

文章编号: 1004 - 0609(2004) 12 - 2073 - 06

管坯电磁连铸内结晶器侧换热系数的模拟与研究^①

张 琦, 李丘林, 李廷举, 郑贤淑, 金俊泽
(大连理工大学 铸造工程研究中心, 大连 116023)

摘 要: 将实验得到的初始凝固坯壳的形状与数值模拟结果相结合的反推法确定了内结晶器冷却水量与内结晶器侧壁换热系数之间的关系, 模拟了冷却水流量为 80、100、120 L/s 时凝固坯壳的形状和位置; 在模拟得到的固-液界面位置附近, 即距液面 5~20 mm 处施加了频率为 2 500 Hz 的电磁场。结果表明: 与传统连铸方法相比, 施加电磁场后空心管坯的质量得到了明显的改善。

关键词: 电磁连续铸造; 空心管坯; 热交换系数

中图分类号: TG 213

文献标识码: A

Numerical simulation and experimental research of heat transfer coefficient in electromagnetic continuous casting of hollow billets

ZHANG Qi, LI Qiu-lin, LI Ting-ju, ZHENG Xian-shu, JIN Jun-ze
(Engineering Research Center of Foundry,
Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: The relationship between the cooling water flow rate and the heat transfer coefficient at the billet/core interface was built up via the trial and error approach. The position and shape of the initial solidified shell were predicted by the numerical simulation when the cooling water flow rate is 80, 100 and 120 L/s. The electromagnetic field with the frequency of 2 500 Hz was imposed to the position of liquid/solid interface which was 5~20 mm close to the liquid level. The results show that comparing with the conventional continuous cast one, the electromagnetic cast has obviously improved billet quality.

Key words: electromagnetic continuous casting; hollow billet; heat transfer coefficient

目前精密铜管被广泛应用于 IT 业和制冷业, 此类铜管的直径通常小于 4 mm 且壁厚小于 0.2 mm。如果铸造得到的管坯微观组织粗糙, 在随后进行的穿孔和拉拔过程中就很容易导致管壁开裂^[1-4]。为此, 大连理工大学进行了纯铜管和白铜合金管的电磁铸造方法研究, 研究表明采用电磁铸造的方法可显著改善管坯的质量, 大大提高工业生产效率。

在管电磁铸造过程中, 关键参数是电磁场的施

加位置以及所施加电磁场的频率和功率。研究表明电磁场应该施加在初始凝固壳附近, 确定初始凝固壳位置的最有效的方法是计算出凝固过程中的液穴深度。现已有大量文献^[5-9]报道了传统连续铸造过程的数值模拟, 研究了管壁与结晶器间热交换系数, 但是对空心管的数值模拟的研究却很少, 其中对管的内表面与内结晶器间的热流传输过程的研究更是微乎其微。因此, 本文作者建立了空心管坯电磁连铸的简单的数学模型, 利用此模型可以很容易

① 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59995442); 中科院精密铜管开发中心资助项目

收稿日期: 2004-05-13; 修订日期: 2004-09-01

作者简介: 张 琦(1979-), 女, 博士研究生。

通讯作者: 金俊泽, 教授, 博士生导师; 电话: 0411-84709443; E-mail: jinjunze@dlut.edu.cn

地得到液穴形状。通过将实验结果与数值模拟相结合的反推法确定了管坯内表面与内结晶器界面的换热系数。此外，由于工业水平电磁连铸过程中，液穴深度不容易直接测量，因此，可以将本文得到的界面换热系数值应用到水平连续铸造的数值模拟中，用所得到固-液界面位置来指导电磁场的施加。

1 实验

空心管坯电磁连铸的实验装置如图 1 所示。

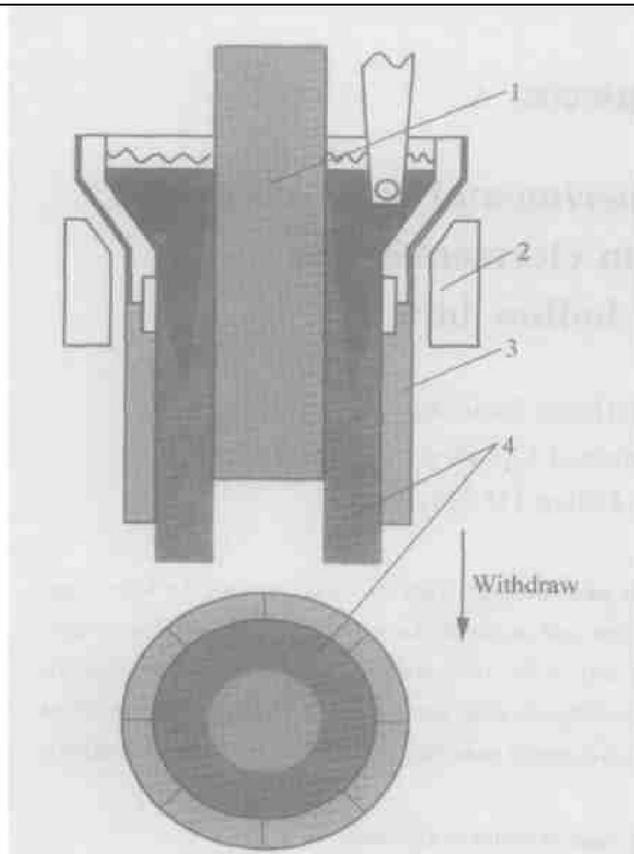


图 1 空心管坯电磁连铸实验装置

Fig. 1 Experimental apparatus for casting hollow billet

1—Inner mold; 2—Inductor;
3—Outer mold; 4—Hollow tube

外结晶器的内径为 60 mm，为了减小铝制外结晶器的电磁屏蔽作用，在外结晶器的外壁沿轴向自上向下开设了 8 条宽度为 3 mm，长度为 80 mm 的等宽窄缝。内结晶器的外径为 30 mm，有 1°~ 2° 的倒锥度。采用循环冷却水对内、外结晶器进行冷却。内结晶器的冷却系统如图 2 所示。通过调整热顶中感应线圈的功率和外结晶器的冷却水流量，可以控制外结晶器侧凝固的初始点的位置。内结晶器侧初始凝固点位置通过调节内结晶器的冷却水流量来控制。为了获得质量优良的管坯，感应器应该设

置在初始凝固壳附近。实验用合金为 Sr-4.5% Pb 合金。将熔化的合金通过浸入式浇口浇注到内外结晶器之间，同时对内、外结晶器通循环水冷却。当合金液面距热顶顶部 10 mm 时，启动拉坯装置，同时协调拉坯速度与浇注速度以便控制液面始终保持在距顶部 10~ 15 mm 处。在凝固过程达到稳定时，采用“探测法”，利用细铜丝对初始凝固坯壳的位置进行粗略测量，在此后的实验中，将感应器加在测量位置附近。

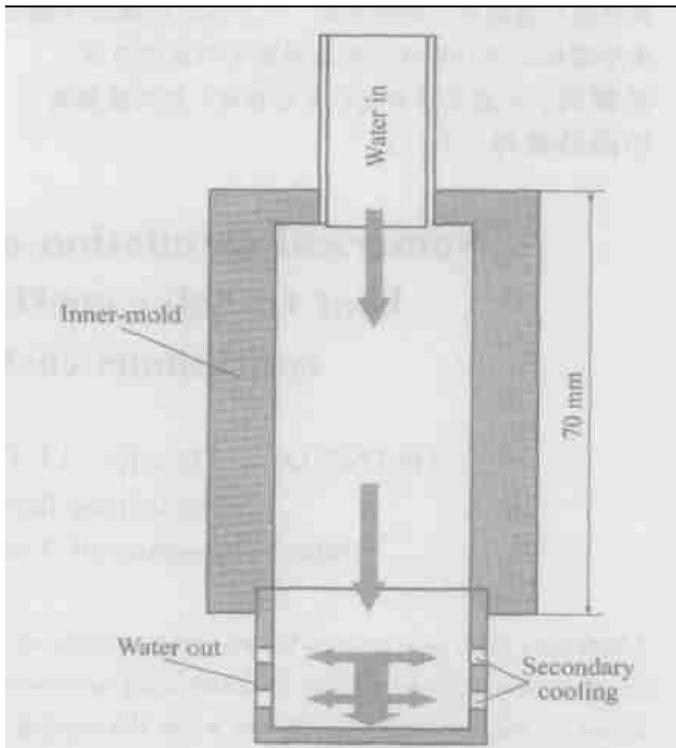


图 2 内结晶器冷却系统

Fig. 2 Cooling system of inner-mold

实验采用的铸造参数如表 1 所列。为了显示初始凝固壳的形状，在液态合金 Sr-4.5% Pb 的浇注末期浇入了将成分调整为 Sr-43% Pb 的熔体。

表 1 实验条件

Table 1 Experimental conditions

Metal	Billet size/mm	Pouring temperature/°C	Casting speed/(mm·s ⁻¹)	Inner cooling water flow rate/(L·min ⁻¹)	Outer cooling water flow rate/(L·min ⁻¹)
Sr-4.5% Pb	60 × 15	280	3.3	80~ 120	100

2 凝固进程的数值模拟

2.1 控制方程

建立数学模型时作如下假定：

1) 不考虑液相区中流体的速度, 认为液相区、固-液两相区和固相区是一个整体, 均以铸造速度向下运动;

- 2) 合金的密度不随温度变化;
- 3) 连铸过程是空间稳定温度场问题;
- 4) 凝固潜热算入比热中。

采用与拉坯速度相同的运动坐标系来描述铸坯的传热过程。因铸坯与坐标系无相对运动, 在柱坐标系下的传热控制方程为

$$\rho_p \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} (\lambda \frac{\partial \theta}{\partial r}) + \frac{\lambda \partial \theta}{r \partial r} + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z}) + q \quad (1)$$

式中 c_p 、 ρ 和 λ 分别表示合金的质量定压热容、密度和导热系数; θ 为温度; t 为时间; q 为内热源; r 为柱坐标系下的半径。

2.2 边界条件

连铸空心管坯边界不仅包括管坯的顶部、底部以及外结晶器侧的外表面, 而且还有内结晶器侧的内表面。由于管坯的顶部、底部以及外结晶器侧的外表面处的边界条件与圆棒一致, 因此, 本文着重阐述内结晶器侧的边界条件。

1) 一冷区^[10]

在内结晶器高度范围内, 假定结晶器的锥度设计接近理论值, 则凝固壳与结晶器形成空气层厚度不随高度变化, 计算中换热系数 h 为常数:

$$h = \frac{k_g}{d} + h_{rad} = h_0 \quad (2)$$

式中 k_g 为空气层介质的导热系数; h_{rad} 为空气层间辐射传热系数; d 为空气层厚度, 本文为 1.5 mm。

2) 辐射区

空气辐射区为一冷和二冷之间的区域, 在这一区域中, 铸坯表面的热量主要通过空气辐射带走, 因此热流密度可通过式(3)计算:

$$q = h_{air} (\theta - \theta_0) \quad (3)$$

式中 θ 为管坯的表面温度; θ_0 为空气温度; h_{air} 为当量辐射换热系数, 其表达式如式(4):

$$h_{air} = \sigma \times \varepsilon \times (\theta^2 + \theta_0^2) (\theta + \theta_0) \quad (4)$$

式中 σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, 即绝对黑体的辐射系数; ε 为 Sn-Pb 合金铸锭表面的黑度。

3) 二冷区

二冷区位于喷水位置以下, 其传热形式为紊流流体的对流换热, 对流换热系数与喷水量、流速、水温以及管坯表面温度等多种因素有关。一般按照经验公式计算后, 再根据实际工况调整而定。本文

采用的经验公式为^[6]

$$h = 2.25 \times 10^4 \times \omega^{0.55} \times (1 - 7.5 \times 10^{-3} \theta_s) \quad (5)$$

式中 ω 为喷水密度, $L \cdot m \cdot min^{-1}$; θ_s 为铸锭的表面温度, $^{\circ}C$ 。

将铸坯的表面温度在水温和固相线之间分成 5 个区间, 由式(5) 确定不同冷却水量下每个区间顶点的换热系数值, 在区间中 h 为线性变化, 变化趋势类似与文献[6] 中的热流变化趋势。极值出现在 140 $^{\circ}C$ (核态沸腾) 附近。

在进行温度场的数值计算时, 采用了表 2 和表 3 所列的参数。为了准确地模拟空心管坯的凝固过程, 采用将实验得到的凝固坯壳的形状与模拟结果相结合的反推法确定了冷却水量和内结晶器侧壁换热系数之间的关系。

表 2 温度场计算参数

Table 2 Parameters used in calculation of temperature field

Density/ ($kg \cdot m^{-3}$)	Latent heat of solidification/ ($kJ \cdot kg^{-1}$)	Pouring temperature/ $^{\circ}C$	Base mold temperature/ $^{\circ}C$
7 000	70	280	40
Solidus temperature/ $^{\circ}C$	Liquidus temperature/ $^{\circ}C$	Water temperature/ $^{\circ}C$	Ambient air temperature/ $^{\circ}C$
183	220	20	25

表 3 温度场计算参数

Table 3 Parameters used in calculation of temperature field

Temperature/ $^{\circ}C$	Specific heat/ ($kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	Thermal conductivity/ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
63	0.231	64.5
93	0.239	63.3
123	0.245	62.1
153	0.252	61.4
183 (solidus)	0.26	60.8
220 (liquidus)	0.25	30.2

3 结果与讨论

3.1 管坯凝固壳的形状与位置

图 3 所示为在不同冷却水流量条件下采用模拟和实验 2 种手段得到的初始凝固壳形状, 图 3(a)~

(c) 为计算结果, 图 3(a') ~ (c') 为实验所得的照片。由图可知, 随着冷却水流量的增加, 液穴深度逐渐减小, 内结晶器侧的凝固壳厚度逐渐增加。这是因为冷却水流量越大内结晶器侧壁的换热系数也越大。

图 4 所示为换热系数与内结晶器侧的冷却水流量的关系。由图可以看出, 当冷却水流量比较小时, 随着冷却水流量的变化, 内结晶器侧的热交换系数变化缓慢, 当冷却水流量大于 95 L/s 时, 随着冷却水流量的变化, 内结晶器侧的热交换系数发生了迅速的变化。

通过对上述实验和模拟结果进行分析可知, 当内结晶器冷却水流量在 80~ 120 L/s 之间时, 电磁场应该施加在距液面 5~ 20 mm 处。本实验中在内结晶器冷却水流量为 90 L/s 时, 在距液面 15 mm 处施加了频率为 2 500 Hz 的中频电磁场, 并研究了中频电磁场对管坯表面质量和凝固组织的影响。

3.2 空心管坯的表面质量

图 5 所示为未施加电磁场和施加电磁场时得到的空心管坯表面照片。未施加电磁场时, 铸坯的内外面质量较差, 有明显的偏析瘤和波痕; 施加了功率为 13 kW 的电磁场后, 表面的波痕消失, 但外表面有小的偏析瘤和夹渣, 内表面质量也得到了改善, 偏析瘤被消除。这是因为在开缝外结晶器外施加电磁场时, 金属熔体受到的电磁力抵消了部分静压力, 与外结晶器形成软接触; 另外, 金属熔体在电磁力的作用下产生强迫对流, 冲刷了凝固前沿的枝晶间低熔点物质, 改善了凝固前沿的溶质和温度分布, 这些因素有利于铸坯内外表面质量的改善^[11-16]。

3.3 空心管坯的宏观组织

图 6 所示为不同铸造条件下得到的铸坯宏观凝固组织。从图中可以看出, 无电磁场作用时, 铸坯凝固组织主要由相向生长的粗大的柱状晶组成, 施加电磁场后, 铸坯的宏观凝固组织由细小的等轴晶

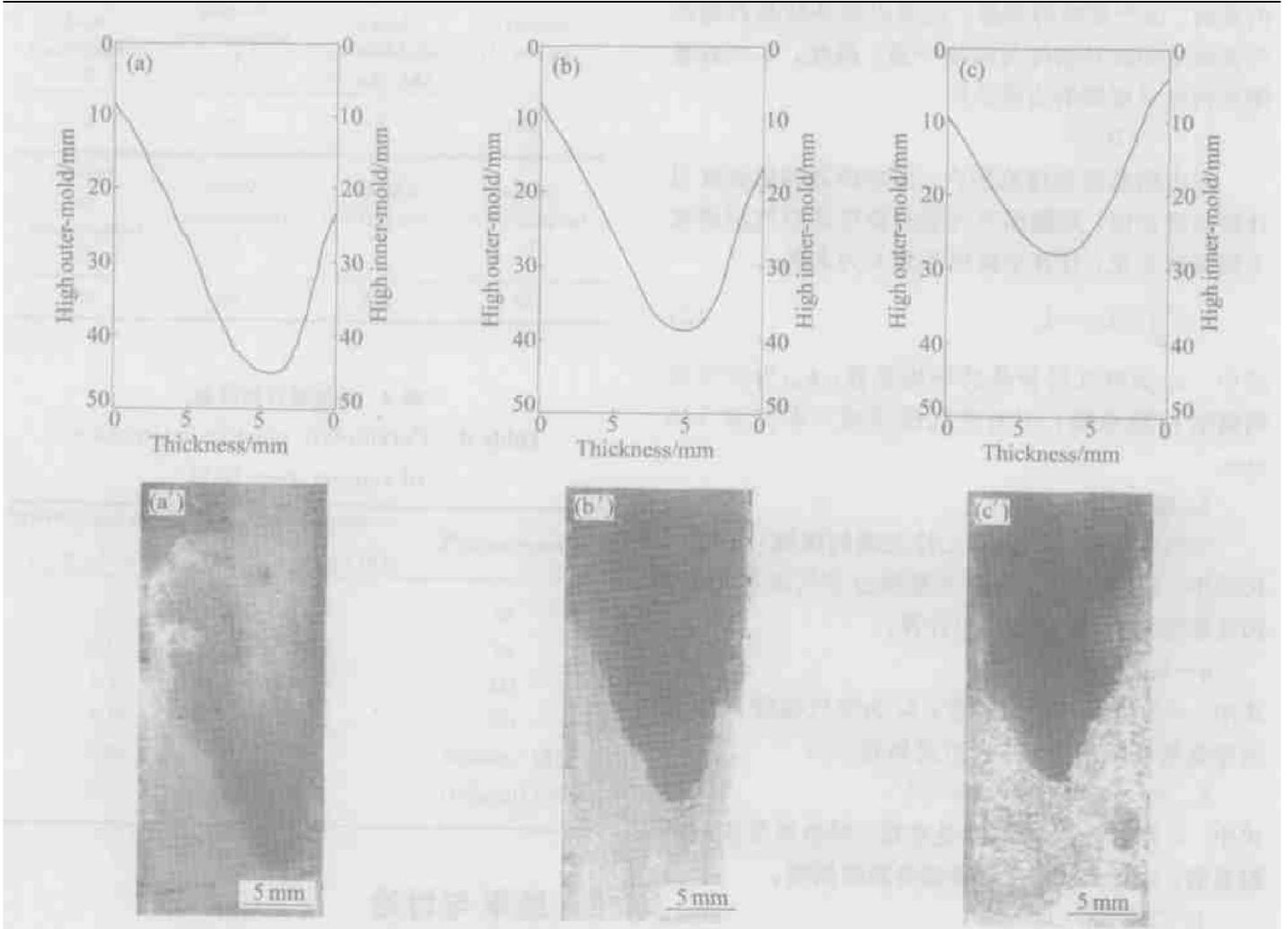


图 3 不同冷却水流量下实验与数值模拟所得的凝固坯壳比较

Fig. 3 Numerical simulation and experiment results at different cooling conditions

(a), (a') —80 L/s; (b), (b') —100 L/s; (c), (c') —120 L/s

(a) ~ (c): calculated results, (a') ~ (c'): experimental results

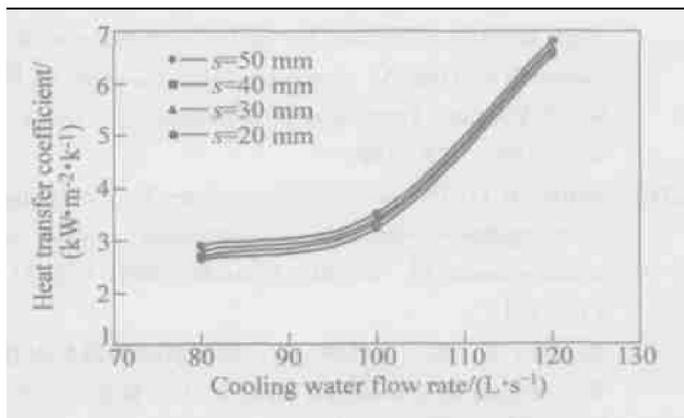


图 4 冷却水流量对换热系数的影响
(s 指从外结晶器顶部到内结晶器的距离)

Fig. 4 Effects of cooling water flow rate on heat transfer coefficient
(s refers to location of inner-mold from top of outer-mold)

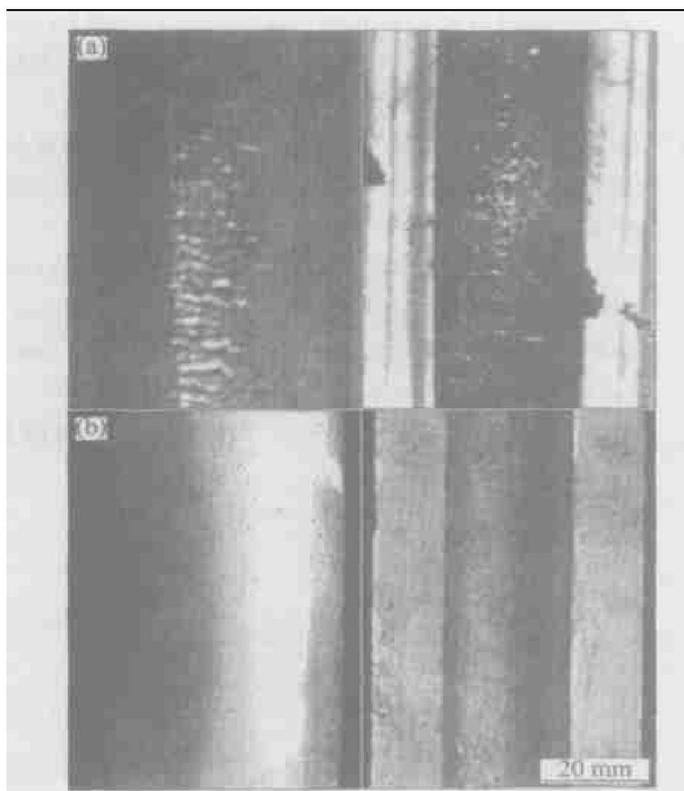


图 5 空心管坯的表面写真

Fig. 5 Surface quality appearances of hollow billets

组成, 而且晶粒尺寸均匀。此外, 热顶电磁连铸空心管坯的凝固组织周均匀性很好, 应用热顶和浸入式浇注, 解决了周向组织均匀性差的问题。

4 结论

1) 内结晶器的冷却水流量在低于 95 L/s 时换

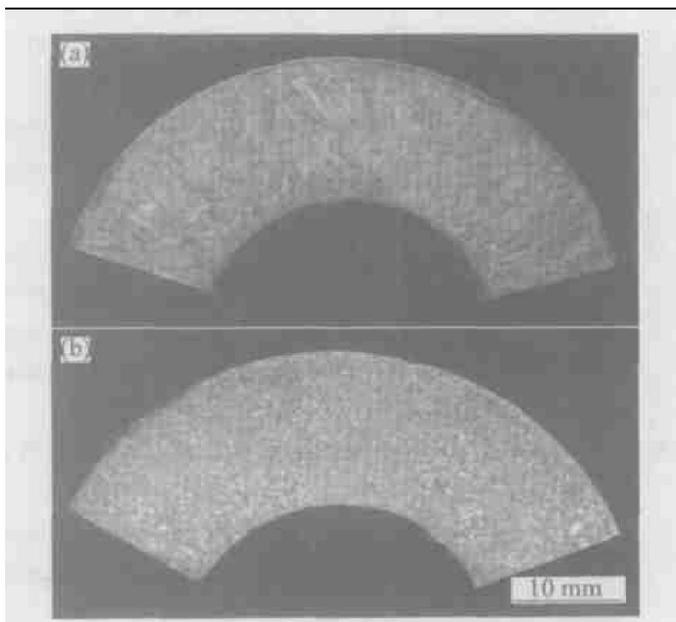


图 6 施加电磁场和未施加电磁场时空心管坯的凝固组织

Fig. 6 Macrostructures of hollow billets with and without electromagnetic field

(a) -0 kW;
(b) -13 kW(2 500 Hz)

热系数随水量的变化不大, 冷却水流量大于 95 L/s 时, 换热系数随着水流量的增加而线性增大。

2) 当内结晶器冷却水流量在 80~ 120 L/s 之间时, 频率为 2 500 Hz 的电磁场应施加在距液面 5~ 20 mm 处。

3) 施加 2 500 Hz 的中频电磁场, 能显著改善管坯表面质量的同时细化凝固组织。

REFERENCES

[1] Tarmann R, Poppmeier W. Hollow tube round through continuous casting[J]. Journal of Metals, 1996, 18(4): 453 - 461.

[2] Ono S, Sakaguchi H. A basic study of steel pipe continuous casting method[J]. Mitsubishi Heavy Industry Technical Report, 1981, 18(5): 625 - 632.

[3] Tarmann R. Continuous Casting Method of Tube Blanks[P]. Japanese 42 - 18989, 1965 - 01 - 14.

[4] Gerd V, Josef G, Manfred S, et al. Verfahren Zum Stranggiessen Von Hohlstrangen[P]. German 1758466, 1968 - 06 - 07.

[5] ZHENG Xiann-shu, WANG Yicheng, LI Zhao-xia, et al. Numerical simulation of the temperature field in the electromagnetic semi-continuous casting of slab[J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2001(2): 109 - 111.

[6] 李朝霞, 郑贤淑, 金俊泽. 连续铸造铸锭与冷却水之

- 间换热系数的确定[J]. 铸造, 2001, 50(1): 141 - 144.
- LI Zhao-xia, ZHENG Xian-shu, JIN Jur-ze. Determination of heat transfer coefficient in continuous casting[J]. Foundry, 2001, 50(1): 141 - 144.
- [7] JIN Jur-ze, ZHENG Xian-shu, CAO Zhi-qiang, et al. Numerical simulation of solidification in the electromagnetic casting of aluminum alloys[A]. Proceeding of 3rd Pacific Rim Inter Cofer on Casting Modeling[C]. Beijing, 1996. 335 - 340.
- [8] 卫超, 庞维诚. 圆坯连铸温度场模拟[J]. 铸造, 2002, 51(2): 106 - 108.
- WEI Chao, PANG Wei-cheng. Temperature field simulation of round billet continuous casting[J]. Foundry, 2002, 51(2): 106 - 108.
- [9] 张云鹏, 苏俊义, 陈铮, 等. 铸铁水平连铸中圆坯凝固过程的数值模拟[J]. 金属学报, 2001, 37(3): 287 - 290.
- ZHANG Yun-peng, SU Jur-yi, CHEN Zheng, et al. Numerical simulation on solidification process of horizontally continuously cast round iron bars[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2001, 37(3): 287 - 290.
- [10] Kai H, Robert D P. Metal mold interfacial heat transfer[J]. Metallurgical Transaction B, 1985, 16B: 585 - 594.
- [11] ZHANG Zhi-feng, LI Ting-ju, WEN Bin, et al. Electromagnetic continuous casting by imposing multi-electromagnetic field[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2000, 10(6): 741 - 744.
- [12] Spitzer K H, Reiter G, Schwerdtfeger K. Volume force designs in liquids by multi-frequency electromagnetic stirring[A]. International Symposium on Electro-Magnetic Processing of Materials[C]. Nagoya: ISIJ, 1994. 178 - 182.
- [13] Spitzer K H, Dubke M, Schwerdtfeger K. Rotational electromagnetic stirring in continuous casting of round strands[J]. Metallu Trans B, 1986, 17B(3): 119 - 131.
- [14] 张志峰, 温斌, 李廷举, 等. 软接触结晶器外对连铸坯施加高频电磁场的基础研究[J]. 铸造, 2000, 49(5): 257 - 260.
- ZHANG Zhi-feng, WEN Bin, LI Ting-ju, et al. A fundamental study on high frequency electromagnetic field imposing upon continuous casting outside soft contacting mold[J]. Foundry, 2000, 49(5): 257 - 260.
- [15] LI Ting-ju, CAO Zhi-qiang, ZHANG Zhi-feng, et al. Control of solidified structure of cast metal by imposing electromagnetic field[J]. Mater Trans JIM, 2001, 42(2): 281 - 285.
- [16] 张志峰, 李廷举, 温斌. 复合电磁场对结晶器弯月面金属液运动行为及铸坯质量的影响[J]. 钢铁研究学报, 2000(12): 36 - 40.
- ZHANG Zhi-feng, LI Ting-ju, WEN Bin. Effect of multi-electromagnetic field on motion state at meniscus and quality of continuous casting metals[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2000(12): 36 - 40

(编辑 李向群)