



熔炼参数对 GH4151 合金电渣重熔过程的影响

钟 佳, 江 河, 董建新

(北京科技大学材料学院, 北京 100083)

摘 要: GH4151 是一种高性能沉淀强化的新型镍基高温合金, 适用于航空发动机涡轮盘锻件的制造。基于经过工业验证的 MeltFlow 软件, 研究了不同熔炼工艺参数对 GH4151 合金电渣重熔过程的影响。结果表明, 随着电渣重熔的进行, 不同冶炼时刻熔池形貌分布为整个熔池呈现中心深, 周围浅, 熔池最后凝固在渣池-金属液交界面中心处。随着熔速增加(1.5~4.5 kg/min), 熔池最大深度从 360 mm 增加到 474 mm, 糊状区最大宽度从 60 mm 增加至 99 mm, 同时, 局部凝固时间、二次枝晶间距和黑斑形成概率皆增大; 随着电极直径增加(填充比从 0.27 增加至 0.94), 熔池深度和糊状区宽度变化不大, 但熔池体积减小了 0.0015 m³, 渣皮厚度减小了约 1 mm。黑斑形成概率和局部凝固时间随着电极直径增加均减小。因此, 应适当减小熔速, 增大电极直径(增大填充比), 对合金凝固质量更有利。

关键词: GH4151 合金; 电渣重熔; 熔速; 填充比

DOI: 10.20057/j.1003-8620.2025-00034 **中图分类号:** TF815

Influence of Melting Parameters on the Electroslag Remelting Process of GH4151 Alloy

Zhong Jia, Jiang He, Dong Jianxin

(School of Materials, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: GH4151 is a high-performance precipitation strengthened new nickel-based high temperature alloy, suitable for the manufacture of aviation engine turbine disc forgings. Based on the industrially validated MeltFlow software, the effects of different smelting process parameters on the electroslag remelting process of GH4151 alloy were studied. The results revealed with the process of the electroslag remelting, the morphology distribution of the molten pool exhibited a deep central region and shallow periphery at different smelting stages. Ultimately, the melt pool solidified at the center of the slag pool-liquid metal interface. ; As the melt speed was increased from 1.5 kg/min to 4.5 kg/min, the maximum depth of the melt pool increased from 360 mm to 474 mm, and the maximum width of the paste zone expanded from 60 mm to 99 mm. Furthermore, the local solidification time, the spacing of secondary dendrites, and the probability of black spot formation all exhibited a notable increase. As the electrode diameter increased (with the filling ratio rising from 0.27 to 0.94), the depth of the melt pool and the width of the mushy zone showed no change. However, the volume of the melt pool decreased by 0.0015 m³, and the thickness of the slag skin reduced by approximately 1 mm. The probability of black spot formation and the local solidification time both decreased as the electrode diameter increased. Therefore, the melting speed should have been reduced, and the electrode diameter (filling ratio) should have been increased, which would have been more favorable for the solidification quality of alloy.

Key Words: GH4151 Alloy; Electroslag remelting; Melting speed; Filling Ratio

GH4151 合金是一种高合金化的镍基高温合金, 是一种新开发的铸造和锻造(C&W)的难变形高温合金, 用于高达 800 °C 的涡轮盘^[1]。涡轮盘是重型燃机的核心部位, 它的制造长期被少数西方国家垄断。因此, 研究 GH4151 合金的制备工艺对我国航空发动机部位的选材至关重要^[2]。

电渣重熔(Electro-slag remelting, ESR)是一种用于生产高质量合金材料的特殊冶金技术。通过消耗电极、大量电流和渣池区域中的焦耳热量实现熔化。渣池区域始终保持高温状态, 消耗电极在液

态渣中连续熔化。在重熔过程中, 靠近电极底部的小区域是进行冶金反应的关键区域, 包括化学反应、质量和能量传递等。在此区域, 超过三分之二的杂质被去除^[3]。然而重熔锭的熔化和凝固同时进行, 当熔炼参数稳定时, 才能够获得稳定的凝固过程。因此, 熔炼参数的调控对铸锭质量好坏至关重要。其中, 影响电渣重熔凝固组织的主要熔炼参数有熔速、填充比和电流等, 然而电渣重熔过程凝固过程无法通过肉眼直接观察, 因此, 多采用数值模拟对电渣重熔过程进行预测, 降低试错成本。目

前,越来越多数值模拟被学者所采用,于新皓等^[4]采用Fluent软件研究了电流对GH984G合金重熔凝固参数的影响。杨传浩等^[5]采用Procast软件研究了大型钢锭温度场分布及二次枝晶间距的变化。近年来,模拟研究进一步拓展,MeltFlow软件经过大量工业验证,已经广泛应用到真空自耗熔炼和电渣重熔过程分析中^[6-7]。罗文忠等^[8]采用MeltFlow软件预测VAR熔炼过程不同电流状态下的温度场分布,借此方法提高铸锭表面质量。王建武等^[9]采用MeltFlow软件模拟电渣重熔过程温度场和熔池形貌,经过工业验证,MeltFlow软件能够很好的预测铸锭质量。鄢宇灿等^[10]结合实际工业生产情况,采用MeltFlow软件研究电渣重熔过程不同冷速下的枝晶间距,预测凝固过程的组织演变情况。因此,MeltFlow有限元软件已经非常成熟,可以准确预测铸锭熔炼过程中熔池以及凝固参数变化。然而针对难变形高温合金中不同熔炼工艺参数对铸锭凝固质量的模拟研究尚少,电渣重熔中主要熔炼参数熔速、填充比对熔池形貌以及凝固质量变化尚不清楚。

众多学者已通过数值模拟对电渣重熔过程进行分析,但是对于GH4151合金,缺少研究不同熔炼工艺参数(熔速和填充比)对凝固质量参数的影响。因此,本研究旨在采用MeltFlow软件探究镍基高温合金GH4151电渣重熔过程中不同熔速和填充比对铸锭的温度场、熔池形貌、凝固质量参数的影响,凝固质量参数主要包括二次枝晶间距、局部凝固时间、黑斑形成概率、熔池体积以及渣皮厚度。这些研究有助于优化熔炼工艺参数并提高电渣重熔材料的质量。

1 数学模型

本计算电渣重熔铸锭为轴对称,渣池、熔池以及凝固大部分流场和热环境为稳态状态,建立计算模型如图1所示,并作出以下假设^[4, 7, 9]:

- (1) 稳态下,电极-渣池和渣池-熔池视作平面;
- (2) 忽略熔滴跌落和熔渣运动对流场的影响;
- (3) 在渣-金属界面,热通量呈连续变化状态;
- (4) 电极对热和磁场的影响很小,因此,可以忽略。
- (5) 模型的计算范围为渣池到一定长度的铸锭。

1.1 温度场控制方程

在渣池和熔池中,温度场由能量守恒方程控制,同时,考虑了凝固潜热和电磁焦耳热,如式(1)

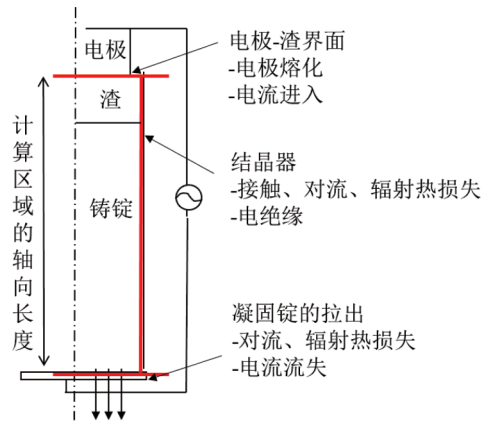


图1 电渣重熔(ESR)工艺稳态行为分析范围

Fig. 1 Analysis range of steady state behavior of ESR process

所示。在铸锭计算中,采用固定网格法将总焓分为显热焓和潜热焓,并据此推导出相应的控制方程,如式(3)所示^[11]。

$$\rho C_p \vec{V} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) - \rho \vec{L} \nabla \cdot \lambda + S_j \quad (1)$$

$$\lambda = f \left(\frac{T - T_{Solidus}}{T_{Liquidus} - T_{Solidus}} \right) \quad (2)$$

进一步推导

$$\frac{\partial(\rho \vec{V} C_p T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} C_p T) = \nabla \cdot (k \nabla T) - \left[\frac{\partial(\rho \Delta H)}{\partial t} - \nabla \cdot (\rho \vec{V} \Delta H) \right] - \left[\nabla \cdot (\rho \vec{V} (h - C_p T)) + \frac{\partial[\rho \vec{V} (h - C_p T)]}{\partial t} \right] + S_j \quad (3)$$

式中, C_p 为定压热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; S_j 为外热源; ρ 为密度, kg/m^3 ; \vec{V} 为熔化速度, kg/s ; T 为温度, K ; L 为无量纲距离; λ 为导热系数, $\text{W}/(\text{K} \cdot \text{m})$; $T_{Liquidus}$ 为液相线温度, K ; $T_{Solidus}$ 为固相线温度, K ; f 为液相分数; h 为焓变, J/kg ; H 为磁场强度, A/m^2 。

铸锭侧表面和结晶器内壁需考虑渣皮和凝固收缩对传热的影响。假设渣皮厚度均匀,热损失通过有效换热系数进行计算;同时,考虑铸锭凝固收缩对渣皮和结晶器壁的热损失影响^[12-13]。

电极-渣池界面

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{m \left(L + \int_{T_{ambient}}^{T_{liquid}} C_p dT \right)}{A_{electrode}} \quad (4)$$

裸露的渣界面

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = \varepsilon \sigma (T^4 - T_{\text{sink}}^4) \quad (5)$$

式中, $A_{\text{electrode}}$ 为电极面积, m^2 ; σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, $5.68 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; ε 为熔渣的辐射率。

1.2 铸锭组织控制方程

稳态下, 合金熔池和糊状区维持稳定不变, 因此, 合金局部凝固时间以及铸锭质量相关参数与铸锭纵向位置相关。其中, 枝晶间距由冷却速率计算^[14], 如式(6)~(8)所示。

$$LST = \text{Time}(T_{\text{solidus}}) - \text{Time}(T_{\text{liquidus}}) \quad (6)$$

$$\lambda_1 = \frac{150 \times 10^{-6}}{(G_L R)^{0.33}} \quad (7)$$

$$\lambda_2 = \frac{40 \times 10^{-6}}{(G_L R)^{0.42}} \quad (8)$$

式中, LST 为局部凝固时间, s ; λ_1 为一次枝晶间距, m ; λ_2 为二次枝晶间距, m ; $G_L R$ 为冷却速度, K/s , 其中 G_L 为温度梯度, K/m , R 为凝固速度, m/s ;

1.3 黑斑判据

计算模型中, 用雷诺数预测枝晶偏析及黑斑。当黑斑被视为富溶质液相在多孔介质中的流动问题时, 影响枝晶间流动的参数为糊状区渗透性, 其中, 渗透性决定枝晶组织对液相流动的粘性摩擦力。渗透性使用二阶张量 K 进行定义, 其中, K_x 和 K_y 分别表示枝晶结构中平行于一次枝晶和垂直于一次枝晶的渗透性分量, 如式(9)~(11)所示^[15]。

垂直于一次枝晶的渗透性分量

$$K_y = 3.75 \times 10^{-4} f_L^2 \lambda_1^2 \quad (9)$$

平行于一次枝晶的渗透性分量

$$K_x = 3.62 \times 10^3 f_L^{3.34} \lambda_1^{0.699} \lambda_2^{2.73} \quad (10)$$

渗透性系数

$$K = \frac{1}{\frac{\sin^2 \alpha}{K_x} + \frac{\cos^2 \alpha}{K_y}} \quad (11)$$

式中, K_x 为平行一次枝晶的渗透性系数, m^2 ; K_y 为垂直一次枝晶的渗透性系数, m^2 ; f_L 为液相分数; K 为垂直方向的有效渗透性系数, m^2 ; α 为枝晶生长前沿角度(熔池角), ($^\circ$)。

在电渣重熔钢锭中, 枝晶间偏析液相的流动受到多种因素的影响, 综合考虑各因素, 结合 Flemings 判据推导出以下适合电渣重熔钢锭的相对雷诺数判据, 如式(12)~(15)所示^[16]。

$$Ra = \frac{g \cdot \frac{d\rho}{dz}}{\frac{\eta D_T}{h^4}} \quad (12)$$

$$h = \lambda_1 \left(\frac{K}{K_y} \right) \quad (13)$$

$$\frac{d\rho}{dz} = \frac{d\rho}{dT} \times \frac{dT}{dz} = \frac{d\rho}{dT} G_F^V \quad (14)$$

$$Ra = \frac{g \cdot \frac{d\rho}{dT} G_F^V}{\eta D_T} \left[\lambda_1 \left(\frac{K}{K_y} \right) \right]^4 \quad (15)$$

式中, Ra 为瑞利数; g 为重力常数, m/s^2 ; $\frac{d\rho}{dz}$ 为垂直方向上的密度反转项, kg/m^4 ; h 为枝晶间对流的特征长度, m ; η 为动力粘度, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$; D_T 为热扩散系数, m^2/s ;

1.4 物性参数及操作参数

计算用熔渣的成分(质量分数/%)为 $50 \text{ CaF}_2 + 20 \text{ CaO} + 22 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 5 \text{ MgO} + 3 \text{ TiO}_2$, 合金及熔渣热物性参数均由热力学软件 JMatPro 计算得到。其中, 电极和熔渣的物性参数、几何参数及主要熔炼参数见表 1。

1.5 模型验证

模拟结果与参考文献^[12]的实际生产结果进行对比, 渣皮厚度对比情况如图 2 所示。实际渣皮厚度为 1.78 mm , 模拟结果与实际结果误差较小, 相对吻合。如图 3 所示为实际二次枝晶间距参考文献^[11]与模拟结果对比图。可见二次枝晶间距从中心到边缘逐渐降低, 由于冷却强度逐渐升高, 与实际结果一致。由于忽略渣成分和结晶器冷却强度的瞬态变化, 二次枝晶间距模拟结果略低, 这也导致了部分误差。然而, 模拟结果与参考文献^[11]中内容一致, 具有较好的吻合性。由此可见, 以上结果有效验证了模拟结果的准确性和可靠性。

2 结果与讨论

2.1 熔炼过程温度场、液相分数分布

在电渣重熔过程中不同冶炼时刻下的温度场及液相体积分数的瞬时分布如图 4 所示。从图 4 中看出, 冶炼初期为快速建立熔池, 渣池输入功率急剧上升, 电流密度和磁场强度迅速增强, 导致电磁力和焦耳热功率迅速提升^[17], 使渣池流动迅速稳定。同时, 受结晶器底部强冷作用, 液态金属在底部迅速凝聚成糊状区, 熔池呈现中心深、周边浅的形态, 逐步凝固成型。进入稳定熔炼阶段(101~181 min), 渣池输入功率保持稳定; 在结晶器底部及

表 1 电极、熔渣与铸锭的物性参数、几何参数及主要熔炼参数

Table 1 Physical parameters, geometric parameters and main smelting parameters of electrode, slag and ingot

参数	数值
电极直径/mm	100-140-180-200-280-300-340
填充比	0.27-0.38-0.50-0.55-0.77-0.83-0.94
重熔锭直径/mm	360
渣直径/mm	360
渣高/mm	160
电流/kA	5
频率/Hz	50
冷却水温/K	303.15
冷却水流量/(L·min ⁻¹)	750
合金固液相线温度/K	1 363-1 599
合金电导率/[Amp·(V·m) ⁻¹]	9.5×10 ⁵
合金潜热/(J·kg ⁻¹)	2.37×10 ⁵
熔渣固液相线温度/K	1 542-1 587
熔渣电导率/[Amp·(V·m) ⁻¹]	235.362
熔渣潜热/(J·kg ⁻¹)	4.3×10 ⁵
熔渣密度/(kg·m ⁻³)	2 716
合金密度/(kg·m ⁻³)	8 005
熔速/(kg·min ⁻¹)	1.5-2-2.5-3-3.5

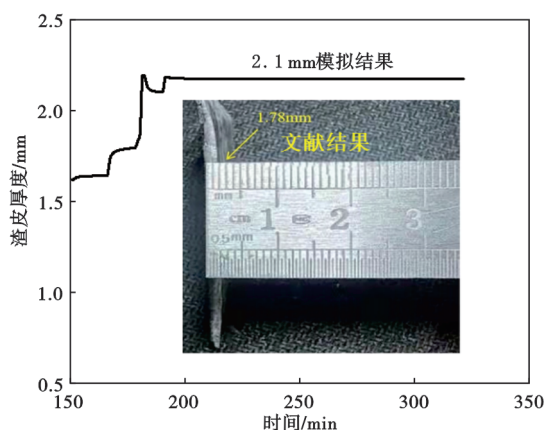


图 2 渣皮厚度模拟结果与参考文献 [11] 对比

Fig. 2 Comparison of the simulated slag skin thickness with the results from Reference [11]

侧壁冷却作用下,渣池与熔池的温度分布及形态逐步趋于稳定,熔池呈现“U”型,直至进入补缩阶段。冶炼后期(181~213 min,即补缩阶段),因渣层保温及凝固潜热释放,渣池和铸锭内温度略降,直至通电结束后进入模冷阶段。模冷阶段(213~297 min),渣池凝固始于结晶器边界,先于渣池上表面迅速凝固,后逐步由四周扩展至渣池底部中心,直至整个渣池及铸锭完全凝固。

图 5 展示了电渣重熔过程中,渣池与熔池体积及铸锭表面渣皮厚度随冶炼时间变化的瞬态模拟结果。在冶炼初期,结晶器底部熔池糊状区迅速形

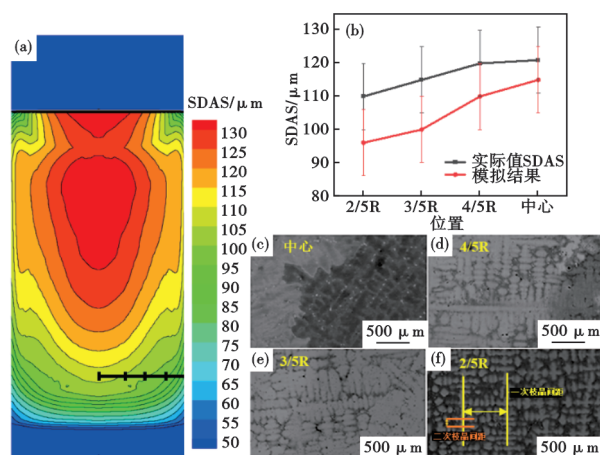


图 3 二次枝晶间距模拟结果与参考文献 [11] 对比:(a)二次枝晶间距分布图,(b)二次枝晶间距实验值与模拟结果对比,(c)不同位置二次枝晶间距光学显微镜(OM)图

Fig. 3 Comparison of the simulated secondary dendrite arm spacing with the results from Reference [11]: (a) distribution map of secondary dendrite spacing, (b) comparison of experimental values of secondary dendrite spacing and simulation results, (c) optical microscope (OM) map of secondary dendrite spacing at different positions

成并呈线性增长;随着糊状区出现,熔池逐步建立,其体积迅速增大。进入稳定熔炼阶段后,熔池输入热量和电极熔速均趋于稳定;同时,底部冷却效果减弱、侧壁增强,致使熔池和糊状区体积基本保持不变。在补缩阶段,随着渣池输入功率与电极熔速

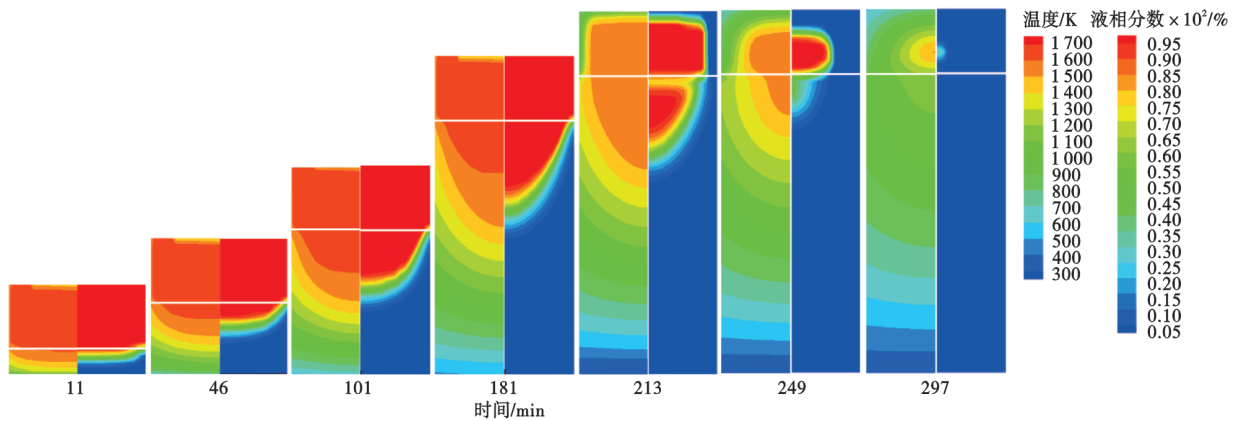


图 4 ESR 全程的温度及液相体积分数分布变化

Fig. 4 Temperature and liquid phase volume fraction distribution changes throughout ESR process

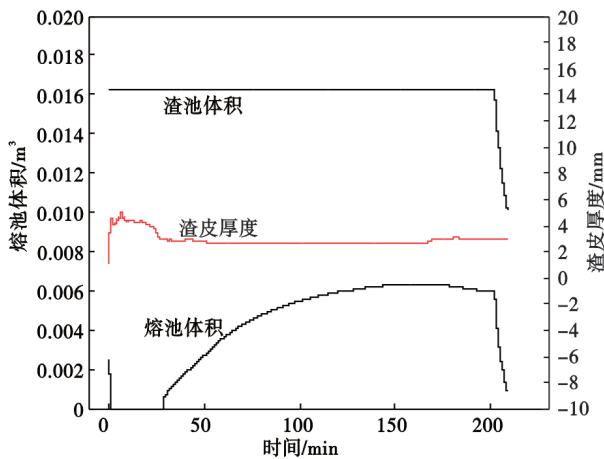


图 5 ESR 全程的渣池和熔池体积、渣皮厚度变化

Fig. 5 Variation of slag pool and melt volume, slag skin thickness throughout ESR process

逐步降低,熔池及糊状区体积迅速收缩,最终趋于零。同时,渣皮形成是在熔炼初期,炉渣先熔化,在结晶器臂上形成渣皮、在结晶器中间形成渣池^[18]。

后金属熔化,熔池不断上升,先期形成的渣皮会出现部分返熔,之后重新结晶和凝固。

2.2 凝固质量相关参数计算

除了计算电渣重熔过程中的温度场、液相和熔池体积分数及渣皮厚度外,还可计算与凝固质量相关的参数,如局部凝固时间、冷却速率、二次枝晶间距(SDAS)及黑斑判定瑞利数(Ra)等。如图 6(a)所示,局部凝固时间沿径向呈梯度分布,铸锭侧面及下表面的凝固时间较短,中心及中上部较长。图 6(b)显示冷却速率的分布规律与之相一致,铸锭侧面及下表面的冷却速率最大,中心及中上部最小。二次枝晶间距沿径向呈梯度分布,仅在铸锭头部和底部区域沿轴向变化较大,如图 6(c)所示。二次枝晶间距主要受温度梯度和局部冷却速度影响。在熔炼初期,底部结晶器冷却水作用下,冷却速度较大,二次枝晶间距较小,局部凝固时间较短;而在熔炼末期,渣池下部冷却速度最小,二次枝晶间距增大,局

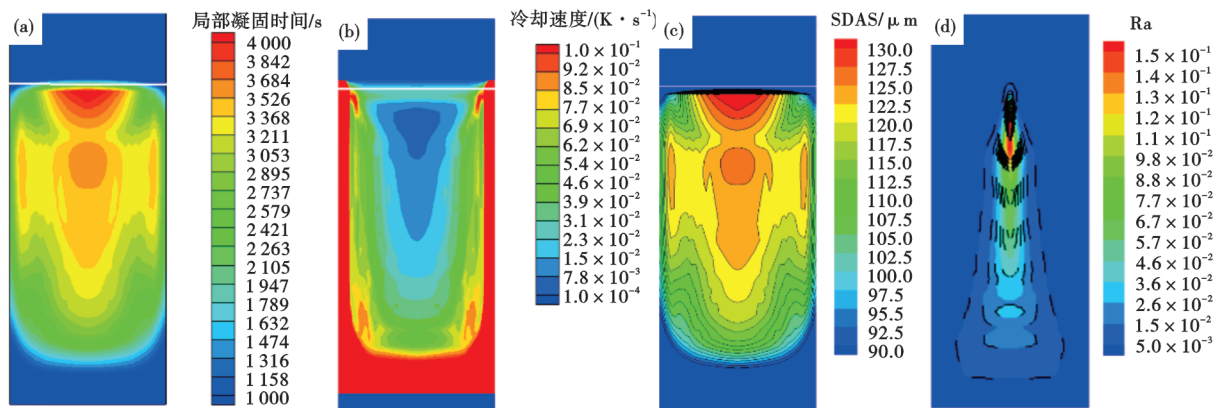


图 6 凝固质量相关系数分布信息:(a)局部凝固时间,(b)冷却速度,(c)二次枝晶间距 SDAS,(d)黑斑判定瑞利数 Ra

Fig. 6 Information on the distribution of solidification quality correlation coefficients : (a) local solidification time, (b) cooling speed, (c) secondary dendrite spacing SDAS, (d) black spot determination Rayleigh number Ra

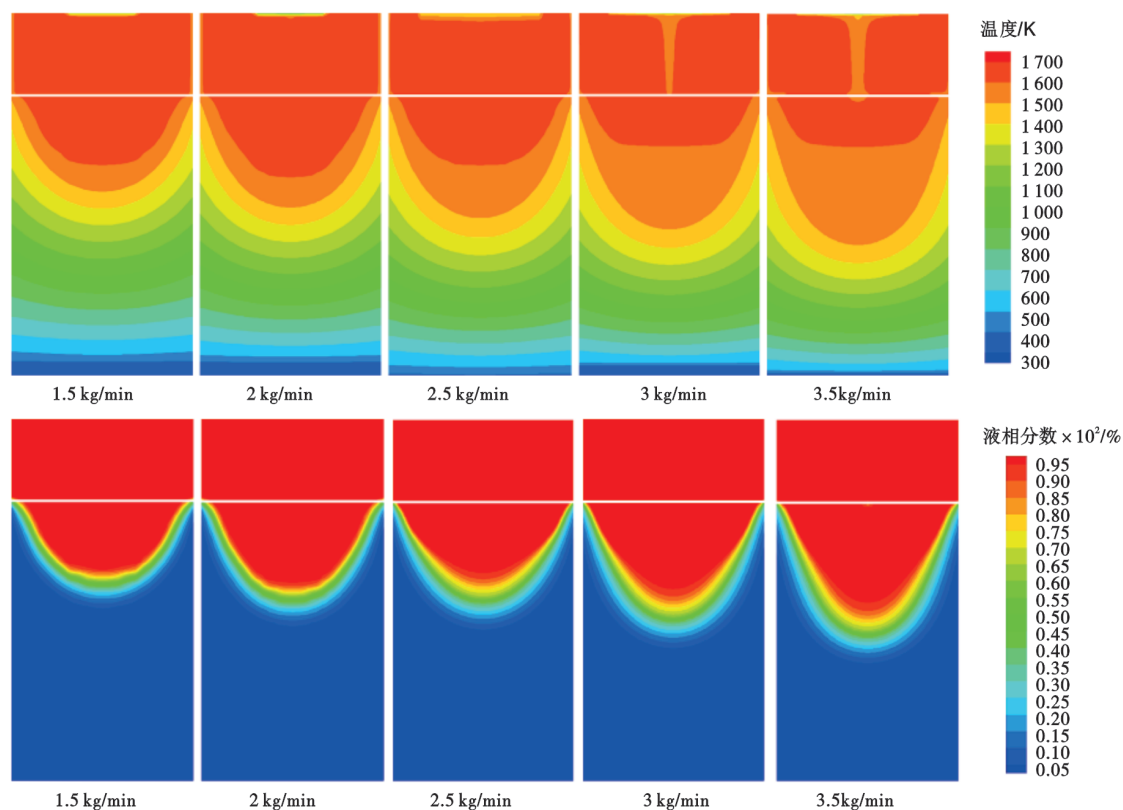


图 7 熔速对温度场、熔池形貌分布的影响

Fig. 7 Effect of melting rate on temperature field, melt pool morphology distribution

部凝固时间较长。图 6(d)给出了黑斑判定瑞利数 Ra, 当瑞利数 Ra 大于 1, 说明此铸锭可能出现黑斑, 反之, 则不会有黑斑形成倾向。如图 6 可知, 铸锭在中心及 1/2 半径处黑斑形成概率大。但瑞利数最大值约为 0.15, 说明在当前工艺参数下, 不具有黑斑形成的倾向。

2.3 熔速的影响

2.3.1 熔速对温度场、熔池形貌的影响

图 7 展示了不同熔速下稳态时刻的温度场和熔池形貌。熔池与铸锭质量息息相关, 其深度及形状直接影响铸锭的质量。熔速增加, 导致更多的电流或热量输入, 熔池温度升高, 从而融化更多金属, 导致熔池变深。进一步发现, 熔池形貌从浅平逐渐转换为“V”型, 由于底部和侧面热量的传导较强, 使这些区域的金属熔化更快, 而中心区域的熔化较慢。当熔速为 1.5 kg/min 时, 熔池的最大深度约为 360 mm, 糊状区的最大宽度约为 62 mm; 而在熔速提升至 3.5 kg/min 时, 熔池的最大深度增至约 474 mm, 糊状区的最大宽度也增大至约 99 mm, 因此, 熔速增加, 熔池深度和糊状区都增大, 糊状区过大导致金属熔池成分分布不均匀, 影响合金组织。

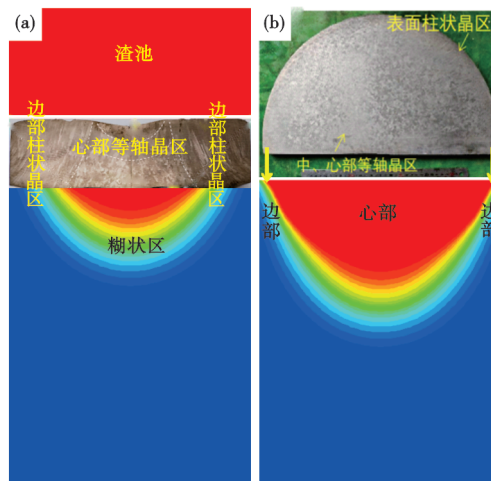


图 8 熔速 2.5 kg/min 的熔池形貌与参考文献 [11] 实际凝固组织对比

Fig. 8 Comparison of melt pool morphology with melting rate 2.5 kg/min and actual solidification microstructure of reference [11]

将熔速为 2.5 kg/min 时的熔池形貌与实际生产数据对比, 如图 8(a) 所示, 电渣锭头部纵剖腐蚀后的凝固组织呈现心部等轴晶区和边部柱状晶区, 且头部组织与熔池轮廓一致。如图 8(b) 所示, 电渣锭横剖腐蚀后的组织与模拟结果对比, 横剖面显示心

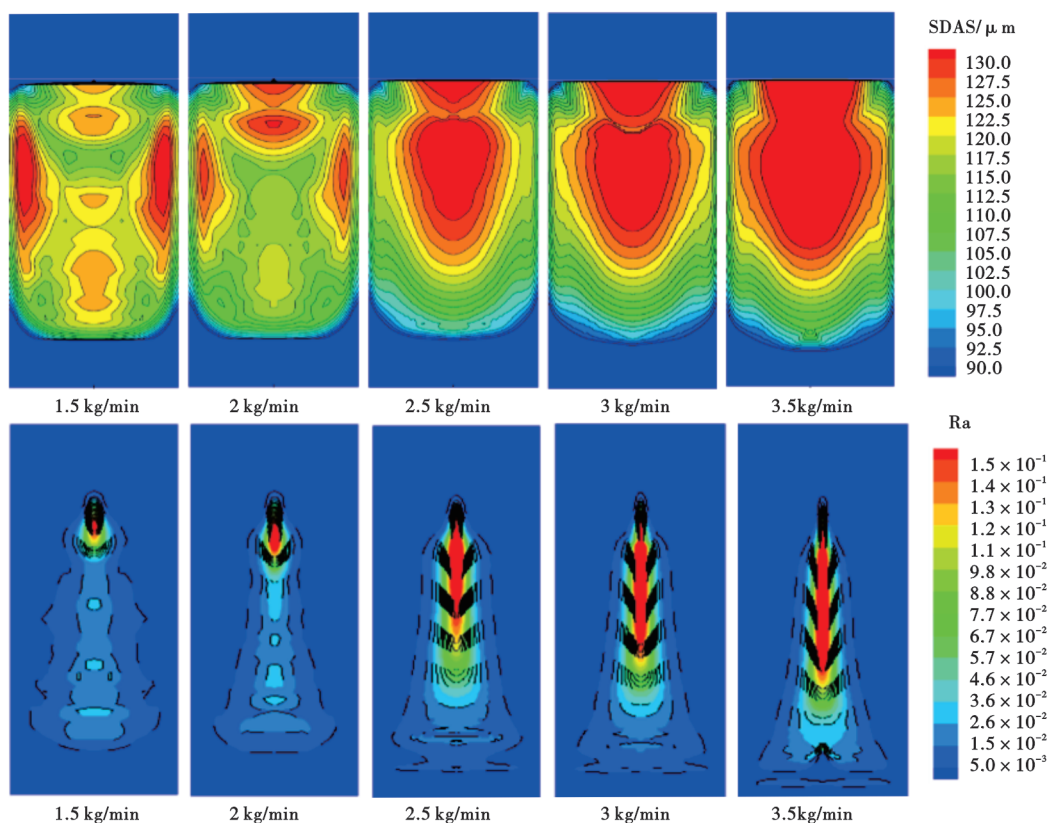


图9 熔速对二次枝晶间距、黑斑判定瑞利数的影响

Fig. 9 Effect of melting rate on secondary dendrite spacing, black spot determination of Rayleigh number

部为等轴晶区,边部为柱状晶区,且等轴晶区范围较大。组织结果与模拟结果相符。通过与文献[11]中的实际生产数据对比,表明模拟结果具有较高的准确性。

2.3.2 熔速对凝固参数的影响

除了熔速对温度场和熔池的影响外,熔速还会影响凝固参数,包括二次枝晶间距(评价枝晶组织,间距越小质量越好)、局部凝固时间(合金固-液两相区停留时间,评价合金组织的重要指标)和黑斑形成概率(瑞利数)。图9和图10展示了不同熔速下二次枝晶间距、局部凝固时间和黑斑判定瑞利数的分布情况。随着熔速增加,热输入增大,熔池冷却速率减弱,铸锭中心的局部凝固时间从3 300 s延长至4 500 s,二次枝晶间距从120 μm增大至134 μm。黑斑判定瑞利数的最大值出现在铸锭中心,随着熔速增大,黑斑形成概率范围逐渐增大。但瑞利数均在0.15左右,因此,不易形成黑斑。总体来说,随着熔速增加,熔池最大深度和糊状区增大,导致二次枝晶间距、黑斑形成概率和局部凝固时间增加,这对铸锭质量不利。

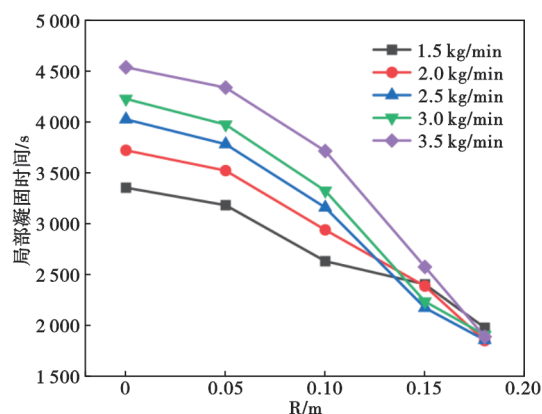


图10 熔速对铸锭局部凝固时间的影响

Fig. 10 Effect of melting rate on local solidification time

2.4 填充比的影响

2.4.1 填充比对温度场、熔池及渣皮厚度的影响

图11为不同电极直径(填充比:电极直径/结晶器直径)下的温度场、熔池形貌的分布情况。当电极直径为100 mm(填充比0.27),渣池内最高温度为1 640 K,平均温度为1 613 K;当电极直径为340 mm(填充比0.94),渣池内最高温度为1 641 K,平均温度为1 630 K。随着电极直径增加,热量输入区域增

大,熔池加热更加均匀,导致渣池温度趋于均匀。热量分布均匀降低了局部冷却速率,避免了熔池局部深度增加,导致熔池深度和糊状区宽度变化不大,但熔池形貌更加浅平且范围更广。图 12 为填充比对熔池体积、渣皮厚度的影响,可以看出电极直径增加,熔池体积减少了 0.001 5 m³。当电极直径为 200、280、300、340 mm,熔池体积变化不大,均为 0.006 m³左右。同时,随着电极直径增加,渣层的流动性增强,导致形成的渣皮越来越薄,渣皮厚度减少了约 1 mm。铸锭的表面质量与渣皮厚度紧密联

系,过厚的渣皮将使铸锭容易产生缺陷,更薄而均匀的渣皮有助于铸锭具有良好的表面质量,铸锭的缺陷需要进行表面处理,减少了金属收得率^[19]。因此,综合温度场、熔池体积以及渣皮形成的影响,增大电极直径更有利于熔渣和金属液反应的均匀性,更有利于铸锭的表面质量。

2.4.2 填充比对凝固参数的影响

图 13 和图 14 为不同电极直径(填充比:电极直径/结晶器直径)条件下电渣锭的二次枝晶间距、瑞利数和局部凝固时间的变化。由图 13 和图 14 可

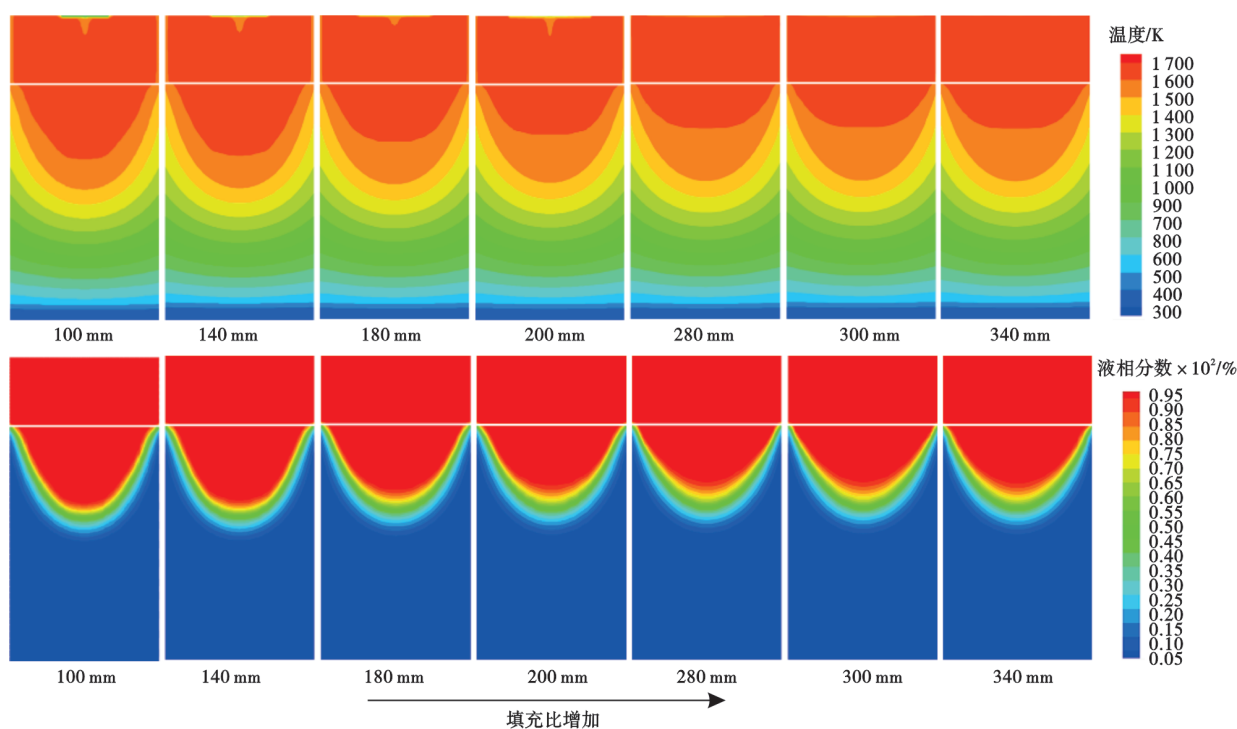


图 11 电极直径(填充比)对温度场、熔池形貌分布的影响

Fig. 11 Influence of electrode diameter (filling ratio) on temperature field, melt pool morphology distribution

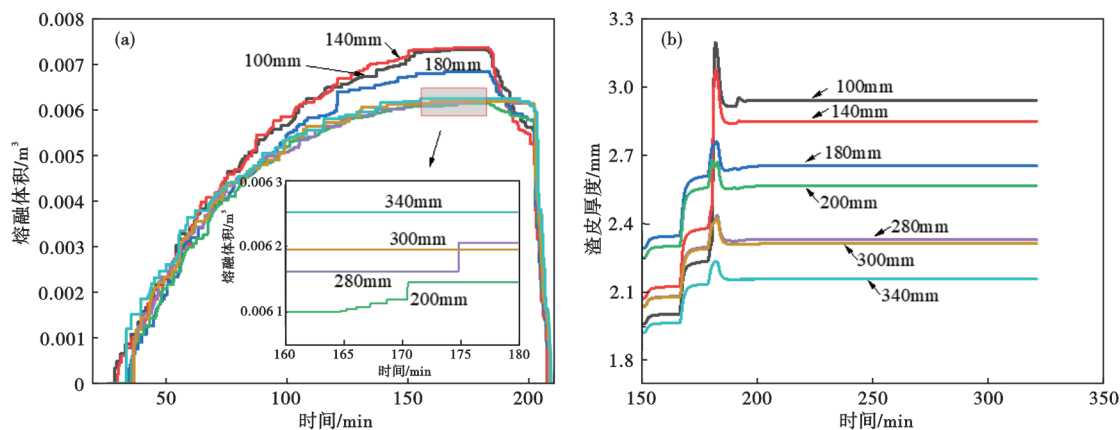


图 12 电极直径(填充比)对熔池体积、渣皮厚度的影响

Fig. 12 Effect of electrode diameter (filling ratio) on melt pool volume, slag skin thickness

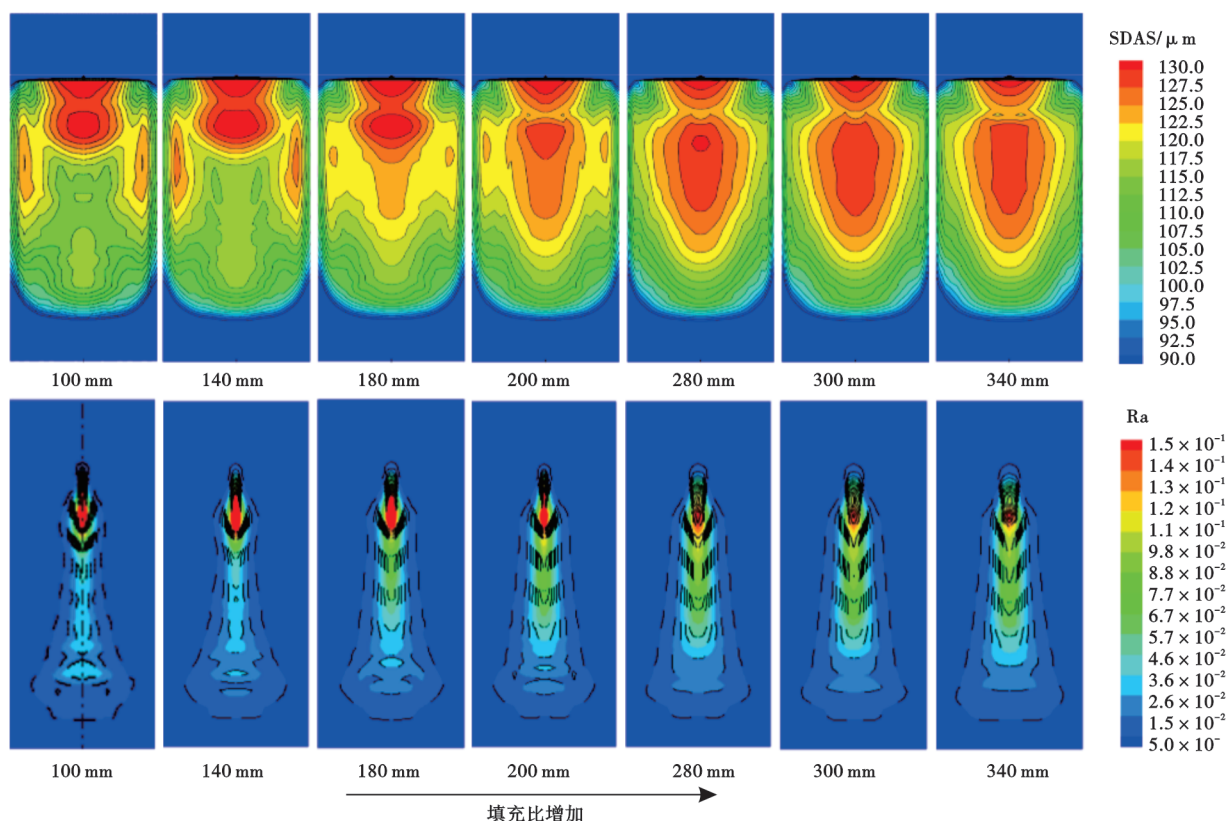


图 13 电极直径(填充比)对二次枝晶间距、黑斑判定瑞利数的影响

Fig. 13 Effect of electrode diameter (filling ratio) on secondary dendrite spacing, black spot determination of Rayleigh number

知,随着电极直径增大,在距离渣最近的中心处,二次枝晶间距逐渐减小;在距离渣较远的中心处,二次枝晶间距最大值向中心下部蔓延。且当电极直径为 100 mm 时,二次枝晶间距最大值为 132 μm;当电极直径为 340 mm 时,二次枝晶间距最大值为 128 μm。二次枝晶间距最大值变化不大。随着电极直径增大,热量分布更均匀,降低了温度梯度,进而减少了温差引起的自然对流强度,导致瑞利数和局部凝固时间均稍微减少。由上述可知,电极直径增大,能显著提高渣池温度的均匀性和流动性,有利于液态金属和熔渣的充分接触和反应以去除夹杂物和有害杂质。因此,电极直径增加,铸锭质量越好。但电极直径过大,使得电极侧面与坩埚间的距离过小,容易造成坩埚侧壁局部过热而烧损^[20],因此将在安全情况下,尽量增加电极直径。

3 结论

经过大量工业验证的 MeltFlow 软件研究了不同熔炼工艺参数对 GH4151 合金电渣重熔过程的模拟研究,得出以下结论:

1)随着电渣重熔过程的进行,不同冶炼时刻的

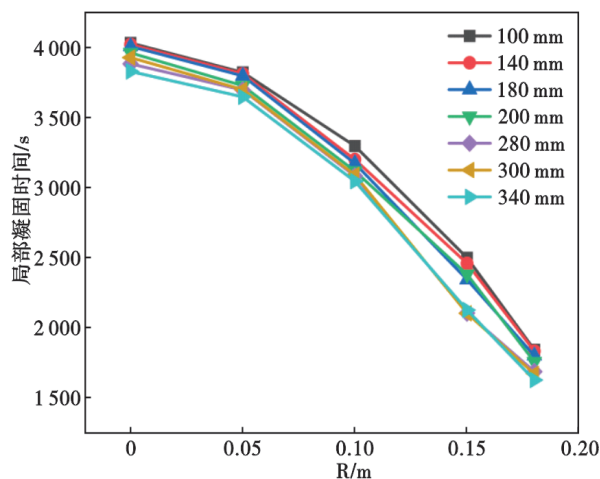


图 14 电极直径(填充比)对局部凝固时间的影响

Fig. 14 Effect of electrode diameter (filling ratio) on local solidification time

熔池形貌呈现出中心深、周围浅的分布。在稳定熔炼阶段,熔池形貌呈现出“U”型;熔池最后凝固在渣池-金属液交界面中心处。电渣重熔过程中熔池体积先迅速增加,后维持稳定,最后快速减小。

2)通过对不同熔速(1.5~3.5 kg/min)电渣重熔过程进行模拟发现,熔速增大,熔池最大深度从

360 mm 增加到 474 mm, 糊状区最大宽度从 60 mm 增加至 99 mm。熔滴带入的热量增大, 导致局部凝固时间、二次枝晶间距和黑斑形成概率增大。因此, 应该适当减小熔速, 对凝固质量更有利。

3) 通过对不同填充比(0.27~0.94)电渣重熔过程进行模拟发现, 随着电极直径增大(填充比增

加), 熔池深度和糊状区宽度变化不大, 但熔池形貌更加浅平, 稳态熔炼阶段熔池体积减小了 0.0015 m^3 , 渣皮厚度减小了约 1 mm。黑斑形成概率和局部凝固时间随着电极直径增加也稍微减小, 但二次枝晶间距变化不大。因此, 在保证安全的前提下, 可适当增大电极直径(增大填充比)。

参考文献

- [1] 王法, 江河, 董建新. 高合金化GH4151合金复杂析出相演变行为[J]. 金属学报, 2023, 59(6): 787-796.
- [2] 吴佳雷, 王芳, 李升, 等. 航空发动机涡轮盘电渣重熔合金凝固组织的数值模拟[J]. 材料与冶金学报, 2022, 56(4): 1-17.
- [3] 李正邦. 电渣冶金原理及应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996: 17.
- [4] 于新皓, 王傲, 刘福斌, 等. 电流对电渣重熔过程多场耦合行为和凝固参数影响的数值模拟[J]. 钢铁研究学报, 2021, 33(8): 744-751.
- [5] 杨传浩, 刘仲礼, 王桂权, 等. 大型钢锭电渣重熔工艺数学模型的建立及模拟计算[J]. 钢铁, 2013, 48(5): 29-34.
- [6] 梁强, 陈希春, 付锐, 等. 电渣重熔过程模拟软件Meltflow-ESR理论基础简介及其应用[J]. 材料与冶金学报, 2012, 10(1): 97-102.
- [7] 梁强, 陈希春, 郭汉杰. 熔速对GH4169合金电渣重熔凝固过程参数影响的数值模拟研究[J]. 铸造技术, 2013, 34(8): 1016-1020.
- [8] 罗文忠, 赵小花, 刘鹏, 等. 采用数值模拟方法分析影响VAR熔炼钛合金铸锭表面质量的因素[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(3): 927-932.
- [9] 王建武, 王宁, 杨树峰. 基于数值模拟的镍基高温合金电渣重熔工艺优化[J]. 中国冶金, 2022, 32(3): 80-86.
- [10] 鄢宇灿, 谷雨, 贾雷, 等. GH3536合金电渣重熔铸锭微观组织演变行为[J]. 中国冶金, 2024, 34(4): 59-71+87.
- [11] 贾雷, 崔衡, 杨树峰, 等. 新型镍基GH4151高温合金ESR数值模拟及工艺优化[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(9): 2873-2889.
- [12] Rao L, Hu Q Y, Li X L. Numerical simulation study of consumable electrode melting process in electro-slag remelting ingots[J]. Advanced Materials Research, 2011, 189-193: 3895-3898.
- [13] Živić M, Veljić N. Application of finite volume method for pure metal continuous casting[J]. Pollack Periodica, 2009, 4(1): 53-62.
- [14] 车家宝, 廖敦明, 孙飞, 等. 铝合金铸件凝固过程二次枝晶臂间距模拟计算[J]. 铸造, 2020, 69(4): 382-387.
- [15] Poirier D R. Permeability for flow of interdendritic liquid in columnar-dendritic alloys[J]. Metallurgical Transactions B, 1987, 18(1): 245-255.
- [16] 张扬. 电渣重熔钢锭中黑斑的形成机理及控制措施研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2017.
- [17] 贺铸, 蔡辉, 刘双, 等. 不同熔化速率下的电渣重熔过程数值模拟分析[J]. 重庆大学学报, 2015, 38(5): 104-111.
- [18] 孟庆虎, 许立伟, 牛瑞新. 电渣炉渣皮形成机理研究[C]. 全国电渣冶金技术学术会议论文集, 2012.
- [19] 于新皓. 电渣重熔过程渣皮形成机制的数值模拟研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2022.
- [20] 张晶宇, 范丽娟, 张一鹏, 等. 影响真空自耗电极电弧炉电弧稳定性的因素及对策[J]. 真空, 2003, (3): 21-24.