文章编号: 1004-0609(2008)06-1058-06

# 电磁场作用下铜板带水平连铸熔体的流动和凝固特征

李伟轩1,于湛1,邓康1,雷作胜1,程镇康2,任忠鸣1

(1. 上海大学 现代冶金与材料制备重点实验室,上海 200072;
 2. 兴业电子铜带有限公司, 慈溪 315336)

摘 要:为了消除铜板带水平连铸中的微气孔、夹杂和柱状晶对接等凝固问题,提出一种基于正交磁场和直流电流相互作用的结晶器内水平电磁搅拌,并在实验室物理模拟实验的基础上,进行现场工业实验。在模拟实验中, 用超声波多普勒测速仪测量该电磁搅拌下水平连铸结晶器内金属液的流动规律,并与生产实验中锌白铜板带的凝固特征相互印证,发现搅拌电流达到 400 A 时,板带内部气孔消失,电流达到 500 A 时板带出现等轴晶带,电流达到 800 A 时板带坯偏析率趋于零。

关键词:铜熔体;水平连铸;电磁搅拌;流动;凝固 中图分类号:TG 249.7;TG 146.1 文献标识码:A

# Flow and solidification characteristics of melt under electromagnetic stirring in horizontal continuous casting of copper thin-slab

LI Wei-xuan<sup>1</sup>, YU Zhan<sup>1</sup>, DENG Kang<sup>1</sup>, LEI Zuo-sheng<sup>1</sup>, CHENG Zhen-kang<sup>2</sup>, REN Zhong-ming<sup>1</sup>

(1. School of Materials, Shanghai University, Shanghai 200072, China;
 2. Sunshine Electronic Copper-tape Ltd. Co., Cixi 315336, China)

**Abstract:** A new horizontal electromagnetic stirring method in mold based on the orthogonal interaction between static magnetic field and DC current was put forward to overcome the solidification disadvantages such as micro pore, inclusion and columnar crystals joint in copper thin-slab's horizontal continuous casting. Commercial production was experimented based on the physical simulation in laboratory. In the simulation, the flow rule of melt metal in mold of horizontal continuous casting with electromagnetic stirring is measured using ultrasonic Doppler velometer, and the result is inter confirmed with the solidification characteristics is tics of zinc cupronickel thin slab in industrial product, some advantageous results are obtained that, when the current is 400 A the inner micro-pores disappear, when the current is 500 A the center equiaxed crystal layers occur and when the current is to 800 A the inner-segregation decreases to zero. **Key words:** copper melt; horizontal continuous casting; electromagnetic stirring; flow; solidification

薄板带坯水平连铸是生产有色金属板带材的重要 工艺。由于其铸造过程中温度梯度大,冷却速度快, 使板带坯在凝固中易产生偏析、中心疏松、夹杂、微 气孔等缺陷,这些凝固缺陷往往在后续冷加工中才得 以暴露,且难以去除,严重影响产品质量或造成直接 报废。研究表明,连铸结晶器内金属液的流动对铸坯 的质量有重要影响<sup>[1-9]</sup>,而在外部电磁场的作用下,结 晶器内的金属熔体受其驱动,其流态和流速可按照人 们所设想方向和范围进行调节,因此影响和改善铸坯 的凝固行为,可获得高质量的铸坯<sup>[10-11]</sup>。对此,本文 作者针对铜板带水平连铸的上述凝固缺陷问题,利用 外加电磁作用驱动结晶器内铜液的定向流动并期望改

基金项目:国家高技术研究发展计划资助项目(2002AA3Z1410) 收稿日期:2007-10-12;修订日期:2008-03-18

通讯作者:邓康,教授;电话: 021-56331102; E-mail: dengk2000@163.com

善其凝固行为,改善铜板带坯的凝固质量。

生产中,水平连铸的铜板带坯厚度仅 15~20 mm, 并且结晶器为水缝冷却,无法安置传统的电磁搅拌线 圈,同时超薄的板带坯对交流电磁搅拌的感应效率极 低,电磁场的能量难以输送到金属液中。这时,若直 接使用传统的交流电磁搅拌方法,将电磁搅拌线圈安 装在结晶器外,则电磁场穿过结晶器时,结晶器所损 耗能量将占总能量的90%以上。因此,本文给出一种 在结晶器中设置静磁场和输入与之正交的直流电流的 定向电磁搅拌方法,以解决上述传统交流感应式电磁 搅拌在薄板带坯水平连铸中难以应用和电磁效率太低 等问题。该方法的原理如图1所示,在结晶器内安置 条状永磁体(厚度 10 mm),形成竖直方向的静磁场, 再在结晶器的水平方向通入直流电流。这样,磁场与 电流正交,产生沿铸坯推拉方向上的电磁力,该力驱 动结晶器内金属液在水平面上做定向运动,形成直流 电磁搅拌。

为直观和定量地研究电磁场驱动下结晶器内金属 液的流动行为,本文作者利用低熔点金属(水银)模拟 铜液在水平连铸结晶器中的电磁搅拌过程,并用超声



图1 实验原理示意图

**Fig.1** Principle schematic diagram of experiment: (a)—Front view; (b) — Top view (1 — Permanent magnet; 2 — Inner magnetizer; 3—Liquid metal; 4—Outer magnetizer)

波流速测量仪<sup>[12-14]</sup>测量金属液在 1:1 的结晶器模型中 的流态、方向和速度分布,以此进行电磁搅拌工艺设 计和参数优化。

### 1 模拟实验与结果分析

#### 1.1 超声波多普勒测速原理

超声波流速测速仪(UDV)的测速原理为,由传感 器发射出周期性的脉冲超声波,并不断接受超声波束 范围内由随流体一起运动的微小粒子所反射的回波, 通过检测回波的滞后时间和多普勒频率的变化,即可 得到测点的位置和该点处流体的流速<sup>[15-16]</sup>。该方法对 流体的透明性和导电性等无限制,因此可用于低熔点 金属或合金(如水银或镓铟锡合金等)的非透明流场的 测量,但对高温熔体则受制于传感器的耐热能力(目前 传感器的使用温度≤100℃)。

本文实验中,超声波在水银中的传播速度为1450 m/s,采用瑞士 DOP2000 超声波多普勒测速仪,其传感器直径 5 mm,频率 4 MHz,空间分辨率为1.45 mm, 流场的测量精度在 0.1 mm/s。

#### 1.2 模拟实验装置

用有机玻璃制成板带坯水平连铸的结晶器模型, 其与现场生产用结晶器尺寸比例为1:1。水银为模拟工 质。结晶器的尺寸为长320mm,宽226mm,厚度17 mm。在容器左右两边安装导电电极并与直流电 源 连接,通电强度为25A和50A。在结晶器的上下表 面各安装3块NdFeB 永磁体(见图1(b)),其尺寸为30 mm×30mm×40mm,磁铁在结晶器模型内产生的磁 感应强度为0.1T。

本研究在模拟实验中,使用 16 个超声波传感器进 行流场测试,其测点均匀地分布于结晶器侧壁面的中 心高度上,传感器中心点距结晶器上下表面均为 8.5 mm,测点间距 20 mm。实验中,每次输入不同强度 的直流电流,待肉眼观察水银表面的流动已达到稳定 后,开始超声波测量流速。

#### 1.3 模拟实验结果分析

实验结果如图 2 所示。在结晶器中,对应于安装 永磁体处的磁感应强度最大,因而该处金属液所受到 的电磁力最大。在实验中可以观察到此处的水银首先 产生流动,形成搅拌流,当金属液的流动遇到结晶器 壁或凝固前沿时,其分解成两个流股,形成回流,并



Fig.2 Measured point of ultrasonic and mercury flow with EMS (top view)

由此带动整个结晶器内的金属液发生定向的搅拌流 动。这里,结晶器中每一点的流动是定向的,而结晶 器内整体的流动则是呈左右环向对称的,即在结晶器 中形成了两个对称的环流,并且当输入电流足够大时, 肉眼可见在结晶器模型中的环流形成两个涡,在涡的 中心区域聚集有细小的夹杂物颗粒和气体。这表明在 生产中,只要保持稳定的铸坯拉速和水冷强度,则电 磁搅拌会将铜液中的夹杂物微粒或气体由凝固界面前 沿冲走,使之聚集于液流由电磁搅拌所产生的涡中, 进而降低可铸坯中的夹杂物和气体含量。同时,电磁 搅拌所产生的环流对改善(降低)液固前沿的温度梯度 也是有利的。

本研究中,静磁场的大小和分布是不变的,因此 可通过调节输入电流来控制电磁搅拌的强度。这里输 入的直流电流分别为 25 和 50 A。结果显示,当输入 电流为 25 A 时,金属液在拉坯方向上的最大流速为 80 mm/s;而当电流增到 50 A 时,该方向上的最大流 速达到 120 mm/s。由此可见,金属液的流速随输入电 流增强而线性增加。

本实验中,超声波实测的水银流速分布见图 3(图 中流速单位为 mm/s,并以流向超声波传感器的方向为 正,反之为负)。由图可见,在本研究所设置的静磁场 和直流电流的耦合作用下,结晶器中间区域的金属液 流由保温炉涌向铸坯凝固界面,而在结晶器的两边, 则是金属液流自凝固前沿流回保温炉,并且金属液在 结晶器的中部流速最大,这给凝固前沿带来强烈的冲 刷,进而可有效防止夹杂物和气泡在凝固前沿滞留或 被凝固界面吞没。

由实验结果也可预见,在电磁搅拌的作用下,金

属液对凝固前沿的过度冲刷会也对其产生不利的影 响,即金属液所携带的热量(热流)对凝固前沿造成局 部热冲击会导致温度不均匀,这在生产中则表现为"铸 造线"向拉坯方向的局部推移和弯曲。在本研究的生 产实验中即发生过此类现象。因此,对电磁搅拌的强 度优化和与连铸工艺的协调是生产中必须探索和解决 的一个关键问题,这项工作尚在进行中。

### 2 生产实验的现象和分析

本研究的工业实验在浙江兴业电子铜带有限公司 铜板带水平连铸生产线上进行,铸坯和结晶器尺寸与 模拟实验相同,合金熔炼工艺和浇注温度按生产现场 的操作制度进行,实验材料分别为用于集成电路引线 框架的 KFC 合金和锌白铜。因此,本实验条件与企业 现有生产工艺相比,只在结晶器上加装永磁体和输电 铜排,形成铜液熔池中的静磁场和电流场,实现凝固 前沿的直流电磁搅拌,使结晶器中铜液产生对称的环 流和涡,以期改善铜板带坯的夹杂和气孔问题。

在生产实验中,结晶器的传热层包括石墨板(厚度 40 mm)和导热铜板(厚度 30 mm),在铜板的背面开有 导流水槽,供冷却水通过。永磁体被安装于导流水槽 后方,这样结晶器的循环冷却水可同时起到冷却永磁 体的作用(永磁体的工作温度上限为 100 ℃)。于是, 结晶器中上下永磁体端面(磁极)的距离为 157 mm,结 晶器型腔中的磁感应强度经实测为 0.005~ 0.01 T。 根据前述模拟实验的结果,并考虑到电磁力与磁场和 电流的关系 *F=J×B*,因此当实际生产中结晶器内磁 感应强度降低时,只要将电流增大相同的倍率,同样 可得到预想大小的电磁力。这样,本研究生产实验所 使用的直流电流的强度范围取在 200~800 A,实验中 并以输入电流 0 A 的结果作为无电磁搅拌的情况进行 参照(对比)分析。

板带坯水平连铸施加电磁搅拌后的"铸造线"的 变化如图 4 所示。由图可见,在现有生产工艺条件下, 板带铸坯的"铸造线"是比较平直的,这种平直的凝 固界面有利于溶质元素的扩散,降低宏观偏析。在施 加电磁搅拌后,由于铜液环流对凝固界面的冲刷,及 该环流所携带热量(热流)对凝固界面的局部冲击,使 "铸造线"出现局部推移和弯曲的现象。这种"铸造 线"的推移和弯曲与对铜液电磁搅拌的强度(包括流态 和速度分布等)有关。从板带表面看,在无电磁搅拌时, 铸坯表面的"铸造线"在板带中部基本是平直的,到 边缘区域则向后弯曲,显示出此时板带的凝固是中间



图 3 实测的结晶器内流速分布

Fig.3 Measured flow velocity distribution of metal in mold



图 4 有、无电磁搅拌时铜板带水平连铸"铸造线"的形状



区域首先凝固,两边区域则凝固较晚;当施加电磁搅 拌时,板带的"铸造线"呈现双峰形,其中间和边缘 部位凝固较晚,而板带 1/4 宽度处的凝固却是首先完 成的,这反映出在结晶器中间区域的凝固速度被指向 铸坯凝固前沿的铜液环流和热流所减缓。

通常认为,上述双峰形的"铸造线"对凝固前沿的溶质扩散是不利的,易出现宏观偏析的情况。因此针对本实验有、无电磁搅拌的条件下所生产的 KFC 板带坯进行了化学分析。沿板带坯横断面的中心线上,每隔 1 cm 取 1 个试样,用化学分析方法分析其成分,并按以下公式计算板带坯中局部及平均的偏析率:

$$\eta_i = \frac{c_i - c_0}{c_0} \times 100\% \ (\text{局部偏析率})$$
(1)

$$\overline{\eta} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^{n} |\eta_i| A_i \quad (\mathbb{T} \mathfrak{I}) \widehat{\eta_i} \mathbb{K}$$

由此评估铸坯在有、无电磁搅拌下的宏观偏析情况。分析结果见图 5,即连铸拉速保持在 125 mm/min时,不同搅拌电流条件下,KFC 合金中溶质元素 Fe 的平均偏析率。由图可见,随着电流增大(即电磁搅拌增强),铜板带中的成分均匀性增加。这一结果显示,电磁搅拌尽管会使板带坯的"铸造线"发生推移和弯曲,但其所产生的"强制对流"却在铸坯的凝固

1062



图 5 不同电流条件下铜板带水平连铸铁元素的平均偏析率 Fig.5 Average segregation of Fe element in horizontal continuous casting copper thin-slab under different stir current

前沿拥有比扩散机制更有效的均匀成分,抑制溶质元 素局部聚集的能力。因此,尽管电磁搅拌下板带坯的 "铸造线"发生局部推移和弯曲,但其平均偏析率却 比无电磁搅拌时下降。

再看电磁搅拌对铜板带凝固组织的影响。图 6 所 示为本试验中锌白铜板带坯横截面的宏观组织。在无 电磁搅拌时,铸坯以对接的柱状晶为主;当电流为 200 A 时,铸坯中的柱状晶变细且铸坯中心层位置出现等 轴晶带;当电流增大到 500 A 时,铸坯的柱状晶进一 步细化,同时等轴晶带加宽,等轴晶比例上升。这反 映出在无电磁搅拌时,铸坯内部温度梯度大,柱状晶 发育充分,出现对接;而施加电磁搅拌时,铜液对结 晶器壁面和固液界面的冲刷,增进了表面形核,使柱 状晶细化,同时铸坯内部温度趋于均匀(温度梯度降 低),促进了中心层面出现等轴晶带。随着电流强度增 大,熔池搅拌加剧,这种现象越发强烈。由此可见, 电磁搅拌将改善板带坯的凝固组织。经对锌白铜板带



图 6 锌白铜板带坯的宏观显微组织

**Fig.6** Macrostructures of zinc cupronickel thin slab: (a)—0 A; (b)—200 A; (b)—500 A

坯的气孔分析表明,在无电磁搅拌时,铸坯内部存在 细小气孔,这是该合金的凝固特性(如合金固、液相的 气体溶解度差等)和工艺特性(渣的成分和形貌、颗粒 度等)所决定的;而施加电磁搅拌时,随电流增强,铸 坯中气孔出现的概率降低,当电流达到 400 A 以上时, 气孔完全消失。这对改善锌白铜铸坯的组织性能十分 有利。这表明,电磁搅拌所生产的铜液环流,有助于 将金属液中的夹杂和气泡由凝固前沿推开,从而抑制 了夹杂和气泡在凝固前沿滞留和被凝固界面吞没的现 象,进而提高锌白铜板带坯的质量。

## 3 结论

针对铜板带坯水平连铸中的夹杂和气孔控制
 问题,本研究提出一种静磁场和直流电流正交作用的
 电磁搅拌方法,并通过物理模拟实验和现场生产实验
 进行了验证,达到预想的结果。

2) 在电磁搅拌下,铜板带坯结晶器内形成对称的 环流运动,铜液对凝固界面的冲刷有助于防止夹杂和 气泡在凝固前沿的聚集和被固相吞没,从而降低了铸 坯的夹杂和气孔。实验表明当搅拌电流达到 400 A 时, 板带坯内部气孔消失。

3) 电磁搅拌会使铸坯的"铸造线"发生局部推移 和弯曲,但电磁搅拌所生产的铜液"强制对流"具有 比散机制更强的抑制溶质元素在凝固前沿堆集的作 用,因此使铸坯的宏观偏析率降低随搅拌电流增大而 降低。本文实验显示,搅拌电流达到 800 A 时,板带 坯的偏析率趋零。

4) 电磁搅拌促进了表面形核,使柱状晶细化,同时均衡液相温度分布,降低温度梯度,使板带坯在中心层面出现等轴晶带,由此可解决板带坯凝固的柱状晶对接问题。本文实验显示,搅拌电流 200 A 时,板带坯出现柱状晶细化和中心等轴晶层;搅拌电流达到500 A 时,板带坯中部出现等轴晶带。

#### REFERENCES

- 王晓东,李廷举,金俊泽. 电磁场对连铸末端凝固过程的影 响[J]. 金属学报, 2001, 37(9): 71-974.
   WANG Xiao-dong, LI Ting-ju, JIN Jun-ze. Effect of electromagnetic field on final solidifying process of continuous casting[J]. Acta Metal Sinica, 2001, 37(9): 971-974.
- [2] 周 亮,唐 萍,李永祥.小方坯结晶器电磁搅拌磁场测量与分析[J].钢铁钒钛, 2006, 27(4): 10-13.

ZHOU Liang, TANG Ping, LI Yong-xiang. Test and analysis on magnetic field in M-EMS for billet caster[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2006, 27(4): 10–13.

- [3] 冯 军,陈伟庆,王晓峰,王庆贤,苏 旺.凝固末端电磁搅 拌对高碳钢内部质量的影响[J].钢铁,2006,41(11):26-28.
   FENG Jun, CHEN Wei-qing WANG Xiao-feng, WANG Qing-xian, SU Wang. Effect of white band on quality of billet cast with F-EMS[J]. Iron and Steel, 2006, 41(11): 26-28.
- [4] 郭大勇,杨院生,童文辉,花福安,程根发,胡壮麒. 电磁驱动熔体流动与枝晶变形断裂模拟[J]. 金属学报, 2003, 39: 914-919.

GUO Da-yong, YANG Yuan-sheng, TONG Wen-hui, HUA Fu-an, CHENG Gen-fa, HU Zhuang-qi. Simulation of electromagnetic force driven melt flow and fracture of dendrites[J]. Acta Metallrugica Sinica, 2003, 39: 914–919

- [5] 张桂芳,陈 永.结晶器电磁搅拌电流对大方坯质量影响试验[J].铸造技术,2006,26(8):720-722.
  ZHANG Gui-fang, CHEN Yong. Experiments on effects of M-EMS current on quality of bloom[J]. Foundry Technology, 2006, 26(8): 720-722.
- [6] 刘国平,田乃媛,吴耀光,汪国才. 圆坯连铸结晶器电磁搅拌 数学模拟[J]. 北京科技大学学报,2006,28(2):119-123.
  LIU Guo-ping, TIAN Nia-yuan, WU Yao-guang, WANG Guo-cai. Numerical simulation on the electromagnetic field of round billet continuous casting moulds in electromagnetic stirring process[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2006, 28(2): 119-123.
- [7] 于 洋,李宝宽. 钢连铸电磁搅拌工艺中电磁力的计算[J]. 金属学报, 2006. 42: 540-544.
  YU Yang, LI Bao-kuan. Calculation of electromagnetic force in electromagnetic stirring during continuous casting of steel[J]. Acta Metallrugica Sinica, 2006, 42: 540-544.
- [8] 肖英龙. 日本连铸工艺中电磁力应用技术现状[J]. 宽厚板, 2006, 12(3): 43-47.

XIAO Ying-long. Present status of applied technology about electromagnetic force in continuous casting process in Japan[J].

Width and Heavy Plate, 2006, 12(3): 43–47.

- [9] KUNSTREICH S. 板坯连铸的电磁搅拌[J]. 钢铁, 2005, 40(9): 81-82, 86.
   KUNSTREICH S. Electromagnetic stirring of slabs[J]. Iron and Steel, 2005, 40(9): 81-82, 86.
- [10] 李秋玲,邓 康,李伟轩,任忠鸣. 薄板坯水平连铸结晶器电磁搅拌的模拟实验研究[J]. 上海金属,2005,27(6):31-35.
  LI Qiu-ling, Deng Kang, LI Wei-xuan, REN Zhong-ming. Simulation experiment of electromagnetic stirring in horizontal continuous casting of thin slab[J]. Shanghai Metals, 2005, 27(6): 31-35.
- [11] 李建超, 崔建忠, 王宝峰, 麻永林. 大方坯连铸凝固末端电磁 搅拌的数值模拟和试验分析[J]. 金属热处理, 2007, 32(8): 69-71.

LI Jian-chao, CUI Jian-zhong, WANG Bao-feng, MA Yong-lin. Numerical simulation and test analysis of F-EMS for continuous casting bloom[J]. Metal Heat Treatment, 2007, 32(8): 69–71.

- [12] TAKEDA Y. Measurement of velocity profile of mercury flow by ultrasound doppler shift method[J]. Nucl Tech, 1987, 79: 120–124.
- [13] BRITO D, NATAF H C, MASSON P C. Ultrasonic doppler velocimetry in liquid gallium[J]. Experiments in Fluids, 2001, 31: 653–663.
- [14] ECKERT S, GERBETH G. Velocity measurements in liquid sodium by means of ultrasound doppler velocimetry[J]. Experiments in Fluids, 2002, 32: 542–546.
- [15] 于 湛, 雷作胜, 贾洪海, 金小礼, 任忠鸣, 邓 康, 钟云波. 液态金属流速的测量技术[J]. 上海金属, 2007, 29: 54-58.
   YU Zhan, LEI Zuo-sheng, JIA Hong-hai, JIN Xiao-li, REN Zhong-ming, DENG Kang, ZHONG Yun-bo. Velocity measure technology of liquid metal[J]. Shanghai Metals, 2007, 29: 54-58.
- [16] 张洪军,吕 进. 多普勒全场测速技术的进展[J]. 力学进展, 2007, 37(3): 428-442.
  ZHANG Hong-jun, LU Jin. The process of the doppler global velocimetry[J]. Advances in Mechanics, 2007, 37(3): 428-442.

(编辑 陈爱华)