

电流对大截面镍基高温合金电渣锭熔池及偏析行为的影响

宫佳睿, 刘中秋*, 黄雪驰, 李宝宽

东北大学冶金学院, 沈阳 110819

Effect of Current on Electrode Segregation Behavior of Large Cross-Section Nickel-base Superalloy Electroslag Molten Pool

Gong Jiarui, Liu Zhongqiu*, Huang Xuechi, Li Baokuan

School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang, 110819, China

1. 前言

近年来得益于其高温合金材料的研制上取得的巨大进步航空发动机取得了高速发展, 与过去相比, 航空发动机更加强调其在使用过程中的可靠性、长寿命以及低制造成本。因此, 工业上对与高温合金涡轮盘等关键部件的力学性能和高温抗氧化腐蚀能力的要求也在进一步的提高^[1]。GH4065A 在 René88DT 合金的基础上进行了改良, 是新一代涡轮盘的主要材料。其具有优良的性能, 且兼具低成本和可批量化工业生产的优势, 被视为我国未来重点发展的变形涡轮盘材料^[2]。

当前涡轮盘用高温合金冶炼的工艺主要分为两种, 一是真空感应熔炼与真空自耗重熔相结合的两联熔铸; 二是真空感应熔炼、电渣重熔、真空自耗重熔三者相结合的三联熔铸。相对于两联熔铸, 三联熔铸增加了电渣重熔这一过程, 可以显著提高涡轮盘的质量。电渣重熔(Electroslag remelting, 简称 ESR)是制备高温合金的精炼技术之一, 是去除真空感应熔炼过程中自耗电极夹杂物的重要过程, 相比于其他精炼过程, 电渣重熔去除夹杂物效果显著^[3]。

电渣重熔的实质为熔渣对合金液的化学精炼过程, 该过程伴随着一系列复杂的流动、传热传质和熔化凝固行为^[4-7], 主要包括: 自耗电极熔化、金属熔滴汇聚、熔滴穿落渣池、金属熔池形成和金属凝固结晶。在工业过程中, 电渣重熔的电流是影响铸锭质量的重要因素。本文通过数值模拟对电渣重熔过程进行研究, 分析了重熔电流对多物理场的影响, 对实际工业生产有参考意义。

2. 数学模型

在电渣重熔过程中, 电磁场的分布由 Maxwell 方程组表述为:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_e \quad (4)$$

流动的基本的控制方程包括连续性方程和动量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (5)$$

$$\left[\frac{\partial(\rho\bar{u})}{\partial t} + \nabla(\rho\bar{u} \times \bar{u}) \right] = -\nabla p + \mu_{\text{eff}} \nabla^2 \bar{u} + \vec{F}_e + \vec{F}_b + \vec{F}_p \quad (6)$$

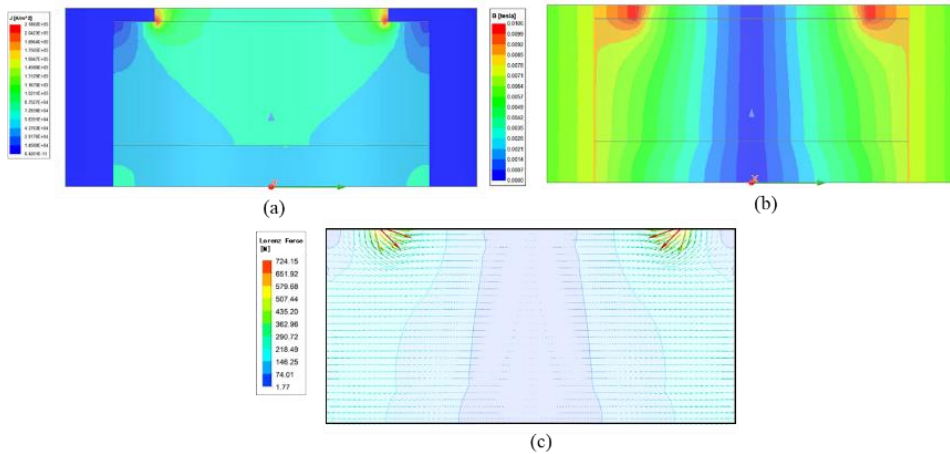
此外由于凝固过程存在着相变，因此为了准确预测电渣重熔过程中的温度分布和凝固，采用了基于焓方法的能量守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}H) + \nabla \cdot (\bar{\rho}vH) = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T) + Q_j + S \quad (7)$$

3. 结果与分析

3.1. 渣池电磁场

以 180 mm 的炉渣厚度、9000 A 的电流和 0.8 的填充比为例，图 1 显示了 ESR 期间电磁场的一般特性。图 1(a)显示了 ESR 过程显示了渣池中电流密度的分布，在渣池区域中，电流密度在电极的两端达到最大值，而在渣池表面的边缘达到最小值。在熔融钢区域，结晶器边缘的电流密度更大，趋肤效应明显。图 1(b)显示了渣池中的磁感应强度分布，磁感应强度在电极的两端最大，且沿结晶器直径从外向内逐渐减小。图中的矢量图 1(c)显示了模具中洛伦兹力的分布。由图可知，洛伦兹力的最大值出现在电极边缘。电磁力的方向指向对称轴，其大小从对称轴向外逐渐增大，在对称轴处则减小至零。



(a) 电流密度分布; (b)磁感应强度分布; (c) 洛伦兹力分布

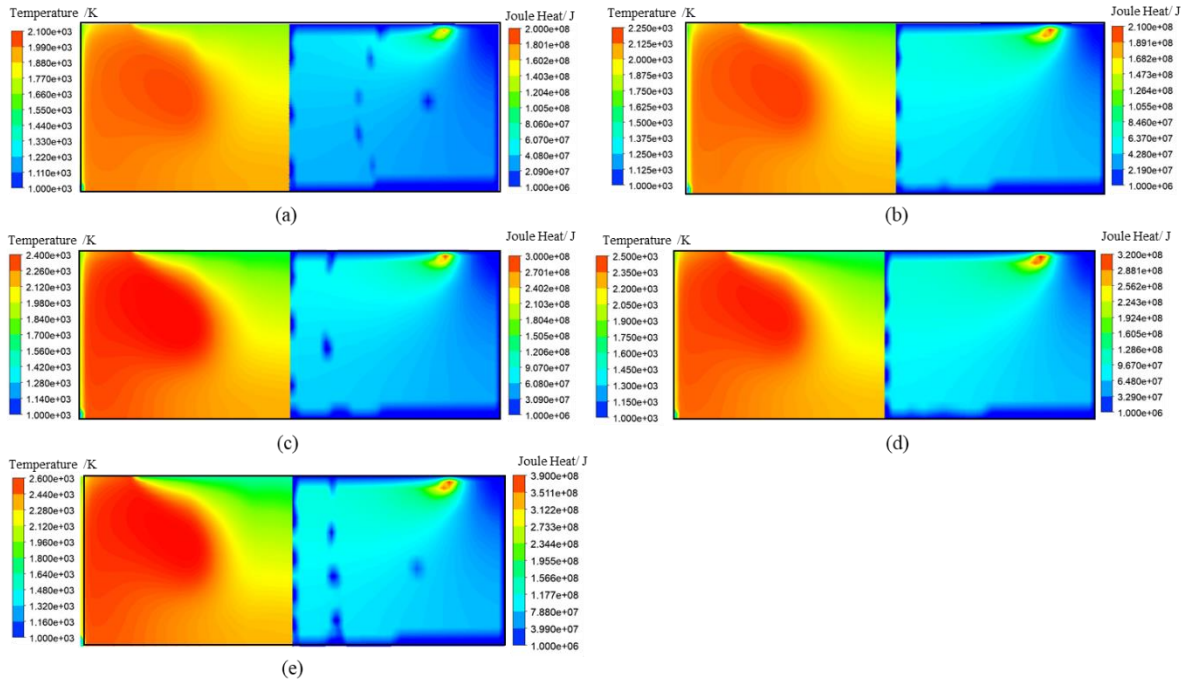
图 1 电磁场分布

Fig.1 Electromagnetic field during electroslag remelting

3.2. 渣池温度场

焦耳热是 ESR 过程中热量的主要来源，主要在炉渣中产生。电流的变化会显著影响焦耳热的产生位置，从而影响所形成的金属池的形状和偏析的分布。图 2 显示了结晶器渣池中温度和焦耳热的分布。焦耳热主要分布在渣池中的电极附近，并在电极尖端的边缘达到最大值。随着电流的增大，焦耳热分布基本不变，但最大焦耳热量增加。如图所示，当电流从 9000 A 降低到 15000 A 时，最大焦耳热从 1.96×10^8 J 增加到 2.57×10^8 J。渣池内温度随焦耳热的增大而升高，在渣池上顶部形成高温区造成电极熔化，由于熔融钢液主要在结晶器中部滴落，且熔融钢液温度较低，故渣池中心形成部分低温区。

当温度中的最高温度可达 2583 K。随着电流的增大，焦耳热逐渐增大，最高温度随电流的增加增大，渣池温度主要受焦耳热影响，渣池温度随电流增大而增大。当渣厚为 180 mm，电流从 9000 A 增大到 15000 A 时，渣池最高温从 2085K 增大到 2583 K，增大了约 20.3%。



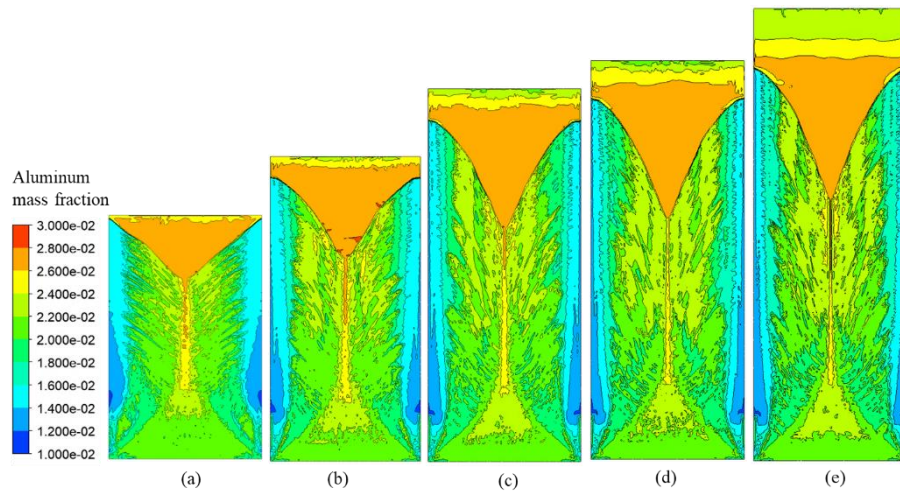
(a) 9000 A; (b) 10500 A; (c) 12000 A; (d) 13500 A; (e) 15000 A.

图 2 不同电流下的温度及焦耳热

Fig.2 Temperature and joule heating at different current

3.3. 铸锭熔池及偏析

如图所示，图 3 为电渣重熔系统在 8000 s 时的铝分布和熔池形状分布图。当电流从 9000 A 增加到 15000 A 时，熔池的最大深度增加了 79.7%。钢锭中心呈正偏析，外围和表层呈负偏析。其原因是，随着熔池加深，[Al]元素富集在熔池底部，金属液滴滴落带入熔池的动能会抑制富集在熔池底部的[Al]元素沿轴向上浮，液滴滴落增强了钢液沿凝固前沿向熔池底部流动，使凝固过程中被排出到熔池外围的[Al]元素迁移到熔池底部，进而在熔池底部富集，造成了钢锭中心处的正偏析。根据[Al]元素的质量守恒，钢锭边缘呈负偏析。



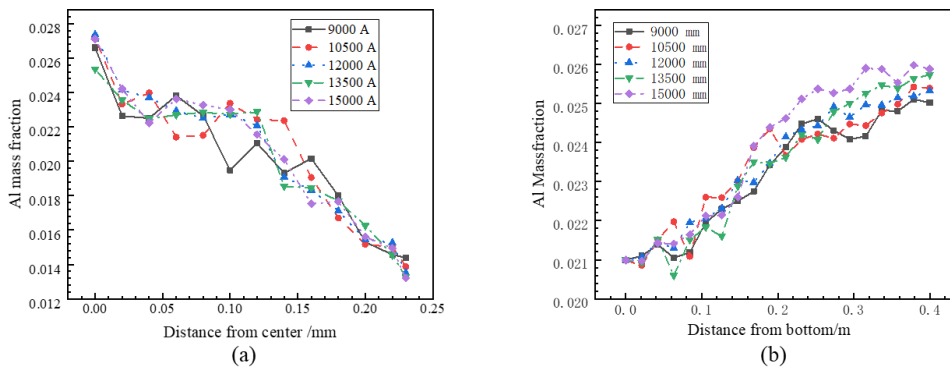
(a) 9000 A; (b) 10500 A; (c) 12000 A; (d) 13500 A; (e) 15000 A

图 3 不同电流下的偏析分布

Fig.3 Segregation distribution under different currents

随着电流增大，重熔钢锭的[Al]偏析程度逐渐增大。这是由于工作电流增大将导致电流通过渣池产生的焦耳热增大，冷却条件不变的情况下，渣池内温度会增高，电极与渣池之间的对流换热量增强，加快了电极熔化速率，渣池内的流动会进一步增强。同时，渣池内的剧烈扰动相应提高了渣池和熔池之间的对流换热。熔池内温度升高导致钢液不易凝固，熔池深度变大。随着熔池深度变大，更多的[Al]元素聚集在熔池中心，导致偏析程度增大。

图 4(a)为初始[Al]质量分数时沿直径方向[Al]质量分数，图 4(b)为沿轴向方向[Al]质量分数。可以看出，靠近钢锭中心处出现最大正偏析，边缘处出现最大负偏析。由图 4(b)轴向分布图可以看出，当工作电流由 9000 A 增大至 15000 A 时，重熔钢锭碳含量正偏析指数由 0.0837 增大至 0.0856，增大了 2.27%，且中部偏析带宽度减小。



(a)沿铸锭径向的[Al]质量分数； (b)沿轴向方向[Al]质量分数

图 4 沿铸锭径向的[Al]质量分数和沿轴向方向[Al]质量分数

Fig.4 Mass fraction [Al] along the diameter direction and in the axial direction

4. 结论

(1)电流的变化会显著影响焦耳热的产生，从而影响在该过程中形成的金属池的形状。焦耳热在电极尖端的边缘处达到最大值，渣池高温区域接近中心。随电流的增大，最大焦耳热增加，渣池温度升高。

(2)随着电流的增加，熔池的深度加深。当电流从 9000 A 增加到 15000 A 时，熔池的最大深度增加了 79.7%。当电流较大时，再增加电流对熔池深度的影响逐渐减小。

(3)随电流的增加，铸锭中心[Al]溶质富集，偏析度增加，中部偏析带宽度减小，外侧溶质贫乏。

致谢

感谢科技部重点研发计划（No. 2022YFB3705101）、重大工程材料服役安全研究评价设施国家重大科技基础设施开放课题基金（No.MSAF-2021-009）对本论文的资助。

参考文献

- [1] Zhang B, Zhao G, Zhang W, et al. Investigation of High Performance Disc Alloy GH4065 and Associated Advanced Processing Techniques [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2015, 51(10): 1227-1234.
- [2] 杜金辉, 赵光普, 邓群, 吕旭东, 张北江. 中国变形高温合金研制进展[J]. *航空材料学报*, 2016, 36(03): 27-39.
- [3] 高小勇. FGH96 粉末高温合金母合金的纯净化技术研究[D]. 北京科技大学, 2020.
- [4] Huang X, Li B, Liu Z, et al. Modeling of fluid flow, heat transfer and inclusion removal in electroslag remelting process with a rotating electrode[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020, 163: 120473.
- [5] Huang X, Li B, Liu Z, et al. Numerical study on the removal and distribution of non-metallic inclusions in electroslag remelting process[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019, 135: 1300-1311.
- [6] Lv S, Jia C, He X, et al. Effect of Preannealing on Microstructural Evolution and Tensile Properties of a Novel Nickel-Based Superalloy[J]. *Advanced Engineering Materials*. 2020, 22(6): 2000134.
- [7] Wang Q, Yan H, Ren N, et al. Effect of current on solute transport in electroslag remelting dual alloy ingot[J]. *Applied Thermal Engineering*. 2016, 101: 564-567.