

材料研发

引文格式:刘娟,叶恩东.攀枝花低品位钛精矿流态化焙烧制备高性能焊材用人造金红石[J].中国有色冶金,2026,55(2): 108-117.

LIU Juan, YE Endong. Preparation of high-performance artificial rutile for welding materials by fluidized bed roasting of Panzhuhua low-grade titanium concentrate[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2026, 55(2): 108-117.

攀枝花低品位钛精矿流态化焙烧制备高性能 焊材用人造金红石

刘娟^{1,2}, 叶恩东¹

(1.攀钢集团研究院有限公司 钒钛资源综合利用国家重点实验室,四川 攀枝花 617000;

2.成都先进金属材料产业技术研究院股份有限公司 先进功能材料研究所,四川 成都 610305)

[摘要] 钛材焊条药皮中主要利用成分是金红石型 TiO_2 ,目前该材料主要依赖进口,对外依存度超过 90%。针对此现状,本研究以攀西低品位钛资源(MgO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 MnO 、 CaO 总含量 10%以上)为原料,结合其特点,采用“电炉熔炼提钛-流态化强氧化焙烧”工艺成功制备了人造金红石型 TiO_2 ,并进行了热力学分析、物相表征、微观结构观测及工业化试验,得到以下主要结论。最优工艺参数为流态化焙烧 950℃、保温 60 min,此条件下制得产品 TiO_2 含量 75.2%,人造金红石型 TiO_2 占比 92%、 $\text{S} \leq 0.028\%$ 、 $\text{C} \leq 0.008\%$,熔渣流动性提升、焊缝气孔率降至 1.2%,满足高端制造领域对焊材原料的超低硫碳要求。低品位钛渣氧化焙烧重构金红石型 TiO_2 的机制为“固溶体分解-晶型定向生长-杂质协同脱除”,焙烧过程中钛精矿中 MgO 、 SiO_2 等伴生杂质以纳米级均匀分布,形成“原位造渣组元”,实现了资源化协同利用。本工艺实现了该低品位钛精矿向高端焊材用人造金红石的高效转化, TiO_2 资源利用率达 85%,较传统工艺提升 25 个百分点;制得的人造金红石吨成本约 2 538 元,且流程短、无酸性废水排放、 CO_2 减排 40%,经济与环保优势显著。该研究结果突破了传统金红石产品制备工艺对高品位钛原料的依赖,为攀西钛资源从“资源型”向“功能型”转化提供了理论依据与技术支持。

[关键词] 高端焊接材料;人造金红石;攀枝花钛精矿;流态化焙烧;脱硫脱碳;金红石型 TiO_2 ;矿相重构;资源协同利用

[中图分类号] TF823;TG42 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2026)02-0108-10

DOI: 10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2026.02.012

0 引言

焊接材料是航空航天、核电装备、海洋工程等高端制造领域的关键基础材料,其性能直接决定金

属结构的服役安全。制备与母材性能匹配的焊接材料是大型装备制造的关键。钛系原料是焊接材料生产所需的主要原料之一,主要包括金红石、还原钛、钛精矿等^[1-4]。金红石具有改善引弧性能、稳定电弧、造渣和改善焊缝成型的作用,在焊接过程中可大幅提升熔渣的流动性,形成短渣,提高熔敷效率,调整熔渣黏度、有利于全位置焊接,改善焊接材料工艺性能,焊缝成形美观,受到焊接材料行业的青睐。我国虽然钛资源丰富,但高端焊接材料长

[收稿日期] 2025-10-20 [修订日期] 2025-11-25

[录用日期] 2025-11-30 [出版日期] 2026-04-01

[第一作者] 刘娟(1989—),四川内江、硕士、高级工程师,主要从事钛渣冶炼、人造金红石制备相关工艺研究。

[通信作者] 刘娟(1989—),四川内江、硕士、高级工程师,主要从事钛渣冶炼、人造金红石制备相关工艺研究。

期面临“卡脖子”难题,核心配方原料严重依赖进口,尤其是用于调控熔渣性能、改善焊缝质量的金红石型 TiO_2 ,对外依存度超过90%。2023年,进口天然金红石到岸价高达2 200美元/t,且受地缘政治影响供应波动剧烈(如2021年澳大利亚出口受限导致国内价格暴涨40%),严重制约了我国高端装备制造的自主可控能力^[5]。

焊接材料对钛原料的性能要求严苛,而攀西钛资源品位低,有害杂质含量高,制备焊接材料难度大。焊接材料由焊芯和药皮组成,焊芯与母材基本一致,在焊接过程中熔融与母材结合起到连接作用;药皮根据焊接材料使用环境、连接母材不一致,成分不一致,由多种矿物、合金及化工产品细颗粒混合而成。金红石型 TiO_2 在钛材焊条药皮中主要起造渣作用,可以改善熔渣的流动性,促进焊缝金属还原产物的聚集,并将其排除到熔渣中。增加药皮中 TiO_2 相对含量会使渣壳容易脱落,有效缩短熔渣凝固温度区间,使熔渣具有一定的引弧和稳弧作用。焊接材料行业通常要求钛系原料中 $\text{TiO}_2 \geq 86\%$,同时对钛系原料中C、S、P等有害杂质元素要求极高。在焊接材料中钛系原料主要利用其中的金红石型 TiO_2 ,以提升焊接性能及焊缝质量。

攀枝花钛精矿中 MgO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 MnO 、 CaO 总含量10%以上,在冶炼过程中与Ti一起进入渣相,在钛渣中比重达到14%以上,如果在充分利用 TiO_2 基础上同时充分利用这些资源,将大幅提升攀西钛资源的综合利用效率。前期研究表明,攀西钛精矿经电炉熔炼后,可将 TiO_2 品位提升至76%以上并降低FeO含量;流态化焙烧技术因具有气固接触面积大(颗粒比表面积 $1.2 \sim 4.5 \text{ m}^2/\text{g}$)、传热传质效率高(温度均匀性 $\pm 5^\circ\text{C}$)的优势,为低品位钛资源高效利用提供了新思路。本研究依据攀西钛资源特性及金红石成分构成,开发“电炉熔炼提钛-流态化强氧化焙烧”联合工艺,在试验基础上采用热力学性能分析及各种表征分析探究了低品位钛精矿向高性能人造金红石的转化机理;对人造金红石性能指标与现有技术产品进行了对比,并进行了经济可行性分析。该研究结果可为攀西钛资源的低成本高效利用提供理论基础和技术支撑。

1 现有焊接材料用人造金红石制备技术

目前,工业上制备焊接材料用人造金红石的常规方法主要包括还原锈蚀法和酸浸法,但均存在显著缺陷。

1.1 还原锈蚀法

该方法以钛铁矿为原料,通过高温还原($1\ 000 \sim 1\ 200^\circ\text{C}$)使FeO转化为金属铁,再经湿法锈蚀(盐酸或硫酸)去除铁杂质,最终得到人造金红石。该工艺的核心化学反应见式(1)。



但该工艺流程冗长(需3~4次焙烧及多级分选),吨产品(TiO_2)能耗高达1 500 kWh,且锈蚀过程产生大量酸性废水(吨产品废水排放 $5 \sim 8 \text{ m}^3$),环保处理成本占比达30%。所得产品 TiO_2 含量约80%~85%,S、C含量分别为0.08%~0.12%、0.03%~0.05%,难以满足高端焊材要求^[6]。

1.2 酸浸法

该方法采用浓硫酸(浓度 $\geq 98\%$)在 $150 \sim 200^\circ\text{C}$ 下浸出钛渣,溶解Fe、Mg、Ca等杂质,核心化学反应见式(2)。



该工艺需消耗大量强酸(吨产品耗酸1.2~1.5 t),设备腐蚀严重,且浸出渣主要为石膏渣(主要成分为 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)处理成本高达200元/t。产品 TiO_2 含量可达85%~88%,但残留S含量(0.06%~0.07%),且生产成本(含酸耗、设备维护、环保治理)较天然金红石进口价高15%~20%^[7]。

上述工艺均依赖高品位原料($\text{TiO}_2 \geq 60\%$),对攀西低品位钛精矿($\text{TiO}_2 = 47\%$)适应性差,且面临高污染、高成本、低效率的共性问题,难以支撑高端焊材的国产化需求。

2 试验介绍

2.1 原料特性分析

试验原料为攀钢集团选钛厂“强磁+浮选”工艺生产的攀枝花钛精矿,化学成分见表1,粒度分布见表2。钛精矿中 TiO_2 质量占比47.15%,FeO质量占比34.73%,S质量占比0.16%,属于典型多元素伴生岩矿,结构致密,需通过冶炼提升品位。

表1 攀枝花钛精矿化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of panzhihua titanium concentrate (mass fraction) %

成分	TiO ₂	FeO	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	S	V ₂ O ₅
含量	47.15	34.73	5.72	1.29	5.25	2.97	1.21	0.16	0.087

表2 钛精矿粒度分布

Table 2 Particle size distribution of titanium concentrate

粒度/ μm	+150	150~96	96~75	75~44	-44
质量占比/%	15.55	28.21	20.74	26.51	8.99

由表1和表2可知,攀枝花钛精矿品位较低,其他杂质含量较高,钛铁氧化物质量占比87.6%。由于Ca、Mg、Si、Al与O结合能力比Fe强,该类元素在钛渣冶炼过程中均后于Fe还原,基本以氧化物或固溶体形式存在于钛渣中。攀枝花钛精矿中S含量达0.16%,远高于优质砂矿中S含量,不能作为焊接材料用钛系原料,无法直接作为焊接材料用钛系原料^[6]。此外,攀枝花钛精矿粒度偏细,其中-96 μm 的颗粒占比达56.24%。

2.2 试验装置与方法

1) 钛渣制备。将钛精矿与焦丁按特定比例混合,置于50 kV·A直流电弧炉中,在1 600~1 700℃的熔炼温度下熔炼2 h。熔炼后的产物经水淬、破碎、筛分等工艺处理,得到酸溶性钛渣。熔炼过程中,FeO被还原为金属铁并分离,TiO₂品位显著提升76%,同时MgO、SiO₂等杂质以固溶体形式保留在钛渣中,粒度经筛分处理控制在0.096~0.5 mm之间,满足后续流态化氧化焙烧的要求。

2) 流态化氧化焙烧。在实验室流态化焙烧装置中进行强氧化试验,参数范围:温度700~1 000℃,停留时间10~60 min,空气流量1.5 L/min(约1.2倍最小流化速度),氧浓度为18%~21%,床层压降稳定在0.8~1.2 kPa。每次称取50 g钛渣,以10℃/min升温至目标温度700~1 000℃,保温10~60 min;钛渣颗粒均匀悬浮于气流中,形成动态密相床层,无明显分层及死床区域,后随炉冷却。通过改变温度和停留时间,系统研究分析焙烧样品的成分、物相及微观结构。

3) 新型人造金红石的工业试制。基于小型流态化氧化焙烧试验获得的最优工艺参数,在工业规

模上进行新型人造金红石的试制。选用 $\Phi 1.2$ m流态化焙烧炉,单次处理量为500 kg。通过工业试制,进一步验证工艺的可行性和稳定性,为工业化生产提供实践依据。

2.3 表征分析方法

1) 物相分析采用Bruker D8 X射线衍射仪(Cu K α 辐射,扫描速度5°/min),重点分析金红石型($2\theta=27.45^\circ$)与锐钛型($2\theta=25.3^\circ$)TiO₂特征峰。

2) 晶型定量分析采用Horiba XploRA拉曼光谱仪(532 nm激光),通过金红石型(442.5 cm^{-1} 、610.0 cm^{-1})与锐钛型(396.8 cm^{-1} 、637.0 cm^{-1})特征峰强度比计算晶型转化率。

3) 微观结构分析采用Hitachi SU8010扫描电镜(20 kV加速电压)结合EDAX能谱,分析颗粒表面形貌及元素分布(分辨率10 nm)。

4) 热行为测试采用Mettler Toledo TGA-DSC同步热分析仪(空气气氛,升温速率10°/min),研究氧化反应动力学及杂质脱除路径。

3 结果与讨论

3.1 钛渣物理性能及热力学性能分析

3.1.1 物理性能分析

分级后钛渣粒度呈正态分布(图1),0.074~0.18 mm颗粒质量占比79.29%,满足流态化焙烧对颗粒分散性的要求。物理性能测试显示(表3),钛渣松散密度1.76 g/cm^3 ,休止角30.94°,分散性良好,无明显团聚倾向,表明该钛渣适宜进行流态化操作。良好的流态化性能有助于在焙烧过程中实现气固充分接触,提高传热传质效率,促进反应的

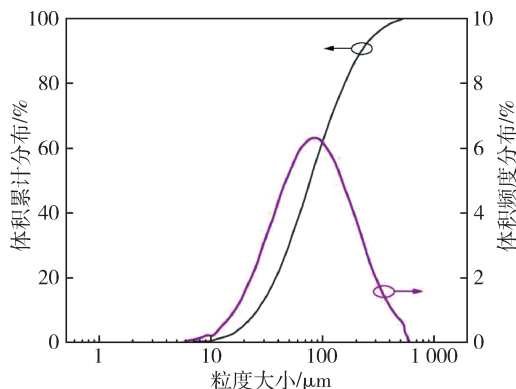


图1 攀枝花钛渣粒度分布曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve of panzhihua titanium slag

进行。

3.1.2 热力学性能分析

TGA-DSC曲线(图2)表明,钛渣氧化过程可分为三个阶段。

表3 钛渣物理性能参数

Table 3 Physical performance parameters of titanium slag

性能指标	真实密度/ (g·cm ⁻³)	松散密度/ (g·cm ⁻³)	振实密度/ (g·cm ⁻³)	休止角/(°)	崩溃角/(°)	分散角/(°)
测试值	3.64	1.76	1.89	30.94	23.27	25.44

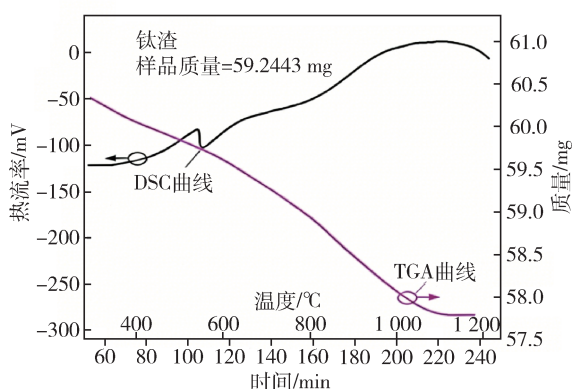
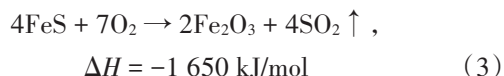


图2 钛渣TGA-DSC曲线

Fig. 2 TGA-DSC curves of titanium slag

1) 低温氧化阶段(400~600℃)。主要发生金属铁与表面FeO的氧化失重1.2%对应FeS分解,见式(3)。



2) 固溶体分解阶段(600~900℃)。黑钛石晶格开始破坏,Ti³⁺与Fe²⁺逐步氧化,DSC曲线出现强放热峰(峰值温度850℃),见式(4)。



3) 晶型转变阶段(900~1000℃)。锐钛型TiO₂向金红石型转变(ΔG=-25 kJ/mol),伴随多孔结构形成,比表面积从1.2 m²/g增至4.5 m²/g。

3.2 流态化焙烧过程中物相的演变

XRD分析(图3)表明,750℃时黑钛石(MgFeTiO₅)衍射峰较强,金红石型TiO₂峰(2θ=27.45°、36.09°)微弱;850℃时黑钛石峰减弱,金红石峰增强;950℃以上黑钛石基本消失,金红石成为主相,伴随少量Fe₂O₃与MgTiO₃。Raman光谱(图4)进一步证

实,随温度升高,锐钛型特征峰(396.8 cm⁻¹、637.0 cm⁻¹)逐渐红移并减弱,金红石特征峰(442.5 cm⁻¹、610.0 cm⁻¹)增强,950℃时锐钛型特征峰(396.8 cm⁻¹)完全消失,金红石型特征峰半高宽从50 cm⁻¹收窄至35 cm⁻¹,表明晶体完整性显著提升。

流态化焙烧过程中,黑钛石(MgFeTiO₅)固溶体中低价钛(Ti³⁺)与Fe²⁺的氧化反应活化能仅为120 kJ/mol,较静态焙烧降低30%,可在950~1000℃实现快速氧化分解,促进金红石型TiO₂定向生长。

3.3 杂质脱除机制及动力学分析

焙烧过程中硫与碳杂质的脱除效果见图5。结果显示,硫的脱除分为两个阶段(图5(a)):700~800℃时,表面FeS通过气固反应(式(3))缓慢脱除(脱除率30%);800~950℃时,随黑钛石分解,内部包裹的FeS暴露,脱除速率加快(一级反应速率常数k=0.025 min⁻¹),950℃时S含量降至0.028%。碳的脱除主要依赖CO/CO₂气相反应(C+0.5O₂→CO↑, C+O₂→CO₂↑),750℃以上脱除率达90%,950℃时C含量低至0.008%,满足焊接材料对杂质的严苛要求(C≤0.02%、S≤0.05%)。

对焙烧过程的硫脱除反应建立动力学方程,见式(5)。

$$-\ln(1-X_s) = kt \quad (5)$$

式中:X_s为硫脱除率,%;k为速率常数,950℃时k=0.032 min⁻¹;t为时间,min。

该模型预测值与试验数据吻合度R²=0.98,表明硫脱除受化学反应控制。碳的脱除则符合收缩核模型,反应界面从颗粒表面向内部推进,脱除速率随比表面积增大而提升(950℃时脱除速率为0.015 g/(m²·min))。

3.4 微观结构演变及性能分析

SEM观察(图6)显示,750℃样品表面光滑致密,存在冶炼残留的微裂纹;850℃时,颗粒表面析出50~100 nm的金红石晶核,形成初始多孔结构;950℃时,晶核生长为1~2 μm的针状或短棒状晶体,孔径50~200 nm均匀分布,比表面积较原料提升近3倍;1000℃时晶粒粗化至5 μm以上,孔隙率下降导致比表面积降至3.2 m²/g。EDS面扫表明,950℃样品中Ti元素分布均匀性(相对标准偏差≤5%)显著优于天然金红石(偏差12%),Fe、Mg元素

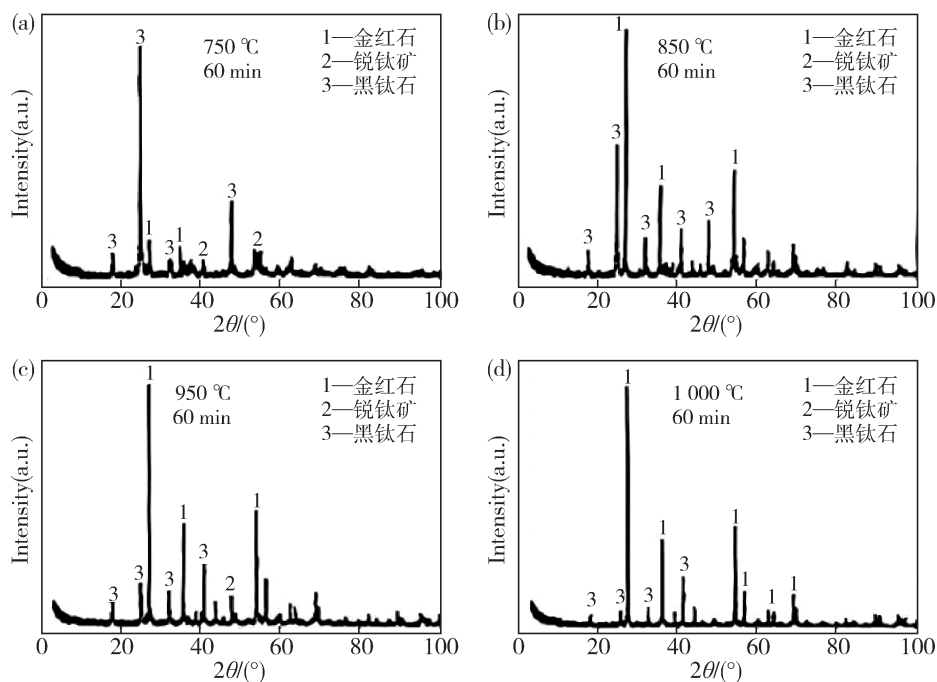


图3 不同温度焙烧样品XRD图谱

Fig. 3 XRD patterns of samples calcined at different temperatures

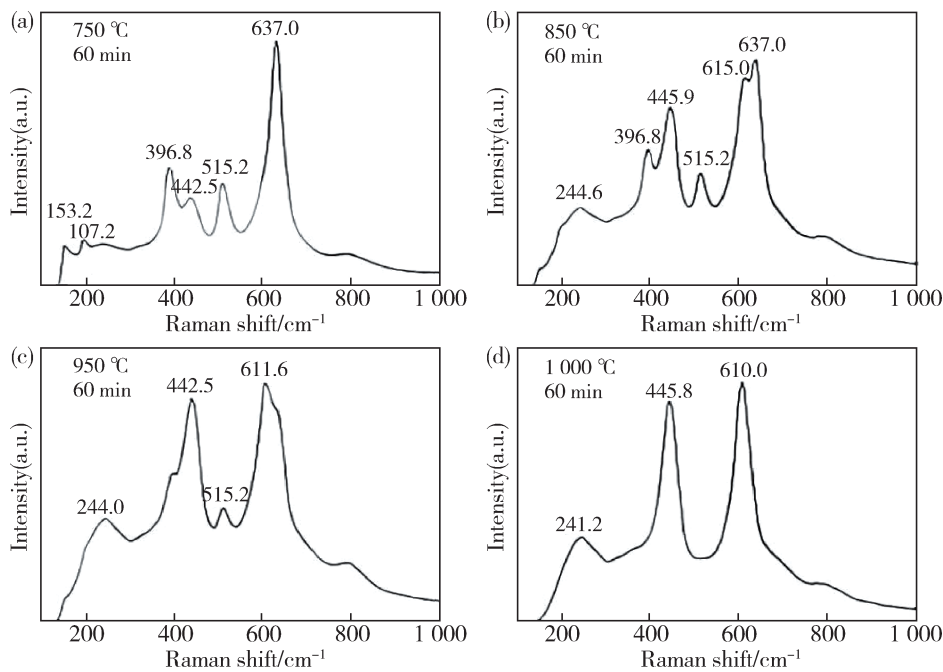


图4 不同温度焙烧样品Raman光谱

Fig. 4 Raman spectra of samples calcined at different temperatures

以纳米级氧化物(≤ 100 nm)均匀分散,无明显偏析。微观形貌的变化与物相结构演变密切相关,多孔结构和均匀的元素分布有助于提高人造金红石的反应活性和焊接性能。

3.5 焙烧时间对人造金红石的影响

在950℃下考察停留时间的影响(图7),结果显示:50 min内钛渣增重迅速(达理论值的95%),50 min后趋于稳定,对应黑钛石分解与氧化反应

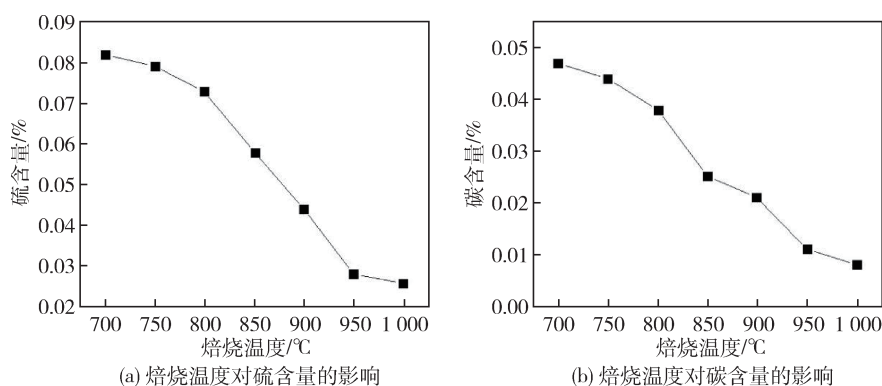


图5 焙烧温度对硫、碳含量的影响

Fig. 5 Effect of roasting temperature on sulfur and carbon contents

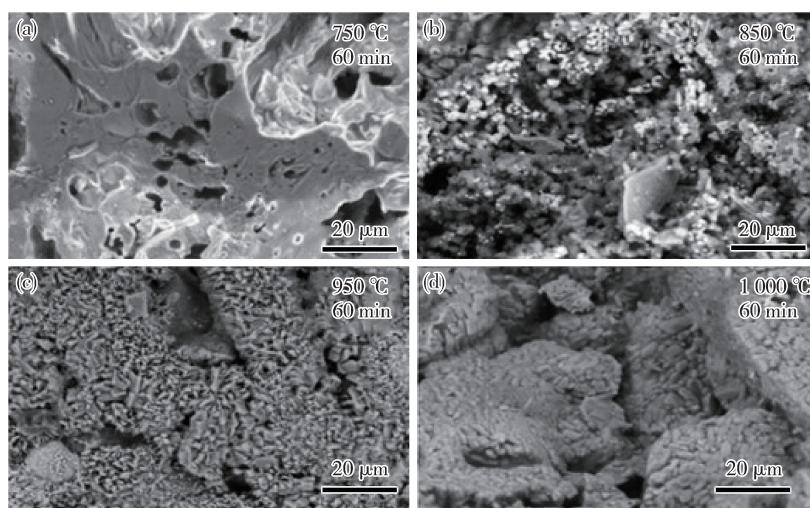


图6 不同温度焙烧样品SEM图像(2000×)

Fig. 6 SEM images (2000×) of samples calcined at different temperatures

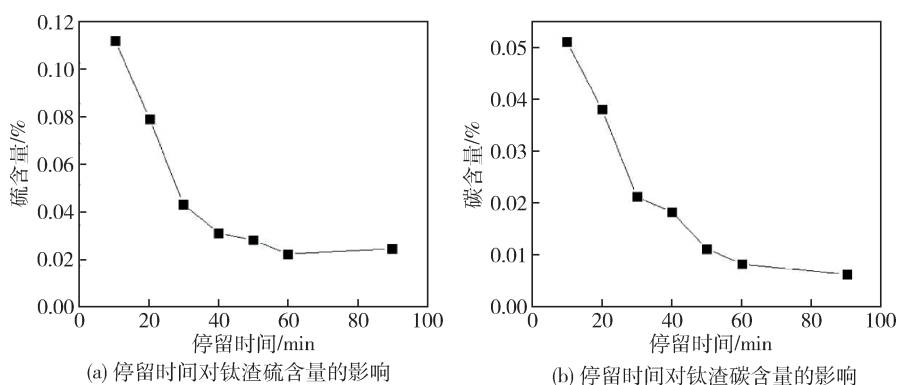


图7 停留时间对钛渣硫与碳含量的影响

Fig. 7 Effect of sulfur and carbon contents in titanium slag under different holding times.

的完成;硫、碳含量随时间延长持续降低,60 min 时 $S \leq 0.03\%$ 、 $C \leq 0.001\%$,脱除率分别达 81.25% 和 93.75%。综合能耗与效率,确定最佳停留时间为 60~80 min,较传统酸浸法(处理时间 120~180 min)

缩短 50% 以上。合适的焙烧时间既能保证杂质充分脱除,又能避免过度焙烧导致能耗增加和产品性能下降。

3.6 流态化焙烧矿物重构机制分析

本研究构建“固溶体分解-晶型定向生长-杂质协同脱除”的矿相重构理论,揭示低品位钛渣流态化焙烧制备高晶型纯度人造金红石的内在机制,该过程分为三个耦合关联的阶段:

(1)固溶体分解阶段:(600~900℃启动,900℃以上完成),高温作用下,黑钛石(MgFeTiO_5)固溶体晶格中 Fe^{2+} 与 Ti^{3+} 的配位键发生断裂, Fe^{2+} 优先被氧化为 Fe^{3+} 并形成50~100 nm的 Fe_2O_3 纳米颗粒,不仅实现铁杂质的形态转化,更在钛渣颗粒表面形成大量活性位点,为后续 Ti^{3+} 的氧化反应提供反应基础。

(2)晶型定向生长阶段:(900~1 000℃),流态化床层的高效气固传质特性,使氧原子均匀扩散至钛渣颗粒内部并吸附于活性位点,暴露的 Ti^{3+} 发生快速氧化反应生成 TiO_2 晶核;同时流态化焙烧形成的均匀温度场($\pm 5^\circ\text{C}$),引导 TiO_2 晶核沿金红石型[110]晶向定向生长,有效提升金红石型 TiO_2 的晶型纯度与晶体完整性。

(3)杂质协同脱除阶段:(全程伴随),固溶体分解与晶型生长过程中,晶格内部包裹的 FeS 、单质C等有害杂质充分暴露,分别通过气固反应(FeS 氧化分解)和气相氧化反应($\text{C}\rightarrow\text{CO}/\text{CO}_2$)实现深度脱除;而 MgO 、 SiO_2 等伴生杂质则以纳米级(平均粒径 ≤ 100 nm)均匀分散于金红石基体中,形成“原位造渣组元”,实现杂质的资源化协同利用,同时晶格应力释放过程中形成多孔疏松结构,进一步提升产物的反应活性与焊接工艺性能。

三个阶段同步耦合、相互促进,在实现金红石型 TiO_2 定向合成的同时,完成有害杂质深度脱除与伴生杂质资源化利用,最终实现低品位钛渣向高性能人造金红石的矿相重构。

4 产品性能对比及经济性分析

4.1 本工艺金红石产品性能指标及优势对比

以攀枝花钛精矿为原料,在 $\Phi 1.2$ m工业流态化炉(处理量500 kg/批)中验证适宜工艺参数(焙烧温度950℃、保温时间60 min)下人造金红石产品与天然金红石及传统工艺产品的关键性能对比见表4。

综上,本工艺通过“电炉熔炼-流态化焙烧”联合技术,在晶型纯度、杂质深度脱除、熔渣性能调

控、生产环保性四大核心维度全面超越传统还原锈蚀法和酸浸法,精准解决了高端焊材对超低硫碳、高效造渣性能的核心需求。同时,该工艺突破了传统人造金红石制备对高品位钛原料的依赖,为我国核电、航空航天、海洋工程等高端制造领域提供了自主可控的焊材核心原料解决方案,推动攀西钛资源从“资源型”粗放利用向“功能型”高值化利用转化。

4.2 经济性分析

以年产10万t人造金红石的工业化生产规模为核算基准,对本工艺的吨产品成本进行详细核算,并与天然金红石进口成本、传统工艺直接生产成本对比,分析本工艺的经济可行性;同时从“三废”排放、能耗控制角度,评估其环保优势。

4.2.1 成本核算

原料成本主要包括钛精矿与焦丁等费用,约2 500元;综合能耗成本(电炉熔炼电耗+流态化焙烧煤气消耗)约1 134元;扣除电炉熔炼副产品生铁回收收益1 096元后,吨产品直接生产成本约2 538元,环保处理成本(除尘)约50元。

该成本显著低于天然金红石进口价格(15 000元/t)及酸浸法工艺最新测算直接生产成本(3 460元/t)。传统工艺附加成本偏高,还原锈蚀法吨产品产生酸性废水5~8 m^3 ,环保处理成本约占总成本的30%;酸浸法吨产品消耗浓硫酸1.2~1.5 t,石膏渣处理成本达200元/t,且设备维护成本高等,将显著推高整体生产成本。

4.2.2 环保效益

本工艺从工艺设计上规避了传统湿法工艺的高污染问题,无酸性废水排放,生产过程中废气、固废均实现低排放或资源化利用。

1) 废气。焙烧废气中 SO_2 浓度为50 mg/m^3 ,远低于《钛工业污染物排放标准》(GB25467—2020)规定的100 mg/m^3 限值。

2) 固废。熔炼及焙烧产生的除尘灰主要成分为 Fe_2O_3 ,可回收作为冶金原料再利用,无固废外排。

3) 碳排放。吨产品 CO_2 排放从传统工艺的1.8 t降至1.1 t,减排幅度达40%,符合国家“双碳”发展目标要求。

相较于传统工艺,本工艺实现了“低成本、低污染、高资源利用率”的生产目标,工业化应用的经济价值和环境价值显著。

表 4 不同工艺产品性能对比

Table 4 Performance comparison of products with different processes

性能指标	本工艺	天然金红石 ^[11]	还原锈蚀法 ^[6]	酸浸法 ^[7]	性能优势分析(本工艺 vs 传统工艺)
TiO ₂ 含量/%	75.2	95.6±1.2	80 ~ 85	85 ~ 88	总含量略低,但金红石型占比更高,且含 14.3% 原位造渣组元(MgO+SiO ₂),可直接优化熔渣性能,减少焊材配料环节的造渣剂添加成本。
金红石型 TiO ₂ 质量占比/%	92	96 ~ 98	75 ~ 80	82 ~ 86	晶型纯度显著高于传统工艺,可有效促进焊缝成型、提升熔渣流动性,优化焊接工艺性能。
S 含量/%	0.028	0.075	0.092	0.065	硫含量较传统工艺降低 50% 以上,从根源避免 Fe-S 低熔点共晶引发的焊缝热裂纹,降低高拘束度焊接场景下裂纹发生率。
C 含量/%	0.008	0.025	0.041	0.032	碳含量较传统工艺降低 60% 以上,且远低于 0.01%,可有效抑制焊缝金属马氏体转变,使焊缝冲击韧性提升,满足高端焊材超低碳指标要求。
MgO+SiO ₂ 质量占比/%	14.3	1.2	12.5	8.2	MgO 以 80 nm 纳米级均匀分布于基体,无需焊材配方额外添加 MgO,使熔渣碱度提升,脱磷率提高,大幅简化焊材配方设计流程。
熔渣碱度	1.5*(含 MgO 原位造渣)	1.2(需外加 MgO)	1.0(依赖外加造渣剂)	1.1(需调整配料)	依托原位造渣组元实现熔渣碱度精准调控,无需额外调整焊材配料,提升焊材生产效率。
熔渣黏度 (1 600℃)/(Pa·s)	1.8	2.5(需加 SiO ₂ 调节)	2.8(流动性差)	2.3(需控制酸残留)	SiO ₂ 原位优化熔渣黏度,较天然金红石降低 28%,改善熔渣铺展性,使焊缝成型系数提升 12%,增强全位置焊接适应性。
焊缝气孔率/%	1.2	1.5(传统数据)	≥2.0	≥1.8%	多孔结构(比表面积 4.5 m ² /g)和 1 ~ 2 μm 针状晶型降低气孔率 18% ~ 40%,熔敷金属致密性显著提升。
原料适应性	低品位钛精矿(TiO ₂ =47%)	高品位砂矿(TiO ₂ ≥90%)	钛铁矿(TiO ₂ ≥50%)	钛渣(TiO ₂ ≥60%)	唯一突破低品位限制的工艺(TiO ₂ ≥47%),TiO ₂ 资源利用率达 85%,较传统工艺提升 25 个百分点,盘活攀西低品位钛资源。
流程复杂度	两步法(熔炼+焙烧)	天然矿分选	多步焙烧+多级锈蚀分选	强酸浸出+复杂除杂	流程短(8 h),无需湿法分选或强酸处理,设备维护成本低,生产稳定性高。
杂质协同利用	MgO、SiO ₂ 原位造渣(12% ~ 15%)	杂质含量<2%	杂质(Fe、Mg)作为废物处理	杂质(Ca、Fe)形成石膏渣	首次实现伴生杂质(MgO、SiO ₂)资源化利用,替代 3 ~ 4 种造渣组元,减少配方复杂度,降低配料成本 15%。

注:文中焊接熔渣碱度均指二元碱度,其定义为碱性氧化物质量分数之和与酸性氧化物质量分数之和的比值。

5 结论

针对我国高性能焊材用人造金红石制备技术空白,核心原料依赖进口,以及攀西低品位钛资源高值化利用困难的双重问题,本研究以攀枝花低品位钛精矿(TiO₂品位 47%)为原料,采用“电炉熔炼提钛-流态化强氧化焙烧”联合工艺进行处理,并进行了热力学分析、物相表征、微观结构观测及工业化试验,得到以下主要结论。

1) 最优工艺参数为流态化焙烧 950℃、保温 60 min,此条件下制得产品 TiO₂含量 75.2%,人造金

红石型 TiO₂占比 92%、S≤0.028%、C≤0.008%,熔渣流动性提升、焊缝气孔率降至 1.2%,满足高端制造领域对焊材原料的超低硫碳要求。

2) 低品位钛渣氧化焙烧重构金红石型 TiO₂的机制为“固溶体分解-晶型定向生长-杂质协同脱除”,固溶体分解阶段形成大量活性位点,晶型定向生长阶段引导 TiO₂晶核定向生长并形成多孔结构,杂质协同脱除伴随整个工艺过程,通过气固反应和气相氧化反应深度脱除 S、C 杂质元素。

3) 该工艺中,原料低品位钛精矿中 MgO、SiO₂等伴生杂质实现了资源化协同利用,其以纳米级均

匀分布形成“原位造渣组元”,MgO提升熔渣碱度并提高脱磷率,SiO₂优化熔渣黏度,可替代多种造渣组元,简化焊材配方并降低成本。

4) 本工艺实现了该低品位钛精矿向高端焊材用人造金红石的高效转化,TiO₂资源利用率达85%,较传统工艺提升25个百分点;制得的人造金红石吨成本约2 538元,且流程短、无酸性废水排放、CO₂减排40%,经济与环保优势显著。该研究结果突破了传统金红石产品制备工艺对高品位钛原料的依赖,为攀西钛资源从“资源型”向“功能型”转化提供了理论依据与技术支撑。

[参考文献]

- [1] 苏允海,刘政军. 国内外焊接材料的应用及发展趋势[J]. 现代焊接, 2009(7): 1-4.
SU Yunhai, LIU Zhengjun. Application and development trend of welding materials at home and abroad [J]. Modern Welding, 2009(7): 1-4.
- [2] 张凯,张元彬. 焊条性能改进的研究进展[J]. 焊接技术, 2010, 39(11): 1-5.
ZHANG Kai, ZHANG Yuanbin. Research progress on performance improvement of welding electrodes [J]. Welding Technology, 2010, 39(11): 1-5.
- [3] 唐伯钢,刘景凤. 中国焊接材料的市场需求与发展态势[J]. 金属加工(热加工), 2007(8): 37-40.
TANG Bogang, LIU Jingfeng. Market demand and development trend of welding materials in China [J]. Metal Processing (Hot Working), 2007(8): 37-40.
- [4] 李午申,唐伯钢. 中国钢材、焊接性与焊接材料发展及需要关注的问题[J]. 焊接, 2008(3): 1-12.
LI Wushen, TANG Bogang. Development of steel materials, weldability and welding materials in China and issues needing attention [J]. Welding, 2008(3): 1-12.
- [5] 贾景岩,朱红波,彭金辉,等. 微波加热还原钛铁矿制备电焊条药皮的研究现状[C]//样品制备学术会议. 2012.
JIA Jingyan, ZHU Hongbo, PENG Jinhui, et al. Research status of microwave heating reduction of ilmenite for welding electrode coating preparation [C]//Academic Conference on Sample Preparation. 2012.
- [6] CHEN G, PENG J H, CHEN J. Optimizing conditions for wet grinding of synthetic rutile using response surface methodology [J]. Minerals and Metallurgical Processing, 2011, 28 (1): 44-48.
- [7] 中国焊接协会. 焊接材料配方设计指南[M]. 上海:上海科学技术出版社, 2019: 45-52.
China Welding Association. Guide for welding material formula design [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2019: 45-52.
- [8] 王福明,李士琦. 冶金过程传质与传热[M]. 北京:冶金工业出版社, 2017: 200-220.
WANG Fuming, LI Shiqi. Mass and heat transfer in metallurgical processes [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2017: 200-220.
- [9] 生态环境部. 钛工业污染物排放标准(GB25467-2020)[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2020.
Ministry of Ecology and Environment. Emission standard for pollutants from titanium industry (GB25467-2020) [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2020.
- [10] 机械工业规划研究院. 高端焊接材料产业发展规划(2021—2025)[R]. 北京, 2021.
China Machinery Industry Planning Institute. Development plan for high-end welding materials industry (2021-2025) [R]. Beijing, 2021.
- [11] 张宝昌,李军. 金红石矿物特性与宝石工业应用价值解析[J]. 矿产综合利用, 2022 (3): 38-40.
ZHANG Baochang, LI Jun. Analysis of Rutile Mineral Characteristics and Gem Industrial Application Value [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022 (3): 38-40.

Preparation of high-performance artificial rutile for welding materials by fluidized bed roasting of Panzhihua low-grade titanium concentrate

LIU Juan^{1,2}, YE Endong¹

(1. State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Pangang Group Research Institute Co., Ltd., Panzhihua 617000, China;

2. Department of Advanced Functional Materials, Chengdu Institute of Advanced Metallic Material Technology and Industry Co., Ltd., Chengdu 610305, China)

Abstract: Rutile TiO₂ is the primary functional component in the coating of titanium electrode welding rods. At present, this material is mainly dependent on imports, with an external dependence rate exceeding 90%. In response to this situation, this study took low-grade titanium resources from Panxi region (with total content of MgO, SiO₂, Al₂O₃, MnO and CaO higher than 10%) as raw materials. Combined with its material characteristics,

the synthetic rutile-type TiO_2 was successfully prepared via the process of “titanium extraction by electric furnace smelting-fluidized strong oxidation roasting”. Thermodynamic analysis, phase characterization, microstructure observation and industrial tests were also carried out, and the main conclusions are as follows. The optimal process parameters were determined as fluidized roasting at 950°C for 60 min. Under these conditions, the prepared product had a TiO_2 content of 75.2%, with the proportion of rutile-type TiO_2 reaching 92%, sulfur content $\leq 0.028\%$ and carbon content $\leq 0.008\%$. The slag fluidity was improved, and the weld porosity was reduced to 1.2%, meeting the ultra-low sulfur and carbon requirements for welding consumable raw materials in high-end manufacturing. The mechanism of reconstructing rutile-type TiO_2 by oxidative roasting of low-grade titanium slag is identified as “solid solution decomposition-directional crystal growth-synergistic removal of impurities”. During roasting, associated impurities such as MgO and SiO_2 in the titanium concentrate are uniformly distributed at the nanoscale, forming “in-situ slag-forming components” and realizing synergistic resource utilization. This process realizes the efficient conversion of low-grade titanium concentrate into synthetic rutile for high-end welding materials. The TiO_2 resource utilization rate reaches 85%, 25 percentage points higher than that of traditional processes. The production cost per ton of synthetic rutile is about 2 538 RMB, In addition, the process features a short flow, no acidic wastewater discharge, and 40% CO_2 emission reduction, showing remarkable economic and environmental advantages. The research results break through the dependence of traditional synthetic rutile preparation processes on high-grade titanium raw materials, providing theoretical basis and technical support for the transformation of Panxi titanium resources from “resource-oriented” to “functional-oriented”.

Key words: advanced welding materials; artificial rutile; Panzhihua titanium concentrate; fluidized bed roasting; desulfurization and decarburization; rutile-type TiO_2 ; mineral phase reconstruction; synergistic resource utilization