

# 基于 VAR 数值模拟的新型 Ti551 钛合金熔炼工艺研究

罗坤<sup>1,2</sup>, 郑友平<sup>1,2</sup>, 耿乃涛<sup>1</sup>, 游彦军<sup>2</sup>, 李京懋<sup>2\*</sup>

(1. 攀钢集团研究院有限公司, 钒钛资源综合利用国家重点实验室, 四川 攀枝花 617000; 2. 成都先进金属材料产业技术研究院股份有限公司, 四川 成都 610300)

**摘要:** 为满足深海装备对耐压材料的需要, 围绕新型  $\alpha+\beta$  钛合金 Ti551 的熔炼工艺展开系统研究, 在数值模拟优化熔炼参数的基础上, 成功实现了从 150 kg 试验模型到 3 t 级工业铸锭的放大制备, 并采用真空自耗电弧熔炼 (VAR) 工艺进行验证, 最终获得纯净度高、组织均匀性良好的 3 t 级 Ti551 工业铸锭。研究重点考察了熔炼电流与稳弧电流对铸锭成分均匀性和熔池形貌的影响, 通过五种不同熔炼工艺的对比试验, 得出在熔炼电流为 21~24 kA、稳弧电流为 15 A、稳弧交流时间为 30 s 的优化工艺条件下, 所获效果最优的结论。基于该工艺制备的 3 t 工业铸锭表面光洁, 无冷隔、皮下气孔及夹渣等缺陷, 成分均匀性良好, 其中 Cr、Fe、Sn、V、Zr 等关键元素的极差均不超过 0.03, 未出现明显宏观偏析, 综合性能满足深海装备对原材料的严苛要求。

**关键词:** 新型 Ti551 钛合金; 真空自耗电弧熔炼; 数值模拟; 成分均匀

中图分类号: TF823, TG146

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2026)02-0029-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2026.02.004

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听语音  
与作者互动  
聊科研

## A study on the melting process of novel Ti551 titanium alloy using VAR numerical simulation

LUO Kun<sup>1,2</sup>, ZHENG Youping<sup>1,2</sup>, GENG Naitao<sup>1</sup>, YOU Yanjun<sup>2</sup>, LI Jingmao<sup>2\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Pangang Group Research Institute Co., Ltd., Panzhihua 617000, Sichuan, China; 2. Chengdu Advanced Metal Materials Industrial Technology Research Institute Co., Ltd, Chengdu 610300, Sichuan, China)

**Abstract:** To meet the demand for pressure-resistant materials in deep-sea equipment, this study investigated the melting process of a novel  $\alpha+\beta$  titanium alloy Ti551 based on Vacuum Arc Remelting (VAR) numerical simulation. By optimizing parameters through numerical simulation, the melting process was directly scaled up from a 150 kg model to produce 3-ton industrial-scale ingots via VAR. The results demonstrate the successful production of high-purity, highly homogeneous 3-ton Ti551 industrial ingots. The study focused on the effects of melting current and arc-stabilizing current on compositional homogeneity and pool profile, identifying reduced melting current as the optimal parameter. Through comparative experiments of five different melting processes, it was concluded that the optimized process conditions—a melting current of 21~24 kA, an arc-stabilizing current of 15 A, and an AC arc stabilization time of 30 s—yielded the best results. Based on this optimized process, the produced 3-ton in-

收稿日期: 2025-11-17; 修回日期: 2026-01-22; 接受日期: 2026-02-04

基金项目: 国家重点研发计划: 深海特种装备用高均质超大尺寸钛合金构件制造关键技术(2024YFB3714200)。

作者简介: 罗坤, 1996 年出生, 男, 重庆人, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为钛合金熔炼, E-mail: 1411540211@qq.com;

\*通信作者: 李京懋, 1992 年出生, 男, 四川渠县人, 博士研究生, 工程师, 研究方向为钛合金加工, E-mail: lijn2016@163.com。

dustrial ingots exhibited a smooth surface free from defects such as cold shuts, subsurface porosity, and slag inclusions. The ingots demonstrated good compositional uniformity, with the range of key elements including Cr, Fe, Sn, V, and Zr all within 0.03, indicating no significant macrosegregation. The overall properties meet the stringent requirements for raw materials used in deep-sea equipment.

**Key words:** novel Ti551 titanium alloy; vacuum arc remelting; numerical simulation; composition uniformity

## 0 引言

钛及钛合金因其卓越的比强度(强度 - 密度比)和优异的耐腐蚀性能,在海洋工程结构材料中占据重要地位,广泛应用于深海装备、舰船船体、海上平台等关键领域<sup>[1-5]</sup>。研究表明,深海装备耐压结构用钛合金需要具有中等强度、优异的韧性和高耐腐蚀性。

现有耐压结构材料用钛合金多为 Ti62A、TC4 ELI 和 Ti80 等牌号<sup>[6-7]</sup>。这三种合金中 Ti62A 为高强度钛合金,其屈服强度最高,比 TC4 ELI 高出约 20%,这对提高潜深有优势,但是由于具有较多合金元素,其热加工窗口窄,对锻造、轧制、焊接等成型工艺的控制要求苛刻且成本较高;TC4 ELI 和 Ti80 同属中强高韧钛合金,TC4 ELI 的优势在于超低间隙元素带来的优良韧性和焊接性,但是屈服强度相对较低,在追求更大潜深或更大容积耐压舱时面临挑战<sup>[8-10]</sup>。Ti80 作为近  $\alpha$  型合金,其屈服强度相对 TC4 ELI 更低,且制备困难,成材率低。

现有中等强度海洋用钛合金在综合力学性能、大规模应用经济性方面均难以完全满足下一代大型深海装备对耐压结构材料的更高要求<sup>[11-12]</sup>。为此,中国科学院金属研究所在 Ti62A 合金(名义成分为 Ti-6Al-3Mo-2Sn-2Zr-1Cr-1V)的基础上,通过适当降低  $\beta$  稳定元素含量,开发出新型 800 MPa 级海洋结构用钛合金 Ti551(名义成分 Ti-5Al-1.5Mo-1V-1Cr-1Sn-1Zr)。在保留一定强度的同时改善了工艺成形性,降低了加工成本,展现出成为新一代深海耐压结构材料的潜力。根据中国有色金属标准质量信息网公布的钛合金牌号征求意见稿显示,Ti551 在同等屈服强度条件下,冲击吸收能量较传统的 Ti80 合金提升约 20%,制备成本降低 20% 以上。

作为一种全新设计的钛合金,国内外未见其相关工艺制备的研究报道。为实现其工程应用,需尽快开展工业级熔炼工艺研究。真空自耗电弧熔炼

(VAR)是制备大规格钛合金铸锭的主流方法<sup>[13-16]</sup>,但 Ti551 各元素物性差异大,在凝固过程中易产生宏观偏析和夹杂缺陷,对铸锭均匀性与稳定性控制提出挑战。传统“实验室-小试-中试-工业试制”的研发流程迭代慢、成本高<sup>[17-20]</sup>。

为此,笔者围绕制备高纯净、高均匀、高稳定性大规格 Ti551 铸锭的目标,采用数值模拟与 VAR 工艺相结合,通过模拟熔炼电流、稳弧参数等对熔池与溶质分布的影响,优化工艺条件。构建了“中试模拟-试验校正-模型放大”的新路径,首先,通过 150 kg 级小锭试验优化工艺,为模拟提供校准数据;将校准后的熔炼模型从 150 kg 直接放大至 3 t 工业铸锭规模,基于校正模型对 3 t 铸锭 VAR 过程进行多参数模拟,揭示关键工艺参数的影响规律,指导工艺制定,从而显著降低开发成本、加快研制进程。最终通过工业试制确定稳定工艺,为 Ti551 在大型深海装备中的规模化应用提供材料基础。

## 1 试验部分

### 1.1 试验材料

试验原材料由 0A 级小粒海绵钛、铝钒合金 (AlV55)、钛钼合金(Ti-32Mo)、钛锡合金(Ti-80Sn)、铝铬合金(Al-80Cr)、海绵锆(HZr-1)、钛铁(TiFe32)、钛白粉( $\text{TiO}_2$ )、铝粒(1050)组成,其中 150 kg 级一次锭规格为 $\text{Ø}190$  mm,二次锭规格为 $\text{Ø}250$  mm,成品锭规格为 $\text{Ø}310$  mm;

### 1.2 熔炼工艺模型建立及优化

采用 MeltFlow-VAR 软件建模并验证 150 kg Ti551 钛合金铸锭熔炼结果,模型为轴对称数学模型,运用有限体积法进行模拟,对电磁、流体、传热、凝固及元素偏析现象进行预测,表 1 为计算采用的 Ti551 钛合金物性参数,1 873 K 时,合金的导热率为  $0.3172 \times 10^2$  W/m,比热为  $0.947 \times 10^3$  J/kg,物性参数来自 MeltFlow-VAR 软件自带数据库计算预测。

在 150 kg Ti551 钛合金铸锭熔炼结果分析、优化的基础上,将模型放大,利用 MeltFlow-VAR 仿真

模拟软件对工业 3 t 级 Ti551 钛合金 VAR 第三次熔炼过程进行模拟, 模拟的工艺参数如表 2 所示, 以工艺 1 为基准工艺, 工艺 2、3 是探究熔炼电流对铸

锭的元素分布和熔池形状等的影响, 工艺 4、5 是探究稳弧电流对铸锭的元素分布和熔池形状等的影响。

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

Liquid density/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	Solid density/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	Volume expansion coefficient/ $\times 10^5/\text{K}^{-1}$	Solidus temperature/K	Liquidus temperature/K	Latent heat/ $\times 10^5/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1})$	Electrical conductivity/ $\times 10^{-5}/(\text{A}\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{m}^{-1})$
4 060	4 510	9.35	1 947	2 000	3.20	8.5

表 2 3 t Ti551 钛合金第三次 VAR 熔炼的不同模拟计算工艺参数  
Table 2 Different simulation calculation process parameters for the third VAR melting of 3 t Ti551 titanium alloy

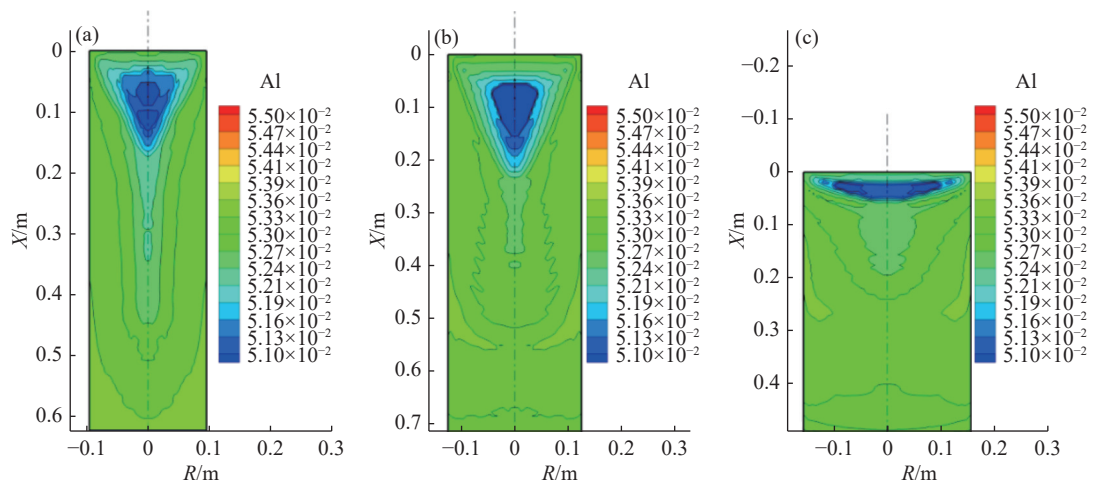
	Melting condition	Electric current/kA	Arc stabilizing current /A	Arc stabilizing AC time/s
Process 1	Benchmark process	23 ~ 26	15	30
Process 2	Increase melting current	25 ~ 28	15	30
Process 3	Reduce melting current	21 ~ 24	15	30
Process 4	Increase arc stabilizing current	23 ~ 26	20	30
Process 5	Reduce arc stabilizing current	23 ~ 26	10	30

## 2 结果与讨论

### 2.1 150 kg Ti551 铸锭制备和数值模拟仿真模型验证

Ti551 钛合金 VAR 熔炼过程中需要三次熔炼, 第一次熔炼主要目的是去除夹杂物, 第二次熔炼目的为调控成分, 第三次熔炼是为了进一步控制成分

均匀性。使用软件计算了 150 kg Ti551 三次 VAR 熔炼过程中铸锭的 Al 元素分布, 如图 1 所示,  $R$  为径向距离(m),  $X$  为距离铸锭顶部距离(m)。由图 1 可知, 三次锭的元素均匀性比一次锭、二次锭的好, 一次锭、二次锭的冒口位置深, 元素偏析面积大, 三次锭冒口浅, 元素偏析面积少, 三次锭中 [Al] 元素的成分偏析约为 5.1% ~ 5.39%。



(a)一次锭; (b)二次锭; (c)三次锭

图 1 MeltFlow-VAR 模拟计算 150 kg Ti551 熔炼中各铸锭的 Al 元素分布

Fig. 1 MeltFlow-VAR simulation calculation of Al element distribution of each ingot in 150 kg Ti551 smelting

采用与图 1 Meltflow 计算相同的工艺, 开展了 150 kg Ti551 铸锭 VAR 熔炼, 其制备流程如图 2 所示。由图 2 可知, 将海绵钛、铝钒合金等原料压制

成电极块后焊接成电极, 经过三次 VAR 熔炼后获得 Ti551 铸锭。由于 Ti551 钛合金中合金元素较多, 不同元素的物理化学性质存在明显差异, 在凝固过

程中,元素会在固相和液相中重新分配,导致铸锭不同部位成分不均匀。因此,在第二、三次 VAR 熔炼时,分别将一次锭、二次锭底部和头部颠倒作为下

一次熔炼的电极,以减小铸锭不同部位成分不均匀性,Ti551 钛合金在三次熔炼过程中使用的铜坩埚直径不断增大,形成的铸锭直径也相应增大。

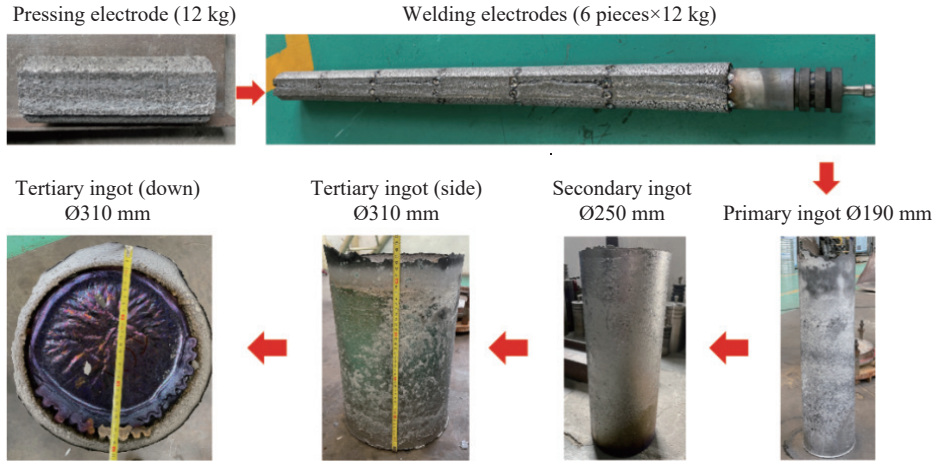
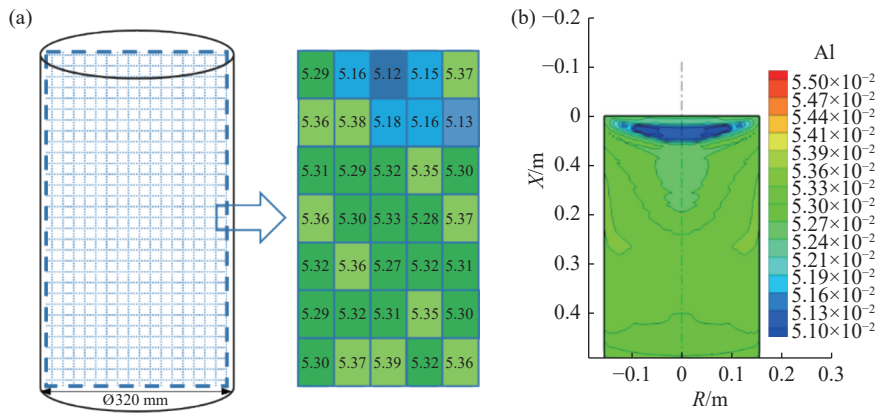


图 2 VAR 熔炼制备 150 kg Ti551 钛合金铸锭的流程  
Fig. 2 Process of preparing 150 kg Ti551 titanium alloy ingot by VAR melting

采用相同的工艺对 VAR 实际熔炼和 Melt-flow 模拟计算的 150 kg Ti551 结果进行了对比,对比结果如图 3 所示,图中  $R$  为径向距离(m), $X$  为距离铸锭顶部距离(m)。从图 3(a)可知,Al 元素在实际试制的铸锭中部和底部分布较均匀,但是在铸锭

顶部存在元素偏析,从芯部到边部,Al 元素含量呈增加趋势,熔炼的三次锭  $w[Al]=5.12\% \sim 5.39\%$ ;这与图 3(b)的计算结果相符:在铸锭顶部,Al 元素从芯部到边部逐渐增加,呈现正偏析趋势,其余部位 Al 元素分布比较均匀。



(a) VAR; (b)数值模拟计算

图 3 VAR 实际和数值模拟计算的 150 kg Ti551 结果对比  
Fig. 3 Comparison between actual results and numerical simulation of VAR for 150 kg Ti551

偏析是在合金凝固过程中的常见现象,遵从溶质组元的平衡分配常数  $K_0(K_0=C_s / C_l)$ ,式中  $C_s$  是溶质在固相中的平衡浓度,  $C_l$  是溶质在液相中的平衡浓度,单位均为 mol/L。Ti551 钛合金中 Al 元素的平衡分配常数  $K_0$  为 1.13,因此 Al 元素会在钛合金中正偏析,图 3(a)(b)均遵从这一趋势。比较图 3(a)和 3(b)可知,Meltflow 模拟计算 Ti551 合金元素偏析趋势与实测结果基本一致,可以用 Meltflow 将

150 kg 计算模型放大,为 3 t 级 Ti551 钛合金 VAR 熔炼工艺的制定与优化提供技术指导和理论依据。

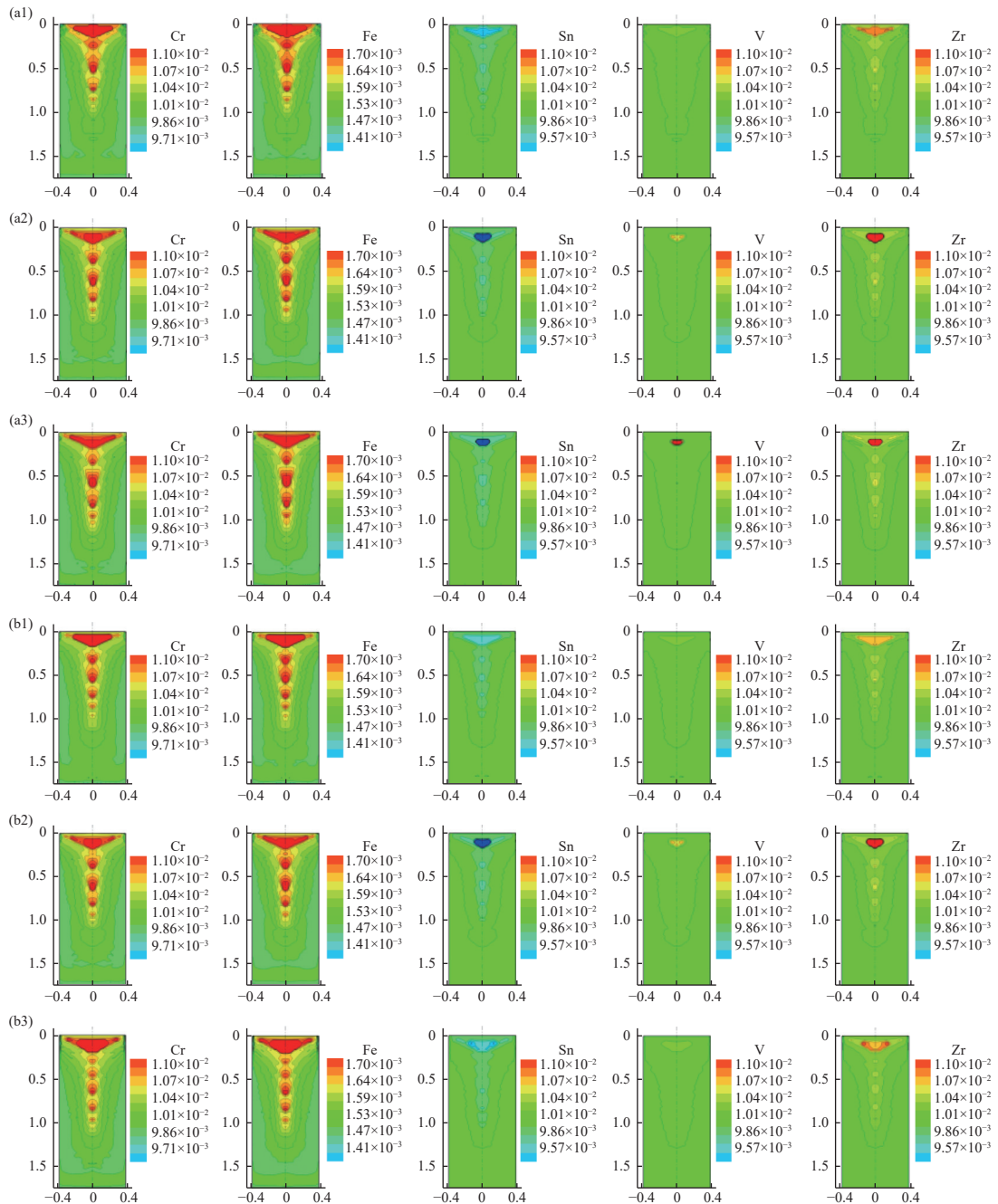
### 2.2 Ti551 钛合金 3 t 铸锭 VAR 熔炼工艺参数对元素偏析的数值模拟分析

150 kg Ti551 钛合金的 Melt-flow 计算结果和 VAR 熔炼结果趋势一致,验证了数值模拟仿真模型的准确性;将该模型放大为 3 t 模型,在此基础上模拟研究熔炼电流以及稳弧电流这两种对大型工业铸

锭元素成分偏析更具影响的参数。在大型铸锭的 VAR 熔炼时, 熔炼电流的大小决定了金属熔化速率和熔池温度, 更影响熔池深度和形状等, 熔池深度和形状与元素成分偏析直接相关; 稳弧电流则通过调控电磁搅拌强度影响熔池流场与温度分布, 对铸锭

成分均匀化和结晶细化有重要作用。

图 4 分别展示了 Meltflow 模拟计算熔炼电流、稳弧电流对 Ti551 钛合金三次铸锭中 Cr、Fe、Sn、V、Zr 元素分布的影响, 图中  $R$  为径向距离(m),  $X$  为距离铸锭顶部距离(m)。



熔炼电流: (a1) 工艺 3, (a2) 工艺 1, (a3) 工艺 2; 稳弧电流: (b1) 工艺 5, (b2) 工艺 1, (b3) 工艺 4

图 4 数值模拟计算熔炼电流和稳弧电流情况下 3 t Ti551 钛合金铸锭中合金元素的分布

Fig. 4 Numerical simulation of the distribution of alloy elements in a 3 t Ti551 titanium alloy ingot under melting current and arc stabilization current conditions

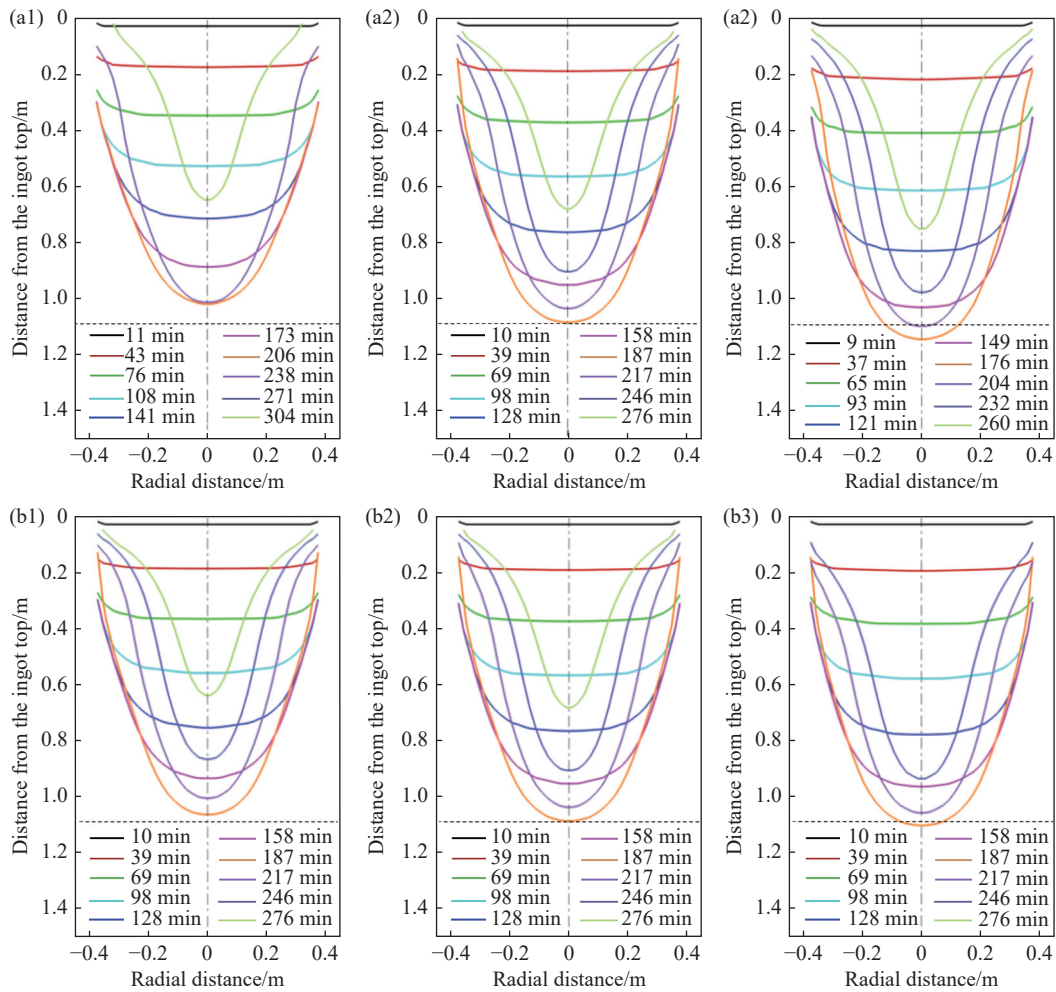
由图 4(a1)~(a3) 可知, 随着熔炼电流的增加, Cr 和 Fe 元素向铸锭芯部偏析聚集, 芯部偏析面积

呈增大趋势, Sn 元素在铸锭顶端芯部位置的正偏析加重, V 和 Zr 元素的负偏析加重, 而且 Sn、V 和 Zr

元素在减少熔炼电流的铸锭中,成分均匀性较良好,所以随着熔炼电流的增加,铸锭元素均匀性变差。比较工艺 1、2、3,工艺 3 的元素偏析小、成分极差较低,利于 Ti511 第三次 VAR 熔炼时获得质量良好的铸锭。由图 4(b1)~(b3)可知,随着稳弧电流的增加,Cr 和 Fe 元素的芯部偏析面积加剧。比较减少稳弧电流工艺(工艺 5)、增加稳弧电流(工艺 4)与基准工艺(工艺 1)的铸锭偏析情况,发现随着稳弧电流的减少,Sn、V 和 Zr 元素在顶部芯部偏析程度较少,具有更好的元素均匀性,工艺 5 较好。

熔池深度直接影响铸锭的结晶情况,从而影响铸锭的品质。在 VAR 熔炼过程中,熔池越宽(即

越饱满),表明熔池到边情况越好,越有利于提升铸锭的表面质量;同时,为得到较好的内部质量,希望得到“扁平状”熔池,即熔池不能太深。图 5 是 Meltflow 模拟计算熔炼电流和稳弧电流对熔池深度的影响,液相分数为 0.1。从图 5(a1)~(a3)可知,随着熔炼电流的增加,熔池深度增加,工艺 3 熔池最浅,有利于获得质量良好的铸锭;从图 5(b1)~(b3)可知,随着稳弧电流的增加,熔池深度增加,工艺 5 熔池最浅,有利于获得质量良好的铸锭。而少熔炼电流(工艺 3)铸锭的熔池深度比少稳弧电流(工艺 5)的更浅,更加有利于提升铸锭品质,因此最佳工艺为工艺 3。



熔炼电流: (a1) 工艺 3, (a2) 工艺 1, (a3) 工艺 2; 稳弧电流: (b1) 工艺 5, (b2) 工艺 1, (b3) 工艺 4

图 5 数值模拟计算熔炼电流和稳弧电流对熔池深度的影响

Fig. 5 Effect of melting current and arc-stabilizing current on pool depth calculated by numerical simulation

MeltFlow-VAR 模拟计算结果表明:随着熔炼电流和稳弧电流的增加,3 t Ti551 钛合金铸锭的元素均匀性变差,熔池深度加深,减少熔炼电流(工艺 3)和减少稳弧电流(工艺 5)所得铸锭的元素成分偏析控制较好,但工艺 3 效果更佳,因此最佳 3 t

Ti551 钛合金铸锭的 VAR 熔炼工艺为工艺 3。需要注意的是,熔炼电流与稳弧电流存在交互效应,工艺 3 的使用要考虑到现场生产的一些限制。

### 2.3 3 t Ti551 工业试制

依据模拟计算结果以及实际生产成本,采用工

艺 3 开展 3 t 工业级 Ti551 钛合金的 VAR 熔炼, 其结果如图 6 所示。从图 6 可看出, Ti551 电极无氧化、无大面积黑色挥发物, Ti551 三次锭表面质量光滑、无黑斑, 经表面扒皮后质量良好, 无皮下气

孔、夹渣等缺陷, 进行超声探伤后, 切除锭底起弧端、冒口。

对 Ti511 扒皮后光锭的上、中、下三个部位的各侧面 4 点进行取样, 取样示意图如图 7 所示。



(a) 电极; (b) 铸锭; (c) 扒皮后光锭

图 6 3 t 工业级 Ti551 钛合金的电极、铸锭及扒皮后光锭

Fig. 6 Electrode, ingot and peeled ingot of 3 t industrial grade Ti551 titanium alloy

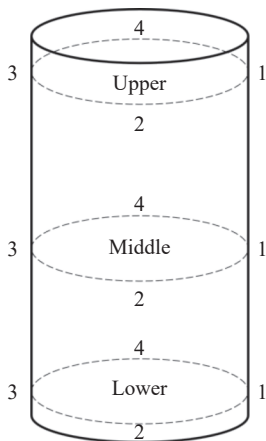


图 7 Ti551 铸锭侧面多点(12 点)取样方案示意

Fig. 7 Schematic diagram of multi-point (12 points) sampling scheme on the side of Ti551 ingot

表 3 是 Ti551 钛合金铸锭 Cr、Fe、Sn、V、Zr 元素检测分析结果。

表 3 Ti551 钛合金铸锭成分分析结果

Table 3 Composition analysis results of Ti551 titanium alloy ingot %

	Cr	Fe	Sn	V	Zr
Standard value	0.8~1.2	≤0.20	0.8~1.2	0.8~1.2	0.8~1.2
Maximum value	0.96	0.16	1.04	1.03	1.01
Minimum value	0.93	0.15	1.03	1.00	0.98
Average value	0.96	0.15	1.04	1.02	1.00
Extreme difference	0.03	0.01	0.01	0.03	0.03

从表 3 可知, 铸锭成分均匀性良好, Cr、Fe、Sn、V、Zr 元素的检测含量均在标准值范围内, 且元素极差≤0.03, 这表明模拟计算优化后的工艺适用于大规格 Ti551 钛合金铸锭的工业化生产。

### 3 结论

1) 通过 MeltFlow-VAR 软件模拟计算 150 kg Ti551 钛合金的主元素成分分布结果, 将其与 VAR 熔炼实测结果比较, 验证了数值模拟仿真模型的准确性; 再将模型放大, 设计了不同的 3 t 级 Ti551 钛合金工业锭 VAR 熔炼工艺, 通过模拟计算优化了工艺, 进行工业试制获得了质量良好, 无皮下气孔、夹渣等缺陷的 3 t 铸锭, 铸锭成分均匀性良好, Cr、Fe、Sn、V、Zr 元素极差≤0.03。

2) 模拟计算结果表明, 随着熔炼电流和稳弧电流的增加, 熔池深度增加, 铸锭成分均匀性变差, 减少熔炼电流(工艺 3)和减少稳弧电流(工艺 5)均可以获得较好熔炼质量, 最佳 3 t 工业级 Ti551 钛合金铸锭的 VAR 熔炼工艺为三次熔炼, 且减少熔炼电流(工艺 3), 熔炼电流为 21~24 kA, 稳弧电流为 15 A, 稳弧交流时间为 30 s。

### 参考文献

[1] LI Y H, ZHANG W X, CHEN X L, *et al.* Research and application status of titanium alloys for marine engineering[J]. Titanium Industry Progress, 2022, 39(1): 43-48.  
(李永华, 张文旭, 陈小龙, 等. 海洋工程用钛合金研究与应用现状[J]. 钛工业进展, 2022, 39(1): 43-48.)

[2] WILLIAMS J C, BOYER R R. Opportunities and issues in the application of titanium alloys for aerospace components[J].

- Metals-Open Access Metallurgy Journal, 2020, 10(6): 705.
- [ 3 ] ORYSHCHENKO A S, LEONOV V P, MIKHAILOV V I, *et al.* Titanium in shipbuilding and other technical applications[J]. Matic Web of Conferences, 2020, 321: 02001.
- [ 4 ] NAJAFIZADEH M, YAZDI S, BOZORG M, *et al.* Classification and applications of titanium and its alloys: A review[J]. Journal of Alloys and Compounds Communications, 2024, 3: 100019.
- [ 5 ] YANG J, ZHANG K F, CAO J H, *et al.* Research on preparation of oversized TC4 ELI titanium alloy ingots by VAR[J]. Titanium Industry Progress, 2023, 40(4): 1-5.  
(杨健, 张开发, 曹江海, 等. VAR 熔炼制备超大规格 TC4 ELI 钛合金铸锭研究[J]. 钛工业进展, 2023, 40(4): 1-5.)
- [ 6 ] NIMER S, EVERETT R K, ZUPAN M. Microtensile characterization of titanium 5111 alloy mechanical properties and comparison of failure mechanisms at two microstructural length scales[J]. Materials & Design, 2019, 183: 108081.
- [ 7 ] LIU H, LU L, ZHANG Y, *et al.* Comparative study of the mechanical properties and fracture mechanism of Ti-5111 alloys with three typical microstructures[J]. Metals, 2024, 14(6): 722.
- [ 8 ] WANG Z F, CHOLLOCOOP N, BRIANT C L, *et al.* Hydride formation and its effects on mechanical properties of Ti-5111[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2001, 32(6): 1552.
- [ 9 ] CZYRYCA E J, WELLS M E, TRAN K. Titanium alloy Ti-5111 for naval applications[J]. Proceedings, Advanced Marine Materials: Technology & Applications, 2003: 41-49.
- [ 10 ] CHANG M C, LUO C W, HUANG M S, *et al.* High-temperature microstructural characteristics of a novel biomedical titanium alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 499(2): 171-175.
- [ 11 ] BEEN J, FALLER K. Using Ti-5111 for marine fastener applications[J]. JOM, 1999, 51(6): 21-24.
- [ 12 ] LI M Y, YANG S F, LIU W, *et al.* Research process on segregation and control of titanium alloy during vacuum arc remelting[J]. China Metallurgy, 2023, 33(9): 1-10,18.  
(李明宇, 杨树峰, 刘威, 等. 真空自耗熔炼钛合金的偏析缺陷及控制研究进展[J]. 中国冶金, 2023, 33(9): 1-10,18.)
- [ 13 ] KARIMI-SIBAKI E, KHARICHA A, VAKHRUSHEV A, *et al.* Numerical modeling and experimental validation of the effect of arc distribution on the as-solidified Ti64 ingot in vacuum arc remelting (VAR) process[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 19: 183-193.
- [ 14 ] LUO K, GENG N T, YOU Y J, *et al.* Optimization of VAR melting process of 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]. 钢铁钒钛, 2024, 45(3): 25-32.)
- [ 15 ] HUANG L Q, WU J Y, GUO J, *et al.* Effect of self-induced magnetic field on liquid flow and segregation during VAR process for titanium alloys[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2023, 44(4): 55-61,84.  
(黄立清, 吴京洋, 郭杰, 等. 钛合金 VAR 过程中自感电磁场对流场与偏析行为的影响[J]. 钢铁钒钛, 2023, 44(4): 55-61,84.)
- [ 16 ] WEN H, ZHENG Y B, CHEN F, *et al.* Research on melting technology of TC2 titanium alloy ingot depend on MeltFlow-VAR[J]. Metallurgical Smelting, 2022(14): 12-15.  
(文豪, 郑亚波, 陈峰, 等. 基于 MeltFlow-VAR 的 TC2 钛合金铸锭熔炼工艺研究[J]. 世界有色金属, 2022(14): 12-15.)
- [ 17 ] JING Z Q, SUN Y H, CHEN L, *et al.* Numerical simulation of current, magnetic field and electromagnetic force in vacuum arc remelting of titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2023, 52(6): 1994-2001.
- [ 18 ] KARIMI-SIBAKI E, KHARICHA A, ABDI M, *et al.* A numerical study on the influence of an axial magnetic field (AMF) on vacuum arc remelting (VAR) process[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2021, 52(5): 3354-3362.
- [ 19 ] KOU H, ZHANG Y, LI P, *et al.* Numerical simulation of titanium alloy ingot solidification structure during VAR process based on three-dimensional CAFE method[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(7): 1537-1542.
- [ 20 ] ZHAO X H, WANG J C, LIU P, *et al.* Effect of electrode block's mixing uniformity on titanium alloy ingot's composition[J]. Titanium Industry Progress, 2021, 38(4): 1-4.  
(赵小花, 王锦程, 刘鹏, 等. 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.)