

# 锡磷青铜薄板坯水平电磁连铸技术的优化研究

张琦<sup>1</sup>, 郭丽娟<sup>2</sup>, 李廷举<sup>3</sup>

(1. 青岛理工大学, 山东 青岛 266033)

(2. TDK 大连电子有限公司, 辽宁 大连 361021)

(3. 大连理工大学, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 对锡磷青铜薄板坯水平连铸的行波电磁搅拌技术进行了优化研究, 提出了在搅拌器的端部放置硅钢片、改变搅拌器的长度以及减小搅拌器的端部电流强度等 3 种方法, 来优化连铸薄板坯端部的流动和凝固过程, 并采用数值模拟和工厂实验相结合的方法对其进行了分析。结果表明: 相比其他 2 种方法, 通过在行波搅拌器的端部放置硅钢片更有利于改善熔体端部的流动状况, 当施加硅钢片的长度为 150 mm 时, 熔体端部的强环流消失, 连铸坯端部的凝固坯生长更加均匀, 从而有利于防止连铸薄板坯边部的裂纹和偏析缺陷产生。

**关键词:** 水平连续铸造; 行波搅拌磁场; 边部质量; 锡磷青铜薄板坯

中图分类号: TG249.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2015)10-2553-04

铜板带水平连铸是生产铜带材的重要生产工艺, 具有工序短、生产成本低、设备占地面积小等优点, 尤其适用于生产热轧困难的锡磷青铜等合金品种<sup>[1,2]</sup>。但在水平连铸过程中, 铸坯的温度梯度大, 冷却速度快, 在凝固中容易产生偏析、中心疏松、夹杂、气孔等缺陷, 并在后续的加工中暴露, 严重影响带材质量。研究表明, 结晶器内钢液的流动对铸坯质量有重要影响<sup>[3-6]</sup>。因此, 本课题组在规格为 16 mm×655 mm 的锡磷青铜薄板坯水平连铸过程中施加了行波搅拌磁场, 如图 1 所示, 该方法改善了结晶器内钢液的流态和流速, 使锡磷青铜带坯的晶粒组织得到明显细化、缩松和偏析得到明显减轻<sup>[7]</sup>。但是, 在工业试验过程中发现, 由于该薄板坯的厚度较薄, 施加行波磁场搅拌后, 使结晶器的端部熔体内产生强烈的环流, 由于流动强度过大, 反而影响了薄板坯两端部的凝固过程, 容易在薄板坯的两端产生裂纹和偏析等缺陷。因此, 为了进一步解决该问题, 本课题组提出了在行波搅拌器的两端安放硅钢片、改变行波搅拌器的长度以及减小行波搅拌器两端的电流强度等方法, 并对这些方法进行数值模拟研究, 分析各种情况下连铸坯内钢液的受力、流动以及凝固过程, 为进一步优化连铸薄板坯的边部质量提供参考依据。

## 1 数学模型的建立

为了简化连铸锡磷青铜薄板坯的计算过程, 并获得准确的结果, 在计算时进行如下假设: (1) 金属液

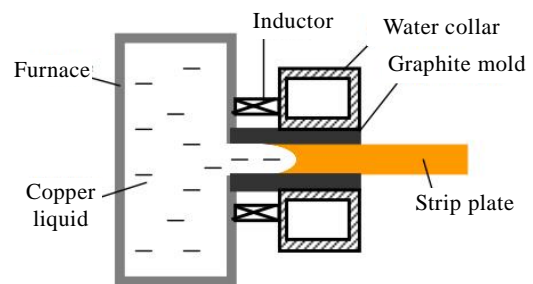


图 1 实验过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of experiment process

是不可压缩的导电流体; (2) 金属液的所有物性参数如密度、粘度、比热、导热、电导率和磁导率等都是标量常数; (3) 忽略金属液的流动对磁场产生的影响; (4) 金属液的流动为紊流。

### 1.1 电磁场计算模型

求解 Maxwell 等式获得金属熔体内的电流密度和磁感应强度值, 进而得到电磁力和焦耳热。计算时在空气外围四周施加磁力线平行边界条件<sup>[8]</sup>。

$$F = J \times B \quad (1)$$

$$Q = J^2 \cdot \frac{1}{\sigma} \cdot t \quad (2)$$

其中:  $B$  为磁感应强度;  $J$  为电流密度;  $\sigma$  为电导率;  $t$  为时间;  $F$  为洛伦磁力,  $Q$  为焦耳热。

### 1.2 流动计算模型

将由电磁场模块计算得到的电磁力作为源项施加

收稿日期: 2014-10-12

基金项目: 国家自然科学基金 (51204101)

作者简介: 张琦, 女, 1979 年生, 博士, 副教授, 青岛理工大学, 山东 青岛 266033, 电话: 0532-80698139, E-mail: zhangqidlut@126.com

到 Navier-stoke 模型中, 并采用  $k-\epsilon$  紊流模型来描述金属液的湍流流动。计算时在金属液的四周施加无滑移边界条件<sup>[9]</sup>。

连续性方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \rho g_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} [\mu_e (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})] + F_i \quad (4)$$

其中:  $\rho$  为密度;  $p$  为压力;  $g$  为重力加速度;  $u$  为速度;  $\mu$  为动力粘度;  $\mu_e$  为有效粘度;  $\mu_t$  为湍流粘度;  $\mu_e = \mu + \mu_t$ ;  $F_i$  为由电磁场模型计算得到的各方向的洛伦兹力; 下标  $i, j$  代表方向。

### 1.3 凝固计算模型

将由电磁场模块计算得到的焦耳热作为源项施加到能量守恒方程中, 在计算时, 在熔体凝固的不同位置处施加不同的换热边界条件。

能量方程:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i T)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (\Gamma_{\text{eff}} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}) + s \quad (5)$$

其中:  $\Gamma_{\text{eff}}$  为有效温度扩散系数,  $T$  为温度,  $s$  为源项, 包括凝固潜热以及由电磁场计算获得的焦耳热。

计算用各种参数如表 1 所示。计算所用数学模型如图 2 所示。

## 2 计算结果与分析

为了保证计算结果的准确性, 首先, 对数学模型进行验证, 在没有金属液的情况下, 打开行波磁场发生器, 分别测量靠近结晶器上表面和下表面处的磁感应强度, 与数值计算结果相比较, 比较结果如图 3 所示。可以看出, 计算结果与测量结果有偏差, 但是二者的变化趋势是一致的, 而且二者的数值差不大, 因此该数学模型是可靠的。

表 1 锡磷青铜物性参数及连铸工艺参数

Table 1 Physical parameters of Phosphor Bronze and continuous casting process parameters

Parameter	Value
Density/kg m <sup>-3</sup>	8780
Specific heat/J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	380
Conductivity/W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	50
Latent heat/J kg <sup>-1</sup>	210000
Solidus temperature/K	1118
Liquidus temperature/K	1273
Viscosity/kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>	0.0012
Casting speed/m s <sup>-1</sup>	0.003
Pouring temperature/K	1433
Current intensity/A	12
Current frequency/Hz	50

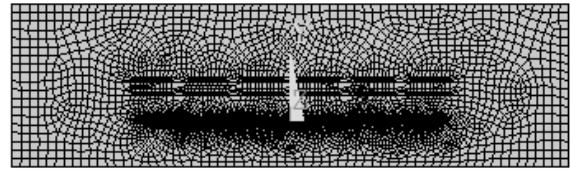


图 2 计算用有限元模型

Fig.2 Mathematical model

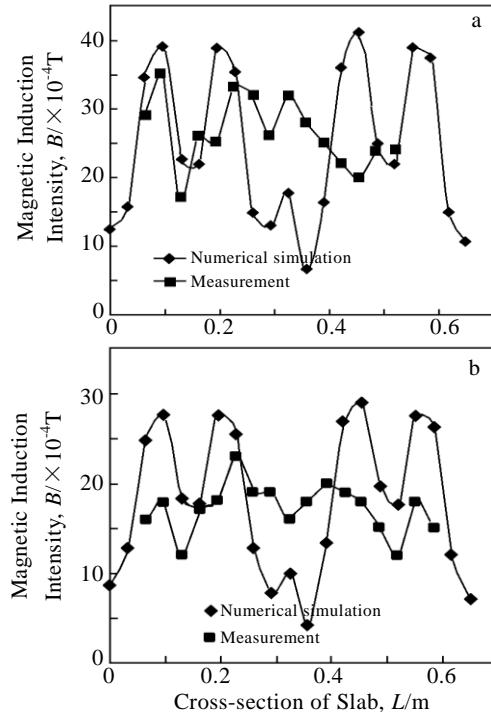


图 3 电磁场的测量值和计算值的比较

Fig.3 Comparison of the measured and calculated magnetic induction intensity under the traveling magnetic field ( $I=12$  A,  $f=50$  Hz): (a) on the surface and (b) under the surface

### 2.1 硅钢片的影响

在锡磷青铜薄板坯连铸过程中, 为了消弱行波搅拌磁场引起的结晶器端部熔体的强烈环流, 在搅拌器端部与结晶器间的空隙处放置硅钢片, 利用硅钢片强烈的导磁效应, 减轻薄板坯端部的磁场强度, 从而优化结晶器端部熔体的流动状况。下面对硅钢片的长度以及宽度对结晶器内端部熔体的流动影响进行了详细的分析。由于该薄板坯的宽厚比比较大, 为了看清楚铸坯端部的流动, 本研究仅截取薄板坯的左端部的模拟结果进行显示。

通过图 4 和图 5 可以看出, 在行波搅拌器的端部放置硅钢片后, 由于硅钢片对电磁场的屏蔽作用, 可以有效阻挡行波搅拌磁场在金属熔体端部产生的电磁场,

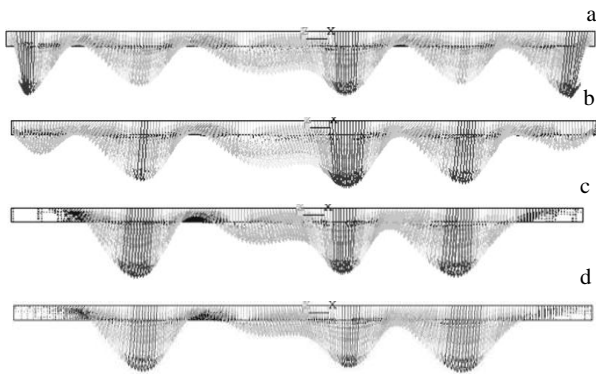


图 4 硅钢片的长度和宽度对熔体所受电磁力分布的影响

Fig.4 Effect of silicon steel sheet on the electromagnetic force of molten metal: (a) without silicon steel sheet, (b) 100 mm×5 mm silicon steel sheet, (c) 150 mm×5 mm silicon steel sheet, and (d) 150 mm×0.5 mm silicon steel sheet

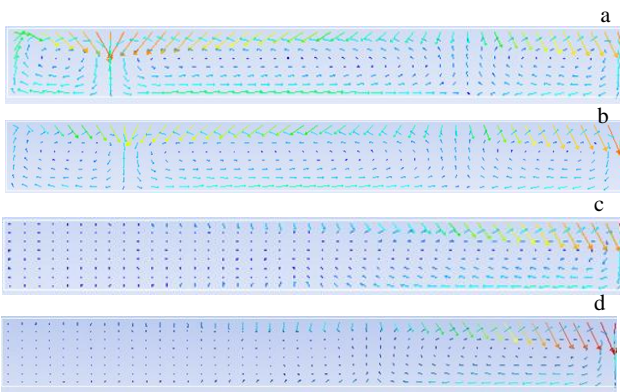


图 5 硅钢片的长度和宽度对熔体端部的流动影响

Fig.5 Effect of silicon steel sheet on the flow of molten metal: (a) without silicon steel sheet, (b) 100 mm×5 mm silicon steel sheet, (c) 150 mm×5 mm silicon steel sheet, and (d) 150 mm×0.5 mm silicon steel sheet

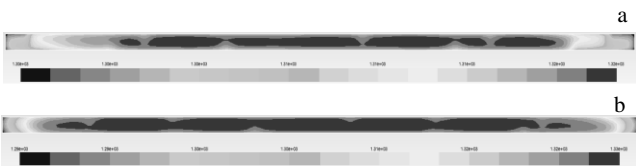


图 6 硅钢片对熔体凝固过程的影响

Fig.6 Effect of silicon steel sheet on the solidification of molten metal: (a) without silicon steel sheet and (b)150 mm×0.5 mm silicon steel sheet

从而减轻了金属熔体端部所受电磁力以及流动强度。比较图 5b 和 5c 可以看出，当硅钢片的长度较短时，边部的环流仍然存在，只是流动强度减弱，而增加硅钢片的长度，将使边部的环流基本消失。比较图 5c 和 5d 可以看出，硅钢片的厚度对熔体边部流动的影响

并不明显，因此，若搅拌磁场与结晶器间的空间有限，选用较薄的硅钢片即可起到良好的效果。总之，针对本研究的连铸过程，选用规格为 150 mm×0.5 mm 的硅钢片放置在搅拌磁场发生器的端部有利于消除端部熔体的流动。从图 6a 中可以看出，当没有硅钢片时，由于搅拌磁场使端部熔体内产生强度较大的大环流，使得结晶器端部位置处的熔体凝固坯壳生长不均匀，增加了硅钢片后，由于减弱了端部熔体的流动，使环流消失，因此端部熔体的凝固坯壳生长均匀。

### 2.2 行波搅拌器长度的影响

除了施加硅钢片外，本研究还尝试着通过改变搅拌器的长度来达到改善连铸坯端部熔体的流动。原搅拌器长度为 755 mm，现分析当搅拌器长度增加至 950 mm 和减短至 560 mm 两种情况下，金属熔体内的流动状况，如图 7 所示。

从图 7 中可以看出：当增加搅拌器长度时，不利于改善熔体端部的流动，而当搅拌器的长度减小时，可以减小熔体端部的流场，但由于搅拌器的长度受到缠绕线圈、磁轭宽度等限制，所以减小空间有限，因此采用减小搅拌器长度的方法对改善熔体端部的流动效果有限，此方法不宜采用。

### 2.3 行波搅拌器端部电流的影响

行波搅拌器中通入三相交变电流实现对金属熔体的搅拌作用，下面分析一下减小搅拌器两端的电流强度，即将其 A 相和 C 相的电流强度由 12 A 减小至 6 A，而 B 相电流强度保持 12 A 不变，获得金属熔体所受电磁力和流动状况。

从图 8 中可以看出，减小搅拌器两端的电流强

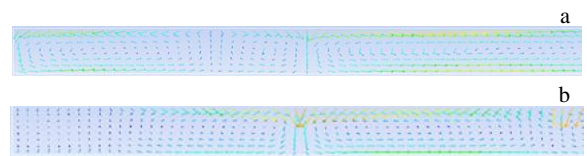


图 7 搅拌器长度对熔体端部流动的影响

Fig.7 Effect of stirrer length on the flow of molten metal: (a) 950 mm and (b) 560 mm

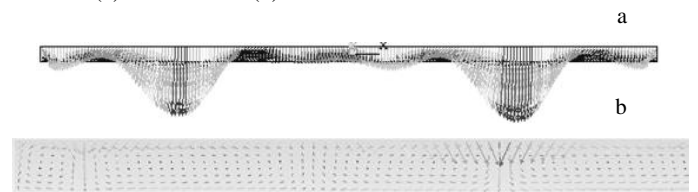


图 8 搅拌器内的电流强度对熔体内电磁力和流动的影响

Fig.8 Effect of current intensity on the electromagnetic force and flow of molten metal: (a) electromagnetic force distribution and (b) flow distribution

度值对熔体端部磁场分布和熔体端部流动的影响不大, 仍然存在较大强度的大环流, 不利于端部熔体的均匀凝固, 不利于改善铸件端部的质量。

### 3 结 论

1) 在搅拌器的端部放置硅钢片可以有效地改善熔体端部的流动状况, 硅钢片的长度以 150 mm 为优, 硅钢片的厚度对流动的影响不大, 改善熔体端部的流动状况可以明显地改善结晶器内端部熔体的凝固过程, 使凝固坯壳均匀生长, 有利于改善连铸坯的边部质量。

2) 增加行波磁场发生器的长度无法改善熔体端部的流动, 而减小行波磁场发生器的长度可以减弱熔体端部的流动, 但是由于行波磁场发生器的长度缩短有限, 所以对熔体端部的流动影响有限。

3) 减弱行波磁场发生器端部的电流强度对熔体端部的流动影响不大。

#### 参考文献 References

[1] Guo Mingen(郭明恩), Liu Rui(刘 瑞), Sun Zhuli(孙祖莉). *Casting Technology* (铸造技术)[J], 2005, 26(7): 591

- [2] Hwang J D, Li B J, Hwang W S *et al.* *Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 1998, 7(4): 495
- [3] Bai Bingzhong(白丙中). *Foreign Steel*(国外钢铁)[J], 1992, 11: 13
- [4] Li Tingju(李廷举), Jin Junze(金俊泽). *Materials Review* (材料导报)[J], 2000, 14(12): 12
- [5] Yu Zhan(于 湛), Li Weixuan(李伟轩), Deng Kang(邓 康) *et al.* *Special Casting & Nonferrous Alloys* (特种铸造及有色合金)[J], 2008, 28(3): 229
- [6] Li Weixuan, Yu Zhan, Deng Kang *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2008, 18(6): 1058
- [7] Hui Chunhua(回春华), Li Tingju(李廷举), Jin Wenzhong(金文中) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2008, 37(4): 721
- [8] Feng Cizhang(冯慈章). *Electromagnetic Field*(电磁场)[M]. Beijing: People's Education Press, 1985: 278
- [9] Wang Fujun(王福军). *Computational Fluid Dynamics Analysis* (计算流体动力学分析)[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 65

## Optimization of Electromagnetic Horizontal Continuous Casting Technology of Phosphor Bronze Slab

Zhang Qi<sup>1</sup>, Guo Lijuan<sup>2</sup>, Li Tingju<sup>3</sup>

(1. Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China)

(2. TDK China Co., Ltd, Dalian 361021, China)

(3. Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** In order to improve the edge quality of horizontal continuous casting phosphor bronze slab, three methods including applying silicon steel at ends of the traveling magnetic field stirrer, changing the length of traveling magnetic field stirrer, and reducing the ends current intensity of traveling magnetic field stirrer were proposed, and a numerical simulation method was used to study the flow and solidification process of continuous casting phosphor bronze slab. The results show that compared to the other two methods, the method of placing the silicon steel sheet on the edge of the traveling electromagnetic stirrer is more beneficial to improve the melt flow. When the length of the silicon steel sheet is 150 mm, the strong flow at the melt ends disappears and the ends melt solidification process is more uniform, which is helpful to prevent the crack and segregation defect and improve the edge quality of continuous casting phosphor bronze slab.

**Key words:** horizontal continuous casting; traveling magnetic stirrer; edge quality; phosphor bronze slab

Corresponding author: Zhang Qi, Ph. D., Associate Professor, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, P. R. China, Tel: 0086-532-80698139, E-mail: zhangqidlut@126.com