

电子束冷床炉制备TC4钛合金铸锭

闫 昭*, 弋 可, 曹江海, 张 智, 刘宇明, 李 维

西部钛业有限责任公司, 陕西 西安

收稿日期: 2025年9月22日; 录用日期: 2025年10月15日; 发布日期: 2025年10月21日

摘 要

采用Langmuir定律对电子束冷床炉一次熔炼制备TC4合金铸锭的工业化过程进行研究, 探讨了熔炼工艺参数对铸锭化学成分的影响规律, 并对熔炼过程中Al元素的挥发行为进行分析。研究表明: 在电子束冷床熔炼过程中, Al元素出现显著挥发, 实际挥发率达到20%至23%, 明显高于理论预测值12.9%; 通过优化工艺参数, 所制备的铸锭整体化学成分均匀性良好, 其中单个铸锭Al元素最大偏差 ≤ 0.17 , V元素 ≤ 0.09 , 其化学成分完全符合国家标准要求。

关键词

TC4合金铸锭, 电子束冷床熔炼, 残料回收, 挥发率

Preparation of TC4 Titanium Alloy Ingot by Electron Beam Cold Bed Furnace

Zhao Yan*, Ke Yi, Jianghai Cao, Zhi Zhang, Yuming Liu, Wei Li

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

Received: September 22, 2025; accepted: October 15, 2025; published: October 21, 2025

Abstract

The industrial process of preparing TC4 alloy ingots by one-time melting in an electron beam cold hearth furnace was studied using the Langmuir law. The influence of melting process parameters on the chemical composition of the ingots was explored, and the volatilization behavior of Al element during the melting process was analyzed. The research results show that during the electron beam cold hearth melting process, Al element volatilizes significantly, with an actual volatilization rate of 20% to 23%, which is much higher than the theoretical predicted value of 12.9%. By optimizing the process parameters, the overall chemical composition uniformity of the prepared ingots is good, with the maximum deviation of Al element in a single ingot ≤ 0.17 and V element ≤ 0.09 , and

*通讯作者。

文章引用: 闫昭, 弋可, 曹江海, 张智, 刘宇明, 李维. 电子束冷床炉制备 TC4 钛合金铸锭[J]. 机械工程技术, 2025, 14(5): 599-604. DOI: 10.12677/met.2025.145061

its chemical composition fully meets the national standard requirements.

Keywords

TC4 Alloy Ingot Casting, Electron Beam Cold Bed Melting, Recycling of Residual Materials, Volatilization Rate

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/>



1. 引言

钛及钛合金因其高比强度、优良的耐高低温性能、抗腐蚀性、可焊性好以及无磁性等特点，在航空航天、海洋工程、武器装备和生物医疗等多个领域得到了广泛应用[1]。在国外航空长期应用中发现，采用真空自耗电弧炉(Vacuum Arc Remelting Furnace)熔炼钛合金时，由于其除杂和脱气能力有限，所制备的铸锭往往难以完全消除高、低密度夹杂物，且成分均匀性较差，这些问题会显著降低发动机关键部件的疲劳性能和持久寿命，制约了该材料在高端领域的应用。为此，美国和俄罗斯宇航局均明确规定，航空发动机旋转部件所用钛合金必须经过一次电子束冷床炉熔炼(Electron Beam Cold Hearth Melting)，以确保彻底去除铸锭中的各类夹杂，提升冶金质量[2] [3]。

电子束冷床熔炼钛合金是一种新型熔炼技术，能高效去除钛合金中的高密度和低密度夹杂物，并且显著提升残料在熔炼过程中的使用比例。本文在工业生产条件下使用 EBCHM 熔炼的 TC4 钛合金铸锭进行试验验证，为今后生产优质的 TC4 合金铸锭提供技术依据。

2. 试验材料及方法

试验材料选用经碱洗、酸洗处理后的 TC4 返回料和 Al 板($Al \geq 99.7\%$)，表 1 为 TC4 返回料的化学成分。料箱装入的 Al 板厚度为 2 mm、宽度为 700 mm、长度为 1200 mm，沿料箱长度方向进行拼接，共添加 10 张 Al 板(分两层布料)，保证料箱长度范围内添加的 Al 板均匀分布，即保证每一横截面处 Al 含量基本一致。采用电子束冷床炉进行铸锭熔炼，获得 $\Phi 590 \text{ mm} \times L \text{ (mm)}$ 规格的圆锭，具体的工艺参数见表 2 所示(该电子束冷床炉共有 4 把电子枪，其中 1#、2#电子枪用于熔化原料，3#电子枪用于精炼冷床内的熔融态金属，4#电子枪用于使结晶器的金属液保持液态，具有良好的充型能力)，该冷床炉为单边进料方式。在铸锭圆周表面及横截面取屑样和块样分析化学成分。

Table 1. Chemical composition requirements for TC4 return material
表 1. TC4 返回料化学成分要求(wt.%)

元素	Ti	Al	V	Fe	C	N	H	O
范围	基	5.50~6.75	3.5~4.5	≤ 0.25	≤ 0.08	≤ 0.03	≤ 0.012	≤ 0.18

Table 2. EB melting process parameters of TC4 alloy
表 2. TC4 合金 EB 熔炼工艺参数

各电子枪电流范围/A			熔炼速度 kg/h	进料速度 mm/min	电子枪真空度/Pa	炉内真空度/Pa
1#~2#	3#	4#				
8.0~11.0	5.5~6.5	6.5~8.0	300~400	≤ 10	≤ 10	≤ 1.0

3. 试验结果及讨论

3.1. 熔炼工艺参数设计

获得的 TC4 合金锭规格为 590 mm × 3320 mm，电子束冷床炉额定功率为 1800 kW。

在 TC4 钛合金 EB 熔炼过程中，Al 元素的挥发行为主要受到电子束功率、熔池表面积以及熔炼速率等参数的影响[4]；此外，熔炼过程中电流的变化趋势可作为评估熔炼铸锭质量的一项重要依据。图 1 所示为熔炼过程中 4 支电子束枪电流的变化曲线。EB 熔炼过程可划分为物料的熔化、精炼及结晶 3 个阶段，相应的电子束枪工作区域划分为熔化区、精炼区及结晶区 3 个部位。在熔炼进入稳定阶段前，各电子枪的电流均持续上升，且存在频繁的大幅波动；其主要原因是物料在初始熔炼阶段会释放出大量气体，导致炉室内真空不稳定，继而影响电子枪的工作稳定性。

正常熔炼阶段 1#~2#电子枪用于物料熔化，电流相对比较稳定，基本保持在 8.0~10.0 A 之间；3#电子枪用于冷床内金属液的精炼提纯以及保持液流路径的通畅，其电流值不宜过高，则保持在 6.0 A 左右；4#电子枪用于维持结晶器中金属液的保温及充型能力，其电流保持在 7.0 A 左右。有研究表明[5]，熔化、精炼及结晶三区电流的分配占比对于合金元素的挥发烧损具有重要的影响，本研究确定优选的电流占比为：熔化区 60%，精炼区 18%，结晶区 22%。

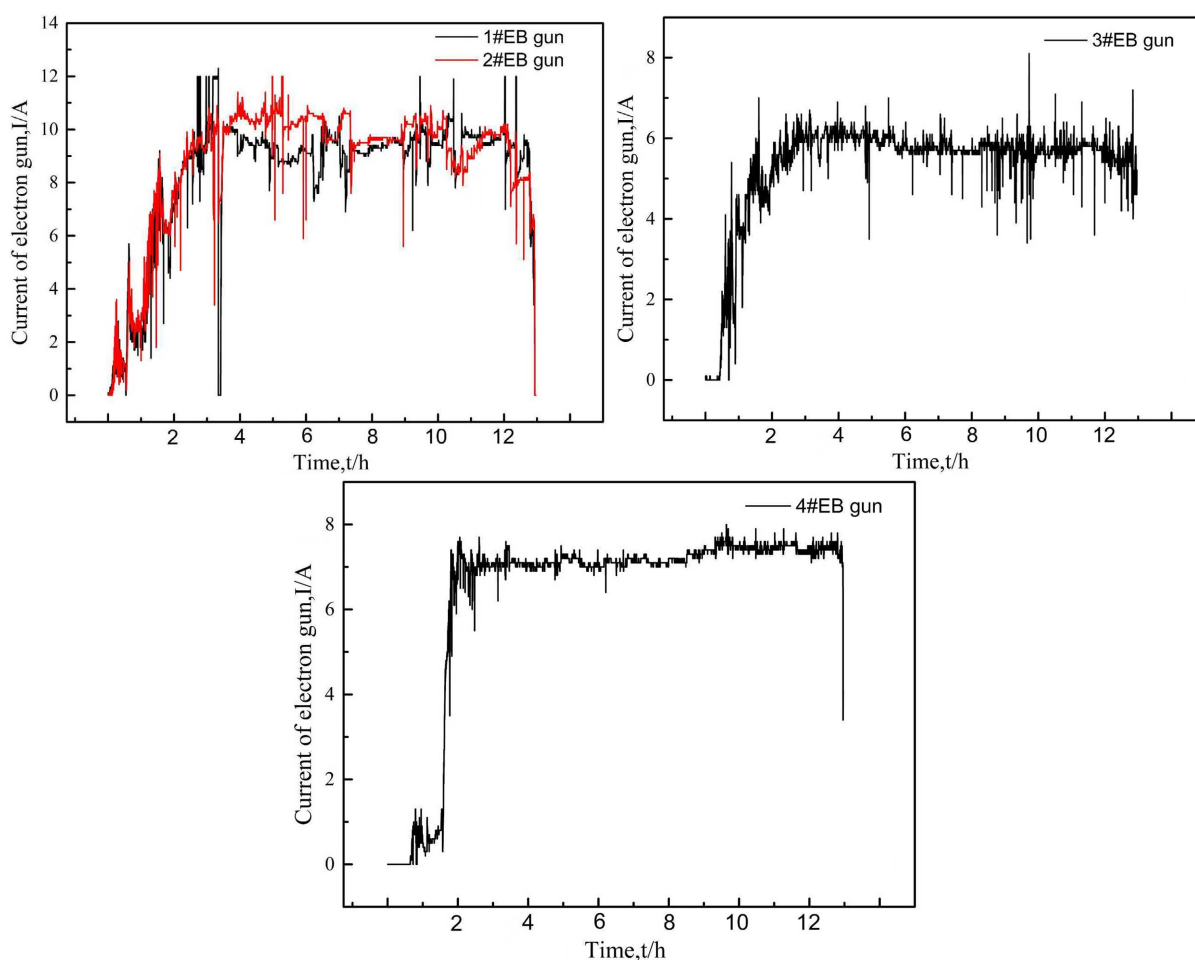


Figure 1. Current change curves of each electron gun

图 1. 各枪熔炼电流变化曲线

3.2. Al 元素挥发理论计算

元素的饱和蒸汽压是影响熔炼过程中挥发行为的关键因素。在 TC4 钛合金的电子束熔炼过程中, Al 元素在相同温度条件下具有最高的饱和蒸汽压, 致使该组元的挥发难以有效控制, 从而导致铸锭化学成分均匀性下降[6] [7]。合金元素在熔池表面的挥发过程服从 Langmuir 定律:

$$J_i = \alpha p_i^\theta \gamma_i x_i S \sqrt{M_i / (2\pi RT)} \tag{1}$$

式中: J_i 为 i 组元的挥发传质速率(kg/s); α 为凝固系数, Langmuir 证明 p_i^θ 一般金属的 $\alpha \approx 1$; 为 i 组元的饱和蒸汽压(Pa); γ_i 为 i 组元的活度系数; x_i 为 i 组元的摩尔分数; S 为熔体的表面积; M_i 为 i 组元的摩尔质量; R 为摩尔气体常量, 8.314 J/(mol·K); T 为熔体温度。

合金熔体中某组元 i 的饱和蒸汽压 p_i^θ 可表示为:

$$p_i^\theta = x_i \gamma_i p_i^0 \tag{2}$$

式中: p_i^0 为纯组元 i 的饱和蒸汽压。根据文献可知, 各纯组元的饱和蒸汽压可通过式(3)进行计算:

$$\lg p_{Me}^0 = A \cdot T^{-1} + B \cdot \lg T + C \cdot T + D \tag{3}$$

式中: A 、 B 、 C 及 D 为合金元素的蒸汽压常数, 其数值可通过查阅相关文献获得。表 3 列出了 TC4 钛合金中各元素对应的蒸汽压常数。

Table 3. Metal vapor pressure constant of Ti、Al、V element in TC4 titanium alloy (pressure unit is $\times 133.3$ Pa)
表 3. TC4 钛合金中 Ti、Al、V 的金属蒸汽压常数(压力单位为 $\times 133.3$ Pa)

元素	A	B	C	D	温度范围(K)
Ti	-23200	-0.66	—	11.74	熔点~沸点
Al	-16380	-1.0	—	12.32	熔点~沸点
V	-26900	+0.33	-0.265	10.12	298~沸点

将式(1)~(3)联立, 可建立 TC4 合金 EB 炉熔炼过程元素挥发的数学模型。基于该模型计算可得, Al 元素在冷床和结晶器内的挥发速率及挥发率如表 4 所示。

Table 4. Al evaporation loss of TC4 alloy during EBCHM
表 4. TC4 合金 EBCHM 过程中 Al 元素的挥发损失

液态区域	T/K	Al 挥发速率/(g·s ⁻¹ ·m ⁻²)	Al 挥发率/(kg·h ⁻¹)
冷床	2050	1.339	1.964
结晶器	2000	0.488	0.497

本试验中冷床面积为 970 mm $\times$ 420 mm, 结晶器面积为 3.14 $\times$ 295 mm $\times$ 295 mm。根据所建立的挥发模型及表 3 中数据, 可知熔炼过程中 Al 元素的理论挥发率为 12.9%。有实验表明, 通常实际挥发率高于理论挥发率, 为修正该偏差, 本次试验铸锭 Al 元素的理论挥发率按照 15%计算。

3.3. 铸锭成分均匀性

一次 EB 炉熔炼铸锭沿铸锭长度方向进行圆周取样分析 Al、V、Fe、C、N、H、O 元素, 化学成分分析结果见表 5。

由图 2 可以看出, 试制的 EB 炉一次铸锭化学成分均匀性较好, 各组元的化学成分均符合国家标准

的要求。其中单个铸锭 Al 元素最大偏差 ≤ 0.17 ，V 元素 ≤ 0.09 ，其他杂质元素控制在标准范围内。根据表 4 数据(按平均值 6.09%计算)计算，铸锭中 Al 元素的实际挥发率达到 21.6%。试验结果表明，在 EB 炉熔炼过程中，Al 元素挥发较为显著，且实际挥发率高于理论预测值。Al 元素挥发率高于理论值由以下两方面原因造成：1) 试验中 Al 元素使用 Al 板进行添加，相较于使用电极块(海绵钛和中间合金)的添加方式，其熔炼时直接暴露在电子束枪扫描区域下，造成其挥发较多；2) 熔速较低，平均熔速约为 320 kg/h，该阶段 TC4 合金熔体长时间保持在高温状态，Al 元素的饱和蒸气压最大，是 TC4 合金熔体中主要挥发元素，导致该过程 Al 元素挥发损失严重，最终造成铸锭中 Al 元素含量偏低。

Table 5. Results of chemical composition analysis of ingot in EB furnace
表 5. 一次 EB 炉熔炼铸锭化学成分分析结果

部位	化学成分(wt%)						
	Al	V	Fe	C	H	O	N
冒口 100	6.13	4.03	0.15	0.012	0.0006	0.136	0.003
冒口 200	6.17	4.08	0.15	0.012	0.0006	0.134	0.004
冒口 300	6.16	4.02	0.15	0.013	0.0006	0.137	0.004
冒口 800	6.18	4.03	0.14	0.012	0.0006	0.138	0.004
冒口 1300	6.12	4.04	0.14	0.013	0.0011	0.138	0.003
冒口 1800	6.08	4.02	0.15	0.011	0.0010	0.137	0.004
冒口 2300	6.05	4.04	0.14	0.011	0.0011	0.137	0.003
冒口 2800	6.03	4.02	0.15	0.012	0.0011	0.142	0.003
锭底 300	6.01	3.99	0.14	0.012	0.0011	0.148	0.003
锭底 200	6.04	4.02	0.14	0.012	0.0010	0.137	0.005
锭底 100	6.05	4.03	0.14	0.012	0.0011	0.136	0.004

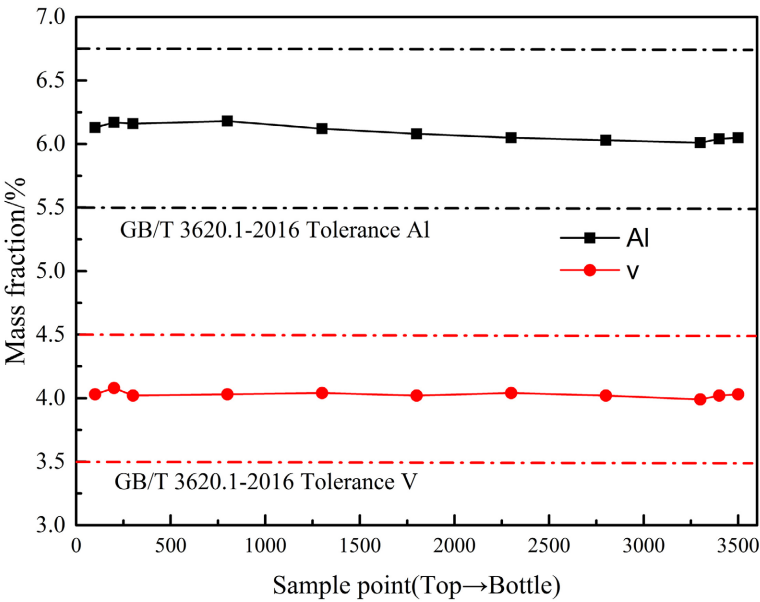


Figure 2. Axial direction distribution of chemical component of Al and V in TC4 alloy ingot
图 2. TC4 合金铸锭 Al、V 轴向化学成分分布

经 EB 炉一次熔炼的铸锭，在 J2 A、B 端横截面 9 点取样化学成分分析结果见表 6。从表 6 可以看出，铸锭成分均匀性较好，横截面处 Al 为 6.22~6.36，平均值为 6.28；V 为 4.26~4.42，平均值为 4.33；O 为 0.126~0.150，平均值为 0.135；Fe 为 0.20~0.22，平均值为 0.206。

Table 6. Analysis results of cross section chemical composition of ingots in a single EB furnace
表 6. 一次 EB 炉熔炼铸锭横截面化学成分分析结果

元素	取样位置								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Al	6.29	6.33	6.22	6.28	6.25	6.36	6.25	6.33	6.28
V	4.26	4.32	4.33	4.34	4.30	4.32	4.35	4.30	4.32
Fe	0.21	0.21	0.20	0.20	0.20	0.20	0.21	0.21	0.20
O	0.13	0.13	0.14	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
Al	6.31	6.29	6.31	6.27	6.28	6.22	6.26	6.24	6.23
V	4.33	4.34	4.33	4.39	4.42	4.34	4.32	4.30	4.30
Fe	0.21	0.22	0.20	0.21	0.21	0.21	0.21	0.20	0.20
O	0.14	0.14	0.14	0.13	0.13	0.15	0.15	0.13	0.15

4. 结论

- (1) 利用电子束冷床熔炼炉熔炼 TC4 钛合金时，需精确计算出原料中补偿的 Al 元素，合理布局 Al 板的添加方式，相应地调整 EB 熔炼工艺参数，Al 元素在回收料重熔过程中的挥发率处于 20%至 23%之间，明显高于理论计算值。
- (2) 铸锭中轴向化学成分分布较为均匀，其中 V 元素的分布均匀性优于 Al 元素；Al 元素极差为 0.17，V 元素极差为 0.09。
- (3) 利用电子束冷床炉一次熔炼制备的 TC4 合金圆锭，其质量符合国标 GB/T 3620.1-2016 的要求，可用于生产高品质的 TC4 合金板/带/棒材等产品。

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] 赵永庆, 葛鹏, 辛社伟. 近五年钛合金材料研发进展[J]. 中国材料进展, 2020, 39(Z1): 527-534, 557.

[2] 张英明, 孙军, 韩明臣, 周廉, 杨建朝. TC4 合金的电子束冷床熔炼研究[J]. 宇航材料工艺, 2007, 37(5): 50-52.

[3] 罗雷, 毛小南, 杨冠军. TC4 钛合金电子束冷床熔炼成分均匀性研究[J]. 冶金工程, 2014, 1(1): 28-34.

[4] Vutova, K. and Mladenov, G. (1999) Computer Simulation of the Heat Transfer during Electron Beam Melting and Refining. *Vacuum*, 53, 87-91. [https://doi.org/10.1016/s0042-207x\(98\)00398-4](https://doi.org/10.1016/s0042-207x(98)00398-4)

[5] 杜彬, 唐增辉, 张志斌, 等. TC4 合金的电子束冷床熔炼工艺[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(12): 2989-2995.

[6] 罗雷. TC4 钛合金电子束冷床熔炼技术研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.

[7] 张英明, 周廉, 孙军, 韩明臣, 倪沛彤, 潘志强, 陈杜鹃. 钛合金电子束冷床熔炼研究进展[J]. 钛工业进展, 2008(4): 14-19.