

基于 MeltFlow-VAR 对 Ti551 合金铸锭进行空间坐标变换的熔炼模拟研究

朱真泽¹, 周思源¹, 张怡凡¹, 杨国庆¹, 张宏岭¹, 马英杰²

(1. 江苏翔云钛合金新材料有限公司, 江苏 无锡 214105; 2. 中国科学院金属研究所, 师昌绪先进材料创新中心, 辽宁 沈阳 110016)

摘要: 真空自耗电弧熔炼 (VAR) 是制备钛合金铸锭的关键技术, 但传统工艺难以精准把控多物理场耦合作用, 易引发铸锭成分偏析问题。对 Ti551 合金目标成分取 Ti-5.3Al-1.5Mo-1.0V-1.0Sn-1.0Zr-1.0Cr-0.10-0.15Fe 进行熔炼模拟研究, 采用 MeltFlow-VAR 软件开展 Ti551 钛合金凝固偏析模拟, 对 Ti551 合金铸锭设计 4 种空间坐标变换的熔炼方案, 通过对一次锭和二次锭的熔炼过程仿真, 分析不同方案下 Al、Mo、V 等合金元素的分布规律, 研究表明, Ti551 合金一次锭存在显著元素偏析, Al、Mo、O 呈负偏析, V、Sn、Zr 等元素为正偏析, 偏析集中于锭头冒口与锭尾区域; 对比四种熔炼方案, 分切焊接类方案改善铸锭中部成分均匀性效果最优, 其中方案 2 元素含量更贴近标准值, 方案 4 可平缓长尺寸铸锭成分波动; 传统头尾倒置法无法根治偏析问题, 而空间坐标变换重组熔炼能够打破原有偏析分布格局。同时, 高熔点高密度的 Mo 元素负偏析效应突出, 分切焊接重组方式可调控其熔池传输与再分布机制, 有效优化铸锭中部成分均匀性, 为钛合金高熔点元素偏析控制及提升铸锭成材率提供技术参考。

关键词: Ti551 钛合金; MeltFlow-VAR; 偏析; 数值模拟

中图分类号: TF806, TG146.23 文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2026)02-0037-09

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2026.02.005

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Study on melting simulation of Ti551 alloy ingots with spatial coordinate transformation based on MeltFlow-VAR

ZHU Zhenze¹, ZHOU Siyuan¹, ZHANG Yifan¹, YANG Guoqing¹, ZHANG Hongling¹, MA Yingjie²

(1. Jiangsu Flying Cloud Titanium Alloy Material Co., Ltd., Wuxi 214105, Jiangsu, China; 2. Shi-Changxu Innovation Center for Advanced Materials, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, Liaoning, China)

Abstract: Vacuum arc remelting (VAR) is the key technology for the preparation of titanium alloy ingots. However, traditional processes struggle to precisely control the coupling effect of multi-physical fields, which easily leads to compositional segregation of ingots. In this paper, melting simulation research was carried out on Ti551 alloy with a target composition of Ti-5.3Al-1.5Mo-1.0V-1.0Sn-1.0Zr-1.0Cr-0.10-0.15Fe. The MeltFlow-VAR software was adopted to simulate the solidification segregation of Ti551 titanium alloy, and four melting cases with spatial coordinate transformation were designed for Ti551 alloy ingots. By simulating the melting processes of primary and secondary ingots, the distribution characteristics of alloying elements such as Al, Mo and V under different cases were analyzed. The results show that obvious elemental segregation exists in the primary Ti551 ingot. Al, Mo and O exhibit negative segregation, while V, Sn, Zr and other elements present positive segregation, and the segregation is mainly concentrated in the riser of the ingot head and the ingot tail. Among the four cases, the

收稿日期: 2026-02-01; 修回日期: 2026-03-01; 接受日期: 2026-03-09

基金项目: 国家重点研发计划 (编号: 2024YFB3714200)。

作者简介: 朱真泽, 1993 年出生, 男, 安徽池州人, 博士, 长期从事钛合金材料研究工作, E-mail: 1097331924@qq.com。

cutting and welding cases have the optimal effect on improving the compositional uniformity in the middle of the ingot. Case 2 enables the elemental content in the middle region to be closer to the standard values, and case 4 effectively weakens the element concentration fluctuation of large-size long ingots. The traditional head-to-tail inversion method cannot fundamentally eliminate segregation defects, whereas the restructured melting based on spatial coordinate transformation can break the original segregation distribution pattern. In addition, Mo features a high melting point and high density with prominent negative segregation during VAR processing. The reconstruction methods including cutting and welding can regulate the transport and redistribution mechanism of Mo in the molten pool, which effectively optimizes the compositional uniformity in the middle of ingots. This study provides a technical reference for the segregation control of high-melting-point elements and the improvement of finished product rate of titanium alloy ingots.

Key words: Ti551 titanium alloy; MeltFlow-VAR; segregation; numerical simulation

0 引言

钛合金凭借优异的耐海洋腐蚀性、超高的比强度,以及抗冲击、抗疲劳、无磁、高透声性与优良低温性能等一系列特性,被公认为极具应用潜力的“海洋金属”。它不仅是海洋工程领域最具发展前景的关键结构材料之一,同时也是舰船装备用先进材料的核心研发方向^[1-3]。Ti80合金是我国自主研制的中强度高韧性近 α 型钛合金,该合金除具备钛合金家族共有的低密度、高强度、无磁、高透声性及优异海水耐腐蚀性等综合特性外,还展现出卓越的冲击韧性、断裂韧性、抗应力腐蚀开裂能力、抗低周疲劳性能与焊接性能,同时兼具良好的加工成型性。目前,Ti80合金已在深潜器耐压壳等深海装备中获得规模化应用,有力推动了我国海洋工程用钛合金材料的技术突破与产业发展^[4]。

然而,国产的Ti551合金在一些领域有着替代Ti80合金的潜力,Ti551是一类 $\alpha+\beta$ 型钛合金,可通过热加工与热处理调控为等轴、魏氏、双态或网篮组织,决定最终强韧性匹配。核心优势是高强度、高韧性、良好热加工与焊接性,适合深海耐压结构与航空锻件等场景,其屈服强度与Ti80相当,冲击吸收能量提升约20%,强塑匹配优异;热加工窗口宽,锻造/轧制成型性好;焊接性优良,适合耐压壳体等大型结构焊接;抗海水应力腐蚀与疲劳裂纹扩展能力突出,适合深海长期服役;成本较Ti80降低20%以上,利于批量应用。国产Ti551主要应用场景有深潜器耐压球壳、耐压筒体等,实现轻量化并提升安全可靠,还有其他化工耐蚀设备、高端模具等对强度与耐蚀性要求高的部件,与Ti-6Al-4V相比,国产Ti551在韧性与成本上更优。

真空自耗电弧熔炼即VAR(Vacuum Arc Remelting)技术,是金属熔炼领域比较特殊的一种金属材料加工技术,涉及电磁场、温度场和流场等多个物理场

的耦合作用,设备本身的局限性使其不能有效捕捉到多物理场之间的细微变化和相互影响,因此难以准确评估各因素对最终产品质量的具体影响^[5]。研究者们通常是依据经验来制定熔炼工艺。最近几年,随着计算机运算能力和模拟软件的迅猛发展,数值模拟技术在解决这种复杂技术问题领域占据了难以替代的技术优势^[6-7]。因此,数值模拟技术可通过调控工艺参数、优化边界条件来复刻实际生产流程,进而探究各类工艺参数对铸锭成分、微观组织及力学性能的影响机制,最终设计出最优工艺方案,实现提升材料综合性能与节约生产成本的双重目标^[8-9]。

刘钊等^[10]通过调整VAR工艺参数来研究铸锭冶金质量,利用数值模拟可视化其过程、预测参数合理性并指导生产,阐述了MeltFlow-VAR软件的多场耦合理论模型,通过对 $\varnothing 820$ mm TC18钛合金铸锭仿真,揭示了熔炼熔池特征、成分与温度场演变规律,以及成品组织分布特点;于继洋等^[11]通过数值模拟确定150 kg级TC4铸锭的熔炼工艺,经工业试验验证后,研究了不同成分极差的AIV55中间合金对铸锭成分均匀性的作用,结果表明:依次改变电流熔炼(一、三次小电流,二次大电流)可获得表面质量优、组织与成分分布均的铸锭;李彤等^[12]采用MeltFlow-VAR多场耦合仿真软件,模拟熔炼电流、稳弧电流等参数对TC17钛合金铸锭熔池形状及元素浓度分布的影响,并制备 $\varnothing 640$ mm大规格铸锭进行验证,结果表明,适当减小熔炼与稳弧电流可均匀化铸锭中Cr、Mo元素分布,有效改善偏析;后续取样验证显示,试验铸锭成分均匀,无明显组织缺陷;罗坤等^[13]采用MeltFlow-VAR软件模拟该厂TB9钛合金一次VAR熔炼过程,考察熔炼电流、稳弧类型的影响,通过分析元素分布、熔池深度及抛杂路径,确定最佳一次熔炼工艺;并全流程模拟原工艺与优化工艺下的三次VAR熔炼,结果表明,宏观偏析在多次熔炼中存在“遗传”效应,优化一次熔炼工

艺可显著提升三次成品锭的成分均匀性;华倩等^[14]基于 MeltFlow-VAR 模拟软件对 Ti₂AlNb 合金的熔炼流程进行了精确的模拟分析,确立了合理的熔炼电流、稳弧电流以及周期等关键工艺参数,显著提升了生产过程的可控性,所生产的 Ti₂AlNb 合金铸锭中 Nb 元素的分布呈现出均匀状态,且其化学成分波动范围保持在较低水平。

对于 VAR 熔炼合金材料,难免伴随着宏观偏析,铸锭主要表现为自下而上的偏析规律,某些元素分布趋势表现为自下而上的减小,某些则相反,头尾偏析严重。为缓解铸锭偏析问题,当前工业生产中普遍采用两种传统处理工艺,具体如下:

1) 头尾倒置法:将初次熔炼成型的铸锭整体翻转,使原有头部与尾部位置互换后进行二次熔炼处理。该工艺具备操作便捷的优势,但偏析改善效果较为有限。核心原因在于,此方法仅实现了偏析严重区域的位置对调,并未从本质上改变偏析元素在铸锭内的分布状态。

2) 短锭对接焊法:先将两支短尺寸铸锭按头尾相对的方式对接并完成焊接,再翻转整体头尾结构开展二次熔炼。该方法可实现更大规格铸锭的熔炼制备,然而焊接成型后的铸锭偏析未得到实质性缓解。

现有技术存在的核心缺陷是其处理思路始终局限于铸锭“头部”与“尾部”这两个宏观区域的简单位置互换,未能充分借助铸锭“中部”区域成分分布

相对均一的特点,也无法从空间维度彻底打破初次熔炼形成的偏析分布格局。基于此,将上述 2 种改善偏析的方法和笔者提出另外一种铸锭偏析改善方法一并进行模拟研究,从理论上比较这几种方式控制偏析的区别。同样也使用 MeltFlow-VAR 软件^[15-16]以 Ti551 合金铸锭熔炼工艺为例,对其进行空间坐标变换的熔炼模拟研究,打破空间布局,对合金均匀化过程进行深度探讨。

1 MeltFlow-VAR 数值模拟

1.1 Ti551 钛合金物性参数

Ti551 钛合金目标成分取 Ti-5.3Al-1.5Mo-1.0V-1.0Sn-1.0Zr-1.0Cr-0.1O-0.15Fe。但值得注意的是,Ti551 钛合金中含有质量分数 1% 的共析型合金元素 Cr 与 1.5% 的高熔点元素 Mo,这两种元素的存在显著提升了真空熔炼过程中成分均匀性的调控难度。因此,选取 Ti551 钛合金铸锭来研究具有十分重要的实际意义。选取的熔炼铸锭重 142 kg,铸锭生产流程包括海绵钛及中间合金选择、混布料、电极压制及焊接、VAR 熔炼 4 个工序,对该过程进行 VAR 熔炼模拟,其中一次锭直径为 $\varnothing 200$ mm,二次锭直径为 $\varnothing 260$ mm。对一次锭进行空间坐标变换研究,在理论上研究该变换方法的可行性,只研究一二次熔炼过程,主要研究不同熔炼方式的偏析差异。如表 1 所示是计算采用的 Ti551 钛合金物性参数。

表 1 计算采用的 Ti551 钛合金物性参数
Table 1 Physical property parameters of Ti551 titanium alloy used in calculation

Liquid density (kg/m ³)	Solid density (kg/m ³)	Volume expansion coefficient/K	Temperature/K		Latent heat (J·kg ⁻¹)	Electrical conductivity (A·V ⁻¹ ·m ⁻¹)	Thermal conductivity (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹ , 1 873 K)	Specific heat (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹ , 1 873 K)	Dynamic viscosity (Pa·S, 1 873 K)
			Solidus	Liquidus					
4 060	4 510	9.35×10 ⁻⁵	1 947	2 000	3.20×10 ⁵	8.5×10 ⁵	0.317 2×10 ²	0.947×10 ³	3.35×10 ⁻³

1.2 模拟方案

模拟计算中一次锭、二次锭的熔炼电压、稳弧电流、稳弧电压分别一致。模拟使用的 Ti551 钛合金铸锭熔炼电流方案如下:

1) 一次锭: 2.80 ~ 3.20 kA; 3.00 ~ 4.00 kA; 4.00 ~ 5.00 kA;

2) 二次锭: 3.00 ~ 4.00 kA; 4.50 ~ 5.20 kA; 5.50 ~ 6.50 kA。

如表 2 所示,其中方案 1 是熔炼获得的一次锭,其规格是 $\varnothing 200$ mm×930 mm,再将其作为电极,翻转电极后熔炼获得二次锭,如图 1 所示,产品规格是 $\varnothing 260$ mm×550 mm;方案 2 是熔炼获得的

一次锭,其规格是 $\varnothing 200$ mm×930 mm,将其从中间切开,如图 2 所示,头尾焊接,中间部分在两侧,再将其作为电极,熔炼获得二次锭,产品规格是 $\varnothing 260$ mm×550 mm;方案 3 是熔炼获得 2 支一次锭,其规格是 $\varnothing 200$ mm×930 mm,将其头尾焊接,如图 3 所示,翻转后再将其作为电极,熔炼获得二次锭,产品规格是 $\varnothing 260$ mm×1 100 mm;方案 4 是熔炼获得 2 支一次锭,其规格是 $\varnothing 200$ mm×930 mm,将其中一支一次锭从中间切开,两部分去对接另一支一次锭头尾并焊接,如图 4 所示,再将其作为电极,熔炼获得二次锭,产品规格是 $\varnothing 260$ mm×1 100 mm。

表 2 Ti551 合金的空间坐标变换的熔炼方案
Table 2 Melting cases for spatial coordinate transformation of Ti551 alloy

Melting cases	Melting batch	Ingot quantity	Matching method	Product dimensions/mm
1	First VAR	1	Cutting and welding	Ø200×930
	Second VAR	1		Ø260×550
2	Fist VAR	1	Cutting and welding	Ø200×930
	Second VAR	1		Ø260×550
3	Fist VAR	2	Welding head and tail	Ø200×930
	Second VAR	1		Ø260×1 100
4	Fist VAR	2	Cut one ingot into sections, match it with another one, and then weld them together	Ø200×930
	Second VAR	1		Ø260×1 100

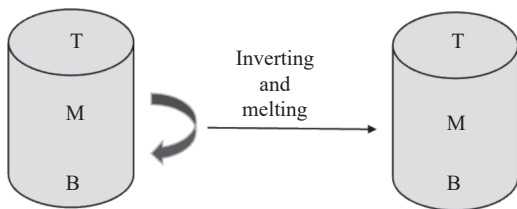


图 1 熔炼方案一示意

Fig. 1 Schematic diagram of melting Scheme 1

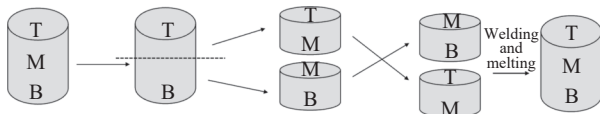


图 2 熔炼方案二示意

Fig. 2 Schematic diagram of melting Scheme 2

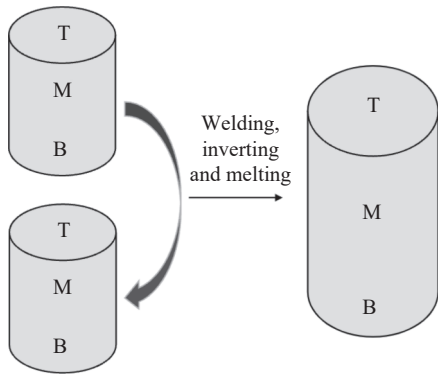


图 3 熔炼方案三示意

Fig. 3 Schematic diagram of melting Scheme 3

铸锭的冒口处和底部则表现出截然相反的情况。以 Mo 元素为例分析: Mo 元素在一次锭中呈现明显的负偏析,这主要与 Mo 的高熔点(约 2 623 ℃)和较大密度(10.28 g/cm³)有关。在 VAR 熔炼过程中, Mo 在熔池中的扩散速率较慢,且易因熔体对流与凝固前沿的推移而向底部富集。此外, Mo 作为稳定 β 相的元素,其分配系数大于 1,导致凝固过程中在铸锭下部累积。这种偏析行为在钛合金 VAR 熔炼中具有典型性,也为后续空间坐标变换工艺的优化提供了理论依据。

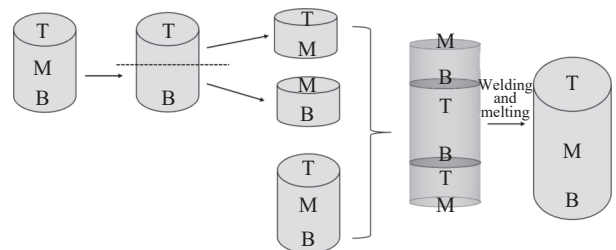


图 4 熔炼方案四示意

Fig. 4 Schematic diagram of melting Scheme 4

2 结果与讨论

2.1 一次锭的模拟结果分析

按照上述熔炼工艺对 Ti551 钛合金进行熔炼模拟,得到了如图 5 所示的 Al, Mo, V, Sn, Zr, Cr, O 和 Fe 元素分布云图,其中可以发现, Al, Mo 和 O 元素表现出负偏析情形,其中冒口处表现出这些元素含量降低,而铸锭底部浓度略高的情况,而 V, Sn, Zr, Cr 和 Fe 元素则呈现出正偏析情形,这些元素在

2.2 方案 1 和方案 2 的模拟结果分析

基于上述一次锭的模拟数据和二次锭的熔炼工艺方案,将继续对一次锭进行二次熔炼,参照方案 1 和方案 2 的工艺方法,分别得到如图 6、7 所示的二次锭 Al, Mo, V, Sn, Zr, Cr, O 和 Fe 元素分布云图。

从图 6、7 中可以明显看出方案 1 和 2 的合金元素变化趋势和一次锭是一致的,值得注意的是图 7 中的元素分布趋势在铸锭的中下部有着明显的浓度梯度,为了量化分析该情况,于是在两个方案的铸锭的轴向自上而下选取了 20 个数据点,绘制出 Al, Mo, V, Sn, Zr, Cr, O 和 Fe 元素分布线图,如图 8、9 所示,通过分析比较各曲线数据,获得了各方案的变化规律。

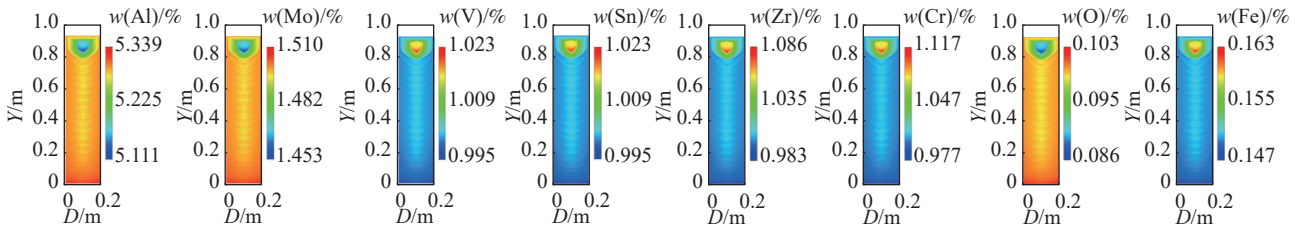


图 5 Ti551 钛合金的一次锭中 Al, Mo, V, Sn, Zr, Cr, O 和 Fe 元素分布云图

Fig. 5 Distribution contours of Al, Mo, V, Sn, Zr, Cr, O and Fe elements in Ti551 titanium alloy primary ingots

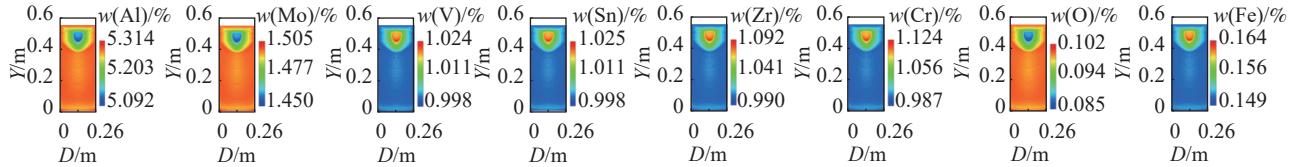


图 6 方案 1 的 Ti551 钛合金二次锭中 Al, Mo, V, Sn, Zr, Cr, O 和 Fe 元素分布云图

Fig. 6 Distribution contours of Al, Mo, V, Sn, Zr, Cr, O and Fe elements in Ti551 titanium alloy secondary ingots under case 1

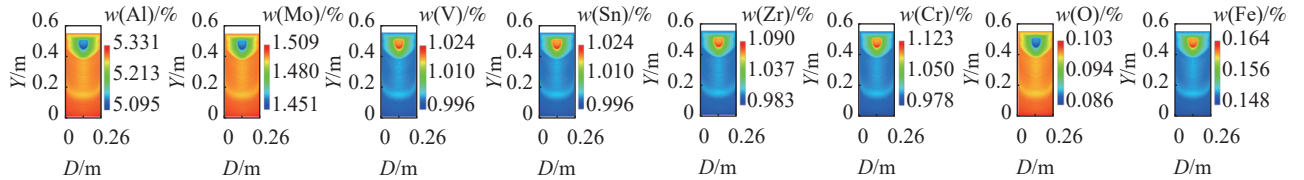
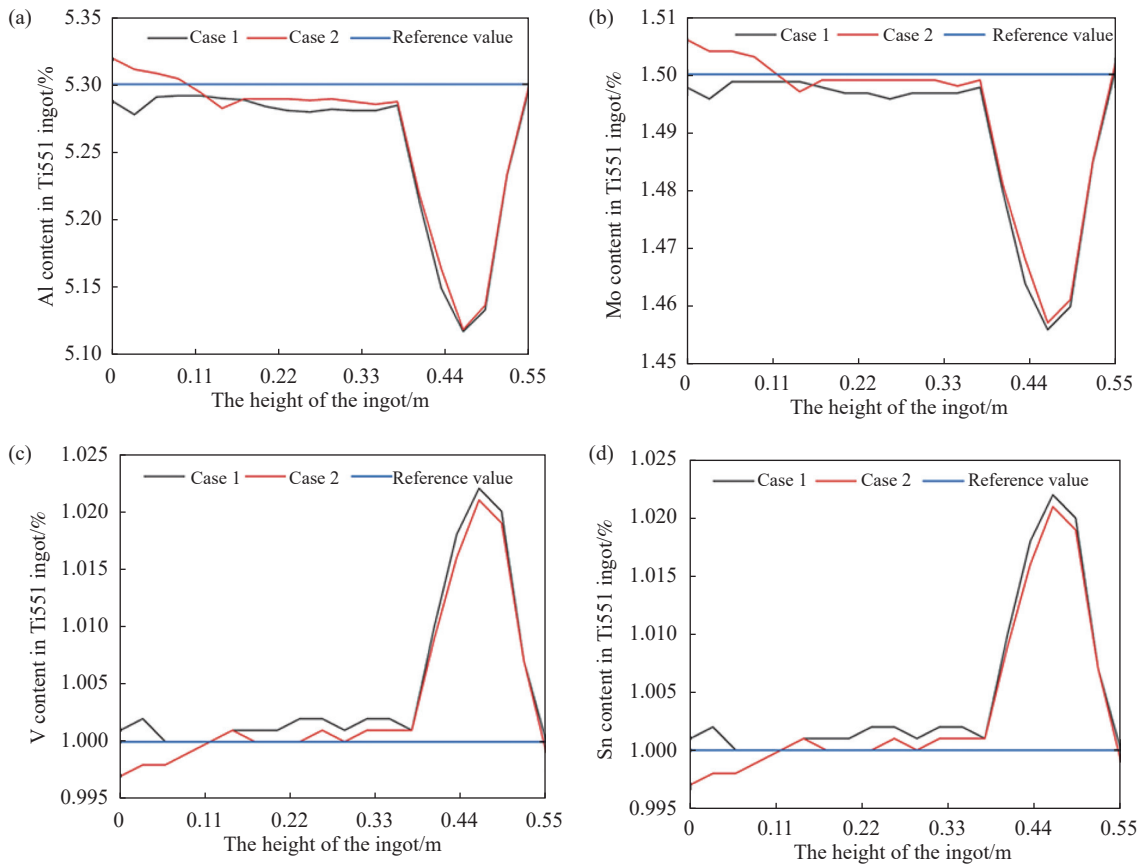


图 7 方案 2 的 Ti551 钛合金二次锭中 Al, Mo, V, Sn, Zr, Cr, O 和 Fe 元素分布云图

Fig. 7 Distribution contours of Al, Mo, V, Sn, Zr and Cr elements in Ti551 titanium alloy secondary ingots under case 2



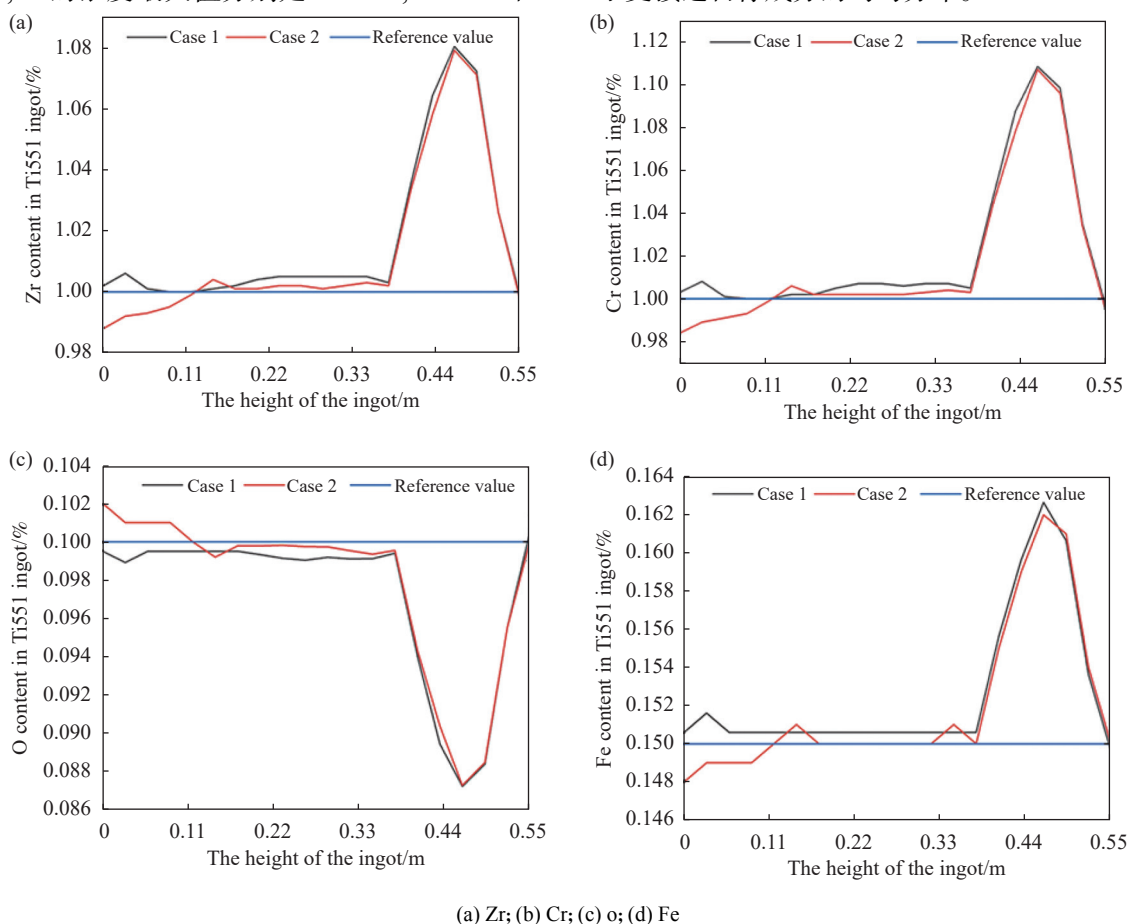
(a) Al; (b) Mo; (c) V; (d) Sn

图 8 方案 1 和方案 2 的 Ti551 钛合金二次锭中轴线上 Al, Mo, V 和 Sn 元素分布

Fig. 8 Distribution curves of Al, Mo, V and Sn elements in Ti551 titanium alloy secondary ingots at axial direction under case 1 and case 2

通过分析发现元素偏析集中在锭头的冒口区域,其次是锭尾区域,两种方案的偏析规律基本一致,然而仔细观察方案2的曲线可以发现,在铸锭的中部区域,各元素的浓度曲线更加靠近于标准的参考值,也就是说方案2对改善铸锭中间部分成分均匀性有着明显的优势;方案2铸锭的接缝处有着明显的浓度梯度,在曲线上也能清楚的观察到该处的元素浓度数值发生了较大的波动。分析方案1的数据可知,元素Al, Mo, O的浓度最大值分别是5.314%, 1.505%和0.102%,最小值分别是5.092%, 1.45%和0.085%,元素V, Sn, Zr, Cr, Fe的浓度最大值分别是1.024%, 1.025%, 1.092%, 1.124%和0.164%,最小值分别是0.998%, 0.998%, 0.99%, 0.987%和0.149%;分析方案2的数据可知,元素Al, Mo, O的浓度最大值分别是5.331%, 1.509%和

0.103%,最小值分别是5.095%, 1.451%和0.086%,元素V, Sn, Zr, Cr, Fe的浓度最大值分别是1.024%, 1.024%, 1.09%, 1.123%和0.164%,最小值分别是0.996%, 0.996%, 0.983%, 0.978%和0.148%。此外,以Mo元素为例,将方案1与方案2中Mo元素的演化对比分析发现:方案1中Mo元素沿轴向仍保持与一次锭相似的负偏析趋势,仅通过简单的头尾倒置实现了偏析区域的位置互换,未改变其分布格局。而方案2通过分切与头尾焊接,将一次锭的中部(成分相对均匀区域)置于电极两端,在二次熔炼中,Mo元素在熔池中经历了更充分的对流与扩散,尤其是电极中部的均匀段在熔炼过程中促进了Mo的重新分布。并且焊接接缝处的温度梯度与流动扰动进一步增强了Mo的迁移,从而在铸锭中部实现了更接近目标成分的均匀分布。



(a) Zr; (b) Cr; (c) o; (d) Fe

图9 方案1和方案2的Ti551钛合金二次锭中轴线上Zr, Cr, O和Fe元素分布

Fig. 9 Distribution curves of Zr, Cr, O and Fe elements in Ti551 titanium alloy secondary ingots at axial direction under case 1 and case 2

2.3 方案3和方案4的模拟结果分析

通过上述对方案1和方案2的研究,我们发现了该工艺对铸锭中部成分有着一定的均匀化优势,这也为熔炼长铸锭提高成材率提供了启发,即想获得更长且中部更加均匀的铸锭,便引出了方案3和

方案4。

同样基于上述一次锭的模拟数据和二次锭的熔炼工艺方案,将继续对一次锭进行二次熔炼,参照方案3和方案4的工艺方法,分别得到如下图10、11的二次锭Al, Mo, V, Sn, Zr, Cr, O和Fe元素分布云图。

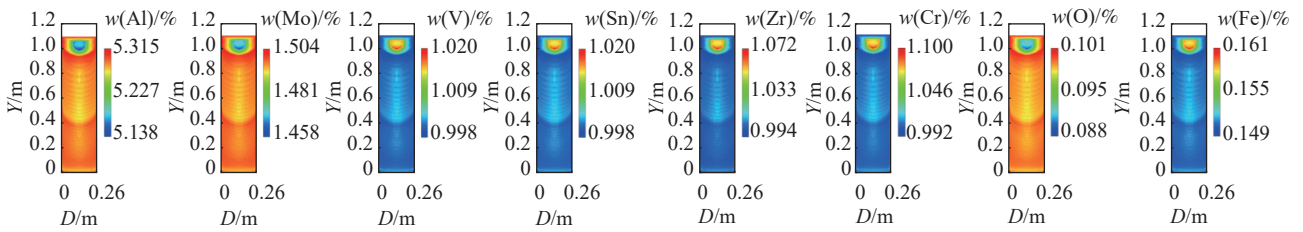


图 10 方案 3 的 Ti551 钛合金二次锭中 Al, Mo, V, Sn, Zr, Cr, O 和 Fe 元素分布云图

Fig. 10 Distribution contours of Al, Mo, V, Sn, Zr, Cr, O and Fe elements in Ti551 titanium alloy secondary ingots under case 3

从图 10、11 中可以明显看出方案 3 和 4 的合金元素变化趋势和一次锭是一致的, 值得注意的是图 10 中的元素分布趋势在铸锭的中部有着 1 处明显的浓度梯度, 而图 11 有两次浓度梯度波动, 为了

量化分析该情况, 于是在两个方案的铸锭的轴向自上而下各选取 40 个数据点, 绘制出 Al, Mo, V, Sn, Zr, Cr, O 和 Fe 元素分布线图, 如图 12、13 所示, 通过分析比较各曲线数据, 获得了各方案的变化规律。

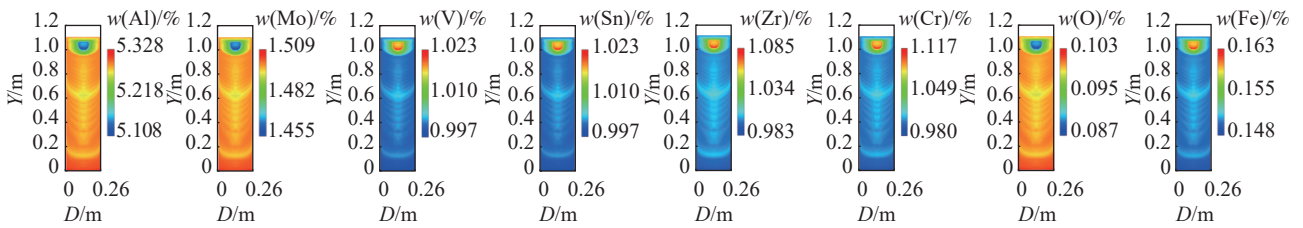
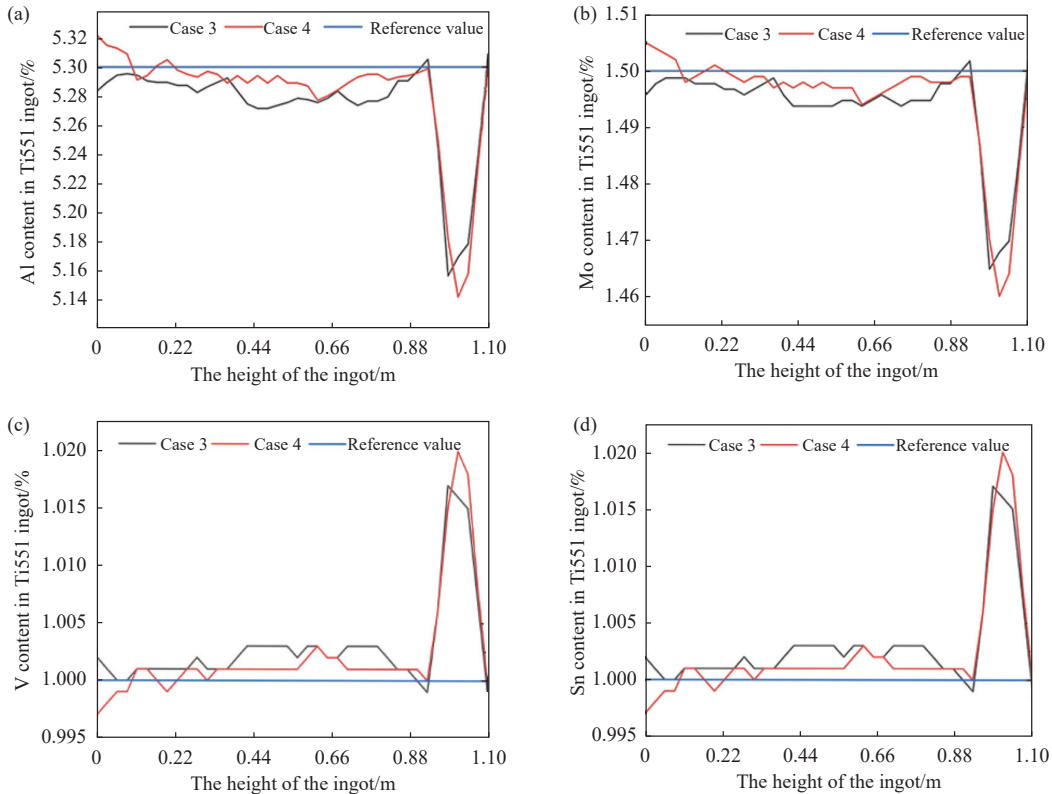


图 11 方案 4 的 Ti551 钛合金二次锭中 Al, Mo, V, Sn, Zr, Cr, O 和 Fe 元素分布云图

Fig. 11 Distribution contours of Al, Mo, V, Sn, Zr, Cr, O and Fe elements in Ti551 titanium alloy secondary ingots under case 4



(a) Al; (b) Mo; (c) V; (d) Sn

图 12 方案 3 和方案 4 的 Ti551 钛合金二次锭中轴线上 Al, Mo, V 和 Sn 元素分布

Fig. 12 Distribution curves of Al, Mo, V and Sn elements in Ti551 titanium alloy secondary ingots at axial direction under case 3 and case 4

通过分析发现元素偏析集中在锭头的冒口区域, 两种方案的偏析规律基本一致, 然而仔细

观察方案 4 的曲线可以发现, 在铸锭的中部区域, 各元素的浓度曲线更加靠近于标准的参考值, 也

就是说方案4对改善铸锭中间部分成分均匀性有着明显的优势;方案3和4铸锭的接缝处有着明显的浓度梯度,在曲线上也能清楚地观察到该处的元素浓度数值发生了较大的波动,然而方案4的成分波动相较于方案3更加平缓。分析方案3的数据可知,元素Al, Mo, O的浓度最大值分别是5.315%, 1.504%和0.101%,最小值分别是5.138%, 1.458%和0.088%,元素V, Sn, Zr, Cr, Fe的浓度最大值分别是1.02%, 1.02%, 1.072%, 1.1%和0.161%,最小值分别是0.998%, 0.998%, 0.994%, 0.992%和0.149%;分析方案4的数据可知,元素Al, Mo, O的浓度最大值分别是5.328%, 1.509%和0.103%,最小值分别是5.108%, 1.455%和0.087%,元素V, Sn, Zr, Cr, Fe的浓度最大值分别是1.023%,

1.085%, 1.117%和0.163%,最小值分别是0.997%, 0.997%, 0.983%, 0.98%和0.148%。此外,以Mo元素为例,研究方案3与方案4中Mo元素的分布机理:方案3仅通过两支一次锭的头尾对焊与翻转,虽增加了铸锭长度,但Mo的偏析模式仍“遗传”自一次锭,导致中部仍存在明显浓度梯度。方案4通过将一支一次锭切分并焊接到另一支一次锭两端,形成了“均匀段-偏析段-均匀段”的交替结构。在二次熔炼中,Mo元素在多个均匀段之间发生扩散与再分配,有效打破了原有的偏析累积路径。此外,接缝处的多次热循环与熔池流动促进了Mo的纵向迁移,使得整体浓度波动更为平缓,尤其是在铸锭中段实现了更好的成分均质化。

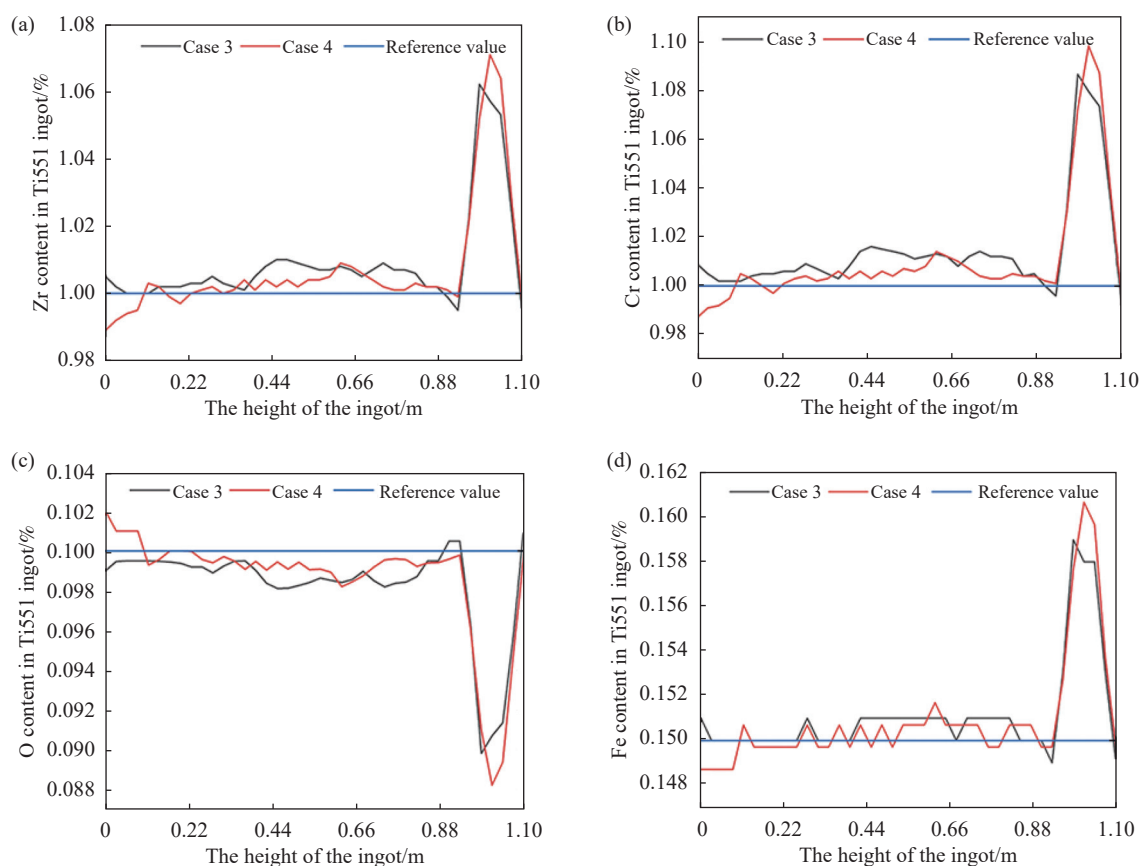


图13 方案3和方案4的Ti551钛合金二次锭中轴线上Zr, Cr, O和Fe元素分布

Fig. 13 Distribution curves of Zr, Cr, O and Fe elements in Ti551 titanium alloy secondary ingots at axial direction under case 3 and case 4

3 结论

采用MeltFlow-VAR软件对Ti551钛合金进行凝固偏析模拟,利用空间坐标变换的熔炼方法对铸锭的合金元素分布深入研究,并得出以下结论:

1) Ti551合金一次锭存在明显的元素偏析现象,Al、Mo、O元素呈现负偏析,冒口处含量降低、底部

浓度略高;V、Sn、Zr、Cr、Fe元素呈现正偏析,元素分布趋势与负偏析元素相反,偏析问题集中在锭头冒口和锭尾区域。

2) 对比4种熔炼方案,分切焊接类方案(方案2、方案4)对改善铸锭中部成分均匀性效果更优,其中方案2能使铸锭中部元素浓度更接近标准

参考值, 方案 4 可让长尺寸铸锭的元素浓度波动更平缓。

3) 传统的头尾倒置法仅实现偏析区域位置互换, 未从根本上改善成分均匀性; 而通过空间坐标变换的分切、对接、焊接等方式, 能够打破一次锭原有的偏析分布格局, 有效提升 Ti551 合金铸锭的成分

均匀性和成材率。

4) Mo 元素作为高熔点、高密度元素, 其负偏析行为在 VAR 熔炼中显著。通过空间坐标变换的分切、焊接与重组, 可有效改变 Mo 在熔池中的传输路径与再分布机制, 从而在铸锭中部实现更好的成分均匀性, 为高熔点元素偏析控制提供了新思路。

参考文献

- [1] ZHAO Y Q, CHANG H, LI Z C, *et al.* Ship-use titanium alloys innovatively developed by northwest institute for nonferrous metal research[J]. *Titanium Industry Progress*, 2003(6): 12-16.
(赵永庆, 常辉, 李佐臣, 等. 西北有色院创新研制的船用钛合金[J]. *钛工业进展*, 2003(6): 12-16.)
- [2] YANG P B. Application of titanium alloys in ships[J]. *Guangdong Shipbuilding*, 2005(3): 30-32.
(杨蓬勃. 钛合金在船舶上的应用[J]. *广东造船*, 2005(3): 30-32.)
- [3] ZHAO Y Q. The new main titanium alloys used for ship building developed in China and their applications[J]. *Materials China*, 2014, 33(7): 398-404.
(赵永庆. 我国创新研制的主要船用钛合金及其应用[J]. *中国材料进展*, 2014, 33(7): 398-404.)
- [4] LIU X H, WU C, HE W P, *et al.* Study on strengthening mechanism of Ti80 alloy based on microstructure regulation[J]. *Development and Application of Materials*, 2024, 39(4): 28-37.
(刘向宏, 吴聪, 和卫平, 等. 基于显微组织调控的 Ti80 合金强化机理研究[J]. *材料开发与应用*, 2024, 39(4): 28-37.)
- [5] LI X J. Vacuum consumable arc furnace melting technology and ingot quality issues[J]. *Titanium Industry Progress*, 2001(3): 16-22.
(李献军. 真空自耗电弧炉熔炼技术和铸锭质量问题[J]. *钛工业进展*, 2001(3): 16-22.)
- [6] ZHAO X H, LI J S, YANG Z J, *et al.* Numerical simulation of temperature field during vacuum consumable arc melting of titanium alloys[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2010, 30(11): 1001-1004.
(赵小花, 李金山, 杨治军, 等. 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.)
- [7] LEI W G, ZHAO Y Q, HAN D, *et al.* Development status of titanium and titanium alloy melting technology[J]. *Materials Review*, 2016, 30(5): 101-106.
(雷文光, 赵永庆, 韩栋, 等. 钛及钛合金熔炼技术发展现状[J]. *材料导报*, 2016, 30(5): 101-106.)
- [8] YANG H, YANG X K, DU C, *et al.* Research progress of vacuum melting technology for titanium and titanium alloys[J]. *World Nonferrous Metals*, 2019(8): 1-4.
(杨欢, 杨晓康, 杜晨, 等. 钛及钛合金真空熔炼技术研究进展[J]. *世界有色金属*, 2019(8): 1-4.)
- [9] PATEL A D, MINISANDRAM R S, EVANS D G. Modeling of vacuum arc remelting of alloy 718 ingots[J]. *Superalloys*, 2004: 917-924.
- [10] LIU Z, ZHOU B B, MAO L L, *et al.* Numerical simulation of VAR melting of TC18 titanium alloy ingots based on MeltFlow-VAR[J]. *World Nonferrous Metals*, 2024(10): 32-36.
(刘钊, 周兵兵, 毛玲玲, 等. 基于 MeltFlow-VAR 的 TC18 钛合金铸锭 VAR 熔炼的数值模拟[J]. *世界有色金属*, 2024(10): 32-36.)
- [11] YU J Y, LUO K, GENG N T, *et al.* Exploring the relationship between Al55 intermediate alloy and composition uniformity of TC4 titanium alloy ingots via MeltFlow-VAR simulation process[J]. *Titanium Industry Progress*, 2025(2): 9-15.
(于继洋, 罗坤, 耿乃涛, 等. 基于 MeltFlow-VAR 模拟工艺探讨 Al55 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(2): 9-15.)
- [12] LI T, HUA Q, LIU H, *et al.* Study on melting process of TC17 titanium alloy ingots based on MeltFlow-VAR[J]. *Special Steel Technology*, 2024, 30(2): 12-16.
(李彤, 华倩, 刘华, 等. 基于 MeltFlow-VAR 的 TC17 钛合金铸锭熔炼工艺研究[J]. *特钢技术*, 2024, 30(2): 12-16.)
- [13] LUO K, GENG N T, YOU Y J, *et al.* Optimization of VAR melting process for TB9 titanium alloy based on numerical simulation[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2024, 45(3): 25-32.
(罗坤, 耿乃涛, 游彦军, 等. 基于数值模拟的 TB9 钛合金 VAR 熔炼工艺优化[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2024, 45(3): 25-32.)
- [14] HUA Q, LI T, WANG C N, *et al.* Study on melting process of Ti2AlNb alloy ingots based on MeltFlow-VAR[J]. *Special Steel Technology*, 2024, 30(3): 33-35.
(华倩, 李彤, 王超南, 等. 基于 MeltFlow-VAR 的 Ti2AlNb 合金铸锭熔炼工艺研究[J]. *特钢技术*, 2024, 30(3): 33-35.)
- [15] Innovative Research Inc. COMPACT-AR Reference Manual[EB/OL]. [2026-02-01]. <http://www.inres.com>.
- [16] Kelkar K M, Patankar S V, Mitchell A, *et al.* Computational Modeling of the Vacuum Arc Remelting (VAR) Process Used for the Production of Ingots of Titanium Alloys [C]//The 11th World Conference on Titanium (Ti-2007) Organizing Committee. Ti-2007 Science and Technology. Kyoto: The Japan Institute of Metals, 2007.