

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2026.5257

Ti-6Al-4V 钛合金铸锭成分均匀性提升研究

梁敬凡, 刘 鹏, 朱仔成, 王阳阳, 雷 强, 何 涛, 罗文忠
(西部超导材料科技股份有限公司 陕西 西安 710018)

摘要:为提升 Ti-6Al-4V 合金铸锭成分均匀性, 解决铸锭底部出现的 Al 元素贫化问题, 系统研究了不同混料质量(100、150、200 kg)与混料次数(一次混料与两次混料)对电极块合金分布及铸锭成分均匀性的影响规律。结果表明, 随着混料质量增加, 钒铝合金(V-Al)和铝豆(Al)在电极块中下部的沉积程度加剧, 导致电极块内部出现宏观偏析。一次混料方式下, 电极块上半部形成尺度较大的合金贫化区, 该不均匀性在后续熔炼过程中无法被完全消除, 最终遗传至铸锭底部, 形成贫 Al 区。相比之下, 两次混料方式通过分批次投料, 有效打散了宏观偏析的尺度, 使其处于熔炼过程自均匀化能力的容错范围内, 从而显著提升了铸锭整体成分均匀性。

关键词: Ti-6Al-4V 合金; 铸锭; 混料方式; 电极块; 成分均匀性

中图分类号: TG146.2+3

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2026)02-0206-06

Study on Improving the Composition Uniformity of Ti-6Al-4V Titanium Alloy Ingots

LIANG Jingfan, LIU Peng, ZHU Zicheng, WANG Yangyang, LEI Qiang, HE Tao, LUO Wenzhong
(Western Superconducting Technologies Co., Ltd., Xi'an 710018, China)

Abstract: To increase the compositional uniformity of Ti-6Al-4V alloy ingots and address the issue of aluminium (Al) depletion occurring at the bottom of the ingot, the influences of different mixing weights (100, 150, and 200 kg) and mixing cycles (single mixing and double mixing) during electrode block preparation on the alloy distribution in electrode blocks and the compositional uniformity of the final ingots were systematically investigated. The results show that with increasing mixing weight, the degree of vanadium-aluminium (V-Al) alloy deposition and the number of Al nodules in the middle and lower parts of the electrode block intensify, leading to macroscopic segregation inside the electrode block. Under the single mixing method, a large-scale alloy-depleted zone is formed in the upper part of the electrode block; this inhomogeneity cannot be completely eliminated in the subsequent melting process and is ultimately inherited by the ingot bottom, resulting in an Al-depleted region. In contrast, the double mixing method, through batch feeding, effectively breaks up the scale of macroscopic segregation and confines it within the tolerance range of self-homogenization capability during the melting process. Consequently, the overall compositional uniformity of the ingot is significantly improved.

Key words: Ti-6Al-4V alloy; ingot; mixing method; electrode block; composition uniformity

钛及钛合金具有高比强度、优秀耐蚀性及良好的生物相容性, 现已成为航空航天、船舶及医疗等领域必不可少的材料, 而 Ti-6Al-4V 作为 $\alpha+\beta$ 双相钛合金的典型代表, 以广泛的应用占据总用钛量的 50% 以上^[1-2]。

铸锭的化学成分均匀性是决定钛合金产品最终性能与服役可靠性的关键因素之一^[3]。同时, 真空自耗电弧熔炼(vacuum arc remelting, VAR)是制备高

品质钛合金铸锭的核心手段^[4]。为实现成分均匀, 对于由海绵钛和中间合金等原料压制而成的电极块来说, 其质量控制便成为影响铸锭成分均匀性的首要环节。电极块内部合金元素与海绵钛的混合均匀程度, 对铸锭的成分分布均会产生一定影响^[5-7]。然而, 在实际生产中, 由于原料间存在粒度、密度和形状等物性差异, 混料过程极易引发颗粒分离现象, 导致电极块内部合金分布不均^[8]。若这种不均匀性的尺度

收稿日期: 2025-11-21

基金项目: 西部超导材料科技股份有限公司自主研究课题(ZX2025050)

作者简介: 梁敬凡, 1992 年生, 硕士, 工程师。主要从事钛合金铸锭熔炼。Email: liangjingfan@163.com

引用格式: 梁敬凡, 刘鹏, 朱仔成, 王阳阳, 雷强, 何涛, 罗文忠. Ti-6Al-4V 钛合金铸锭成分均匀性提升研究[J]. 铸造技术, 2026, 47(2): 206-211.

LIANG J F, LIU P, ZHU Z C, WANG Y Y, LEI Q, HE T, LUO W Z. Study on improving the composition uniformity of Ti-6Al-4V titanium alloy ingots[J]. Foundry Technology, 2026, 47(2): 206-211.

超出熔炼过程熔池对流与搅拌的均匀化能力,则会遗传到铸锭中,形成难以消除的宏观偏析缺陷^[9]。近年来,针对电极块混料工艺的研究多集中于原材料成分差异的影响与熔炼工艺参数研究,例如于继洋等^[10]研究了 V55Al 中间合金成分极差对 TC4 铸锭均匀性的影响,发现中间合金成分波动会导致铸锭 V 元素偏析度提升 0.2%;靖振权等^[11]研究了与铸锭直接相关的 3 个工艺参数(熔速、铸锭上表面温度和冷却强度)对铸锭宏观偏析的影响规律。对于电极块混料对宏观成分均匀性遗传性的影响尚缺乏系统性研究。本文首次提出通过两次混料分批次投料的工艺策略,旨在打破因“巴西果效应”引发的大尺度合金分布不均的结构,从而提升铸锭整体成分均匀性。

以广泛应用的 Ti-6Al-4V 合金为研究对象,以提升 Ti-6Al-4V 合金铸锭成分均匀性,同时解决 Ti-6Al-4V 合金铸锭中出现的底部 Al 元素贫化问题为目标,重点探究电极块混料重量和混料次数对电极块合金分布以及铸锭最终成分均匀性的影响规律。结合实验研究、数值模拟与工业化验证,明确优化工艺窗口,为高品质钛合金铸锭的稳定制备提供科学基础。

1 实验材料与方法

选用优质 0 级海绵钛、钒铝中间合金(V-Al)、铝豆(Al)作为主要原料,所有原料均符合航空级 Ti-6Al-4V 合金的化学成分标准。采用德国进口的 OAS 自动称重及混料设备,制备圆形电极块。

设置不同混料质量(W1: 100 kg;W2: 150 kg;W3: 200 kg)进行对比,每次混料时间固定为 3 min,并设计混料实验模腔,对混料器混合后原料中合金占比进行分层筛分、统计,从而对比电极块中合金的分布规律和均匀性。

结合数值模拟和实验,开展不同混料次数影响研究,即设置一次混料与两次混料两种方式进行对比。一次混料是将所有原料一次性投入混料机,混合预定时间后,再一次性投入油压机模腔内进行压制;两次混料是将总原料等分为两份,先将第一份原料混合相同时间后投入模腔,再将第二份原料混合相同时间后投入已装有第一批物料的模腔中,最后统一进行压制。

不同混料次数影响具体研究过程为:①采用 MeltFlow-VAR 软件模块进行数值模拟。将一次混料和两次混料方案下不同电极块成分分布,作为模拟的初始条件输入,然后进行熔炼工艺数值模拟,

获得成品铸锭的成分分布规律^[8,12-19]。②分别采用两种混料方式压制圆形电极块,对其进行纵剖,观察两种混料方式下合金实际分布特点。③在 VAR 熔炼车间进行了 5 t 级铸锭全流程验证试验,分别采用一次混料和两次混料方式制备电极块,并完成焊接和熔炼,得到成品铸锭,并在铸锭头部、中部和尾部分别切取试样片进行成分均匀性分析评价。

2 实验结果及讨论

2.1 混料质量对电极块中合金分布的影响

采用混合均匀度 M 评价电极块中合金分布的均匀性,混合均匀度 M 计算方式为:

$$M = \frac{\max(A\%) - \min(A\%)}{L} \times 100\% \quad (1)$$

式中, M 为混合均匀度; $A\%$ 为抽样中合金 A 占抽样质量的百分比; L 为理想均匀状态时合金 A 组分所占百分比。混合均匀度 M 值越小,代表合金 A 在电极块中纵向分布离散程度越小,即分布均匀性越好;反之越差。为便于理解,图 1 给出了电极块分层抽样示意图。将电极块沿高度方向均匀分为 4 层,自上而下分别标记为 L1、L2、L3、L4,每层厚度相等。同时,采用 %V-Al 表示 V-Al 合金在每一抽样层中的占比,用于量化 V-Al 合金的分布特征。

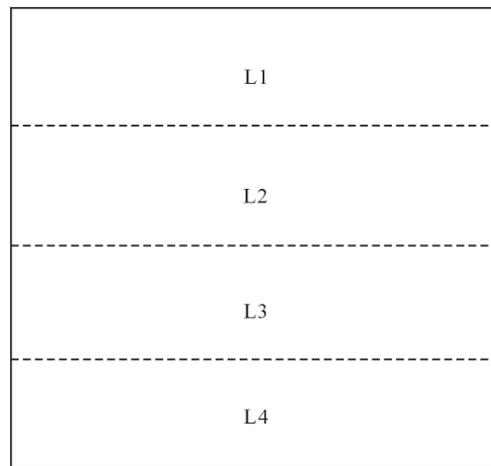


图 1 电极块中钒铝合金分布及抽样示意图

Fig.1 Distribution of vanadium-aluminum alloy in the electrode block

对不同混料质量(W1: 100 kg;W2: 150 kg;W3: 200 kg)下混合均匀度进行分析,可以看出:①对于 V-Al 合金来说,如图 2 所示,3 种混料质量下,大部分 V-Al 合金均沉积于电极块的下半部分(即 L3 和 L4 位置)。而且从不同位置合金占比来看,100 和 150 kg 混料质量下,其 %V-Al(L1:L2:L3:L4)分别为 1:7:11:12 和 1:5:11:10,两者分布规律相近;但 200 kg 混料质量下,%V-Al(L1:L2:L3:L4)为 1:3:26:25。这说

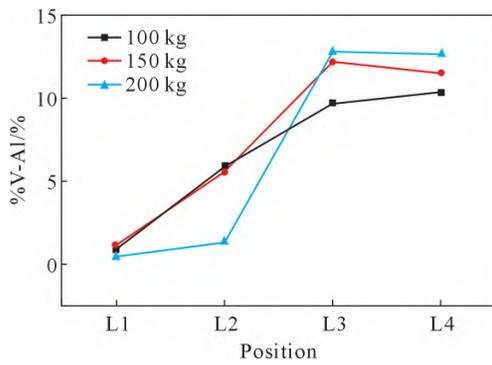


图2 不同混料重量下电极块中钒铝合金分布
Fig.2 Distribution of vanadium-aluminium alloy in the electrode block at different mixing weights

明 100~150 kg 混料质量级别下,电极块中合金纵向分布变化随混料质量的变化不甚敏感,但当增至 200 kg 级别混料质量时,V-Al 合金在电极块中沉积的程度将明显增加。②对于 Al 豆来说,如图 3 所示,3 种混料质量下,大部分 Al 豆均处于电极块的中部位置(即 L2 和 L3 位置)。从不同位置 Al 豆占比来看,100 kg 混料质量下,%Al(L1:L2:L3:L4)为 1:1.3:1.1:0.8,而 150 和 200 kg 混料质量下,%Al(L1:L2:L3:L4)分别为 1:1.2:1.5:1.5 和 1:1.2:1.5:1.2,这说明虽然 Al 豆颗粒尺寸相比 V-Al 合金较大,其在电极块中的沉积效应不如 V-Al 合金明显,但当混料质量从 100 kg 逐渐增加至 150~200 kg 时,其分布特点也呈现出从电极块中上部往中下部偏移的趋势。

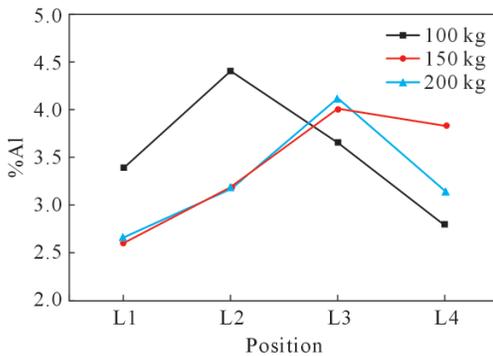


图3 不同混料重量下电极块中 Al 豆分布
Fig.3 Distribution of aluminium nodules in the electrode block at different mixing weights

上述现象可由颗粒系统的“巴西果效应”及其逆向原理解释^[20-21]。通常来说,V-Al 合金粒度范围在 1~10 mm,Al 豆粒度范围在 8~13 mm,而海绵钛的粒度范围通常在 0.83~25.4 mm,在混料过程中,粒度较小的 V-Al 合金和 Al 豆倾向于通过海绵钛颗粒间的间隙向底部迁移,而粒度较大的海绵钛颗粒则上浮或移向外侧。混料质量越大,物料堆的高度越高,小颗粒沉降的驱动力和最终沉降深度也越大,从而导致更严重的纵向偏析。

2.2 不同混料次数下电极块纵剖验证与分析

为了观察两种混料次数下 V-Al 合金和 Al 豆实际分布特点,分别采用一次混料、两次混料的方式制备 150 kg 电极块,并进行纵剖观察。

从一次混料电极块的纵剖面图(图 4a)可以看出,其内部合金成分呈现出宏观分层现象,电极块下半部分(约 1/2 厚度区域),形成了一个连续且富集 Al-V 合金的致密层;而在上半部分,则相应地形成 Al-V 合金贫化的区域。这种不均匀性并非随机分布,而是由材料的物理特性和工艺流程共同决定的。

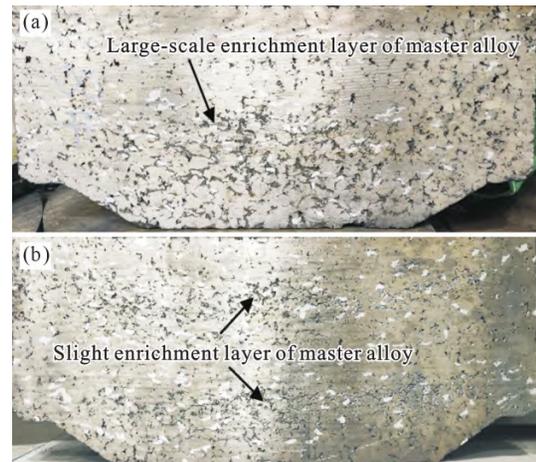


图4 不同混料次数下电极块纵剖结果:(a)一次混料;(b)两次混料

Fig.4 Longitudinal section results of electrode blocks under different mixing cycles: (a) single mixing; (b) double mixing

为克服上述问题,采用两次混料工艺后,每次投入模腔的物料量减少了 1/2,这意味着在模腔内需要形成的物料堆的高度也相应降低,合金沉积效应的影响范围被限制在了一个更浅的深度内。这一过程有效地破坏了一次性投料可能形成的单一、连续的大规模偏析层,将其分割和打散为两个尺度更小、影响范围更有限的偏析单元。从两次混料制备的电极块纵剖面图(图 4b)可以看出,其宏观的分层现象得到极大改善。尽管仍存在轻微的富集层,但其厚度和合金富集的程度已远小于一次混料电极块,这说明了两次混料工艺有效抑制了因粒度差异导致的沉积偏析,获得了合金分布更加均匀的电极块。

2.3 基于数值模拟的混料次数影响预测

为探究同一混料总质量下,一次混料与两次混料两种方式对铸锭成分均匀性的影响规律,依据 2.1 节中电极块中合金分布,设计模拟的电极块初始成分,同时,按照电极块理想均匀状态(ideal uniformity)时成分作为初始条件进行工艺数值模拟,以作为对比。然后进行一次熔炼、二次熔炼工艺数值模拟,获得铸锭成分分布规律。Al 元素模拟结果如图 5 和 6 所

示,极差水平见表 1。

从成分分布来看(分别取距头部 0.5、1.5 和 2.5 m 的横截面),在头(top)、中(middle)、尾(bottom)3 个横截面上,Al 元素的平均含量整体上呈现出头部<中部<尾部的特点。并且,两次混料工艺下头、中、尾截面及整锭(entire)的成分极差均小于一次混料工艺,这也预示了电极块采用两次混料方式对铸锭最终均匀性有一定改善作用。

2.4 工业化验证

2.4.1 工业化验证铸锭成分实测结果

通过工业化试验,进行最终铸锭成分均匀性评价。可以看出一次混料和两次混料方式下,铸锭成分的实测结果与模拟预测基本一致。如图 7 和表 2 所示,实际铸锭 Al 元素同样呈现出头低、尾高的规律,而且采用两次混料工艺时,其制备的铸锭极差

显著减小,模拟值与实测值趋势一致,这也说明当前模型对于 Al 元素的分布趋势以及工艺对比的相对效果预测能力较好,而其中数值差异主要源于实际熔炼过程中电弧波动及熔池流动的非理想性,不影响工艺对比结论。

2.4.2 电极块沉积偏析的遗传效应

通过工业化试验发现,采用一次混料电极最终得到的成品铸锭,距底部 20 mm 范围内(对应铸锭重量约 40 kg),存在显著的 Al 元素贫化,成分极差相比其它位置整体低约 0.3%,而在距底部 50 mm 时,其成分与其他位置水平相当,如图 8 所示,这说明该不均匀性源于电极块初始宏观偏析的遗传效应,而非熔炼凝固过程中的局部宏观偏析所致。这是因为第一次熔炼时,该电极作为自耗电极,其头部电极块贫合金料区最终熔入一次铸锭头部区域,导致

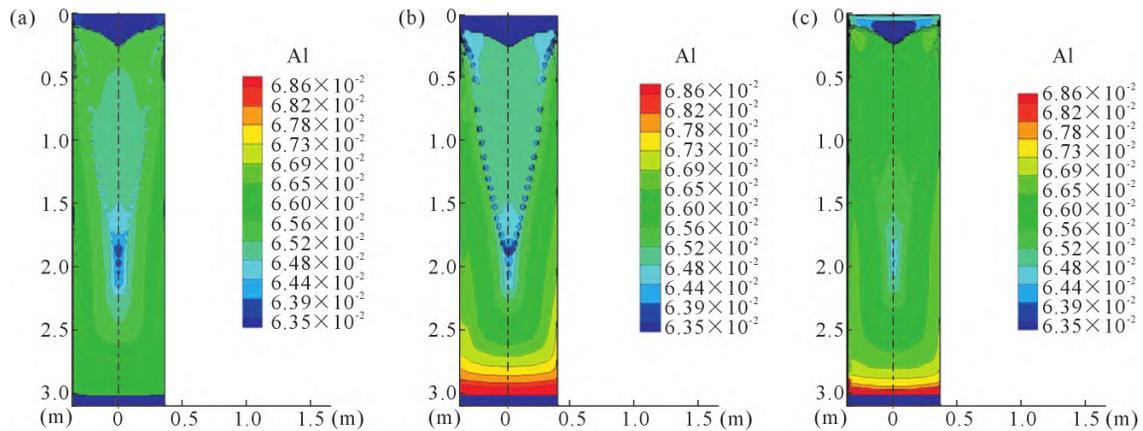


图 5 不同电极块成分分布下成品铸锭 Al 元素模拟:(a)理想均匀状态;(b)一次混料状态;(c)两次混料状态

Fig.5 Simulation of Al in the final ingot on the basis of the composition distribution of different electrode blocks: (a) ideal uniformity; (b) single mixing; (c) double mixing

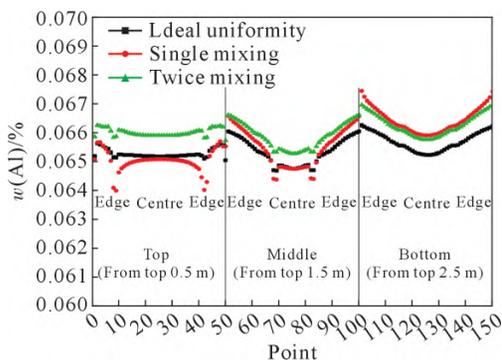


图 6 不同电极块成分分布下成品铸锭 Al 元素模拟规律

Fig.6 Simulated trends of Al in the final ingot on the basis of the composition distributions of different electrode blocks

表1 不同电极块成分分布下成品铸锭Al元素模拟极差

Tab.1 Simulated range of Al in the final ingot on the basis of the composition distribution of different electrode blocks

Position	Ideal uniformity	Single mixing	Double mixing
Top/ $\times 10^{-4}\%$	595	1 716	529
Middle/ $\times 10^{-4}\%$	1381	2 208	1 347
Bottom/ $\times 10^{-4}\%$	1034	1 551	1 203
Entire/ $\times 10^{-4}\%$	1686	3 472	1 582

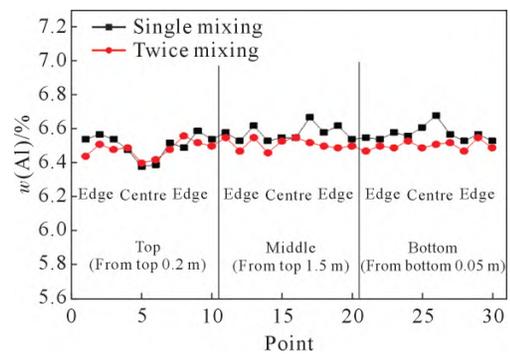


图 7 不同混料次数下成品铸锭实际 Al 元素分布规律

Fig.7 Distribution behavior of actual Al in the final ingot after different numbers of mixing cycles

表2 不同混料次数下成品铸锭实际Al元素极差

Tab.2 Actual range of Al in the final ingot under different mixing cycles

Position	Single mixing	Double mixing
Top/ $\times 10^{-4}\%$	2 100	1 600
Middle/ $\times 10^{-4}\%$	1 400	900
Bottom/ $\times 10^{-4}\%$	1 500	800
Entire/ $\times 10^{-4}\%$	3 000	1 600

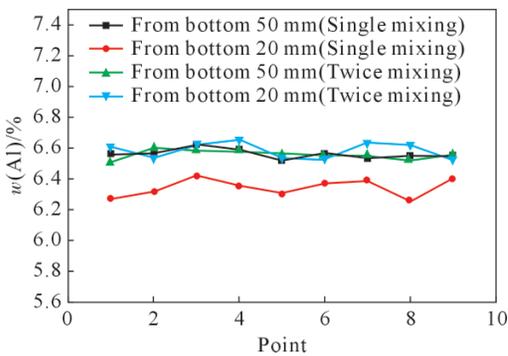


图8 不同混料次数下成品铸锭底部 Al 元素

Fig.8 Al at the bottom of the final ingot after different mixing cycles

一次锭头部整体贫 Al。当再次熔炼时,由于头部(贫料区)对应起弧阶段,因此该部分熔化并凝固后,便形成了铸锭底部贫 Al 区域。

这证明宏观偏析的尺度超出了 VAR 熔炼过程自身搅拌与对流所能均匀化的能力极限,因此被清晰地遗传并定格在最终产品中。反之,两次混料将贫料区的尺度显著减小,使其不均匀性处于熔炼“自均匀化”能力的容错范围内,最终在熔炼过程电弧搅拌和熔液对流作用下,这种局部的成分波动被有效消除。这也说明对电极块均匀性的评判不能只看整体混料均匀度,还要关注是否存在超出后续熔炼工艺修复能力的宏观缺陷。

3 结论

(1)随着混料质量增加,钒铝合金和铝豆在电极块中下部沉积的程度会随之增加。

(2)一次混料方式下,由于电极块上半部分形成合金贫化区域,且尺度超出熔炼过程自均匀化能力,导致铸锭底部最终贫 Al;采用两次混料方式,削减了电极块中合金贫化区尺度,有效解决该问题。

(3)模拟结果和工业化验证结果显示,相比一次混料,采用两次混料方式,可有效提升 Ti-6Al-4V 合金铸锭整体成分均匀性。

参考文献:

- [1] LÜTJERING G, WILLIAMS J C. 钛(第 2 版)[M]. 雷霆,杨晓源,方树铭,译.北京:冶金工业出版社,2011.
LÜTJERING G, WILLIAMS J C. Titanium (2nd ed.)[M]. LEI T, YANG X Y, FANG S M, translate. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011.
- [2] 李伟东,史许娜,李晨阳,乔海滨,王哲,李宁. 钛及钛合金铸锭制备工艺发展现状[J]. 钛工业进展, 2024, 41(5): 42-48.
LI W D, SHI X N, LI C Y, QIAO H B, WANG Z, LI N. Development status of preparation process of titanium and titanium alloy ingot[J]. Titanium Industry Progress, 2024, 41(5): 42-48.

- [3] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册:第 4 卷 钛合金 铜合金[M]. 北京:中国标准出版社,2002.
Editorial Committee of China Aeronautical Materials Handbook . China aeronautical materials handbook: Vol. 4 titanium alloys copper alloys[M]. Beijing: China Standard Press, 2002.
- [4] BERDIN V K, KARAVAEVA M V, KISELEVA S K. Formation of microcrystalline structure in large-scale ingots of Ti alloy Ti-6Al-4V during the complex loading [EB/OL]. (2011-10-14) [2025-11-21]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1110.3122>.
- [5] 张英明,周廉,孙军,韩明臣,倪沛彤,陈杜鹃,潘志强. 钛合金真空自耗电弧熔炼技术发展[J]. 稀有金属快报, 2008, 27(5): 9-14.
ZHANG Y M, ZHOU L, SUN J, HAN M C, NI P T, CHEN D J, PAN Z Q. Progress of vacuum arc remelting technology of titanium alloys[J]. Rare Metals Letters, 2008, 27(5): 9-14.
- [6] BOMBERGER H B, FROES F H. The melting of titanium [J]. JOM, 1984, 36: 39-47.
- [7] 何春艳,祝建雯,朱康平. 浅析原材料对钛合金冶金质量的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(3): 309-312.
HE C Y, ZHU J W, ZHU K P. Effects of raw materials on the metallurgical quality of titanium alloy[J]. Special Casting & Non-ferrous Alloys, 2016, 36(3): 309-312.
- [8] 赵小花,王锦程,刘鹏,吴伟,王凯旋,刘向宏,孙鹏. 钛合金电极块混料均匀性对铸锭成分的影响[J]. 钛工业进展, 2021, 38(4): 1-4.
ZHAO X H, WANG J C, LIU P, WU W, WANG K X, LIU X H, SUN P. Effect of electrode block's mixing uniformity on titanium alloy ingot's composition[J]. Titanium Industry Progress, 2021, 38(4): 1-4.
- [9] BOYER R R. An overview on the use of titanium in the aerospace industry[J]. Materials Science and Engineering: A, 1996, 213(1-2): 103-114.
- [10] 于继洋,罗坤,耿乃涛,王永钢. 基于 MeltFlow-VAR 模拟工艺探讨 AIV55 中间合金与 TC4 钛合金铸锭成分均匀性的关系[J]. 钛工业进展, 2025, 42(2): 9-15.
YU J Y, LUO K, GENG N T, WANG Y G. Relationship between composition uniformity of AIV55 master alloy and TC4 titanium alloy ingot based on MeltFlow-VAR simulation[J]. Titanium Industry Progress, 2025, 42(2): 9-15.
- [11] 靖振权,孙彦辉,刘睿,陈炼,耿乃涛,郑友平,彭力,王莹. 钛合金 TC4 真空自耗电弧熔炼工艺参数对宏观偏析影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52(3): 815-822.
JING Z Q, SUN Y H, LIU R, CHEN L, GENG N T, ZHENG Y P, PENG L, WANG Y. Effect of vacuum arc remelting process parameters on macrosegregation in TC4 titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2023, 52(3): 815-822.
- [12] 李鹏飞,李金山,孙畅,寇宏超,钟宏,常辉,周廉. 钛合金真空自耗电弧熔炼过程的多尺度模拟[J]. 钢铁钒钛, 2013, 34(2): 24-29.
LI P F, LI J S, SUN C, KOU H C, ZHONG H, CHANG H, ZHOU L. Multiscale modeling of the vacuum arc remelting process of titanium alloy[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2013, 34(2): 24-29.
- [13] 王阳阳,赵小花,雷强,吴伟,付杰,尚金金,何永胜,刘向宏. 钛合金 VAR 熔炼用电极块压制过程模拟研究[J]. 钛工业进展, 2021, 38(6): 1-5.
WANG Y Y, ZHAO X H, LEI Q, WU W, FU J, SHANG J J, HE Y

- S, LIU X H. Research on the pressing process of electrode for titanium alloy VAR melting[J]. Titanium Industry Progress, 2021, 38(6): 1-5.
- [14] 张敏,郭宇飞,黄超,张立胜,张文辉. Ti-6Al-4V 三元合金焊接熔池凝固组织模拟[J]. 材料导报, 2021, 35(8): 8116-8120.
ZHANG M, GUO Y F, HUANG C, ZHANG L S, ZHANG W H. Solidification microstructure simulation of Ti-6Al-4V ternary alloy welding pool[J]. Materials Reports, 2021, 35(8): 8116-8120.
- [15] 赵小花,李金山,杨治军,孙来喜,常辉,薛祥义,周廉. 钛合金真空自耗电弧熔炼过程中温度场的数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2010, 30(11): 1001-1004, 974.
ZHAO X H, LI J S, YANG Z J, SUN L X, CHANG H, XUE X Y, ZHOU L. Numerical simulation of temperature field in vacuum arc remelting Ti alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2010, 30(11): 1001-1004, 974.
- [16] 赵小花,宋长虹,楼美琪,王凯旋,王阳阳,夏勇,尚金山,刘向宏. 钛合金铸锭制备全流程数值模拟研究[J]. 材料开发与应用, 2025, 40(3): 83-91.
ZHAO X H, SONG C H, LOU M Q, WANG K X, WANG Y Y, XIA Y, SHANG J J, LIU X H. Study on numerical simulation of whole process of titanium alloy ingot production[J]. Development and Application of Materials, 2025, 40(3): 83-91.
- [17] 张颖娟,寇宏超,李鹏飞,钟宏,胡锐,李金山,周廉. 真空自耗电弧熔炼 TC4 铸锭的凝固组织和缩松缩孔的模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2012, 32(5): 418-421.
ZHANG Y J, KOU H C, LI P F, ZHONG H, HU R, LI J S, ZHOU L. Simulation on solidification structure and shrinkage porosity (hole) in TC4 ingot during vacuum arc remelting process [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2012, 32(5): 418-421.
- [18] CHEN J H, LI J S, TANG B, DU L H, KOU H C. Numerical simulation of hot die forging process of Ti-6Al-4V alloy blade[J]. Materials Science Forum, 2017, 898: 1325-1331.
- [19] ZHENQUAN J, SUN Y H, SONG S C. Numerical simulation of macrosegregation heredity on TC4 titanium alloy ingot by vacuum arc remelting[J]. Metallurgical Research & Technology, 2023, 120(1): 2023.
- [20] GUO Y, WU C Y, THORNTON C. The effects of air and particle density difference on segregation of powder mixtures during die filling[J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(4): 661-673.
- [21] YAN X, SHI Q, HOU M, LU K, CHAN C K. Effects of air on the segregation of particles in a shaken granular bed[J]. Physical Review Letters, 2003, 91: 014302.

(责任编辑:杨浩雪)