

热顶电磁成型系统磁场的实验与数值模拟

曲若家, 张兴国, 何文庆, 房灿峰, 金俊泽

(大连理工大学 铸造工程研究中心, 辽宁 大连 116024, E-mail: quruojia@163.net)

摘要: 根据电磁场理论, 建立了热顶-电磁连铸成型系统的物理和数学模型, 用小线圈法实测了不同电源功率时系统内的磁场强度, 用有限元软件数值模拟了感应线圈高度、结晶器高度、热顶结构等对成型系统内磁感应强度和分布的影响, 结果表明: 1) 降低结晶器高度使系统内磁感应强度增强, 但不十分明显; 2) 感应线圈的高度对系统内磁场影响显著, 采用 20mm 线圈较 40mm 线圈的磁感应强度提高约 85%; 3) 有载时的模拟结果显示, 系统内的磁场呈现更明显的趋肤效应; 热顶结构对磁场的强度和分布规律无明显的影响. 研究结果表明热顶电磁连铸法将有利于提高电源效率和稳定液柱高度, 改善铸坯的内外部质量.

关键词: 羟基磷灰石; 生物陶瓷; 密度; 烧结

中图分类号: TG146.22, TG379

文献标识码: A

文章编号: 1005-0299(2005)06-0647-05

Experimental and numerical simulation of the magnetic field in the Hot-top electromagnetic continuous casting system

QU Ruo-jia, ZHANG Xing-guo, HE Wen-qing, FANG Can-feng, JIN Jun-ze

(Res. Cent. of Foundry Eng., DaLian University of Technology, Dalian 116024, China, E-mail: quruojia@163.net)

Abstract: Based on the theory of an electromagnetic field, the physical and mathematic models of a hot-top electromagnetic continuous casting system have been constructed. The little coil method was used to measure the magnetic field of the shaping system under different powers. Finite element software has been used to numerically simulate the influence on magnetic flux density and the distribution in the mold in terms of the height of the inductor and the mold as well as the structure of the hot-top. The results have shown that: 1) reducing the height of the mold could enhance magnetic flux density in the system, but it wasn't obvious; 2) the height of the inductor had a measurable effect on the magnetism of the system (using the inductor with a height of 20mm could increase the magnetic flux density 85 percent over using the inductor with 40mm in height); 3) the numerical simulation results with the load showed that the skin effect of the magnetic field was becoming obvious. Hot-top had no obvious influence on the magnetic flux density and distributing rule. It showed hot-top electromagnetic continuous casting technology would be favorable to improve the efficiency of the power and to stabilize the height of the liquid column, and could improve the quality of the interior and surface of the ingot.

Key words: continuous casting; hot-top electromagnetic continuous casting; magnetic field; numerical simulation

电磁连铸技术是将普通连铸结晶器分成若干瓣, 在其外侧安放电磁线圈, 电磁场透过结晶器的缝隙作用于金属熔体并产生电磁力, 约束金属熔

体的初始凝固过程, 减少与结晶器壁的接触和摩擦阻力, 达到减轻连铸坯表面缺陷, 提高表面和内部质量的目的^[1,2].

电磁连铸是基于电磁铸造技术基础上发展起来的. 电磁铸造是电磁流体力学与铸造工程相结合的应用技术, 目前已成为铝合金连续铸造的三大生产方法之一. 铝合金的电磁铸造技术由于能够有效改善铸锭的表面品质、细化显微组织, 因

收稿日期: 2004-01-12.

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(59995442), 国家自然科学基金重点资助项目(50234020).

作者简介: 曲若家(1978-), 女, 硕士研究生;

张兴国(1960-), 男, 教授, 博士生导师.

而受到广泛地重视,相关的工作也取得了较快的发展^[3,4].但电磁铸造技术的控制过程复杂,工艺参数的微小变化都会对铸锭的尺寸和表面品质产生影响,限制了它的进一步应用. Vives^[5,6]提出了一种称之为“CREM”法的新工艺,即在结晶器外设置低频电磁场,通过电磁力的作用减小金属熔体与结晶器的接触线高度,改变铸锭冷却过程的热通量分布及熔体内部的温度场和流速场,有效地起到了细化晶粒和改善铸锭表面品质的作用. 浅井滋生将这项技术与冷坩埚技术相结合,提出了软接触电磁铸造工艺^[7].

在铝合金电磁连铸中,液位的稳定控制是个难点,液面位置波动导致结晶器弯月面处所受静压力的波动,从而恶化铸坯表面质量. 另外,电磁搅拌作用产生的流体流动将破坏液柱表面的氧化膜,并不断形成新的氧化膜,增加铸锭表面和内部的氧化物夹杂含量,影响铸锭内部质量. 因此,研究中频电磁场作用下液面形状和控制液面的波动对于提高电磁铸造铸坯质量具有重要的意义. 张兴国等提出热顶-电磁铸造技术,设计制作了热顶-电磁铸造成型系统,优化了铸造工艺参数,制造出尺寸为 $480 \times 20 \times 850\text{mm}$ 的铝薄板样品^[8,9]. 由于热顶的加入,在电磁铸造过程中,少量金属液的增减就不会引起液柱高度明显地变化,从而提高了液柱高度和薄板尺寸以及表面质量的稳定性. 同时又继承了电磁铸造所具有的表面光亮、内部组织均匀细小的优良特性. 如果将热顶的思想引入到电磁连铸中,在结晶器上加热顶,可减小液面波动,稳定弯月面,适当减小结晶器的高度,可削弱结晶器对磁场的屏蔽作用,提高电源效率.

电磁场在结晶器内的分布不仅影响熔池内的流场和温度场,还决定了液柱的形状,从而直接决定了电磁连铸过程的成败. 关于方坯连铸和线材水平连铸过程的电磁场已有学者进行了有意义的数值模拟分析^[10-12]. 本文通过软接触电磁连铸结晶器内的磁场分布特性实测,找出基本分布规律,并用有限元软件进行了三维电磁场数值模拟. 模拟计算了结晶器高度和线圈结构位置等对结晶器内部磁场的影响规律,同时本文将热顶引入电磁连铸技术上,期望通过感应线圈与结晶器的结构设计,模拟其对结晶器内部磁场的影响规律,从而为热顶电磁连铸系统设计提供依据.

1 成型系统设计及磁场测量

1.1 电磁连铸成型系统

电磁连铸实验装置系统由电源、中频淬火变压器、成型和冷却系统、浇注及拉坯系统组成. 结

晶器采用厚8 mm的紫铜板制成内径为 $\phi 120\text{ mm}$ 的圆形结构,结晶器外部通水冷却. 在结晶器上开设了24条宽度为0.4 mm、长100 mm的缝隙. 感应器为高度40 mm,厚5 mm的单匝直边圆线圈. 线圈底端距结晶器底端20 mm. 电源为可控硅整流式中频电源,最大输出功率60 kw,频率2 500 Hz,中频淬火变压器可将电源输出的高电压低电流转化为低电压高电流,供感应器产生交变电磁场^[13].

1.2 磁场测量

电磁铸造条件下的电磁场为复杂的三维场,涡流的存在、高的电流频率使结晶器内的磁场分布很不均匀. 本文用小线圈法测量结晶器内的磁场.

根据电磁感应原理,当小线圈置于结晶器中时,线圈在电磁场的作用下产生感应电动势. 通过测量感应电动势,利用下式计算磁感应强度:

$$B = \frac{E}{2\pi fNS}$$

式中: B 为磁感应强度, T; E 为感应电动势, V; f 为电源频率, Hz; N 为线圈匝数; S 为线圈有效面积, m^2 ^[14]. 本实验中, $f = 2\ 500\text{ Hz}$, $N = 16$, $S = 1.62 \times 10^{-6}\text{ m}^2$. 图1表示了测量磁场时在结晶器内的取点位置.

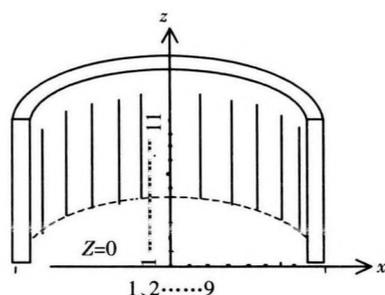


图1 测量点位置示意图

2 电磁场基本理论与数学模型的建立

2.1 电磁场基本理论

电磁场的基本理论由麦克斯韦方程组描述. 微分形式的麦克斯韦方程组如下:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$$

式中: H 为磁场强度, A/m; J 为总电流密度矢量, A/m^2 ; D 电通密度, C/m^2 ; E 为电场强度, V/m ; B 为磁感应强度, T; ρ 为电荷体密度, C/m^3 .

对于电磁场的计算,为了使问题得到简化,通

过定义矢量磁势 A 和标量电势 ϕ 两个量来把电场和磁场变量分离开来,分别形成一个独立的电场或磁场的偏微分方程,有利于数值求解.

矢量磁势定义为:

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$$

标量电势定义为

$$\vec{E} = -\nabla \phi$$

磁场偏微分方程和电场偏微分方程可分别改写为:

$$\nabla^2 \vec{A} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = -\mu \vec{J} \quad (1)$$

$$\nabla^2 \phi - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (2)$$

式中的 μ 和 ε 分别为介质的磁导率和介电常数.对(1)式和(2)式采用有限元法进行数值求解,解得磁势和电势的场分布值,然后再经过转化可得到电磁场的各种物理量,如磁感应强度,储能.

计算中采用诺依曼边界条件,表示如下:

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial n} \right|_{\Gamma} + f(\Gamma) \phi|_{\Gamma} = h(\Gamma) \quad (10)$$

式中: Γ 为诺依曼边界, n 为边界 Γ 的外法线矢量, $f(\Gamma)$ 和 $h(\Gamma)$ 为一般函数(可为常数和零).当为零时为其次诺依曼边界条件.

2.2 数学模型的建立

首先模拟了空载时结晶器内的电磁场.依据实际电磁连铸成型系统,根据实体模型建立有限元计算模型,计算区域包括感应线圈,开缝的结晶器,以及足够的自由空间.对本文所考察的电磁连铸系统,通常认为边界为无穷远处.但是,实际数值计算区域不可能无限大.因此本文假定在距线圈一定距离以外的区域没有励磁磁场的存在.模型建立的圆柱体计算区域尺寸为直径 300 mm,高度 300 mm.实测表明在该区域外磁场已经很弱,说明假设是合理的.计算中给出所有外边界取磁力线平行的边界条件.

电磁场在导体中存在趋肤效应,趋肤深度可以按下式进行估算:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot \omega \cdot \mu \cdot \sigma}} \quad (11)$$

式中: δ 是集肤深度, ω 是角频率, μ 是磁导率, σ 是电导率.当计算精度要求较高时,划分的有限元网格在表面附近必须足够细.通常,在趋肤深度内至少要划分一层或两层单元.

模型采用非均匀网格剖分见图 2,在磁场变化较强的区域进行网格加密,总节点数为 66679 个,采用直接解法求解.

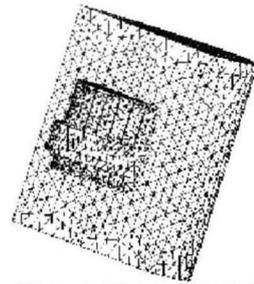


图 2 网格剖分示意图

3 结果分析与讨论

3.1 测量结果

图 3 是实测的空载条件下结晶器内开缝处磁感应强度在结晶器高度方向上的分布,电源功率为 10 kw,频率 2 500 Hz.

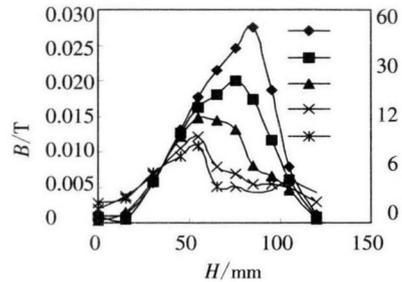


图 3 结晶器高度方向的磁场分布

由图 3 可见,在距铸锭边部不同的位置,磁感应强度沿高度方向的分布规律基本一致,但是,越靠近结晶器中心,磁感应强度最大值越小,且最大值所处位置上移.例如,在 $r = 60 \text{ mm}$, $H = 85 \text{ mm}$ 时(即感应器中心以下 5 mm 处)磁感应强度达到最大 28 mT,而当 $r = 12 \text{ mm}$,则在 $H \approx 55 \text{ mm}$ 时最大.进行铝合金电磁连铸实验时,为使电磁场充分作用于弯月面区域来实现软接触凝固,应将凝固位置控制在磁感应强度最大位置处,即使初期凝固壳位于磁场最强的位置.在本试验条件下,液-固界面应控制在 $H = 85 \text{ mm}$ 处.

图 4 是实验测得的结晶器壁开缝处磁感应强度在铸锭半径方向上的分布情况.可以看出,在铸锭的边部,磁感应强度最大,并向中心逐渐衰减.尤其在靠近边部 10 mm 的范围内,磁场的衰减更为明显.

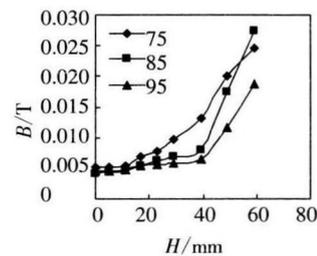


图 4 结晶器径向磁场分布

图 5 为实测获得的结晶器壁两缝隙中间处磁

感应强度在铸锭高度方向上的分布情况。

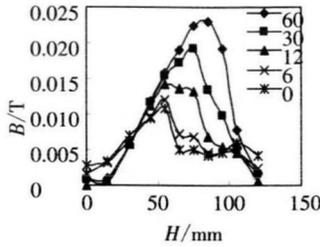


图 5 结晶器高度方向的磁场分布

从图 5 中看出,在两缝隙中间处磁感应强度最大值为约 0.023 T,而缝隙处磁感应强度最大值约 0.028 T,两者的磁感应强度相差约 20%.可见,开缝可以减少结晶器对电磁场的屏蔽作用,使成型系统的磁场增强。

图 6 是不同电源输出功率条件下磁感应强度的分布情况.测量位置为磁感应强度在结晶器高度方向上的最大位置即距顶部 85mm 处.可见磁感应强度随电源施加功率的增大而增大,作用于熔融金属的电磁力也随之增大。

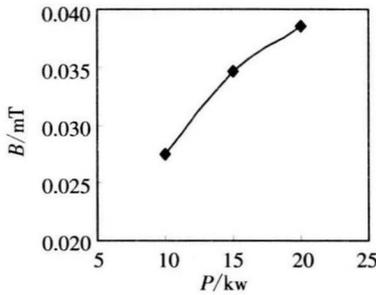


图 6 电源功率对磁场影响

3.2 数值模拟结果

3.2.1 模拟与实测结果对比

依据建立的系统物理模型和数学模型,模拟计算了电磁连铸成型系统内磁场强度和分布.如图 7 所示。

结果表明,模拟计算的磁感应强度分布与实测结果相吻合,计算的磁感应强度最大值为 0.023 T,实测的值为 0.028 T.另外计算和实测结果都表明,在距结晶器顶部 80 mm 左右,即线圈中心位置处磁感应强度达到最大值.上述结果表明本软件系统具有较高的计算精度。

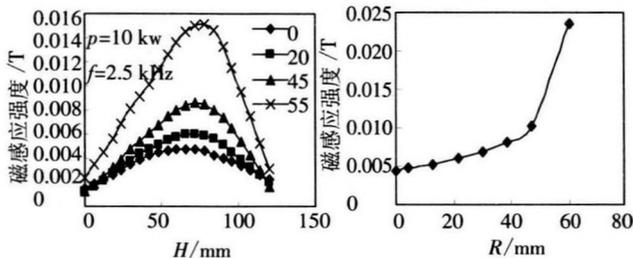


图 7 结晶器高度方向和径向的磁场分布

3.2.2 结晶器高度对磁场的影响

由于铜制结晶器对电磁场有一定的屏蔽作用,因此,结晶器高度对磁场强度与分布有一定影响.本文模拟计算了在线圈高度 40 mm,其位置中心与结晶器重合条件下,改变结晶器高度为 80 mm 和 60 mm 时的磁场分布,结果如图 8 所示.其中,结晶器缝隙宽度仍为 0.4 mm,缝隙距两端均为 10 mm。

由图 8 可见,当减少结晶器的高度时,结晶器内部的磁场分布规律大体不变,磁场强度均在线圈的中心位置达到最大,且磁场强度有一定程度地增加.60 mm 的结晶器最大磁场强度较 120 mm 的结晶器增大了 15.2%.这表明降低结晶器度可以削弱结晶器对磁场的屏蔽作用,提高电磁场的效率。

3.2.3 线圈高度对磁场的影响

线圈高度变化将改变电流密度的量值,因而对产生磁场的强度和分布有一定程度的影响.图 9 表示当结晶器高度为 60 mm,线圈高度为 40 mm、30 mm 和 20 mm 时,模拟计算的结晶器的磁场分布.图 9(a)是距结晶器边部 2 mm 位置处,(b)是径向磁场最大位置处。

由图 9 可见,①降低线圈高度对磁场分布的规律基本无影响;②降低线圈高度增强了系统内的磁场强度,30 mm 线圈高度时磁场强度最大值比 40 mm 高的线圈增加了近 35%,20 mm 高的线圈磁场强度最大值增大了近 85%.这与线圈高度减小,电流密度增大磁场强度增大的理论分析相一致。

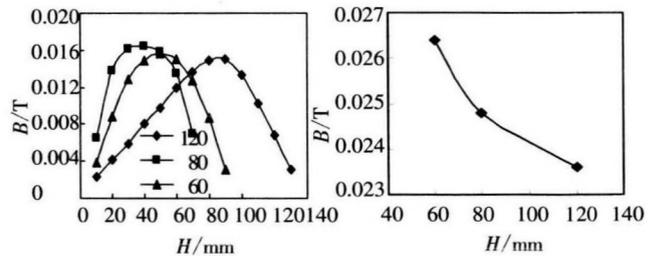
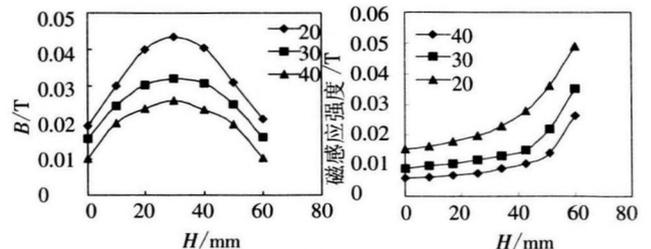


图 8 结晶器高度对磁场的影响



(a) 结晶器高度方向磁场分布 (b) 结晶器径向磁场分布

图 9 线圈高度对磁场的影响

3.2.4 热顶对磁场强度与分布的影响

为抑制弯月面处的熔体流动,减小结晶器对磁场的屏蔽作用,并在系统内产生强的磁场以更好地实现软接触电磁连铸,并改善铸坯的凝固组织,本文提出热丁 - 电磁连铸的思想: ① 液注顶部采用由耐火材料制作的热顶约束; ② 结晶器高度由 120 mm 减小至 60 mm. 线圈高度由 40 mm 减小至 30 mm,其系统结构如图 10 所示.

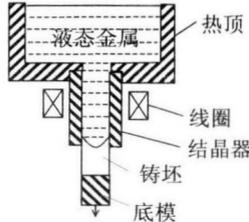
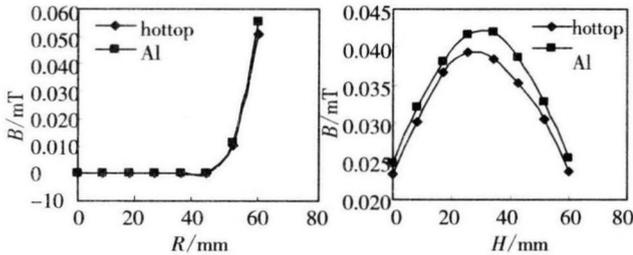


图 10 热顶电磁连铸系统示意图

图 11 表示了有载时热顶 - 电磁连铸成型系统内磁场分布的数值模拟结果. (a) 为磁场强度最大位置处的径向磁场分布, (b) 为距结晶器边部 1 mm 处的磁场分布.



(a) 结晶器径向校对场分布 (b) 结晶器高度方向磁场分布

图 11 热顶电磁连铸系统示意图

从模拟结果可以看出,加载后系统内磁场最大值增大到 50.6 mT,磁场强度最大处仍在线圈中心位置.磁场主要集中在结晶器边部 5 mm 范围内,呈现了更明显的趋肤效应.并且,磁场模拟结果表明,加热顶之后,对结晶器内部的磁场分布规律影响不大,且改变了几种热顶形状后的模拟结果显示,热顶结构变化对结晶器内部磁场分布的影响不明显.因此,我们可以通过在结晶器上部加热顶的热顶 - 电磁连铸方法实现对液体金属液面的稳定性的控制.

4 结 论

1) 通过用有限元软件进行的三维电磁场数值计算,模拟获得的电磁连铸中结晶器内的磁场分布规律与实验测得的规律吻合的较好.

2) 降低结晶器高度使系统内磁感应强度增强,但不十分明显;

3) 感应线圈的高度对系统内磁场影响显著,采用 20 mm 线圈较 40 mm 线圈的磁感应强度提高约 85%;

4) 有载时的模拟结果显示,系统内的磁场呈现更明显的趋肤效应,热顶结构对磁场的强度和分布规律无明显的影响.结果表明热顶电磁连铸法将有利于提高电源效率和稳定液柱高度,改善铸坯的内外部质量.

参考文献:

[1] 李廷举,金俊泽.改进铸坯表面质量的电磁连续铸造研究进展[J].大连理工大学学报,2000,40(1):80-82.
[2] 李廷举,温 斌,张志峰,等.电磁场作用下材料加工新技术[J].大连理工大学学报,2000,49(5):257-261.
[3] GETSELEV Z N.,Casting in a electromagnetic field [J].Metals,1971,23(1):38-43.
[4] PRITCHETT T R. Electromagnetic casting of aluminium alloys[J].Ligh Metal Age,1981,(10):12-18.
[5] VIVES C. A new casting process part I : fundamental aspect[J]. Light Metals, 1987,14(2):769-774.
[6] VIVES C. Electromagnetic refining of aluminium alloys by the CREM process; Part Part I : Working Principle and Metallurgical Results, Metall. Trans. [J],1989, B20 (10) : 623-267.
[7] 鹭见郁宏,佐佐健介,浅井滋生.连铸铸片的表面性状及及ぼす磁気圧力の効果に关ヘデルる实验と理论解析[J].铁と钢,1992,78(3):447-451.
[8] 田正宏,张兴国,金俊泽.铝薄板热顶-电磁铸造成型工艺研究[J].材料研究学报,1999,13(5):546-548.
[9] 张兴国,电磁铸造技术的研究[D].大连:大连理工大学,2001.
[10] 那贤昭,张兴中,仇圣桃,等.方坯软接触电磁连铸结晶器内三维电磁场的数值模拟[J].金属学报,2002,38(9):974-951.
[11] 邓安元,贾光霖,赫冀成.方坯软接触结晶器三维电磁场有限元计算[J].东北大学学报,2001,22(1):75-78.
[12] 赵志浩,张北江,崔建忠,线材水平电磁连铸过程中磁场分布的数值模拟[J].材料与冶金学报,2002,1(2):154-157.
[13] DUGNOL ALVEREZ B, FERNANDEZ MARTINEZ J L, GARZON M L Martin, et al. Finite Elements in Analysis and Desighn,1999, 43:33-36.
[14] 贾 非,电磁连续铸造过程工艺优化及组织性能研究[D].大连:大连理工大学,2002.

(编辑 张积宾)