FENG C, GAO L H, TANG J, *et al.* Effects of MgO/Al₂O₃ ratio on viscous behaviors and structures of MgO-Al₂O₃-TiO₂-CaO-SiO₂ slag systems with high TiO₂ content and low CaO/SiO₂ ratio[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2020, 30(3): 800-811.
- [58] CHEN M, SHI J J, TASKINEN P, *et al.* Phase equilibria of the CaO-SiO₂-TiO₂-Al₂O₃-MgO system in air at 1250-1400 °C [J]. *Ceramics International*, 2020, 46(17): 27702-27710.
- [59] FENG C, TANG J, GAO L H, *et al.* Effects of CaO/SiO₂ on viscous behaviors and structure of CaO-SiO₂-11.00wt%MgO-11.00wt%Al₂O₃-43.00wt%TiO₂ slag systems[J]. *ISIJ International*, 2019, 59(1): 31.
- [60] SHI J J, CHEN M, WAN X B, *et al.* Phase equilibrium study of the CaO-SiO₂-MgO-Al₂O₃-TiO₂ system at 1300 °C and 1400 °C in air[J]. *JOM*, 2020, 72(9): 3204-3212.
- [61] OU H Z. Experimental study on reasonable burden structure of blast furnace for smelting imported high chromia vanadia-titania magnetite[D]. Shenyang: Northeastern University, 2012.
(欧浩展. 高炉冶炼进口高铬型钒钛磁铁矿合理炉料结构的实验研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2012.)
- [62] PANG Z D. Fundamental theory research on blast furnace smelting with ultra-high ratio vanadium titanomagnetite[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.
(庞正德. 超高配钒钛矿高炉冶炼基础理论研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.)
- [63] HE Z W, XUE X X. Comparative study on metallurgical performance of different vanadium-titanium magnetite burdens[J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2019, 40(2): 207-211.
(何占伟, 薛向欣. 不同钒钛磁铁矿炉料冶金性能的对比研究[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2019, 40(2): 207-211.)

- [64] CHU M S, CHEN L J, LIU Z G, *et al.* Study on rational burden structure of smelting vanadium-titanium magnetite in blast furnace[J]. *Henan Metallurgy*, 2013, 21(6): 1-5,43.
(储满生, 陈立杰, 柳政根, 等. 高炉冶炼钒钛磁铁矿合理炉料结构的研究[J]. *河南冶金*, 2013, 21(6): 1-5,43.)
- [65] WU Y M. Measures for smelting with high percentage of V-bearing titanomagnetite in No. 2 BF of Panzhihua Steel & Vanadium[J]. *Ironmaking*, 2025, 44(1): 49-53.
(吴亚明. 攀钢钒2号高炉高比例钒钛矿冶炼技术措施[J]. *炼铁*, 2025, 44(1): 49-53.)
- [66] RAO J T, WANG Y J, HU P. A rapid economic evaluation method for pelletizing vanadium-titanium magnetite concentrate: CN201910833323.1[P]. 2022-05-24.
(饶家庭, 王禹键, 胡鹏. 一种钒钛磁铁矿造块经济性快速评价方法: CN201910833323.1[P]. 2022-05-24.)
- [67] FU W G, RAO J T, JIANG S, *et al.* A blast furnace smelting method for vanadium-titanium magnetite with a high proportion of pelletized ore: CN201810952882. X[P]. 2018-12-04.
(付卫国, 饶家庭, 蒋胜, 等. 一种高比例球团矿的钒钛磁铁矿的高炉冶炼方法: CN201810952882. X[P]. 2018-12-04.)
- [68] JIA H, LU F S, HAO B. Report on China titanium industry in 2020[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2021, 42(3): 1-9.
(贾翊, 逯福生, 郝斌. 2020年中国钛工业发展报告[J]. *钢铁钒钛*, 2021, 42(3): 1-9.)
- [69] YE E D, CHENG X Z, MIAO H J, *et al.* Research on preparation of synthetic rutile with Panxi ilmenite[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2015, 36(1): 7-15.
(叶恩东, 程晓哲, 缪辉俊, 等. 攀西钛精矿制备人造金红石研究[J]. *钢铁钒钛*, 2015, 36(1): 7-15.)
- [70] GUÉGUIN M, CARDARELLI F. Chemistry and mineralogy of titania-rich slags. Part 1—hemo-ilmenite, sulphate, and upgraded titania slags[J]. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2007, 28(1): 1-58.
- [71] ZHENG F, GUO Y, QIU G, *et al.* A novel process for preparation of titanium dioxide from Ti-bearing electric furnace slag: NH_4HF_2 -HF leaching and hydrolyzing process[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 344: 490-498.
- [72] ZHENG F, GUO Y, CHEN F, *et al.* Fluoride leaching of titanium from Ti-bearing electric furnace slag in $[\text{NH}_4^+]\text{-}[\text{F}^-]$ solution[J]. *Metals*, 2021, 11(8): 1176.
- [73] LIU Q M, ZHANG F M. Research progress on carbon reduction and CO_2 resource utilization technologies in iron and steel industry[J]. *Iron and Steel*, 2024, 59(2): 13-24.
(刘清梅, 张福明. 钢铁工业减碳与 CO_2 资源化利用技术的研究进展[J]. *钢铁*, 2024, 59(2): 13-24.)
- [74] HU T, LÜ X W, BAI C G, *et al.* Reduction behavior of Panzhihua titanomagnetite concentrates with coal[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2013, 44(2): 252-260.
- [75] SAFARIAN S. To what extent could biochar replace coal and coke in steel industries?[J]. *Fuel*, 2023, 334: 126697.
- [76] HE Z J, SHENG H Y, GAO L H, *et al.* Research progress on low-carbon ironmaking using biomass energy[J]. *Iron and Steel*, 2025, 60(1): 1-14.
(何志军, 盛宏沅, 高立华, 等. 利用生物质能实现低碳炼铁的研究进展[J]. *钢铁*, 2025, 60(1): 1-14.)
- [77] DAVIES-SMITH C A, HERBERT J, MARTIN C, *et al.* Enhancing biochar quality for the steel industry via hydrothermal pretreatment-steam explosion and pyrolysis[J]. *Bioresource Technology*, 2025, 437: 133009.
- [78] GAN M, FAN X, JI Z, *et al.* Application of biomass fuel in iron ore sintering: influencing mechanism and emission reduction[J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2014, 42(1): 27-33.
- [79] WAN X Y, HONG L K, CHEN J S, *et al.* Hydrogen reduction behavior of biomass-containing vanadium-titanium magnetite pellets[J/OL]. *Iron and Steel*, 2025: 1-8[2025-11-28]. <https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20250365>.
(万新宇, 洪陆阔, 陈建松, 等. 内配生物质钒钛磁铁矿球团的氢还原行为[J/OL]. *钢铁*, 2025: 1-8[2025-11-28]. <https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20250365>.)
- [80] HAN H L, YUAN P, DUAN D P, *et al.* Application of biomass in rotary hearth furnace direct reduction process[J]. *Journal of Chongqing University*, 2015, 38(5): 164-170.
(韩宏亮, 苑鹏, 段东平, 等. 生物质用于转底炉直接还原工艺研究[J]. *重庆大学学报*, 2015, 38(5): 164-170.)
- [81] BLENAU L W, SANDER S A H, FUHRMANN S, *et al.* Holistic valorization of fayalitic slag to pig iron and glass fibers[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 418: 137990.
- [82] HUANG Z C, JIANG X, YI L Y, *et al.* Effects of biomass on reduction behavior of vanadium-titanium magnetite and process enhancement[J]. *Iron and Steel*, 2021, 56(1): 12-20.
(黄柱成, 姜雄, 易凌云, 等. 生物质对钒钛磁铁矿还原行为影响及过程强化[J]. *钢铁*, 2021, 56(1): 12-20.)
- [83] LUO S Y, MA C, SUN P P. Reduction behavior and kinetics of iron ore-biomass composite pellets[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2015, 37(2): 150-156.
(罗思义, 马晨, 孙鹏鹏. 铁矿-生物质复合球团还原行为及还原动力学[J]. *工程科学学报*, 2015, 37(2): 150-156.)
- [84] VOGL V, ÅHMAN M, NILSSON L J. Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 203: 736-745.

- [85] ZHAO Y C, XU Q, ZHOU W, *et al.* Impact and countermeasures of carbon border adjustment mechanism on China's steel export[J]. *Iron and Steel*, 2025, 60(1): 191-203.
(赵禹程, 徐潜, 周为, 等. 中国钢铁出口受碳边境调节机制影响与对策[J]. *钢铁*, 2025, 60(1): 191-203.)
- [86] WANG H F, ZHANG M M, LI H Q. Research progress on renewable energy water electrolysis for hydrogen production coupled with hydrogen metallurgy technology[J]. *Iron and Steel*, 2024, 59(4): 1-15.
(王海风, 张明明, 李会泉. 可再生能源电解水制氢耦合氢冶金技术研究进展[J]. *钢铁*, 2024, 59(4): 1-15.)
- [87] LI F, CHU M S, TANG J, *et al.* Current status, challenges, and development strategies of hydrogen metallurgy in China[J]. *Forward Technology*, 2024, 3(4): 44-57.
(李峰, 储满生, 唐珏, 等. 中国氢冶金工艺现状、挑战及发展对策[J]. *前瞻科技*, 2024, 3(4): 44-57.)
- [88] TANG J, CHU M S, LI F, *et al.* Development and progress on hydrogen metallurgy[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2020, 27(6): 713-723.
- [89] LI L J, ZHANG C D, LIU Y, *et al.* Research progress on non-blast furnace smelting of vanadium-titanium magnetite and comprehensive utilization of titanium slag[J]. *China Metallurgy*, 2025, 35(3): 44-54,64.
(李兰杰, 张彩东, 刘洋, 等. 钒钛磁铁矿非高炉冶炼与钛渣综合利用技术研究进展[J]. *中国冶金*, 2025, 35(3): 44-54,64.)
- [90] YE Q, ZOU L, LU M, *et al.* Pyrometallurgical extraction of titanium from titanium-bearing blast furnace slag: recently development and prospect[J]. *Minerals Engineering*, 2025, 234: 109734.
- [91] JING J F, GUO Y F, ZHENG F Q, *et al.* Development status on comprehensive utilization of Ti-bearing blast furnace slag[J]. *Metal Mine*, 2018(4): 185-191.
(景建发, 郭宇峰, 郑富强, 等. 含钛高炉渣综合利用的研究进展[J]. *金属矿山*, 2018(4): 185-191.)
- [92] XIONG Y, LI C, LIANG B, *et al.* Leaching behavior of air-cooled Ti-bearing blast furnace slag in hydrochloric acid[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2008(3): 557-563.
(熊瑶, 李春, 梁斌, 等. 盐酸浸出自然冷却含钛高炉渣[J]. *中国有色金属学报*, 2008(3): 557-563.)
- [93] LI X H, PU J T. The latest developments of integrated utilization on Panzhihua high titanium-bearing BF slag[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2011, 32(2): 10-14.
(李兴华, 蒲江涛. 攀枝花高钛型高炉渣综合利用研究最新进展[J]. *钢铁钒钛*, 2011, 32(2): 10-14.)
- [94] POURABDOLI M, RAYGAN S, ABDIZADEH H, *et al.* A new process for the production of ferrotitanium from titania slag[J]. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 2007, 46(1): 17-23.
- [95] ZHONG X, LÜ X M, SHI Z X, *et al.* Process mineralogical study on blast furnace slag during high-temperature carbonization-low temperature chlorination[J]. *Metallurgical Analysis*, 2025, 45(8): 19-26.
(钟祥, 吕学明, 史志新, 等. 高炉渣高温碳化-低温氯化过程工艺矿物学研究[J]. *冶金分析*, 2025, 45(8): 19-26.)
- [96] YANG Y J. High-value utilization technology of high-titanium blast furnace slag based on selective carbonization-chlorination theory[R]. Sichuan Province: Pangang Group Panzhihua Iron and Steel Research Institute Co. , Ltd. , 2021.
(杨仰军. 基于选择性碳化-氯化理论的高钛型高炉渣高值化利用技术[R]. 四川省: 攀钢集团攀枝花钢铁研究院有限公司, 2021.)
- [97] WANG X Y, ZHAO H Q, QI X H, *et al.* Research progress and prospect of comprehensive utilization technology of vanadium extraction tailings from vanadium-titanium magnetite[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2024, 45(6): 50-58.
(王新宇, 赵海泉, 齐渊洪, 等. 钒钛磁铁矿提钒尾渣综合利用工艺研究进展及展望[J]. *钢铁钒钛*, 2024, 45(6): 50-58.)
- [98] LIU J S, DING X Y, XUE X X, *et al.* Research progress of comprehensive utilization of vanadium extraction tailings[J]. *Iron and Steel*, 2021, 56(7): 152-160.
(刘金生, 丁学勇, 薛向欣, 等. 提钒尾渣资源化综合利用的研究进展[J]. *钢铁*, 2021, 56(7): 152-160.)
- [99] WANG Z C, ZHENG F Q, LIU C, *et al.* Study on calcification reduction sodium removal of vanadium extraction tailings by coal-based rotary kiln method[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2024, 45(1): 91-95,130.
(王兆才, 郑富强, 刘臣, 等. 提钒尾渣煤基回转窑法钙化还原脱钠研究[J]. *钢铁钒钛*, 2024, 45(1): 91-95,130.)
- [100] QU J W, WENG X Y, LI G S, *et al.* Study on calcified alkaline leaching of vanadium extraction tailings from vanadium titanium-magnetite metallurgy[J]. *China Nonferrous Metallurgy*, 2024, 53(2): 129-138.
(瞿金为, 翁小影, 李高帅, 等. 钒钛磁铁矿提钒尾渣钙化碱浸试验研究[J]. *中国有色冶金*, 2024, 53(2): 129-138.)
- [101] ZHENG F, GUO Y, LIU S, *et al.* Removal of magnesium and calcium from electric furnace titanium slag by H₃PO₄ oxidation roasting-leaching process[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2018, 28(2): 356-366.
- [102] CHEN F, WEN Y K, GUO Y F, *et al.* Research status of viscosity characteristics of chlorinated molten salt system[J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 2022, 54(6): 1-5.
(陈凤, 问悦凯, 郭宇峰, 等. 氯化熔盐体系黏度特性研究现状[J]. *无机盐工业*, 2022, 54(6): 1-5.)

- [103] LI L. Key technologies for molten salt chlorination of high-calcium–magnesium low-grade titanium slag[R]. Sichuan Province: Pangang Group Co. , Ltd. , 2021.
(李亮. 高钙镁低品位钛渣熔盐氯化关键技术[R]. 四川省: 攀钢集团有限公司, 2021.)
- [104] FU G H, YAO H G, CHEN F, *et al.* Development status on comprehensive utilization of residue of molten salt chlorination[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2023(3): 112-118.
(付刚华, 姚洪国, 陈凤, 等. 熔盐氯化废渣综合利用研究进展[J]. 矿产综合利用, 2023(3): 112-118.)
- [105] WANG X D, LEI T, ZOU P, *et al.* Study on safe disposal of molten salt chlorination residue in sponge titanium production[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2008(4): 63-66.
(王祥丁, 雷霆, 邹平, 等. 海绵钛生产中熔盐氯化废渣无害化处理的研究[J]. 中国有色冶金, 2008(4): 63-66.)
- [106] EDITORIAL OFFICE OF IRON STEEL VANADIUM TITANIUM. Core technologies for resource utilization of Pangang waste salt reach the international leading level[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2022, 43(3): 190-190.
(钢铁钒钛编辑部. 攀钢废盐资源化利用核心技术达到国际领先水平[J]. 钢铁钒钛, 2022, 43(3): 190-190.)
- [107] Pangang Group Panzhuhua Iron and Steel Research Institute Co. , Ltd. A method for extracting scandium from by-products of comprehensive utilization in molten salt chlorination: CN202211702314.7[Z]. 2025.
(攀钢集团攀枝花钢铁研究院有限公司. 一种从熔盐氯化综合利用副产物中提钪的方法: CN202211702314.7[Z]. 2025.)
- [108] YANG J, LI Z X, QIN S B, *et al.* The preparation of magnesium metal and magnesium alloys from the waste salt from molten salt chlorination of Panzhuhua titanium slag[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 1994(4): 43-47.
(杨健, 李宗雄, 覃事彪, 等. 从攀矿钛渣熔盐氯化废盐中制取镁及镁锰合金[J]. 矿冶工程, 1994(4): 43-47.)
- [109] FENG C, WEN Y K, GUO Y F, *et al.* The transition of Mg-containing phases and recovery of NaCl in molten salt chloride slags at high temperature[J]. Materials, 2022, 15(17): 5983.
- [110] GUO Y, ZHENG Y, CHEN F, *et al.* A novel method to recover NaCl from molten salt chlorination residue and recycle NaCl back into molten salt chlorination process in $TiCl_4$ production: based on phase diagrams analysis[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2025, 197: 107024.
- [111] SUI Y L, GUO Y F, JIANG T, *et al.* Gas-based reduction of vanadium titanomagnetite concentrate: behavior and mechanisms[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2017, 24: 10-17.
- [112] CHEN F, LI H, WANG S, *et al.* Effect of H_2 –CO ratio on reduction disintegration behavior and kinetics of vanadium–titanium magnetite pellets[J]. Metals, 2025, 15: 823.
- [113] CHEN F, LI H, GUO Y, *et al.* Reduction disintegration behavior and crystallographic transformation of vanadium-titanium magnetite pellets during hydrogen-based reduction[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 34: 152-163.
- [114] WANG S, GUO Y, JIANG T, *et al.* Behavior of titanium during the smelting of vanadium titanomagnetite metallized pellets in an electric furnace[J]. JOM, 2019, 71(1): 323-328.
- [115] WANG S, GUO Y F, JIANG T, *et al.* Reduction behaviors of iron, vanadium and titanium oxides in smelting of vanadium titanomagnetite metallized pellets[J]. JOM, 2017, 69: 1646-1653.
- [116] LI G H, JIANG T, YI L Y, *et al.* A short-flow and high-quality utilization method for vanadium-titanium magnetite resources: CN202510525993.2[P/OL]. China, 2025.
(李光辉, 姜涛, 易凌云, 等. 一种钒钛磁铁矿资源短流程高质利用方法: CN202510525993.2[P/OL]. 中国, 2025.)