

H基竖炉还原 + 电炉熔分生产钛渣 工艺技术探讨

龚晓月

新疆湘和新材料科技有限公司, 新疆 哈密

收稿日期: 2025年8月6日; 录用日期: 2025年9月1日; 发布日期: 2025年9月10日

摘要

本文提出以钛精矿为原料, 利用H基竖炉还原 + 电炉熔分工艺技术生产钛渣, 从背景及必要性、过程原理及要点、对比分析等方面进行了重点描述, 旨在推动钛渣行业技术升级, 实现绿色低碳转型。

关键词

钛精矿氧化球团, 气基竖炉, 熔分电炉, H₂还原, 低碳排放

Technology Exploration for the Production of Titanium Slag by H-Based Shaft Furnace Reduction Electric Furnace Smelting and Separation

Xiaoyue Gong

Xinjiang Xiangxin New Material Technology Co., Ltd., Hami Xinjiang

Received: Aug. 6th, 2025; accepted: Sep. 1st, 2025; published: Sep. 10th, 2025

Abstract

This paper proposes the production of titanium slag by using titanium concentrate as raw material and H-based shaft furnace reduction electric furnace smelting and separation process technology. It describes the background and necessity, process principle and key points, comparative analysis and other aspects in detail, aiming to promote the technological upgrading of the titanium slag industry and achieve green and low-carbon transformation.

Keywords

Titanium Concentrate Oxide Pellet, Gas-Based Shaft Furnace, Smelting and Separation Electric Furnace, H₂ Reduction, Low Carbon Emission

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

钛渣(也称富钛料),作为钛工业的关键中间产品,其生产技术水平对整个钛产业链可持续发展具有重要影响。

当前,国内外生产钛渣的方式普遍采用钛矿以粉料方式直接入炉冶炼,虽采用多点布料、连续加料、连续冶炼、煤气回收等先进技术,但仍电耗较高,碳消耗高,碳排放量大,在国家提倡绿色环保低碳排放的政策驱动下,很有必要寻找一条绿色低碳环保的生产工艺路线。

近年来,铁精矿通过 H 基竖炉还原 + 电炉熔分冶炼生铁,这项非高炉冶炼生铁工艺技术得到了广泛应用;钛精矿冶炼钛渣与冶炼生铁有着相同的原理,都是将矿中的铁氧化物进行还原,然后在高温液体状态下实现渣铁分离。气基竖炉冶炼工艺凭借其以天然气、氢气等清洁能源为还原剂,可实现低温还原、碳排放显著减少。

目前,国内外还没有钛精矿通过 H 基竖炉还原 + 电炉熔分生产钛渣先例,本文将探讨以钛精矿为原料,利用 H 基竖炉还原+电炉熔分工艺技术制备钛渣,旨在推动钛渣行业技术升级,实现绿色环保、减碳排放可持续发展目标。

2. 工艺过程及要点

2.1. 工艺流程

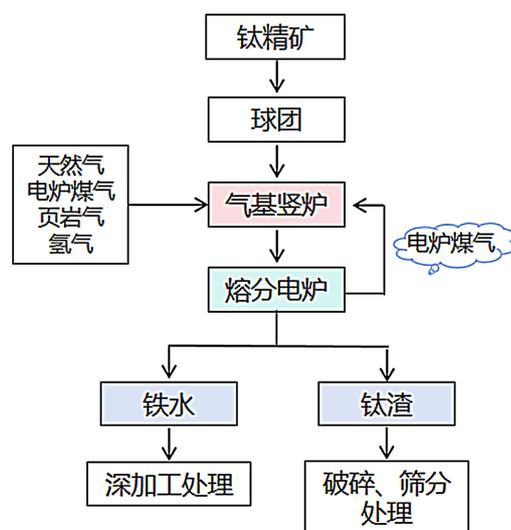


Figure 1. Flow chart of titanium slag production process by H-based shaft furnace reduction electric furnace smelting process
图 1. H 基竖炉还原 + 电炉熔分工艺生产钛渣流程

H 基竖炉还原+电炉熔分工艺流程如图 1 所示，气基竖炉以高品质球团矿为原料，以 H₂、天然气等清洁能源作为还原剂，还原气体经加热后，进入竖炉。在气基竖炉的工艺环境中，由于进口温度较低，无法满足钒钛还原所需的热力学要求，因此在竖炉内被还原，在竖炉主要是 H₂、CO 与铁氧化物发生还原反应生成金属铁。在气基竖炉内，铁氧化物的还原遵循逐级还原规律，即 Fe₂O₃→Fe₃O₄→FeO→Fe [1]。

经过气基竖炉还原的球团，采用热送热装工艺，直接进电炉进行熔分，得到高钛渣和副产物铁水。

2.2. H 基竖炉还原及特点

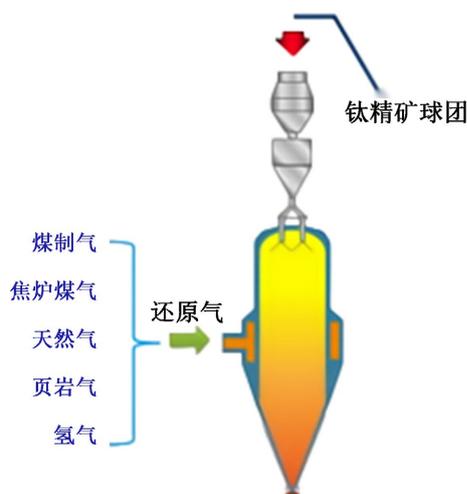


Figure 2. Air-based shaft furnace
图 2. 气基竖炉

气基竖炉结构如图 2 所示，H 基竖炉还原及特点有：

- (1) 钛精矿配上适量的粘接剂制成球团，经氧化焙烧后的球团，钛铁矿的致密性改变，还原性能提高，有利于高效还原；氧化焙烧有脱硫效果，有利于提高钛渣和生铁质量。
- (2) 以天然气、电炉煤气、煤制气为原料气，经过气体重整获得合成气(H₂ + CO)，作为还原气体。
- (3) 球团矿进入气基竖炉，还原气体(H₂ + CO)经加热后进入竖炉下部高温固态下还原，将铁氧化物还原生成金属铁。
- (4) H₂ 还原剂具有黏度低、密度小、导热性好的特点，这些特性能够加快气体与固体之间的传质和传热过程，从而有助于在还原反应中更高效地利用热能。当温度达到 810℃ 及以上时，其还原潜力是 CO 的 14 倍[2]，扩散速度是 CO 的 3 倍左右，是一种高效还原剂，对提高生产效率有积极作用。
- (5) 在竖炉内还原产生的 CO₂ 与 CH₄ 进行部分重整，生成 H₂ 和 CO，又可以作为还原气体，实现能源气体循环利用。

2.3. 电炉熔分原理及特点

熔分电炉结构如图 3 所示，电炉熔分原理及特点有：

- (1) 熔分电炉的结构设计参照密闭钛渣电炉结构设计，其结构参数及加料点位布置根据氧化球团易于熔化和深度还原进行调整。
- (2) 气基竖炉还原球团，采用热送热装工艺，直接进入电炉熔分和深度还原，与冶炼钛渣一样，依靠电弧加热物料熔化升温，在高温液体状态下实现渣铁分离，得到钛渣和铁水。

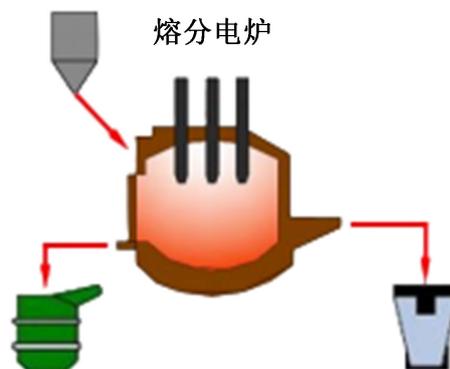


Figure 3. Molten-spray electric furnace
图 3. 熔分电炉

(3) 竖炉出来的球团铁的金属化率可达 90%，电炉熔分只需加入少量的碳深度还原，其加入量主要依据控制钛渣中 FeO 含量所决定，大约 2% 左右，煤气 CO 回收利用，参与气基竖炉还原，实现闭路循环。

(4) 球团入熔分炉过程中，防止氧化降低金属化率，采用热送热装保护措施，可进一步降低熔分电炉的电耗。

(5) 电炉熔分环节的吨渣电耗仅是钛渣电炉冶炼电耗的 1/3~1/4。

总之，H 基竖炉还原 + 电炉熔分生产钛渣，不仅碳排放大幅减少，电耗也能降低。

3. 主要技术研究工作

如果今后要以钛精矿为原料，利用 H 基竖炉还原 + 电炉熔分工艺技术生产钛渣，要研究解决以下问题。

3.1. 适合钛精矿特性的球团制备技术及粘接剂选择

合适的粒度既能使气基竖炉有合适的气体通透性，又能使球团有较大的接触面积便于气体还原；合适的强度能避免球团被压碎导致竖炉物料透气性差；粘接剂的选择原则上不引入新的杂质，不降低钛矿球团的品位。

3.2. 天然气、电炉煤气、煤制气高效重整合成气($H_2 + CO$)技术

常见制氢技术主要有传统化石燃料制氢、工业副产物制氢、电解水制氢等[3]，如何高效重整合成气($H_2 + CO$)使能源利用更加高效合理。

3.3. 球团在竖炉里还原生产金属化球团技术以及金属化率影响因素

钛精矿球团在气基竖炉还原过程中矿相成份、化学成份变化机理、主要影响因素以及球团金属化率与还原气体成分、压力、温度的关系[4]。

3.4. 球团还原过程中防止恶性膨胀技术

在竖炉内，下部的高温区更易发生膨胀现象[5]，如何防止钛精矿球团发生恶性膨胀，需了解钛精矿球团在气基竖炉还原过程中的膨胀机理、机械强度变化机理、影响球团还原膨胀的因素以及之间的相互关系。

3.5. 金属化球团热送热装设备以及防止金属化率降低的措施

采用耐高温、密封、连续输送设备。

3.6. 电炉熔分还原程度的控制技术

依据球团的金属化率、品位质量要求等，合理适量配碳，控制钛渣中 FeO 的含量。

3.7. 熔分电炉炉衬以及渣铁口长寿化关键技术

电炉炉衬挂渣层形成机理、传热机理，以及炉衬内的温度场分布；渣铁口通道孔扩大的机理以及影响因素等。

4. 对比分析

从工艺过程、还原剂种类、碳排放、原料适应性、规模产能及投资、环境适应性以及工艺技术成熟度这些方面对两种工艺进行对比分析，见表 1 所示。

Table 1. Comparison analysis of two processes

表 1. 两种工艺的对比分析

名称	H 基竖炉还原 + 电炉熔分	钛渣电炉冶炼
工艺过程	钛精矿粉料先制成氧化球团，入气基竖炉还原，再热送热装入密闭电炉熔分，实现渣铁分离。	钛精矿粉配碳后，以粉料方式直接进入钛渣电炉冶炼，实现渣铁分离。
还原剂	主要是合成气(H ₂ + CO)	焦炭
碳排放	与电炉冶炼钛渣比较，减少碳排放 70%以上。	高排放
原料适应性	细粒级钛精粉制成了球团，不影响熔分过程以及 TiO ₂ 收率。	细粒级钛精粉不能直接入炉，因冶炼过程不顺及 TiO ₂ 收率低，须先制成球团。
规模产能及投资	单套系统投资是单套钛渣电炉系统的 3~4 倍，但产能规模也是单台钛渣电炉产能的 3 倍以上(电炉容量相同的条件下)，适合大规模生产。	单台投资较小，但产能也低，如要大规模生产，须建设多台套，投资也很大，适合小规模生产。
环境的适应性	适合天然气、焦炉煤气、煤制气资源丰富、碳排放要求严格的地区。	适合电力和煤碳资源丰富地区。
工艺技术成熟度	借鉴铁精矿非高炉炼铁技术，开展试验，建设中试线，实现产业化。	普遍使用，技术成熟。

两种工艺指标的对比分析

为了更加直观地显示出新工艺的优势，初步对两种工艺的主要指标进行对比分析，见表 2 所示。

Table 2. Comparison and analysis of indicators of two processes

表 2. 两种工艺的指标对比分析

主要指标	H 基竖炉还原+电炉熔分	钛渣电炉冶炼
吨渣碳耗/t	0.02~0.05	0.20~0.25
吨渣还原剂(天然气)消耗 Nm ³ /t	30~40	/
吨渣钛精矿消耗/t	1.70~1.80	1.70~1.80
吨渣电耗 kw.h/t	1000~1500	2500~3000
吨渣电极消耗/kg	2~3	7~8

H 基竖炉还原 + 电炉熔分工艺吨渣碳耗、吨渣电耗、吨渣电极消耗都远低于钛渣电炉冶炼，有利于实现钛渣冶炼工艺的绿色转型，对实现双碳目标具有重大意义。

5. 经济优势分析

在新疆独特的能源结构与碳税政策框架下，H 基竖炉 + 熔分电炉工艺凭借其低碳特性和资源高效利用优势，已展现出显著的经济竞争力。

5.1. 能源成本优势：绿电价格与制氢经济性的双重红利

新疆能源价格洼地效应显著，新疆大工业电价在 220 千伏及以上电压等级为 0.36 元/kWh，且新能源上网电价通过市场化交易形成，增量项目机制电价最低可达 0.15 元/kWh。以中冶京诚与新疆恒泰合作的 120 万吨/年光伏制氢项目为例，绿氢成本可降至 15 元/kg 以下，较传统天然气重整制氢(成本约 12~16 元/kg)更具竞争力。

绿电稳定性保障工艺连续运行，新疆新能源装机占比接近 50%，风电和光伏功率预测准确率达 96%，叠加储能设施，绿电供应稳定性显著提升。

5.2. 碳税规避与政策补贴：构建成本护城河

碳税成本差异显著，新疆纳入全国碳市场后，企业碳排放成本参考全国碳价(约 80~100 元/吨 CO₂)。钛渣电炉吨渣碳排放约 0.8~1.0 吨 CO₂，需额外支付 64~100 元/t 渣的碳税；而 H 基工艺若采用 100%绿氢，碳排放可降至 0.3 吨 CO₂/t 渣以下，碳税成本仅 24~30 元/t 渣，成本差距达 40~70 元/t 渣。

氢能补贴政策降低初期投资，克拉玛依市对绿氢项目给予 2024 年 3000 元/吨、2025 年 1500 元/吨的补贴。以年产 5000 吨绿氢的 H 基项目为例，2024 年可获补贴 1500 万元，显著降低制氢设备投资压力。此外，新疆对氢能项目的新能源规模倾斜政策进一步降低用电成本。

6. 结语

1) 在天然气、煤气丰富以及碳排放要求严格的地区，生产规模大的企业，借鉴成熟应用的铁精矿非高炉冶炼生铁工艺技术，开展试验及攻关，建设中试线试验，最终实现大规模产业化。

2) 探索利用高效廉价的气体还原制备钛渣工艺技术，是实现钛渣生产工艺技术的绿色低碳转型，旨在推动钛渣行业技术升级、实现绿色环保、低碳排放可持续发展。

3) 未来将重点研究提升气基竖炉处理中低品位钛矿的能力，更好地适应当地低品位钛资源的开发利用。

参考文献

- [1] 王海涛, 李晓兵, 吕志敏, 等. 钒钛球团矿气基竖炉生产过程的影响因素及改善措施[J]. 烧结球团, 2025, 50(3): 87-93.
- [2] 赵钰琼. 焦炉煤气制氢及甲烷系统中 CO 变换催化剂性能的研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2010.
- [3] 崔伟逸, 王谊, 虞勇, 等. 制氢技术研究进展与规模化应用路径[J]. 化学与生物工程, 2025, 42(7): 1-10.
- [4] 王小艾, 郗亚娜, 李娜, 等. 气基竖炉直接还原过程及性能的研究进展与展望[J]. 中国冶金, 2024, 34(11): 1-9+21.
- [5] 杨柳, 隋裕雷. 钒钛磁铁矿球团气基还原粉化和膨胀实验研究[J]. 广东化工, 2020, 47(6): 17-19.