

HRS 法定向凝固双区感应加热过程电磁场数值模拟

耿小奇 张相龙 徐 莽 刘国怀 王昭东
(东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室)

摘 要 采用有限元方法模拟分析 HRS 法定向凝固双区感应加热过程的电磁场,研究电源参数、结构参数对磁场分布特征的影响。结果表明,双区感应加热过程中石墨发热体内的磁场分布不均匀,水冷环内部的磁场强度最小。随着电流强度减小以及电源频率增加,保温包内部的磁场强度降低。随着石墨发热体电导率以及厚度增加,磁场强度降低;石墨筒高度增加,保温包内磁场增大;设置短路环降低了保温包内部磁场强度。

关键词 定向凝固;数值模拟;感应加热;磁场分布

中图分类号 TG111.4;TP311;TG155.2 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.08.007 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Numerical Simulation of Electromagnetic Field during Double-zone Induction Heating Process of Directional Solidification by HRS Method

Geng Xiaoqi, Zhang Xianglong, Xu Mang, Liu Guohuai, Wang Zhaodong
(State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University)

Abstract: Finite element method was adopted to simulate and calculate the electromagnetic field during the double-zone induction heating process of directional solidification by HRS method, and the influence of power parameters and structural parameters on the magnetic field distribution characteristics was investigated. The results indicate that the magnetic field in the graphite heating unit is unevenly distributed during the double-zone induction heating process, and the magnetic field intensity inside the insulation baffle is the lowest. As the current intensity decreases and the power frequency increases, the internal magnetic field intensity in the insulation package is decreased. With the increase of conductivity and thickness of the graphite heating unit, the internal magnetic field intensity is decreased. As the height of the graphite tube increases, the internal magnetic field intensity is increased. In addition, the existence of the short circuit ring reduces the internal magnetic field intensity of the insulation package.

Key Words: Directional Solidification, Numerical Simulation, Induction Heating, Magnetic Field Distribution

定向/单晶高温合金消除了易产生裂纹的横向/全部晶界,显著提高了合金的综合性能^[1~3]。定向凝固技术通过采取强制措施在已凝固金属和未凝固熔体间建立特定的温度梯度,使晶体沿着热流相反的方向定向生长,进而获得具有特殊取向的柱状晶或单晶组织^[4~9]。

定向凝固技术通过上端热区、下端冷区及中间隔热挡板的设置获得满足晶体定向生长的基本条件^[10~13]。强化加热以提高热区温度是提高固液界面前沿温度梯度的有效思路^[14, 15]。石墨发热体由于其良好的磁场屏蔽能力,目前广泛应用于炉体发热原件。随着加热技术的不断发展,具有双区独立控温的感应加热技术是定向

凝固装置保温包的首选加热方式。石墨发热体在交变磁场下感应生热,同时又具有一定的磁场屏蔽作用,对于满足定向组织生长所需严苛生长环境的定向凝固设备来说,具有明显的优势。然而,快速凝固法(High Rate Solidification, HRS)制备柱状晶/单晶高温合金竞争生长过程受温度场及溶质场等多场耦合作用,以及晶体生长速率及温度梯度的综合影响,其生长环境极为复杂。感应加热条件下不可避免存在电磁场、温度场及熔体扰动情况,影响枝晶的定向稳定生长。

目前针对 HRS 法定向凝固双区感应加热条件下保温包内磁场分布的相关报道较少,因此对双区感应加

收稿日期:2021-09-15;修改稿收到日期:2021-10-29
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52071065);中央高校基本科研业务费资助项目(N2007007);国家重点研发计划资助项目(2016YFB0301201)
第一作者简介:耿小奇,女,1997 年出生,硕士研究生,沈阳(110819),E-mail:996490108@qq.com
通信作者:刘国怀,男,1985 年出生,副教授,沈阳(110819),E-mail:liugh@ral.neu.edu.cn
引用格式:耿小奇,张相龙,徐莽,等. HRS 法定向凝固双区感应加热过程电磁场数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(8):956-959.
GENG X Q, ZHANG X L, XU M, et al. Numerical simulation of electromagnetic field during double-zone induction heating process of directional solidification by HRS method[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(8):956-959.

热定向凝固过程中电磁场的研究具有重要意义。本课程采用 COMSOL 模拟软件,分析定向凝固双区感应加热条件下保温包内电磁场的分布情况,考察电源参数及石墨发热体结构对保温包内磁场分布规律的影响,旨在为其应用提供参考。

1 数学物理模型

1.1 电磁场控制方程

感应加热过程中由感应线圈中的交变电流产生的电磁场为近场源的感应场,满足稳准条件,Maxwell 方程组有如下形式:

$$\nabla \times E = -\partial B / \partial t \tag{1}$$

$$\nabla \times H = J \tag{2}$$

$$\nabla \times B = 0 \tag{3}$$

并且满足下列关系:

$$B = \mu H \tag{4}$$

$$J = \sigma E \tag{5}$$

式中, E 为电场强度; B 为磁感应强度; H 为磁场强度; J 为电流密度; μ 为磁导率; σ 为电导率。

1.2 计算模型

根据实际单晶炉保温包设计结构尺寸,按 1 : 1 建立三维双区感应加热模型,见图 1。模拟计算中的材料参数见表 1。着重分析电源参数、石墨发热体结构等对保温包内部磁场分布的影响,具体模拟参数见表 2。保温包模型内电磁场求解路径见图 1b。

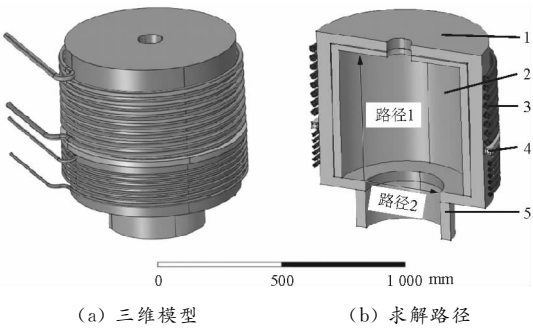


图 1 双区感应加热装置的计算模型

Fig.1 Calculation model of induction heating device in double zone

1.保温包 2.石墨发热体 3.上感应线圈 4.短路环 5.水冷环

表 1 磁场数值模拟材料性能

Tab.1 Properties calculated by simulation of magnetic field					
模型结构	材质	相对磁导率	相对介电常数	电导率/ (MS · m ⁻¹)	密度/ (kg · m ⁻³)
感应线圈、水冷环、短路环	铜	0.999 991	1	58.0	8 933
石墨发热体	石墨	1	1	0.7	2 250
底部保温层	硬质碳毡	1	1	0.003	130
侧保温层	软碳毡	1	1	0.003	130

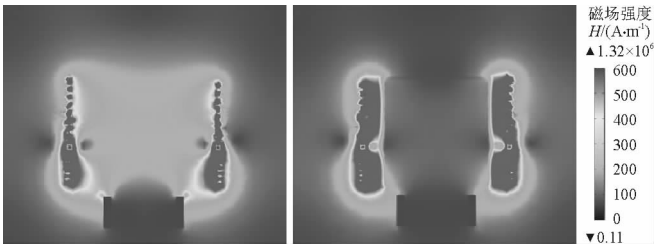
表 2 数值模拟计算参数

Tab.2 Parameters for numerical simulation calculation				
电流/ A	电源频率/ kHz	石墨电导率/ (MS · m ⁻¹)	石墨厚度/ mm	石墨筒高度/ mm
125、175、 250、500	3、4、6、8	0.07、0.09、 0.11、0.125	0、30、40、 50、60	537、737

2 计算结果与讨论

2.1 定向凝固 HRS 结构双区感应加热的磁场分布特征

图 2 是电流强度和频率分别为 500 A 和 3 000 Hz 时双区感应加热过程的磁场分布云图。可以看出,定向凝固过程空间磁场分布存在明显差异。感应加热条件下电磁场主要集中分布于线圈和石墨发热体之间,而保温包内部空间具有相对较低的磁场强度,见图 2b。这表明石墨发热体可以很好地屏蔽磁场。石墨发热体内部空间磁场分布不均匀,磁场强度最大值主要分布在内壁,最小值主要分布在水冷环内。发热体上部磁场强度主要集中在上盖板区域,下部磁场强度主要集中在石墨发热体底部位置;中部短路环附近区域具有较低的磁场强度,这是由于短路环阻止上下线圈产生的磁场叠加,减小磁场之间相互的影响。通过上述分析发现,电源参数和结构参数是空间磁场的主要影响因素。



(a) 无石墨发热体 (b) 石墨发热体厚度为 30 mm

图 2 保温包沿纵截面方向磁场强度分布

Fig.2 Magnetic field intensity distribution along the longitudinal section direction of insulation package

为验证模拟准确性,采用小线圈法^[16]对保温包外部磁场强度进行实际测量。功率为 15 kW、频率为 3 kHz 条件下的测量和模拟计算结果见图 3。可以看出,

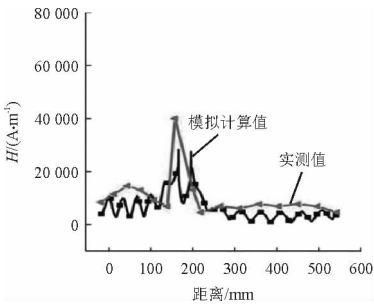


图 3 磁场强度计算值与实测值对比

Fig.3 Comparison of calculated and measured values of magnetic field intensity

测量结果与模拟结果在数值上接近。虽然某些位置磁场强度存在一定差异,但整体分布规律一致。感应线圈上下端,尤其是短路环附近存在复杂的磁场分布。模拟结果与实际测量的差异归因于测量过程中的误差以及模拟过程中磁场的屏蔽效果要明显好于实际过程。根据实际测量和模拟结果对比,采用的模拟模型可以用来计算研究双区感应加热过程保温包内外的磁场变化规律。

2.2 电源参数对磁场分布的影响

不同电流条件下,保温包内不同路径上的磁场分布见图 4。可以看出,随着电流强度增加,保温包内的磁场强度增大。电流从 125 A 增至 500 A,磁场强度值增加 2~4 倍,其变化趋势与电流强度成正比,且电流变化不影响磁场分布。曲线在上盖板和隔热挡板处存在突变。隔热挡板内部磁场强度最小值由 22 A/m 增至 98 A/m。

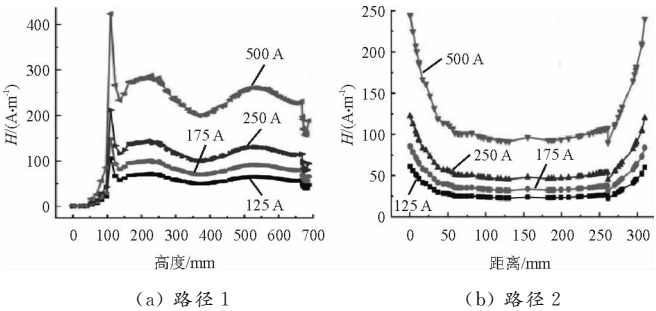


图 4 不同电流条件下沿不同路径磁场强度分布

Fig.4 Magnetic field intensity distribution along different paths under different currents

感应线圈中的交变磁场是随时间时谐规律变化的电磁场,可由复数形式表示^[17, 18]。

随着电流强度增大,源电流密度增大,非涡流区的矢量磁位随之增加。根据式(7)和式(8),非涡流区的复矢量磁位会同步传到涡流区,使涡流区矢量磁位也同步增加,磁感应强度 B 也随之增加的。由于复矢量磁位都是同步增加,所以并不会影响磁场强度的变化趋势。

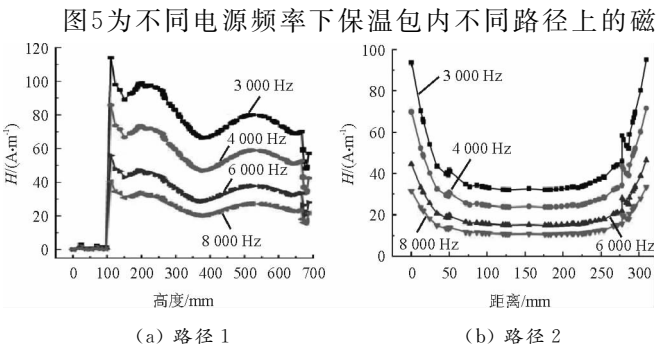


图 5 不同电源频率下沿不同路径磁场强度分布

Fig.5 Magnetic field intensity distribution along different paths under different power frequencies

场分布。可以看出,随着电源频率增加,磁场强度明显降低。频率从 3 000 Hz 增至 8 000 Hz,隔热挡板内磁场强度最小值由 36 A/m 减小至 16 A/m。这是由于频率增加会增加石墨发热体的集肤效应,使大量电磁场能消耗在集肤涡流层内,而一定功率下感应线圈产生的总电磁场能是守恒的,进而使保温包内磁场减小。

2.3 保温包结构对磁场分布的影响

石墨发热体由于良好的导电和导热性能,是高温真空设备广泛采用的一种发热体材料。在相同的加热条件下,获得高的加热温度和良好的磁场屏蔽能力是发热体的选择依据^[19]。图 6 为不同电导率下保温包内部不同路径的磁场分布。可以看出,随着电导率增加,石墨发热体的屏蔽能力增强,保温包内部磁场强度逐渐减小。电导率从 0.07 MS/m 增至 0.125 MS/m,保温包内部磁场强度值减小了 33%~50%,隔热挡板内磁场强度值逐渐减小,磁场强度最小值由 36 A/m 减小至 18 A/m。

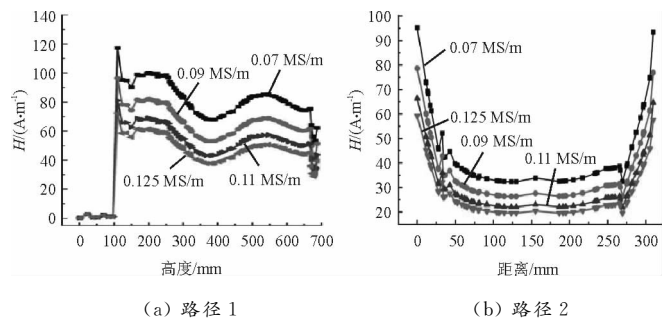


图 6 不同石墨电导率下沿不同路径磁场强度分布

Fig.6 Magnetic field intensity distribution along different paths under different graphite conductivities

图 7 为不同石墨发热体厚度下保温包内不同路径上的磁场分布。可见,随石墨发热体厚度增加,保温包内部磁场强度大幅度下降,石墨发热体厚度从 30 mm 增至 60 mm,保温包内部磁场强度值减小了 50%,隔热挡板内磁场强度最小值由 32 A/m 减小至 13 A/m,显著降低了熔体中电磁扰动的影响。

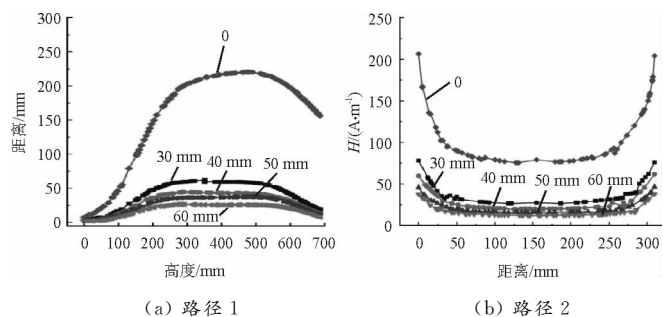


图 7 不同石墨发热体厚度下沿不同路径磁场强度分布

Fig.7 Magnetic field intensity distribution along different paths under different graphite thickness

图 8 为不同石墨筒高度条件下保温包内部不同路径处磁场强度变化。可以看出,石墨筒高度增加,保温包内部磁场强度增大,石墨筒高度从 537 mm 增至 737 mm,隔热挡板内磁场强度最小值由 32 A/m 增加至 48 A/m。说明过高的石墨筒高度不利于保温包内部磁场的屏蔽。实际应用中,石墨筒高度与线圈高度相当即可。

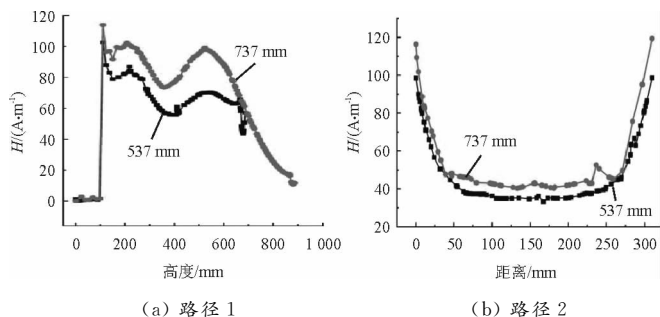


图 8 不同石墨筒高度下沿不同路径磁场强度分布

Fig.8 Magnetic field intensity distribution along different paths under different graphite heater heights

短路环是感应加热中的重要装置。短路环通常选择铜、铝等导电材料^[20]。感应线圈通电时产生交变磁场,位于交变磁场内部的短路环也会产生感应电流。感应电流产生的反向磁场与线圈产生的磁场相互抵消。双区感应加热定向凝固中,在上下线圈之间增加短路环,可以减少上下独立线圈在加热过程的相互干扰,同时也可以在一定程度上屏蔽保温包内部的磁场。短路环对保温包内磁场的影响见图 9。可以看出,短路环的存在改变了保温包内部磁场的分布情况,降低了保温包内部磁场强度,使隔热挡板内磁场强度由 39 A/m 减小至 32 A/m。

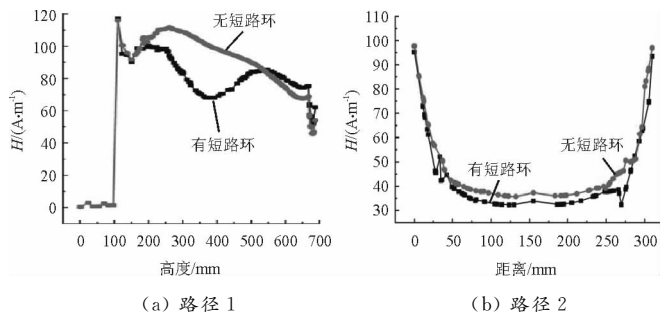


图 9 短路环对保温包内部不同路径磁场强度分布的影响

Fig.9 Effects of short circuit ring on magnetic field intensity distribution inside insulation package

3 结 论

(1)双区电磁感应加热条件下电磁场主要集中分布于线圈和石墨发热体之间,而保温包内部空间具有相对较低的磁场强度。石墨发热体内部空间磁场分布是不均匀的,磁场强度最小值主要分布在隔热挡板附近。采

用小线圈法对保温包内外不同路径下的磁场强度进行实际测量,测量结果与模拟结果整体分布规律一致。

(2)随着电流强度增加,保温包内磁场强度增加。随着电源频率增加,保温包内磁场强度逐渐减小。

(3)随着石墨发热体电导率和厚度增加,石墨发热体内部磁场强度降低,磁场屏蔽效果增加。过高的石墨筒高度不利于保温包内部磁场的屏蔽,石墨筒高度与线圈高度相当即可。短路环可以减少上下独立线圈在加热过程的相互干扰,降低了保温包内部磁场强度。

参 考 文 献

- [1] WILSON B C, CUTLER E R, FUCHS G E. Effect of solidification parameters on the microstructures and properties of CMSX-10[J]. Materials Science & Engineering, 2008, A479(1-2): 356-364.
- [2] WANG F, WU Z N, MA D X, et al. Effect of directional solidification variables on the microstructures of single-crystal turbine blades of nickel-based superalloy[J]. Advanced Engineering Materials, 2017, 19(11): 1 700 297.
- [3] ZHANG J, LI J G, JIN T, et al. Effect of solidification parameters on the microstructure and creep property of a single crystal Ni-base superalloy[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2010, 26(10): 889-894.
- [4] 汤国兴,毛卫民,刘永峰. 定向凝固技术的发展与应用[J]. 中国铸造装备与技术, 2007(2): 11-16.
- [5] 苏彦庆,郭景哲,刘畅,等. 定向凝固技术与理论研究的进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2006, 26(1): 25-30.
- [6] 李勇,郑碰菊,张建波,等. 定向凝固技术的研究现状及发展趋势[J]. 材料导报, 2014, 28(23): 108-112.
- [7] 傅恒志. 航空航天材料定向凝固[M]. 北京:科学出版社, 2015.
- [8] 刘林,张军,沈军,等. 高温合金定向凝固技术研究进展[J]. 中国材料进展, 2010, 29(7): 1-9.
- [9] 陈光,傅恒志. 非平衡凝固新型金属材料[M]. 北京:科学出版社, 2004.
- [10] SCHUBEL P J, CROSSLEY R J, BOATENG E, et al. Review of structural health and cure monitoring techniques for large wind turbine blades[J]. Renewable Energy, 2013, 51: 113-123.
- [11] VERSNYDER F I, SHANK M E. The development of columnar grain and single crystal high temperature materials through directional solidification[J]. Materials Science and Engineering, 1970, 6(4): 213-247.
- [12] ERICKSON J S, OWCZARSKI W A, CURRAN P M. Advances in fabricating aerospace structures process speeds up directional solidification[J]. Metal Progress, 1971, 99(3): 58-60.
- [13] 刘林,张军,沈军,等. 高温合金定向凝固技术研究进展[J]. 中国材料进展, 2010(7): 1-9.
- [14] 许雄. 电磁场对镍基高温合金 K403 定向凝固组织的影响研究[D]. 西安:西北工业大学, 2005.
- [15] 刘承林,苏海军,张军,等. 静磁场对定向凝固镍基高温合金组织影响的研究进展[J]. 材料工程, 2019, 47(9): 13-20.
- [16] 张兴国,曲若家,何文庆,等. 电磁连铸系统磁场的数值模拟及试验研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2004(6): 34-36.
- [17] 杨冬. 中频感应电炉熔炼过程中电磁场与温度场的数值模拟技术研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2012.
- [18] 许冰,严亮,刘丽华. 电磁场的复矢量表示[J]. 大学物理, 2007(4): 16-23.
- [19] 罗文忠,沈军,肇恒跃,等. 电磁感应加热条件下不同发热体中磁场分布研究[J]. 热加工工艺, 2013, 42(22): 95-98.

(编辑:刘晨辉)