

EB熔炼钛工艺技术综述与质量控制策略

弋 可*, 闫 昭, 张治伟, 李 维, 刘 华, 曹江海, 康 聪

西部钛业有限责任公司, 陕西 西安

收稿日期: 2025年9月23日; 录用日期: 2025年10月16日; 发布日期: 2025年10月22日

摘 要

电子束冷床炉(EB炉)凭借高能量密度、强真空环境及精准温度控制优势, 成为高纯度、大规格钛及钛合金铸锭制备的核心设备。本文阐述EB炉熔炼钛的基本原理与工艺过程, 分析在其成分均匀性、杂质去除及铸锭成型方面的关键优势, 探讨熔炼功率、冷床温度梯度、熔炼速率等工艺参数对铸锭质量的影响, 并提出优化方向, 为EB炉在钛金属材料工业化生产中的高效应用提供参考。

关键词

电子束冷床炉(EB炉), 钛及钛合金, 真空熔炼, 铸锭质量, 工艺参数

Review on EB Titanium Smelting Process Technology and Quality Control Strategy

Ke Yi*, Zhao Yan, Zhiwei Zhang, Wei Li, Hua Liu, Jianghai Cao, Cong Kang

Western Titanium Technologies Co, Ltd., Xi'an Shaanxi

Received: September 23, 2025; accepted: October 16, 2025; published: October 22, 2025

Abstract

The electron beam cooled bed furnace (EB furnace) has become the core equipment for the preparation of high-purity and large-sized titanium and titanium alloy ingots due to its advantages of high energy density, strong vacuum environment, and precise temperature control. This article elaborates on the basic principles and process of EB furnace melting titanium, analyzes the key advantages in its composition uniformity, impurity removal, and ingot forming, explores the influence of process parameters such as melting power, cold bed temperature gradient, and melting rate on ingot quality, and proposes optimization directions, providing reference for the efficient application of EB furnace in the industrial production of titanium metal materials.

*通讯作者。

文章引用: 弋可, 闫昭, 张治伟, 李维, 刘华, 曹江海, 康聪. EB 熔炼钛工艺技术综述与质量控制策略[J]. 机械工程技术, 2025, 14(5): 605-611. DOI: 10.12677/met.2025.145062

Keywords

Electron Beam Cooled Bed Furnace (EB Furnace), Titanium and Titanium Alloys, Vacuum Melting, Ingot Quality, Process Parameters

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

钛及钛合金因其优异的物理和化学性能，如低密度、高比强度、良好的耐腐蚀性和生物相容性，在航空航天、海洋工程、医疗植入物等领域具有广泛的应用前景[1]。然而，钛的高化学活性使其在高温下极易与氧、氮、氢等气体以及碳、硅等杂质元素发生反应，导致材料性能劣化。因此，钛的熔炼需要在高真空或惰性气体保护下进行，以避免污染并确保材料质量。

传统的真空自耗电弧炉(VAR)熔炼技术虽然能够满足一般工业需求，但存在着无法有效去除低密度夹杂物(LDI)和高密度夹杂物(HDI)的局限性[2]。电子束冷床炉(Electron Beam Cold Hearth Melting, EBCHM)熔炼技术作为一种先进的特种熔炼方法，凭借其高能量密度、强真空环境和精确的温度控制能力，已成为制备高纯度、大规格钛及钛合金铸锭的核心技术。与 VAR 相比，EBCHM 技术在杂质去除、成分均匀性控制和铸锭质量提升方面具有显著优势。如图 1。

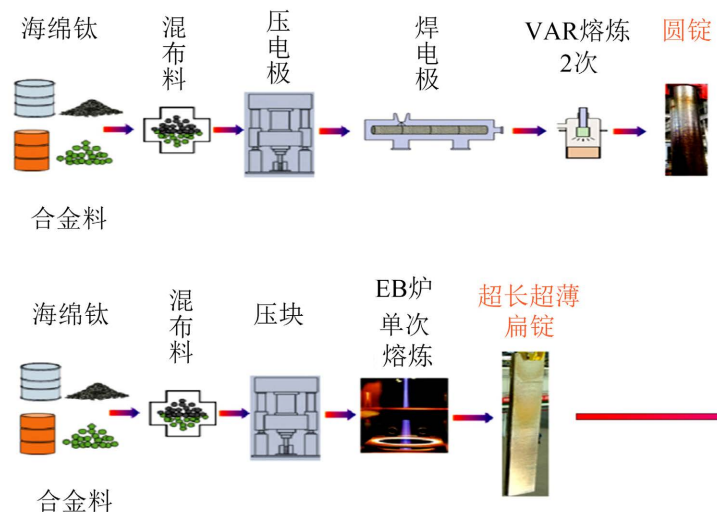


Figure 1. Comparison of VAR and EB smelting processes

图 1. VAR 与 EB 熔炼流程对比

2. EB 炉熔炼钛的基本原理与工艺过程

2.1. 基本原理

EB 炉以电子枪发射的高能电子束为热源，在 $10^{-3}\sim 10^{-4}$ Pa 的高真空环境中，电子束经加速(加速电压为 30 KV)、聚焦后轰击钛原料(海绵钛、再生料等)，将动能转化为热能，使原料在冷床上熔化形成熔池。冷床是一个倾斜式或水平式水冷铜坩埚，其主要功能是提供一个温度梯度环境，促进杂质的分离和去除。在冷

床中, 钛熔体由于密度差异会发生分层: 高密度夹杂物(HDI)如钨、钼、钽、铌等及其化合物会沉淀到底部[3]; 低密度夹杂物(LDI)如钛的氮化物、氧化物等则会漂浮到表面或被分解去除; 另一方面, 熔池在冷床末端逐步凝固, 形成成分均匀、表面光洁的钛铸锭, 最终经引锭机构下拉至炉体下部完成成型[4]。如图 2。

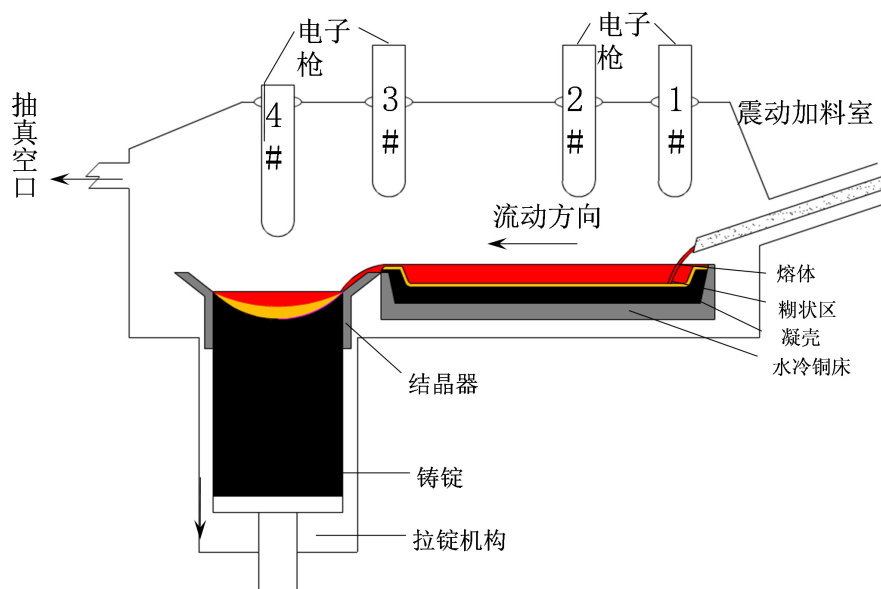


Figure 2. Schematic diagram of EB melting structure

图 2. EB 熔炼结构示意图

2.2. 工艺过程

EB 炉熔炼钛通常采用“单炉单次”或“双炉双联”工艺, 本文以 3150 kW BMO-01 型电子束熔炼炉为例, 工艺流程如下:

原料处理: 再生料(屑状)破碎至 5~30 mm 尺寸, 经过屑料清洗、漂洗、烘干、过筛、磁选、色选等工序, 去除物料表面皂化液、油污, 避免真空系统污染及熔炼过程中气体(O、H、N)杂质元素含量超标; 块状料进行碱洗、酸洗去除表面氧化皮。

抽真空与预热: 关闭炉门后封炉, 通过真空泵将炉内真空度抽至 10^{-3} Pa 以下, 对冷床及电子枪进行预热烘炉, 防止冷凝水影响电子束稳定性。

电子束加热与熔池形成: 启动电子枪, 调节电流与聚焦位置, 逐步加热冷床上的原料, 直至形成稳定的熔池(温度范围约 1800~2200℃)。

精炼与杂质去除: 利用高真空环境, 熔池中 H_2 、 N_2 等气体以分子形式逸出; 低熔点杂质(如 Na、Mg)因沸点低于钛, 优先挥发并被真空系统抽出; 高熔点氧化物(TiO_2)因密度高于钛溶体, 沉降至冷床底部被捕捉, 与液态钛分离; 此阶段是一个连续凝固过程, 需要精确控制电子枪功率、扫描轨迹和熔炼速度等参数。如图 3。

铸锭凝固与下拉: 正常熔炼阶段稳定熔池后, 控制冷床温度, 使溶液顺利由浇筑口流入结晶器, 并在结晶器末端缓慢凝固, 同时通过引锭机构以 5~15 mm/min 的速率下拉铸锭(进料速度与拉锭速度呈正比例关系)。

冷却与出炉: 熔炼结束后, 关闭电子枪, 保持真空环境直至铸锭冷却到 200℃ 以下, 破空后出锭。

在实际操作中, 电子束的扫描轨迹对熔炼过程的稳定性和铸锭质量有重要影响。常见的扫描轨迹包

括蛇型轨迹、同心圆轨迹和同心矩型轨迹等。蛇型轨迹适应性强，可根据熔池形状调整，使熔池各处受热均匀；同心圆轨迹可获得较均匀的温度场，符合热量扩散规律；同心矩型轨迹则可解决矩形冷床局部区域无法扫描的问题。

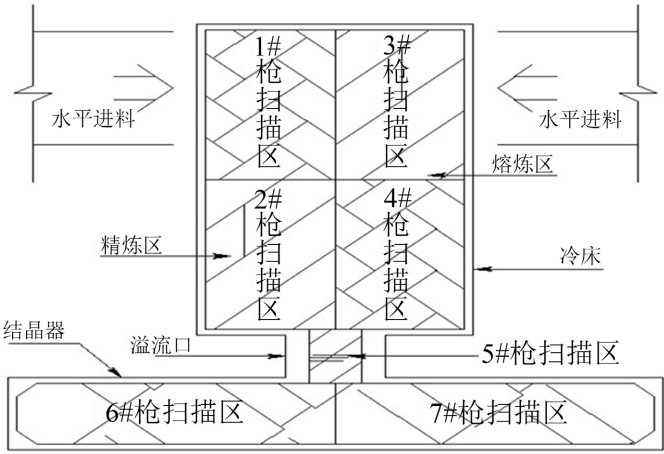


Figure 3. Scanning area of electron gun
图 3. 电子枪扫描区域

3. EB 炉熔炼钛的关键优势

相较于 VAR 炉等传统工艺，EB 炉熔炼钛在质量与效率上具有显著优势，具体体现在以下 3 点：

3.1. 纯度更高

高真空环境(10^{-4} Pa)可有效去除金属钛中的气体杂质(O、H、N)，且冷床精炼功能可降低低熔点金属杂质含量，铸锭纯度可达 99.95%以上，满足航空航天高端钛材需求。

3.2. 除杂效果

高、低密度夹杂物的有效去除：EBCHM 通过冷床的“精炼”过程，将物料与铸锭隔离开，保证了原材料中的高、低密度夹杂无法直接进入铸锭。高密度夹杂物(HDI)如钨、钼、钽、铌等及其化合物(如 WC、TiW 等)由于密度高于钛熔体，会在重力作用下沉淀到冷床底部并被永久去除。低密度夹杂物(LDI)如钛的氮化物、氧化物等则通过漂浮、蒸发和溶解等机制被有效去除。如图 4。

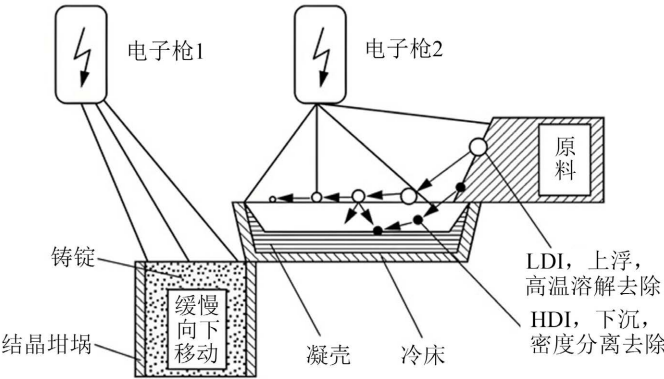


Figure 4. Schematic diagram of impurity removal in cold bed
图 4. 冷床除杂示意图

3.3. 原料实用性更强

无需预制电极,可直接使用海绵钛、钛再生料等多种原料,原料利用率理论可达 100%,降低生产成本,同时可制备不同规格铸锭,满足多种需求。如图 5。

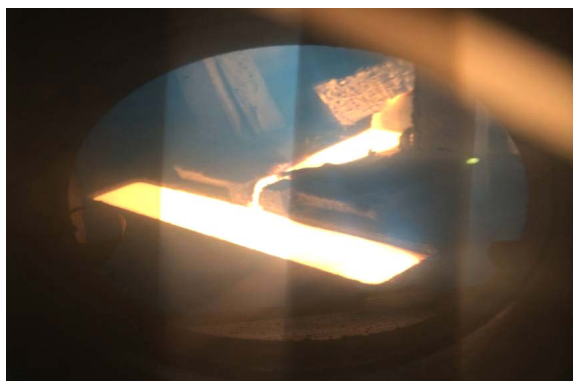


Figure 5. Schematic diagram of melting process

图 5. 熔炼过程示意图

4. 工艺参数对钛铸锭质量影响

EB 炉熔炼钛的质量(纯度、组织、缺陷)主要受功率、冷床温度梯度、熔炼速率 3 类核心参数影响,具体关系如下:

4.1. 熔炼功率

熔炼功率由电子枪加速电压与束流决定,直接影响熔池稳定性:

- 1) 单枪功率过低(<150 kw): 钛原料熔化不充分,熔池流动性差,易形成“未熔化”、“冷隔”缺陷,且气体与杂质元素无法彻底挥发或沉底,如图 6;
- 2) 单枪功率过高(>300 kw): 熔池温度过高(>2000℃),液态钛挥发损失加剧,按经验挥发率>3%,若进行合金熔炼时,其他合金元素例如 Al 元素挥发无法控制导致成分异常,同时冷床材质为铜,接触面易被高温钛熔液溶解,造成铸锭中 Cu 元素超标(>0.1%);
- 3) 单枪熔炼功率控制在 180~220 kw 区间,确保熔池温度稳定在 1750~2000℃,有利于保持熔炼稳定性[5]。此参数下,熔池深度、宽度较为适中,铸锭的固液界面弯角处的曲率较小,从而有助于降低铸锭的宏观偏析,提高铸锭的生产质量。此外,易挥发元素的损失量可以得到有效控制,提高合金成分的精确性。

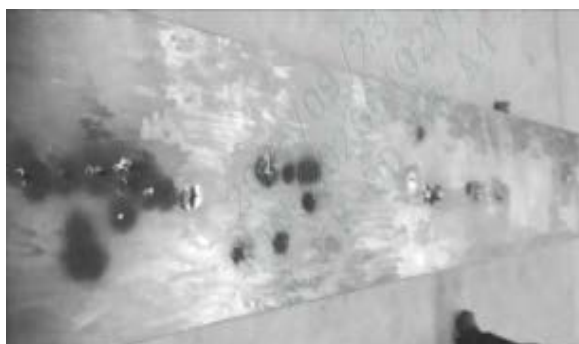


Figure 6. Defect of excessively low power of EB ingot

图 6. EB 锭功率过低缺陷

4.2. 熔炼速率(熔速)

熔炼速率(单位时间内融化的钛原料质量)与铸锭杂质去除效果直接相关:

- 1) 熔速过低(<600 kg): 生产效率低, 且熔池停留时间过长, 钛溶液与真空中 O 元素反应时间增加, 导致 O 元素含量升高(>0.2%);
- 2) 熔速过高(>900 kg/h): 熔炼速率过高会导致熔池波动加剧, 熔池流动不稳定, 液态钛在冷床中流动过于剧烈, 影响凝固过程的稳定性, 高密度夹杂物在剧烈流动中无法充分沉底, 易随溶体进入结晶器中, 增加铸锭内部缺陷的风险, 形成铸锭夹杂缺陷;
- 3) 优化区间: 结合结晶器规格, 纯钛铸锭熔炼熔速控制在 700~800 kg/h 最优, 此熔速液态钛在冷床中流动趋于稳定平缓, 流动过程无明显波动, 夹杂物在熔体中的充分运动分离, 有利于提供稳定的凝固环境, 可有效避免夹杂缺陷[6]。

4.3. 夹杂物有效去除

钛合金常见的夹杂物分为低密度夹杂(N、C、O)和高密度夹杂(W、Mo、WC)。冷床温度梯度影响夹杂物的去除效率。研究表明, 适当的温度梯度有利于夹杂物在熔体中的运动和分离[7]。

例如, 在电子束冷床炉熔炼过程中, 通过在浇口附近强烈辐照电子束产生的 Marangoni 对流, 高密度夹杂粒子会受自身重力作用很快下沉至凝壳与熔体界面, 使其被冷床壁上形成的凝固钛(铸锭壳)捕获。低密度夹杂 TiN 硬度高、脆性大, 直径 1 mm 可引起部件产生疲劳裂纹, 降低其使用寿命; 且 TiN 密度与钛基本接近, 晶体与钛基体共格, 超声探伤时不易被检测。电子束熔炼过程温度高, 可将 TiN 夹杂溶解, 使其残存率小于 0.05%。

5. 现存问题及优化方向

5.1. 主要问题

当前 EB 炉熔炼钛仍存在 2 项关键挑战:

- 1) 电子束能量利用率低: 电子束在传输过程中因散射损失约 20%~30%能量, 导致实际加热效率仅为 60%~70%, 能耗利用较低。
- 2) 铸锭表面质量差: 冷床炉结晶器凝固过程, 钛溶体易在冷床边形成“挂渣”, 导致铸锭表面出现“毛刺”或者“凹坑”, 后续机加量大, 成材率低, 铸锭成材率 < 90%。
- 3) 铸锭直线度差: 当随着熔炼进行, 铸锭长度随之增加, 目前国内最长铸锭长度可达 10 m, 拉锭过程, 会造成铸锭拉完, 直线度 > 10 mm。如图 7。



Figure 7. Straightness of EB ingot
图 7. EB 铸锭直线度

5.2. 优化方向

针对上述问题, 可从工艺、设备两方面进行改进:

- 1) 设备改进: 优化冷床结构(如采用 L 型冷床), 减少溶体在冷床边部停留, 降低“挂渣”风险;
- 2) 工艺优化: 引入“数值模拟技术”, 提前模拟熔池流动与凝固过程, 精准预测工艺参数对铸锭影响, 减少试错成本; 探索不同牌号 EB + VAR 双联熔炼工艺, 精准测算 Al 元素挥发率, EB 实现原料精炼, VAR 实现铸锭成分均匀化。

6. 结论

EB 炉凭借高真空精炼、精准温度控制及原料适应性强的优势, 已成为高端钛及钛合金铸锭制备技术。其熔炼质量主要受熔炼功率、冷床温度梯度、熔炼速率影响, 通过参数优化可获得纯度高、组织稳定的钛方锭及圆锭。

未来可进一步通过设备升级、工艺创新(如数值模拟、双联熔炼), 大幅提升能量利用率与铸锭表面质量、铸锭直线度, 推动 EB 炉在钛材料工业化生产中的规模应用, 为高端装备领域提供高质量钛材支撑。

基金项目

“先进结构与复合材料”重点专项“钛合金返回料利用及板管材高效短流程制备关键技术开发”项目(项目编号: 2022YFB3705600)中子课题四“钛合金管材高效短流程关键技术研发”(编号: 2022YFB3705604)。

参考文献

- [1] 王克鲁, 李慧, 邓运来. 电子束冷床炉熔炼钛及钛合金的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(5): 1021-1035.
- [2] 颜学柏. 我国钛加工业的发展战略[J]. 钛工业进展, 2002, 19(4): 21-25.
- [3] 中国钛工业协会. 中国钛工业发展报告(2022) [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2023.
- [4] 黄金昌. 美国的残钛回收[J]. 稀有金属材料与工程, 1993, 22(5): 82.
- [5] 卞辉. 3150 kW 电子束冷床炉熔炼纯钛电子枪工艺参数设置[J]. 钛工业进展, 2015, 32(5): 38-42.
- [6] 王伟, 王萌, 蔡军, 张浩泽, 史亚鸣, 张晓锋, 黄海广, 王快社. EB 炉熔炼 TC4 钛合金轧制过程中的组织演变与力学性能[J]. 材料导报, 2021, 35(8): 8140-8145.
- [7] 李育贤, 杨丽春. 3150 kW BMO-01 型电子束冷床炉熔炼残钛的优越性[J]. 金属世界, 2016(1): 41-44.