

文章编号:1005-0523(2022)04-0066-08



工艺参数对电渣重熔过程影响的数值模拟

杨 韬¹,唐祁峰¹,张 军²,彭必友¹,黄 华³,普学滔⁴,蒲 喆⁵

(1.西华大学材料科学与工程学院,四川 成都 610039; 2.攀钢集团攀枝花钢铁研究院有限公司,四川 攀枝花 617000;3.攀钢集团江油长城特殊钢有限公司,四川 江油 621700; 4.云南云铝物流投资有限公司,云南 昆明 650502; 5.深圳北理莫斯科大学材料科学与工程系,广东 深圳 518172)

摘要:通过建立三维耦合数学模型,探究了电流强度和电极插入渣池深度对G20轴承钢电渣重熔(ESR)过程中温度场和电磁场的影响,计算结果表明:由于集肤效应,电流密度和磁场强度主要集中在铸锭的外表面;因炉渣的电导率较大,体系的焦耳热主要产生于渣池,最高温度位于渣层中心部位;随着电流强度的增加,整个体系电流密度增大,温度提高;而随着电极插入深度从10 mm增加到30 mm,体系的温度呈下降趋势。在1 500 A电流强度、电极插入深度为0.1 m下,体系中心轴线温度最高为2 187 ℃,渣金界面平均温度大约为1 600 ℃,均大于铸锭的液相线温度1 493 ℃,说明该模拟结果能保证重熔后的钢液顺利通过渣层后逐渐凝固形成铸锭,可以为实际生产提供理论参考。

关键词:电渣重熔;数值模拟;电磁场;温度场;工艺参数

中图分类号:TF142;U214 **文献标志码:**A

本文引用格式:杨韬,唐祁峰,张军,等.工艺参数对电渣重熔过程影响的数值模拟[J].华东交通大学学报,2022,39(4):66-73.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.20220727.008

Numerical Simulation of Influence of Process Parameters on Electroslag Remelting Process

Yang Tao¹, Tang Qifeng¹, Zhang Jun², Peng Biyou¹, Huang Hua³, Pu Xuetao⁴, Pu Zhe⁵

(1. School of Materials Science and Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China; 2. Panzhihua Iron and Steel Research Institute Co., Ltd. of Panzhihua Iron and Steel Group, Panzhihua 617000, China; 3. Jiangyou Great Wall Special Steel Co., Ltd. of Panzhihua Iron and Steel Group, Jiangyou 621700, China; 4. Yunnan Yunlyu Logistics Investment Co., Ltd., Kunming, 650502, China; 5. Department of Materials Science and Engineering, Shenzhen MSU-BIT University, Shenzhen 518172, China)

Abstract: By establishing a three-dimensional coupled mathematical model, the effects of the current intensity and the depth of the electrode inserted into the slag pool on the temperature field and electromagnetic field during the electroslag remelting(ESR) process of G20 bearing steel were investigated. The magnetic field strength is mainly concentrated on the outer surface of the ingot. Due to the high electrical conductivity of the slag, the Joule heat of the system is mainly generated in the slag pool, and the highest temperature is located in the center of the slag layer. With the increase of current intensity, the current density of the whole system increases and the temperature increases. And with the electrode insertion depth increased from 10 mm to 30 mm, the temperature of the system showed a downward trend. At the current intensity of 1 500 A and the electrode insertion depth of 0.1 m, the maximum temperature of the central axis of the system is 2 187 ℃, and the average temperature of the slag-gold interface is about 1 600 ℃, which are all greater than the liquidus temperature of the steel ingot, which is 1 493 ℃. The molten molten steel passes through the slag layer and gradually solidifies to form an in-

收稿日期:2021-12-27

基金项目:四川省科技厅重点研发计划项目(2019YFG0511)

got, which can provide a theoretical reference for actual production.

Key words: electroslag remelting; numerical simulation; electromagnetic field; temperature field; process parameters

Citation format: YANG T, TANG Q F, ZHANG J, et al. Numerical simulation of influence of process parameters on electroslag remelting process[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(4): 66–73.

电渣重熔是一种重新精炼传统冶炼钢的工艺,该工艺不仅能消除钢中的偏析、收缩等缺陷,还能有效的去除夹杂物^[1-3]。重熔后的钢纯度高,组织致密,成分均匀,表面光滑,生产灵活,可以用于生产圆锭,方锭,扁锭和空心锭。电渣重熔技术广泛应用于高温合金、精密合金、航空航天、高速列车和军用特殊钢的净化处理^[4-7]。

在电渣重熔过程中,电磁场的交互作用为电极棒熔化提供了所需的热量。电极棒受热熔化并穿过精炼渣层后,所形成的金属熔池形状和深度影响着金属的结晶方向,电极填充率和电极浸入深度也影响着金属熔池和渣池的温度分布、渣皮厚度等^[8]。而由于电渣重熔工艺周期长、成本高,研究成果难以推广。利用数值模拟方法分析电渣重熔过程中的电磁场和温度场对控制相应的工艺参数来提高重熔钢锭质量具有重要意义。

近年来,国内外学者针对不同金属材料电渣重熔工艺的数值模拟开展了大量的研究工作^[9-17]。吕斌等^[18]利用 ProCAST 对 GCr15 轴承钢钢锭的微观组织进行数值模拟,得到了电渣钢锭的晶粒生长过程、熔池形状变化和晶区分布情况。邓南阳等^[19]通过数值模拟分析了结晶器旋转对 M2 高速钢电渣重熔过程温度场、金属熔池形状的影响。孙梦如等^[20]通过数值模拟分析了 Inconel718 高温合金电渣重熔过程熔滴的滴落行为对温度场和流场的影响。Fezi 等^[21]通过建立二维模型模拟研究了电极直径、成分变化等对 625 合金电渣重熔过程流动和宏观偏析的影响。

G20 轴承钢具有优异的耐冲击性、良好的耐磨性及抗接触疲劳强度等材料综合力学性能,广泛应用于在矿山机械、精密机床、冶金设备与重型装备等重大装备领域和风力发电、高铁动车及航空航天等新兴产业领域^[22-24]。为了提高 G20 轴承钢的纯净度,通常采用电渣重熔的方式对铸锭进行除杂。然而针对 G20 轴承钢电渣重熔过程进行模拟且展开系统深入的研究鲜有报道。为了配合 G20 轴承现场生产,

本研究对该钢的电渣重熔过程进行了数值模拟分析。建立了考虑电流集肤效应的电磁场和温度场的三维数学模型,详细分析了电渣重熔过程中电流强度和电极插入深度对磁感应强度、电流密度、焦耳热和温度场的影响,以期 G20 轴承钢工业电渣精炼过程提供理论参考,减少试验成本。

1 数学模型

1.1 电磁场控制方程

流过渣池的电流会产生焦耳热,从而熔化可消耗电极,在此过程中产生的电磁力会影响流体流动。通常电磁场由麦克斯韦方程描述^[25]

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times H = J \quad (2)$$

$$\nabla \cdot J = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (4)$$

式中: E 为电场强度, V/m; B 为磁通密度, T; H 为磁场强度, A/m; J 为电流密度, A/m²; t 为时间, s。

由于电渣重熔过程属于层流,其雷诺数非常低,所以忽略了流体运动对电磁场的影响。根据欧姆定律,可以将电流密度的表达式简化为^[26]

$$J = \sigma(E + vB) = \sigma E = -\sigma \nabla \varphi \quad (5)$$

电磁力作为动量方程的源项可以表示为

$$F_c = JB \quad (6)$$

焦耳热作为能量方程的源项可以表示为

$$Q = J \frac{J}{\sigma} \quad (7)$$

式中: σ 为电导率, S/m; φ 为电势, V; F_c 为电磁力, N; Q 为焦耳热, J。

1.2 温度场控制方程

本文在模拟过程中不考虑炉渣和金属的凝固过程,因为凝固过程对炉渣池中的流动几乎没有影响。能量方程表示为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho CT) + \nabla \cdot (\rho C \sigma T) = \nabla \cdot (\lambda_{\text{eff}} \nabla T) + Q \quad (8)$$

式中: T 为温度,K; ρ 为密度, kg/m^3 ; C 为比热, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; λ_{eff} 为有效导热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。

2 边界条件

为使模拟准确、高效,对模型进行了相应的简化,并做出以下假设:

1) 在计算域的出口处施加零电势,并在计算域的入口处施加固定的电势梯度 50 V;

2) 电磁场边界条件:磁力线平行边界条件,即在空气单元外侧没有磁场存在;

3) 炉渣与空气界面的热交换是自然对流和热辐射的形式,其对流换热系数一般为 $150 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,渣池表面黑度为 0.6;

4) 炉渣电导率取在 1700°C 时的稳定数值 $360 \Omega^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$;

5) 炉渣和铸锭与结晶器界面的对流换热系数为 $300 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。

3 求解

利用 ANSYS 软件求解数学模型,通过 Electronics 模块计算电磁场,分别获得电磁力和焦耳热作为动量方程的源项,由此求解温度场。本文以 G20 系列轴承钢为研究对象,通过对 $60\%\text{CaF}_2-10\%\text{CaO}-25\%\text{Al}_2\text{O}_3-5\%\text{MgO}$ 渣进行研究。电极尺寸直径为 40 mm,高度为 160 mm;渣池直径为 55 mm,高度为 60 mm;铸锭直径为 55 mm,高度为 140 mm,其余模拟的物理性质如表 1 所示。图 1 为有限元模拟的网格划分示意图,单元网格长度为 4 mm,单元总数为 370 710。

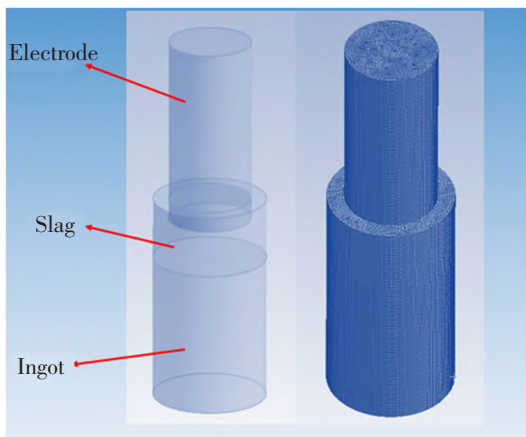


图 1 电渣重熔模型及网格划分示意图

Fig.1 Electroslag remelting model and grid division diagram

表 1 模拟参数及物理性质

Tab.1 Simulation parameters and physical properties

Parameter	Value
Electrode diameter/mm	40
Electrode height/mm	160
Slag density/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2 800
Ingot diameter/mm	55
Ingot height/mm	140
Thermal conductivity of slag/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	10.46
Current/A	1 300, 500, 700
Slag specific heat capacity/ $(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	837
Slag permeability/ $(\Omega^{-1}\cdot\text{m}^{-1})$	1.26×10^7
Ingot specific heat capacity/ $(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	1 225
Frequency/Hz	60
Ingot thermal conductivity $(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	30.52
Electrode, steel ingot conductivity	7.14×10^5
Electrode insertion depth/mm	10, 20, 30
Slag layer diameter/m	55
Slag layer height/m	40
Ingot liquidus/ $^\circ\text{C}$	1 493
Slag conductivity/ $(\Omega^{-1}\cdot\text{m}^{-1})$	360

4 数值模拟结果与分析

本文考察了频率为 60 Hz 下电渣重熔过程中的电磁场强度、电流密度、焦耳热密度及温度场的分布特征。然后分别研究了在电流为 1 500 A,电极插入深度分别为 10, 20, 30 mm 时;电极插入深度为 20 mm,电流分别为 1 300, 1 500, 1 700 A 时,不同工艺参数对电渣重熔过程的影响,具体参数如表 2 所示。

表 2 模拟采用工艺参数

Tab.2 Simulation using process parameters

Serial	Current/A	Electrode insertion depth/mm	Frequency /Hz
1	1 300	20	60
2	1 500	20	60
3	1 700	20	60
4	1 500	10	60
5	1 500	30	60

4.1 温度场

图 2 为在电流 1 500 A,电极插入深度为 20 mm 情况下,电渣重熔系统中心纵截面温度分布图。从图 2 可以看出电渣重熔系统内渣池温度要明显高于电极棒和金属铸锭,其中渣池中心区域温度最高达到 1 987 ℃。图中红色曲线为 G20 铸锭的液相线(1 493 ℃左右),该线基本处于渣层下方,说明该模型计算所得温度符合电渣重熔的基本条件,能够使电极熔化,且顺利通过渣池,最后在水冷结晶器作用下凝固成铸锭。

在渣池中,最高温度位于渣池中上部,渣池产生的焦耳热只能通过结晶器和金属铸锭往外传递,而水冷结晶器的冷却作用强于金属铸锭,所以最高温度出现在渣池中上部,从而形成中心到四周的温度梯度。在铸锭中,从上至下在水冷结晶器的作用下不断降温,形成了下降的温度梯度。

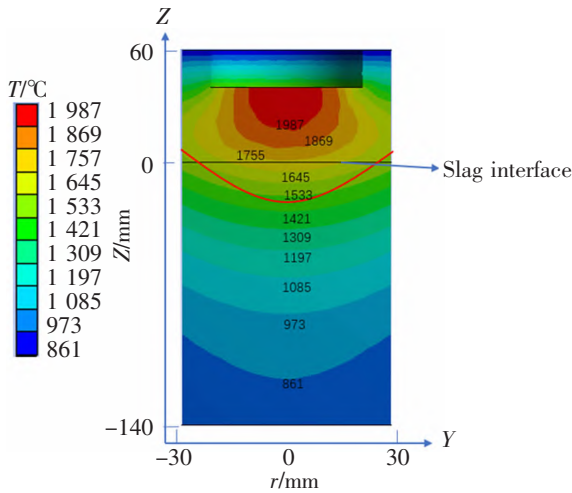


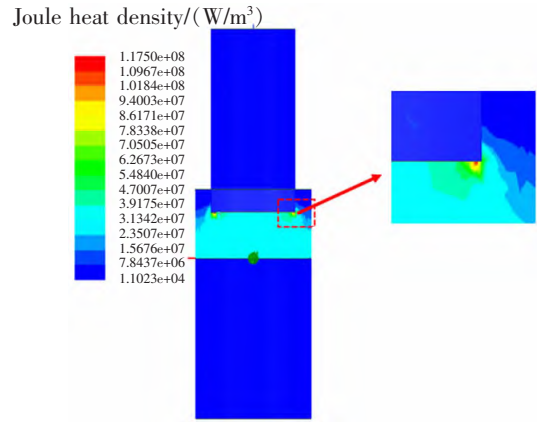
图 2 电渣重熔系统中心纵截面温度分布图

Fig.2 Temperature distribution diagram of the center longitudinal section of the electroslag remelting system

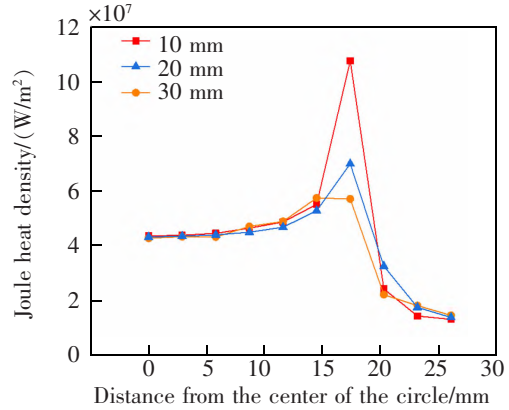
在电渣重熔过程中,电渣最重要的作用之一就是产生焦耳热熔化电极。图 3(a)为电流 1 500 A 电极插入深度为 20 mm 的焦耳热密度分布图。从图 3 (a)可以看出,焦耳热主要分布在渣池内,电极和铸锭产生的焦耳热非常少。电流经电极进入渣池,由于渣池的电阻远大于电极和铸锭,电流经过渣池会产生大量的焦耳热。而电流因集肤效应在电极与渣池接触的边部聚集,所以该处电流密度最大,此处的焦耳热密度也最大。

图 3(b)为电流强度 1 500 A,不同电极插入深度 10,20,30 mm 下,距电极底部 2 mm 渣池横截面

(在图 3(a)中,此截面包含了焦耳热最大值)的焦耳热密度分布。从图 3(a)可以看出,从中心到外壁的 1/2 处($r < 15$ mm)的区域有大量的焦耳热产生且焦耳热密度基本维持不变, $r > 15$ mm 的区域内焦耳热密度随着位置朝外壁方向先增大后逐渐减小,峰值出现在 $r = 19$ mm 位置,位于电极棒与渣池接触的边角部,该位置电流密度最大。在该位置处,电极插入深度为 10 mm 时,产生的焦耳热最大。这是由于电极棒与渣池接触面积小,导致电流密度更高。



(a) Joule heat density distribution map



(b) The influence of the Joule heat density at the depth of 2 mm from the bottom of the electrode when the electrode is inserted

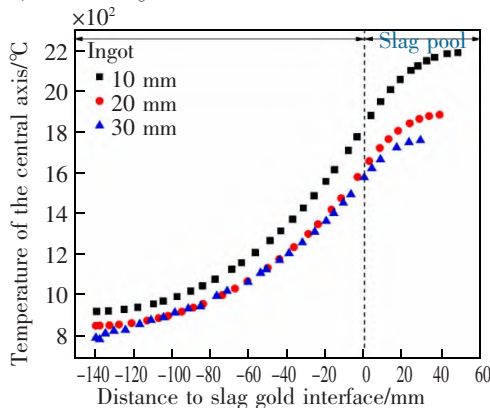
图 3 工艺参数对焦耳热密度影响

Fig.3 Influence of process parameters on Joule heat density

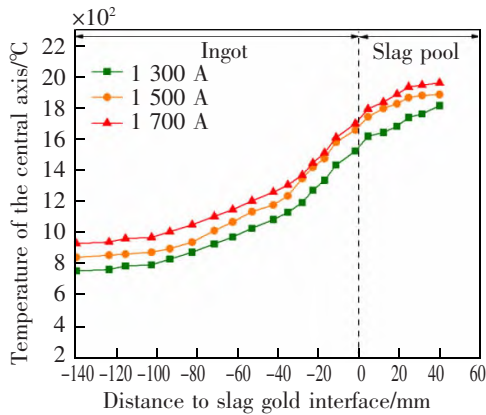
图 4(a)是当电流为 1 500 A,电极插入深度对电渣重熔体系中心轴线温度分布的影响。从图 4(a)可以看出,最高温度都处于渣池部分,渣金界面平均温度大约为 1 600 ℃。但随着电极插入深度的增加,中心轴线上的温度最大值逐渐减小。由图 3(b)可知,电极插入深度增加会使渣池中产生的焦耳热减少。电极插入深度从 10 mm 增加到 30 mm,中心轴线最高温度从 2 187 ℃下降到 1 753 ℃。渣金界面

温度从 1 821 ℃下降到 1 516 ℃, 均大于钢锭的液相线温度 1 493 ℃, 保证钢液顺利通过渣层后逐渐凝固形成铸锭。

图 4(b)为电极插入深度 20 mm, 电流大小对电渣重熔体系中心轴线温度分布的影响, 从图 4(b)中可以看出随着电流的增大, 渣池内温度明显增加。电流增大, 电场强度相应增加, 由麦克斯韦方程可知, 此时电流密度相应增大, 在电阻不变的情况下, 产生的焦耳热变多, 温度也升高。当电流从 1 300 A 增加到 1 700 A 时, 渣金界面中心温度从 1 522 ℃上升到 1 835 ℃, 渣池中心线上最高温度从 1 813 ℃上升到 1 958 ℃。



(a) The influence of electrode insertion depth on the temperature distribution of the central axis of the electroslag remelting process



(b) The influence of the current magnitude on the temperature distribution of the central axis of the electroslag remelting process

图 4 工艺参数对电渣重熔过程中心轴线温度分布影响

Fig.4 Influence of process parameters on the temperature distribution of the central axis in the electroslag remelting process

4.2 电磁场

图 5 为电流 1 500 A, 电极插入深度 20 mm 的电流密度矢量及其分布云图。可以看到电流从电极顶端流入, 从电极底端流入渣池, 经过渣金界面流

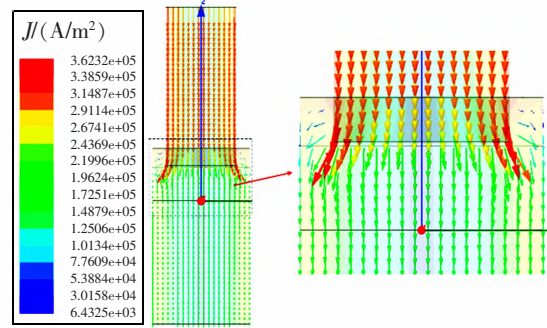


图 5 电流密度矢量图

Fig.5 Current density vector diagram

入铸锭, 最后从铸锭底部流出。由于渣池的横截面比电极横截面要大, 所以渣池中电流密度也相应降低。当电流从渣池流入铸锭, 由于集肤效应, 电流集中在铸锭的外表面。

本文还讨论了电流大小、电极插入深度以及渣层位置的磁场分布。图 6 为电流 1 500 A, 电极插入深度 20 mm 情况下磁场强度分布云图。从图 6 中可以看出电极和铸锭内的磁场强度主要分布在表面。磁场强度正比于电流密度和距离体系轴心线的距离。由于电极表面附近电流密度值最大, 所以磁场强度在电极底部角部达到最大值, 而在体系轴心线位置磁场强度最小, 磁场强度与上述电流密度的分布基本相同。

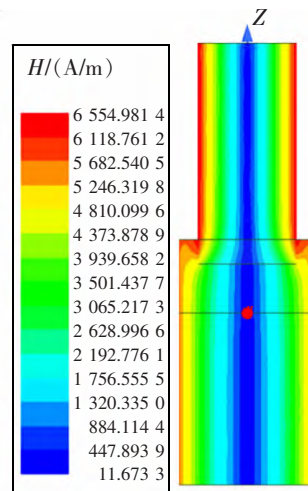
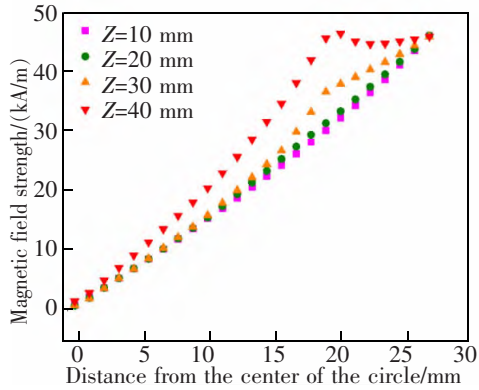


图 6 磁场强度分布云图

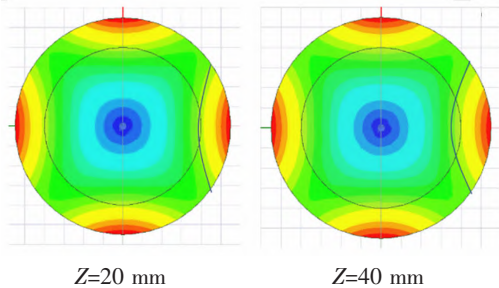
Fig.6 Cloud map of magnetic field intensity distribution

图 7(a)为电流 1 500 A, 电极插入深度 20 mm, 离电极底部不同距离截面上磁场强度沿径向的分布, 图 7(b)为 Z=20 mm 和 Z=40 mm 截面磁场强度分布图。从图 7(a)中可以看出, 磁场强度在中心处

低,在外表面高。 $Z=40\text{ mm}$ 截面上的磁场强度增长最快,在距圆心距离 $r=20\text{ mm}$ 时达到峰值。该截面为渣池与铸锭的交界面,由于铸锭区电导率大于渣池,电流密度也较渣池变大,该截面上的磁场强度增长较快。 $Z=30\text{ mm}$ 的磁场分布与 $Z=40\text{ mm}$ 相似,之后磁场速度增加速率稍有降低。 $Z=10\text{ mm}$ 和 $Z=20\text{ mm}$ 磁场分布基本一致,磁场强度随半径增大而增大,分布较为均匀。



(a) The distribution of the magnetic field strength along the radial direction on different cross-sections



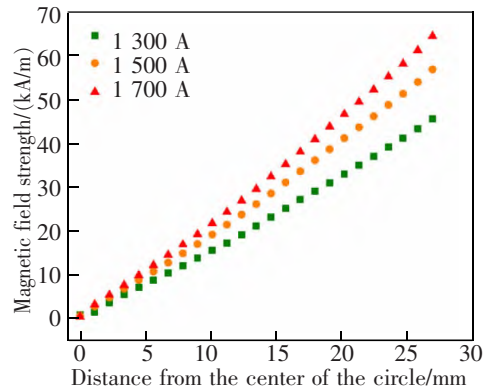
(b) The magnetic field strength distribution diagram of the cross-sections $Z=20\text{ mm}$ and $Z=40\text{ mm}$

图 7 磁场强度沿径向的分布

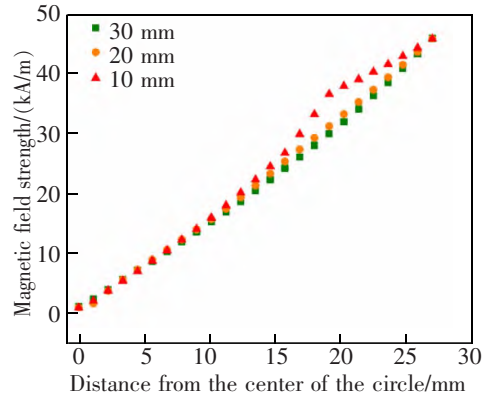
Fig.7 Distribution of magnetic field strength along the radial direction

图 8(a)是在 $1\ 500\text{ A}$ 的电流下,电极插入深度对磁场强度分布在渣层中心的影响。由于渣层电导率小于电极,且接触面发生变化,电流在电极底部会重新分布,所以在 $r<15\text{ mm}$ 时,电极插入深度对磁场强度影响不大。当 $r>15\text{ mm}$,电极插入深度为 10 mm 时,磁场强度增长最快,在 $r=20\text{ mm}$ 时增加速度有所降低。随着电极插入深度的增加,磁场强度增长速度略有降低,但磁场强度增长更为平均。

图 8(b)为电流大小对在渣层中心磁场强度分布的影响。磁场强度随半径的增加而增加,在渣层



(a) The influence of the current size on the magnetic field intensity distribution in the center of the slag layer



(b) The influence of the electrode insertion depth on the magnetic field intensity distribution in the center of the slag layer

图 8 工艺参数对渣层中心磁场强度的影响

Fig.8 Influence of process parameters on the magnetic field strength in the center of the slag layer

中心最小,渣层外表面达到最大。电流从 $1\ 300\text{ A}$ 增加至 $1\ 500\text{ A}$, 磁场强度最大值从 45.65 kA/m 提升到 56.92 kA/m , 提高了约 24.7% ; 电流从 $1\ 500\text{ A}$ 增加至 $1\ 700\text{ A}$, 磁场强度从 56.92 kA/m 提升到 64.55 kA/m , 提高了约 13.4% 。说明改变电流大小,可以适当增加磁场强度。

5 结论

本文通过模拟 G20 轴承钢电渣重熔过程,研究了不同电流及电极插入深度下电流密度、焦耳热密度、磁场强度及温度场变化,得出以下结论。

1) 在电极和钢锭内, 电流主要集中在外表面;在渣池内,由于渣的电导率低,且电极与渣池的接触面发生改变,电流分布发生改变,电流密度最大值位于电极尖角与渣层接触位置;电渣重熔系统的焦耳热主要分布在渣池;体系最高温度位于渣池中上部。

2) 相同 1 500 A 电流,电极插入深度增加导致电极与渣池接触的角部电流密度减小,所以角部附近的焦耳热密度也减小,电流密度在电极下方渣池中心的分布更均匀。

3) 相同电极插入深度 20 mm,电流从 1 300 A 增加到 1 700 A,磁场强度最大值从 45.65 kA/m 增加到 64.55 kA/m,中心轴线温度最大值从 1 813 ℃ 上升到 1 958 ℃。

4) 相同 1 500 A 电流下,电极插入深度从 10 mm 增加到 30 mm,电渣重熔过程中心轴线温度较于磁场强度影响较大,磁场强度最大值从 45.7 kA/m 下降到 44.6 kA/m,中心轴线温度最大值从 2 187 ℃ 下降到 1 753 ℃。

参考文献:

- [1] 姜周华,董艳武,耿盘,等. 电渣冶金学[M]. 北京:科学出版社,2015.
JIANG Z H,DONG Y W,GENG P,et al. Electroslag metallurgy[M]. Beijing:Science Press,2015.
- [2] 李正邦. 电渣冶金的理论与实践[M]. 北京:冶金工业出版社,2010.
LI Z B. Theory and Practice of Electroslag Metallurgy[M]. Beijing:Metallurgical Industry Press,2010.
- [3] 李红利,徐玉松,田开文,等. 电渣重熔对 CuMn50 合金组织和性能的影响[J]. 材料与冶金学报,2020,19(1):57-64.
LI H L,XU Y S,TIAN K W,et al. The effect of electroslag remelting on the structure and properties of CuMn50 alloy [J]. Journal of Materials and Metallurgy,2020,19(1):57-64.
- [4] 姜周华,陈旭,董艳伍,等. 电渣冶金技术的创新与发展[N]. 世界金属导报,2015-11-03(B08).
JIANG Z H,CHEN X,DONG Y W,et al. The innovation and development of electroslag metallurgy technology [N]. World Metal Herald,2015-11-03(B08).
- [5] 李小孟,刘立,赵俊学,等. 电渣重熔冶金过程炉渣黏度性能研究[J]. 金属世界,2015(5):56-59.
LI X M,LIU L,ZHAO J X,et al. Study on slag viscosity performance of electroslag remelting metallurgical process [J]. Metal World,2015(5):56-59.
- [6] 张威风,杨金安,郭显胜,等. 电渣重熔生产 30CrMnSi-Ni2A 航空锻件用钢的探索[J]. 热加工工艺,2017,46(15):168-172.
ZHANG W F,YANG J A,GUO X S,et al. Exploration on the production of 30CrMnSiNi2A aviation forging steel by electroslag remelting[J]. Hot Working Technology,2017,46(15):168-172.
- [7] 朱海燕,朱志和,肖乾,等. 高速列车齿轮箱疲劳可靠性及故障诊断研究现状[J]. 华东交通大学学报,2021,38(1):113-121.
ZHU H Y,ZHU Z H,XIAO Q,et al. Research status of fatigue reliability and fault diagnosis of high-speed train gearbox[J]. Journal of East China Jiaotong University,2021,38(1):113-121.
- [8] 韩丽辉,于春梅,曲明磊. 电渣重熔过程流场和温度场的数值模拟[J]. 实验室研究与探索,2018,37(1):47-53.
HAN L H,YU C M,QU M L. Numerical simulation of flow field and temperature field in electroslag remelting process [J]. Laboratory Research and Exploration,2018,37(1):47-53.
- [9] KHARICHA A,LUDWIG A,WU M. Shape and stability of the stag/melt interface in a small DC ESR process[J]. Materials Science and Engineering,2005,413A(6):129.
- [10] SIBAKI E K,KHARICHA A,WU M,et al. A Numerical Study on the Influence of the Frequency of the Applied AC Current on the Electroslag Remelting Process[M]. Austin:Springer International Publishing,2013.
- [11] LI B K,WANG F,FUMITAKE T. Current,magnetic field and Joule heating in electroslag remelting processes[J]. ISI International,2012,52(7):1289.
- [12] 刘福斌,李永旺,姜周华,等. 实验室规模和工业规模电渣重熔过程中电磁行为[J]. 中南大学学报(自然科学版),2015,46(10):3580-3585.
LIU F B,LI Y W,JIANG Z H,et al. Electromagnetic behavior during laboratory-scale and industrial-scale electroslag remelting[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition),2015,46(10):3580-3585.
- [13] 王芳,李宝宽. 电渣重熔过程中的电磁场和 Joule 热分析[J]. 金属学报,2010,46(7):794-799.
WANG F,LI B K. Electromagnetic field and Joule thermal analysis during electroslag remelting process[J]. Acta Metals Sinica,2010,46(7):794-799.
- [14] 苗志奇,成国光,李世健,等. 工业电渣重熔过程电极插入深度数学模型及应用[J]. 钢铁,2018,53(9):25-29.
MIAO Z Q,CHENG G G,LI S J,et al. Mathematical model and application of electrode insertion depth in industrial electroslag remelting process[J]. Iron and Steel,2018,53(9):25-29.
- [15] 齐海阳,李先春,李万明,等. 抽锭电渣重熔过程的流场和温度场的分布规律[J]. 钢铁研究学报,2018,30(4):

- 294-301.
- QI H Y, LI X C, LI W M, et al. Distribution of flow field and temperature field during electroslag remelting process of ingot extraction[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2018, 30(4): 294-301.
- [16] 余嘉, 刘福斌, 姜周华, 等. 工业规模电渣重熔过程电磁场的数值模拟[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2017, 38(5): 655-660.
- YU J, LIU F B, JIANG Z H, et al. Numerical simulation of electromagnetic field in industrialscale electroslag remelting process[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science) Edition, 2017, 38(5): 655-660.
- [17] 刘双, 贺铸, 蔡辉, 等. 不同工艺参数下电渣重熔过程的数值模拟[J]. 钢铁研究学报, 2015, 27(10): 26-33.
- LIU S, HE Z, CAI H, et al. Numerical simulation of electroslag remelting process under different process parameters[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2015, 27(10): 26-33.
- [18] 吕斌, 李志强, 杨智勇, 等. 电渣重熔工艺对 GCr15 轴承钢凝固组织的影响[J]. 材料导报, 2021, 35(24): 24134-24141.
- LV B, LI Z Q, YANG Z Y, et al. Effect of electroslag remelting process on solidification structure of GCr15 bearing steel[J]. Materials Review, 2021, 35(24): 24134-24141.
- [19] 邓南阳, 施晓芳, 陈佳顺, 等. 结晶器旋转数值模拟及对高速钢电渣锭碳化物的影响[J]. 工程科学学报, 2020, 42(4): 516-526.
- DENG N Y, SHI X F, CHEN J S, et al. Numerical simulation of mold rotation and its influence on carbides of high speed steel electroslag ingot[J]. Journal of Engineering Science, 2020, 42(4): 516-526.
- [20] 孙梦茹, 陈云建, 慕讨荣, 等. Inconel718 高温合金的电渣重熔过程熔滴滴落行为[J]. 辽宁科技大学学报, 2018, 41(6): 419-426.
- SUN M R, CHEN Y J, MU S R, et al. Droplet dropping behavior during electroslag remelting of inconel718 superalloy[J]. Journal of Liaoning University of Science and Technology, 2018, 41(6): 419-426.
- [21] FEZI K, YANKE J, KRANE M J M. Macrosegregation during electroslag remelting of alloy 625[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2015, 46(2): 766-779.
- [22] 曹文全, 李绍昆, 雷建中, 等. 国内外轴承钢现状与发展趋势[N]. 世界金属导报, 2015-08-11(B12).
- CAO W Q, LI S K, LEI J Z, et al. Current situation and development trend of bearing steel at home and abroad [N]. World Metal Bulletin, 2015-08-11(B12).
- [23] 任秀平. 国内特殊钢现状及发展方向[N]. 世界金属导报, 2016-10-18(B14).
- REN X P. Current situation and development direction of domestic special steel[N]. World Metal Bulletin, 2016-10-18(B14).
- [24] 王兴艳, 李丹. 国内铁路用钢现状及趋势展望[J]. 冶金经济与管理, 2017(6): 38-42.
- WANG X Y, LI D. Development and trend prospects of domestic railway steel[J]. Metallurgical Economics and Management, 2017(6): 38-42.
- [25] WANG Q, LOUIS G, LI B K. Effect of rotating electrode on magnetohydrodynamic flow and heat transfer in electroslag remelting process[J]. ISIJ International, 2014, 54(12): 2821-2830.
- [26] DILAWARI A H, SZEKELY J. A mathematical model of slag and metal flow in the ESR process[J]. Metallurgical Transactions, 2015, 8B(1): 95.



第一作者: 杨韬(1997—), 男, 硕士, 研究方向为先进材料成型技术与控制。E-mail: 405899325@qq.com。



通信作者: 唐祁峰(1981—), 男, 博士, 2013年毕业于重庆大学, 研究方向为冶金工程。E-mail: tqfkmust@126.com。

(责任编辑: 吴海燕 姜红贵)