

低频电磁场对奥氏体不锈钢铸坯组织的影响

Effect of Low-frequency Electromagnetic-field on Macrostructure of Continuous Casting Austenitic Stainless Steel

周书才¹, 雷 亚¹, 李华基², 任正德¹, 曹鹏军¹, 杨治立¹

(1 重庆科技学院 冶金与材料工程学院, 重庆 400050; 2 重庆大学 机械工程学院, 重庆 400044)

ZHOU Shu-cai¹, LEI Ya¹, LI Hua-ji²,

REN Zheng-de¹, CAO Peng-jun¹, YANG Zhi-li¹

(1 College of Metallurgy and Material Engineering, Chongqing

University of Science and Technology, Chongqing 400050, China; 2 College

of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

摘要: 在工业实验中研究了低频电磁场对水平连铸奥氏体不锈钢组织的影响, 结果表明: 在低频电磁场作用下, 合适的电磁搅拌参数使奥氏体不锈钢宏观组织在一定程度上得到了明显改善, 铸坯的柱状晶和等轴晶得到了显著的细化, 消除了穿晶现象, 等轴晶区扩大, 中心缩孔、中心疏松级别明显降低; 多次实验发现: 对于奥氏体不锈钢, 所需的搅拌强度应高于一般钢种, 即使搅拌器的中心磁感应强度达 900GS 平均值(幅值达到 1413GS), 采用 3~4Hz 的频率, 搅拌后对钢液的组织影响较小; 在同样的磁场强度下, 不锈钢液由于粘度大, 因而其转速比碳钢液的转速约低 20%~30%。

关键词: 水平连铸; 奥氏体不锈钢; 电磁搅拌; 等轴晶率; 中心疏松

中图分类号: TF777, TG244 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2008)11-0032-04

Abstract: The influence of low-frequency electromagnetic-field on macrostructure of austenite stainless steel in horizontal continuous casting was investigated based on industrial experiment. The results show that application of appropriate electromagnetic stirring parameters can improve the macrostructure of austenitic stainless steel, in which both columnar grains and equiaxed grains are evidently refined and center porosity and shrinkage cavity can be remarkably decreased, and enlarging equiaxed grains zone. The industrial trials verify that the stirring intensity of austenite stainless steel should be higher comparing with plain carbon steel. Electromagnetic stirring has somewhat affected the macrostructure of the austenitic stainless steel even if the the magnetic flux density of the electromagnetic stirring reaches average 90mT (amplitude reaches 141mT) in average at frequency $f = 3\sim 4\text{Hz}$. Due to a higher viscosity, rotating speed of molten stainless steel was 20%-30% lower than that of molten carbon steel in the same magnetic flux density.

Key words: horizontal continuous casting; austenite stainless steel; electromagnetic stirring; equiaxial grain; center porosity

水平连铸技术是 20 世纪 70 年代末发展起来的技术, 首先应用于有色金属的生产, 随后快速发展到黑色金属的生产^[1, 2]。最近几年来, 随着我国不锈钢产量的大幅度增加, 不少厂家对不锈钢进行了连铸工业生产, 但传统连铸工艺生产的不锈钢, 特别是奥氏体不锈钢因在液相线温度附近导热系数较小(是铁素体不锈钢导热系数的 65%~85%, 普通碳素钢的 1/4), 使铸坯凝固过程传热慢, 导致铸坯断面的温度梯度大, 因而奥氏体不锈钢完全凝固后易形成柱状晶, 等轴晶少甚至出现穿晶现象, 晶粒粗大, 缩松严重, 从而严重影响

轧材的综合性能。

电磁场具有传递能量密度大, 无接触, 可控制等特点, 近年来, 电磁搅拌在控制钢的流动, 凝固成形, 液态金属电磁净化等工艺过程的应用及理论研究受到高度重视, 许多学者在从事这方面的研究, 并取得了大量的进展^[3-5]。如: 电磁搅拌在钢水平连铸过程的应用近年来已经引起了生产企业的广泛关注, 但至今关于奥氏体类不锈钢水平连铸公开的文献报道较少。本作者研究了低频旋转型电磁搅拌对水平奥氏体不锈钢凝固组织的影响, 为不同工艺条件电磁搅拌器(特别是水平连

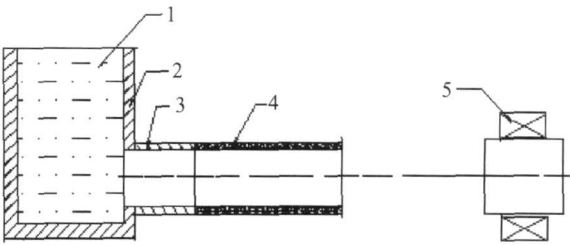
铸机上的电磁搅拌器) 的设计, 电磁参数确定奠定一定基础。

1 实验条件

水平电磁连铸装置主要由中间罐、电磁搅拌器、结晶器组成, 结晶器由水冷铜套和石墨模具组成, 其中水冷铜套壁厚 8mm, 长度 200mm, 石墨模具长度 1000mm, 电磁搅拌器采用外置式、旋转磁场, 外接三相交流电, 其主要参数为: 搅拌电流可调, 设计值为 0 ~ 300A, 搅拌频率可调, 设计值为 0~ 10Hz, 视在功率 132kVA, 通过变频变压及变流调节, 可改变搅拌强度, 实验装置如图 1 所示。

2 实验结果

在工业实验条件下, 进行了 7 炉对比实验, 1Cr18Ni9 不锈钢经精炼, 过热度控制在 $50^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 时, 浇注成 $\phi 180\text{mm}$ 圆坯。铸坯断面的宏观组织如图 2a 所示, 整个铸坯的横断面为粗大的柱状晶和少量等轴晶组成, 且出现穿晶现象。在同样的实验条件下, 铸坯在凝固过程中施加旋转型电磁搅拌, 中心磁感应强度为 68mT, 采用 5Hz 的频率时, 铸坯断面的宏观组织如



1- austenitic stainless steel liquid; 2- tundish;
3- copper mould; 4- graphite mould; 5- rotary EMS
图 1 水平电磁连铸实验装置示意图
Fig. 1 The schematic diagram of the experimental apparatus

图 2b 所示, 电磁搅拌作用下改变了柱状晶的生长方向, 组织状态已经比未施加电磁搅拌的图 2a 要细化并且未出现缩孔, 但其等轴晶率基本没有变化, 当中心磁感应强度 B 为 70mT, 采用 7Hz 的频率时, 铸坯断面的宏观组织如图 2c, 整个铸坯的横断面为细小柱状晶和等轴晶组成, 组织状态比图 2b 又有了明显地改善, 在低倍检验发现距铸坯表面约 40mm 处柱状晶生长方向改变较为明显。但当中心磁感应强度达 90mT 平均值(幅值达到 141mT), 采用 3Hz 的频率, 铸坯断面的宏观组织如图 2d 所示, 搅拌后对钢液的组织几乎没有什么影响。

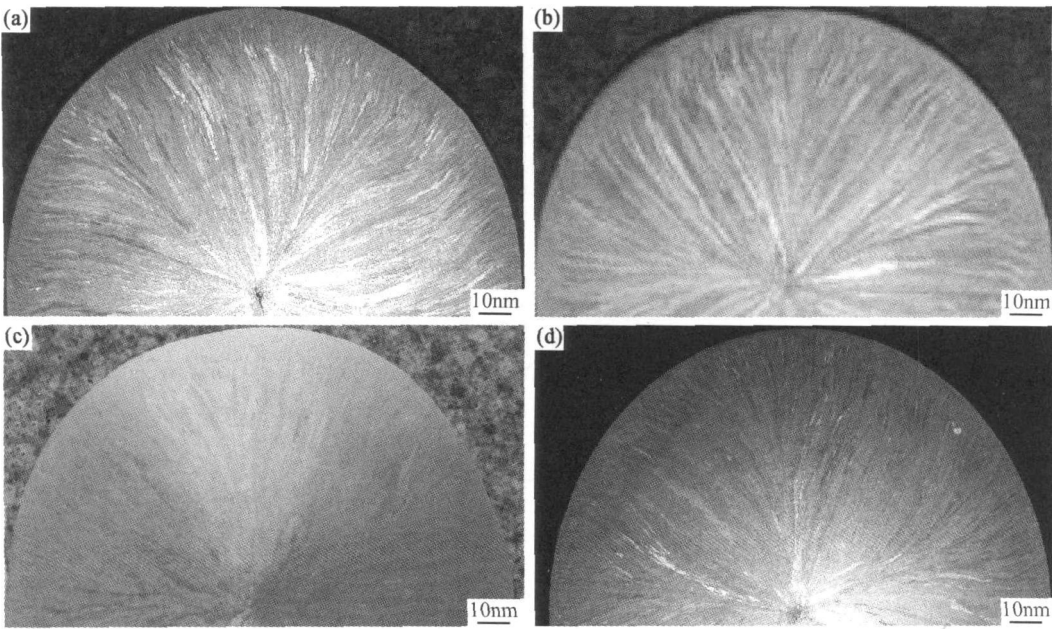


图 2 不同电磁场参数下奥氏体不锈钢铸坯宏观组织
(a) $B = 0\text{ mT}$; (b) $B = 68\text{mT}, f = 4\text{Hz}$; (c) $B = 70\text{mT}, f = 7\text{Hz}$; (d) $B = 90\text{mT}, f = 3\text{Hz}$
Fig. 2 Macrostructure of antenitic stainless steel billets treated by
different magnetic flux density and frequency
(a) $B = 0\text{ mT}$; (b) $B = 68\text{mT}; f = 4\text{Hz}$; (c) $B = 70\text{mT}; f = 7\text{Hz}$; (d) $B = 90\text{mT}; f = 3\text{Hz}$

3 结果分析

3.1 安装位置对空载磁感应强度的影响

根据现场连铸机的情况,采用 CT3 型 Tesla 计分别在铜结晶器,石墨结晶器和结晶器外三个不同位置对搅拌器内部中心磁感应强度在不同电流,不同频率进行了测量,结果如图 3。

从图 3 可以发现在采用交变电磁场的情况下,在三个位置的测量结果相差甚大,铜结晶器和石墨结晶器较结晶器外的磁感应强度小得多,充分说明高导电性

的铜(电阻率 $\rho=1.0\times 10^{-8}\Omega\cdot m$) 结晶器和石墨(电阻率 $\rho=1.0\times 10^{-6}\Omega\cdot m$) 结晶器对磁场的影响效果。同时可以看出,电流一定,随着频率的增加,磁感应强度值均变小。从磁场强度角度来看,结晶器的屏蔽作用消耗了大量电磁场能量,熔体内部难以获得较大的磁感应强度,其原因是铜及石墨电阻率小、涡流大、磁损大、磁场利用率不高。考虑到水平连铸的结晶器较短,冷却强度较小,出结晶器的坯壳厚度较薄,结合以上的测试结果,将电磁搅拌安装在出结晶器下口 1900mm 的位置。

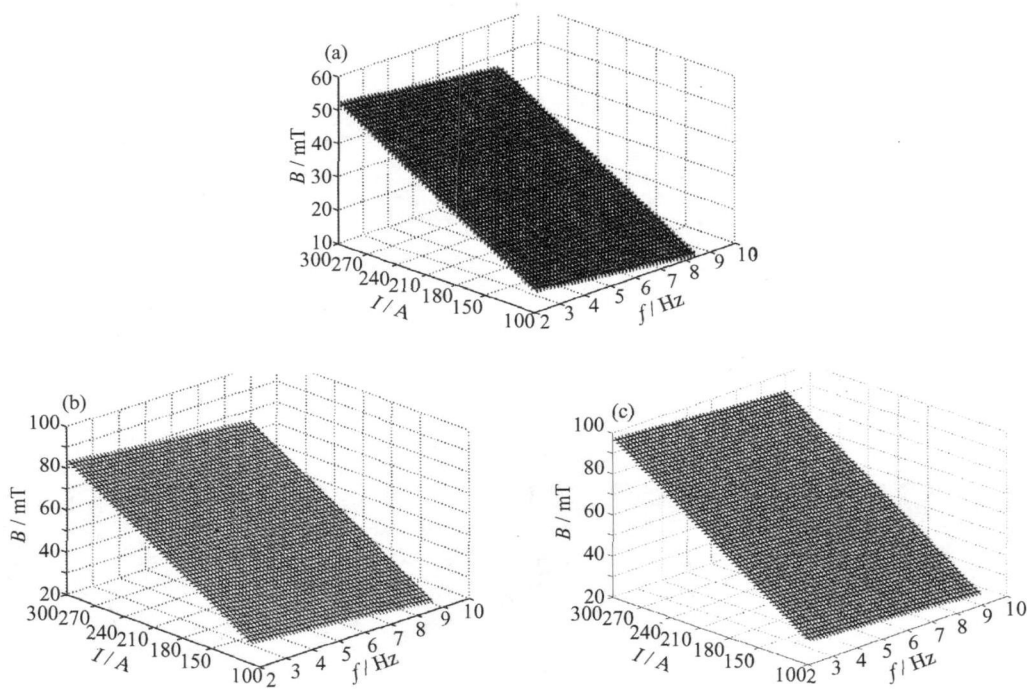


图 3 磁感应强度随电磁场频率和电流的变化规律
(a) 在铜结晶器内; (b) 在石墨结晶器内; (c) 在结晶器外
Fig. 3 Evolutions of magnetic flux density with frequency and current
(a) in copper mould; (b) in graphite mould; (c) beneath mould

3.2 电磁场工艺参数对组织的影响

合金在凝固过程中,凝固界面前沿成分过冷区的宽窄决定着凝固组织的形貌,若合金凝固界面前沿的温度梯度较大,则很难形成较大的成分过冷(满足等轴晶生长),凝固组织为柱状晶。连铸坯中,等轴晶是在较大的成分过冷区内,其周围为过冷熔体的条件下形成的^[6,7]。故要提高铸坯的等轴晶率,改善中心疏松、缩孔,细化铸坯晶粒的关键是①增大过冷度,②阻止柱状晶的生长。对于连铸坯,钢液凝固到一定程度后,邻近固-液界面液相中的溶质集中会处于相对稳定状态,形成成分过冷,当固液界面的成分过冷大于形核所要求的过冷度时,在固液界面析出新的晶核,这些晶核长

大阻止柱状晶向铸坯内延伸生长。由形核理论可知^[7]:

形核驱动力:

$$\Delta G \approx \frac{\Delta H_m \Delta T}{T_m} \tag{1}$$

及成分过冷的过冷度:

$$\Delta T_c = \frac{mc_0(1-k)}{k}(1 - e^{-\frac{Rx}{D}}) - Gx \tag{2}$$

式中: ΔT 为过冷度; ΔH_m 为凝固潜热; m 为相图上液相线的斜率; C_0 为合金原始成分; k 为固液界面处溶质的分配系数; R 为固相向液相的生长速度; x 为距离固-液界面的距离; G 液相中的温度梯度; D 为扩散系数由(1)式和(2)式可知,降低温度梯度将有效提高过

冷度, 实际生产中, 降低温度梯度对结晶组织形貌起主要作用。而金属凝固时液穴内的金属液实施电磁搅拌后, 使铸坯内部的液态金属运动加剧, 一方面, 加速了铸坯内部的热量交换, 使液态温度趋于一致, 凝固界面前沿的温度梯度变小(这已经被实验所证实^[8]), 成分过冷增大, 使得凝固过程表现为液穴内大量晶核进行各向同性生长, 促进了等轴晶的形成, 抑制了柱状晶的生长, 另一方面, 使凝固前沿的树枝晶产生局部的温度起伏, 有助于树枝晶的熔断, 形成游离的晶核并增殖, 同时增加了形核率, 从而导致了晶粒细化, 见图 2b, c, d。

由图 2a 中可以看出, 在未施加电磁场时, 由于结晶器铜套直接进行水冷, 在铸坯中产生了很大的温度梯度, 在整个横截面上基本都是柱状晶, 晶粒粗大, 穿晶现象非常明显。在图 2b, c, d 中, 由于施加的电磁场的中心磁感应不同, 组织也有所不同, 并不是中心磁感应强度越高, 改善效果越明显。在图 2d 中, 虽然磁感应强度较大, 但电磁搅拌力量显得不足, 说明要实现良好搅拌效果须通过中心磁感应强度和搅拌频率的合理配合。这是因为在旋转电磁场作用下首先在液态金属中产生感应电流, 进而产生电磁力, 电磁搅拌对钢水产生搅拌, 是通过电磁搅拌力产生, 由于液态金属在距离中心不同的位置上受到切线方向上的体积电磁力, 再由于液态金属的粘性, 从而使液态金属进行旋转运动, 液态金属单位体积在不同位置所受到的电磁力的周向分力 F 由下式决定^[9]:

$$F = \frac{1}{2} \sigma B^2 \omega r \quad (3)$$

式中: B 为磁感应强度 (T); σ 为液态金属电导率 ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$); ω 为角频率 (rad/s); r 为液态金属的旋转半径 (m)。

根据式 (3) 计算电磁力结果如图 4。从图 4 表明, 电磁力与频率、磁感应强度有关, 故在其他条件相同时, 为了增加搅拌效果, 应尽可能增大电磁力, 而不只是增加中心磁感应强度, 在图 2d 中, 虽然磁感应强度较大, 但电磁搅拌力量显得不足, 在实际工艺参数的调节时, 应充分考虑频率与磁感应强度的综合作用。

3.3 奥氏体不锈钢的热物性参数对组织的影响

由图 2b, c, d 可知, 电磁搅拌虽然改善了奥氏体不锈钢的凝固组织, 但不如一般的合金钢和普碳钢改变明显, 主要表现在等轴晶增加不明显。在低频磁场中, 磁泰勒数 (T_a) 可用来描述流场的特征参数^[8], 其表达式为:

$$T_a = \frac{\sigma \omega B^2 R^4}{2\rho \nu^2} \quad (4)$$

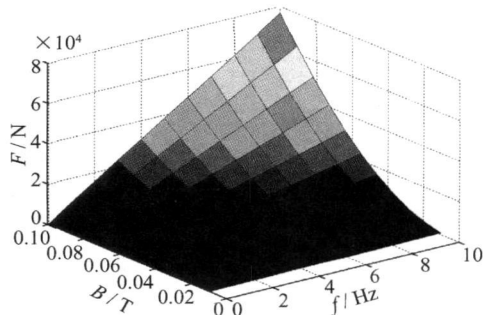


图 4 电磁力随频率和磁感应强度的变化

Fig. 4 Evolutions of electromagnetic force with frequency and current

式中: ρ 为液态金属的密度; ν 为液态金属的动力学粘度; ω 为角频率; R 为搅拌的圆柱半径, 奥氏体不锈钢的动力学粘度较碳钢高, 在同样的磁场强度下, 奥氏体不锈钢的磁泰勒数比碳钢低 42%, 根据文献[8]报道, 在金属凝固过程中, 凝固前沿的温度梯度随磁泰勒数的增加而降低, 且在同样的磁感应强度下, 根据文献[9]提供的公式计算奥氏体不锈钢和碳钢的在铸坯横截面上搅拌速度分布如图 5 所示, 从图 5 可知, 对这两种不同钢液而言, 金属液的转速存在很大的差别, 不锈钢液转速比碳钢液约低 20%~30%, 这与文献[10]实际测量结果基本一致。因此, 奥氏体不锈钢在连铸生产中, 在搅拌强度相同的条件下, 其断面温度梯度应该比碳钢高, 不利于等轴晶的形成。此外, 奥氏体不锈钢较碳钢导热系数小, 电磁搅拌在一定程度上改善了传热, 但在其他条件相同条件下, 其改变的传热效果不如碳钢理想, 导致其断面温度梯度降低较小, 不利于等轴晶的形成。由此可见, 奥氏体不锈钢液和碳钢液的磁泰勒数及搅拌速度差异, 主要取决于其导热系数及动力学粘度的差异, 对奥氏体不锈钢而言, 要获得与碳钢同样的搅拌效果, 需要更大的输入功率。

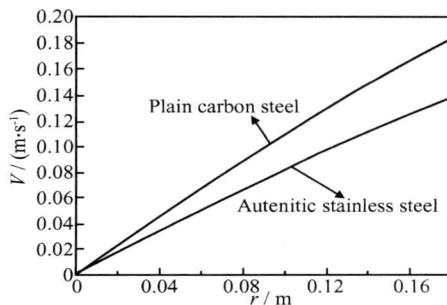


图 5 在铸坯横截面上搅拌速度的分布

Fig. 5 Calculated distributions of stirring velocity in cross sectional view

(下转第 40 页)

及高结合力特性,表现出较好的耐热性能。800℃下热处理处理的镀层出现了“鼓包”,镀层结构变得疏松,力学性能急剧下降。

参考文献

- [1] ZENG Z X, WANG L P, CHEN L, et al. The correlation between the hardness and tribological behaviour of electroplated chromium coatings sliding against ceramic and steel counterparts [J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 201(6): 2282–2288.
- [2] ESTEVE J, ROMERO J, GOMEZA M, et al. Cathodic chromium carbide coatings for molding die applications [J]. Surface & Coatings Technology, 2004, 188–189: 506–510.
- [3] SEN S. Influence of chromium carbide coating on tribological performance of steel [J]. Materials and Design, 2006, 27: 85–91.
- [4] 周克崧. 热喷涂技术替代电镀硬铬的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14S1: 182–191.
- [5] 李钦虎, 王军. 磁控反应溅射沉积 CrN 薄膜的抗氧化性研究[J]. 表面技术, 2005, 34: 40–44.
- [6] WANG D Y, WENG K W, CHANG C L, et al. Synthesis of Cr₃C₂ coatings for tribological applications [J]. Surface and Coatings Technology, 1999, 120–121: 622–628.
- [7] SUA Y L, LIU T H, SU C T, et al. Wear of CrG coated carbide tools in dry machining [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 171: 108–117.
- [8] 胡志彪, 李贺军, 付前刚, 等. 低摩擦系数固体润滑涂层研究进展

[J]. 材料工程, 2006, (3): 60–64.

- [9] TABET N, ALLAM I, YIN R C. X-ray photoelectron spectroscopy investigation of the carburization of 310 stainless steel [J]. Applied Surface Science, 2003, 220: 259–272.
- [10] KOK Y N, HOVSEPIAN P E. Resistance of nanoscale multilayer C/Cr coatings against environmental attack. [J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 201(6): 3596–3605.
- [11] ZHU Y F, WANG L, YAO W Q, et al. The interface diffusion and reaction between Cr layer and diamond particle during metallization [J]. Applied Surface Science, 2001, 171: 143–150.
- [12] BEAUVAIS–REVEILLON S, HUNTZ A M, SEVERAC C, et al. The role of carbon during oxidation of chromium PVD coatings on iron substrates [J]. Corrosion Science, 1995, 37: 1721–1737.
- [13] 范玉殿, 周志烽. 薄膜应力的研究[J]. 真空科学与技术, 1993, 13(2): 130–137.

基金项目: 国家“863”科技攻关项目(2005AA33H010); 西安理工大学创新基金(101-210603)

收稿日期: 2007-09-28; 修订日期: 2008-05-20

作者简介: 严少平(1964–), 男, 副教授, 博士生, 研究方向: 磁控溅射沉积镀层工艺与材料表面改性研究, 联系地址: 西安市金花南路5号西安理工大学材料科学与工程学院办公室(710048)。E-mail: spyan581@sohu.com

(上接第35页)

4 结论

(1) 合适的电磁场参数能明显细化奥氏体不锈钢铸坯的柱状晶和等轴晶, 消除了穿晶现象, 中心缩孔、中心疏松级别明显降低, 铸坯断面上的等轴晶区宽度有所扩大, 但等轴晶增加不明显。

(2) 在其他条件相同的条件下(输入功率及电磁搅拌的尺寸), 电磁搅拌对钢水产生的搅拌效果是由中心磁感应强度、磁场频率及钢水的热物理参数综合决定。

(3) 计算结果表明, 由于奥氏体不锈钢液粘度大, 所需的搅拌强度应高于一般钢种, 不锈钢液转速比碳钢液约低 20%~30%, 要获得与碳钢同样的搅拌效果, 需要更大的输入功率。

参考文献

- [1] HEARD R. Renew of horizontal continuous casting technology [A]. Alex McLean Symposium Proceedings [C]. USA: Iron and Steel Society/AIME, 1998. 147–154.
- [2] HAISSIG M. Horizontal continuous casting: a technology for the future[J]. Iron Steel Eng, 1984, 61(6): 65–71.
- [3] TAKEHIKO T, EIICHI T, MASATAKE H, et al. Electromagnetic control of initial solidification in continuous casting of steel

by low frequency alternating magnetic field [J]. ISIJ International, 1997, 37(11): 1112–1119.

- [4] CHO Y W, OH Y J, CHUNG S H, et al. Mechanism of surface quality improvement in continuous cast slab with rectangular cold crucible mold [J]. ISIJ International, 1998, 38(7): 723–729.
- [5] KOLESINCHENKO A F, KOLESICHENKO A A, BURYAK V V. Improvement of in mold electromagnetic stirrer by feeding of magnetic system with polyharmonic current [J]. ISIJ International, 2004, 44(2): 342–349.
- [6] 张宏丽, 王恩刚, 贾光霖, 等. 电磁搅拌提高铸坯等轴晶比率的数值模拟[J]. 东北大学学报, 2002, 22(5): 535–538.
- [7] 李庆春. 铸件形成理论基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [8] WILLERS B, ECKERT S, MICHEL U, et al. The columnar to equiaxed transition in Pb-Sn alloys affected by electromagnetically driven convection[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 402: 55–65.
- [9] 齐雅丽, 贾光林, 张国志. 电磁搅拌对液态金属运动及凝固组织的影响[J]. 铸造技术, 2005, 26(2): 118–120.
- [10] 钟云波, 孟宪俭, 倪丹, 等. 旋转磁场净化钢液的实验研究[J]. 上海金属, 2006, 28(2): 9–14.

收稿日期: 2007-09-17; 修订日期: 2008-01-10

作者简介: 周书才(1971–), 男, 讲师, 硕士, 主要从事凝固理论及超细晶材料的研究, 联系地址: 重庆市虎溪大学城重庆科技学院冶金与材料工程学院(401331)。E-mail: zhoushucai71@126.com