

文章编号: 1004 - 0609(2004) 12 - 2060 - 06

电磁场对水平连铸紫铜管表面质量及组织性能的影响^①

李新涛¹, 李丘林¹, 李廷举¹, 宋艳琴², 张金利², 金俊泽¹

(1. 大连理工大学 铸造工程研究中心, 大连 116023; 2. 河南金龙股份有限公司, 新乡 453000)

摘 要: 研究了工频电磁场对水平连铸紫铜管坯表面质量、力学性能和组织的影响。结果表明: 在工频电磁场作用下, 紫铜管坯的表面质量得到了一定的改善, 励磁电流为 140 A 时, 表面粗糙度由 120 μm 降到 90 μm ; 施加电磁场后, 柱状晶得到了显著的细化, 并在管坯内侧得到了细小的等轴晶组织; 随着电流强度的增加, 等轴晶区扩大, 晶粒在周向上分布更加均匀; 施加电磁场后, 管坯的力学性能随着励磁电流的增加得到了显著的提高, 当励磁电流为 140 A 时, 抗拉强度提高了 15%, 延伸率提高了 10%, 管坯硬度提高了 11%。

关键词: 电磁场; 水平连铸; 铜管坯

中图分类号: TC 21

文献标识码: A

Effect of electromagnetic field on surface quality, macrostructure and property of horizontal continuous casting of copper hollow billet

LI Xin-tao¹, LI Qiu-lin¹, LI Ting-ju¹, SONG Yan-qin²,
ZHANG Jin-li², JIN Jun-ze¹

(1. Research Center of Foundry Engineering,

Dalian University of Science and Technology, Dalian 116023, China;

2. Henan Golden Dragon Precise Copper Tube Incorporation, Xinxiang 453000, China)

Abstract: The influence of commercial frequency electromagnetic field on the surface quality, mechanical properties and macrostructure of copper hollow billet prepared by horizontal continuous casting method was investigated. The results indicate that high quality copper hollow billet can be obtained by the application of electromagnetic field during horizontal continuous casting. When the imposed current is 140 A, surface roughness decreases from 120 μm to 90 μm . Columnar grains are evidently refined and fine equiaxed grains are acquired in the inner side of cross-section. With the increase of input current, equiaxed grains zone widens and grains distribute more uniform in the circumferential direction. Moreover, the mechanical properties are all remarkably enhanced with the increase of electromagnetic intensity. When the input current is 140A, the increases of tensile strength, elongation and hardness are 15%, 10% and 11%, respectively.

Key words: electromagnetic field; horizontal continuous casting; copper hollow billet

紫铜管作为高效的传热器件在制冷领域及生产生活中有着广泛的应用^[1]。水平连铸—行星轧制—

① 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50274017)

收稿日期: 2004 - 05 - 13; 修订日期: 2004 - 08 - 15

作者简介: 李新涛(1976 -), 男, 博士研究生。

通讯作者: 李新涛, 博士生研究; 电话: 0411 - 84708940; E-mail: xtlee63@dl.cn

拉拔工艺是 20 世纪 90 年代以来逐步发展起来的紫铜管生产新工艺, 它取消实心铸锭加热、挤压等工序, 直接生产出空心管坯, 由三辊行星轧管机轧制成一定规格的拉伸管坯, 具有基建投资低、铸坯质量好等优点^[1, 2]。但是, 在目前的生产工艺条件下生产出的管坯振痕等表面缺陷难以避免, 在轧制之前, 必须进行铣面处理, 降低了金属的利用率^[2, 3]。近年来, 随着空调器向节能、环保方向发展趋势的加剧, 用于空调两器(蒸发器和冷凝器)的薄壁光管逐渐被具有高效传热特性的内螺纹铜管所替代。小直径、薄壁厚内螺纹管的制备对铜管坯质量提出了更高的要求。但是, 采用传统水平连铸工艺生产的空心铜管坯晶粒组织粗大, 且分布不均, 在生产壁厚 0.2 mm 以下的内螺纹管时, 经常出现断管现象。因此, 改进传统水平连铸工艺, 以进一步提高管坯质量, 已经成为迫在眉睫的工作。

电磁场具有传递能流密度大、无接触、可控制等特点, 近年来, 将电磁技术用于控制金属流动、凝固成型已经成为一种趋势。许多学者在从事这方面的研究, 并取得了一定的进展^[4-10]。例如, 在铝合金半连续铸造过程中, Vives^[11-13]为改善微观组织, 发展了一种新型的电磁铸造工艺, 即在结晶器外加感应线圈, 通过电磁力的约束作用及搅拌作用来提高铸坯表面质量及凝固组织。张志峰等^[14]借助于在结晶器外施加复合电磁场控制弯月面形状, 消除了 Sn-4.5% Pb 连铸方坯的表面振痕, 同时细化了铸坯凝固组织。在管坯制备方面, 李丘林等^[15]采用热顶电磁连铸方法, 通过在垂直连铸结晶器外施加中频电磁场得到了内外质量良好的 Sn-4.5% Pb 空心管坯。电磁场在铜管坯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, 但至今尚未见到公开的文献报导。本文作者研究了工频交变磁场对水平连铸紫铜管坯组织及性能的影响, 以期提高管坯的表面质量及结晶组织, 开发出生产高性能管坯的电磁制备技术, 为轧制生产提供高质量的铸坯。

1 实验

根据电磁场理论, 安培定律和洛仑兹力可以分别表示为

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu \mathbf{J}_e \quad (1)$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{J}_e \times \mathbf{B} \quad (2)$$

式中 \mathbf{B} 为磁通密度; μ 为金属液的磁导率; \mathbf{J}_e 为感应电流; \mathbf{F} 为电磁体积力。将式(1)代入式(2)可

以得到式(3):

$$\mathbf{F} = \mathbf{J}_e \times \mathbf{B} = (1/\mu) \cdot (\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} \quad (3)$$

式(3)变形后, 可以得到式(4):

$$\mathbf{F} = (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B} / \mu - \nabla (\mathbf{B}^2 / 2\mu) = \mathbf{f}_1 - \mathbf{f}_2 \quad (4)$$

式中 \mathbf{f}_1 为回旋驱动力, \mathbf{f}_2 为垂直于金属液表面指向内部的力。在铜管坯的初期凝固过程中施加电磁场, 结晶器内金属熔体在 \mathbf{f}_1 作用下进行强迫流动, 冲刷凝固前沿, 并使得熔体混合均匀, 减小了熔体的温度梯度。在水平连铸达到稳定状态时, \mathbf{f}_2 和重力、金属液静压力达到平衡, 在一定程度上减小了铸坯对模具的压力, 起到软接触作用。这些因素均有利于改善空心管坯表面质量, 细化凝固组织。

1.1 装置

实验装置如图 1 所示。水平电磁连铸装置主要由工频保温炉、感应线圈、结晶器以及引锭杆组成。此外, 附属设备还包括拉坯机构、中频熔化炉、控温设备以及电源等。电源采用自行设计的三相工频电源, 可将三相交变电流转化为单相交变电流输出。感应器由一定直径铜线绕制而成, 结晶器由石墨模具和水冷铜套组成。其中, 水冷铜套壁厚 4 mm, 石墨模具外径 118 mm, 内径 84.6 mm, 长度 385 mm, 石墨芯小端直径 38.4 mm, 锥度 1°, 长度 330 mm。施加电磁场时, 模具对磁场有屏蔽效应。穿透层厚度 d 可用式(5)来计算:

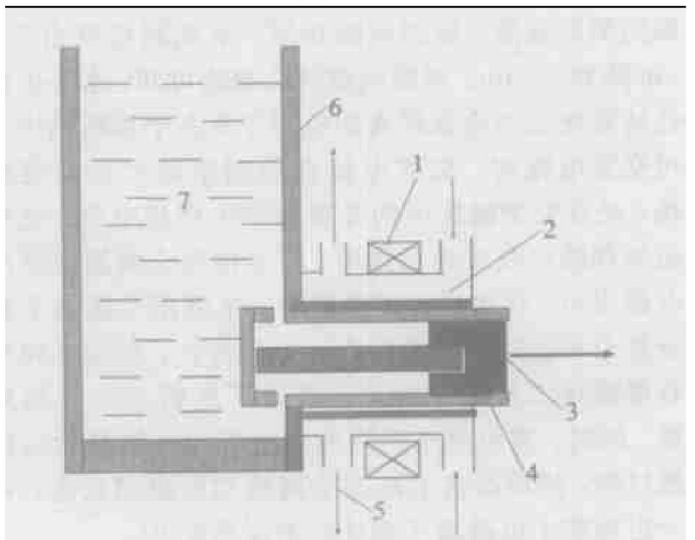


图 1 水平电磁连铸实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental equipment

(1) —Inductor; (2) —Cooling system;

(3) —Dummy bar; (4) —Mold;

(5) —Cooling water; (6) —Furnace;

(7) —Copper liquid

$$d = \sqrt{2 / \mu \sigma \omega} \quad (5)$$

式中 σ 为模具电导率; ω 为角速度。经计算 50 Hz 电磁场对石墨穿透深度为 187 mm, 对水冷铜套的穿透深度为 9.4 mm, 所以模具对磁场强度影响不大。

1.2 方法

实验时, 将感应线圈置于石墨模具外。铜料经中频熔化炉熔化后, 在保温炉内保温, 保温达到 1 150 °C 时开始拉坯。当拉坯进入稳定阶段后施加电磁场, 励磁电流为单相工频交流电。铜液的温度用铂-铑热电偶控制。用转子流量计分别控制结晶器和二次喷水冷却强度, 冷却水压力为 0.4~0.8 MPa, 温度 ≤ 40 °C。进入稳定阶段后拉坯速度为 340 mm/min, 采用拉-停-反推-拉的拉坯制度。

另一组作为对照, 不施加任何磁场, 其它工艺条件相同。

铸造过程完成后, 分别从管坯的横断面上取试样, 经切割、磨光、腐蚀后得到管坯的凝固组织。

2 结果与讨论

2.1 电磁场对管坯外表面质量的影响

图 2 所示为用激光测位仪测得的不同工艺条件下铸态管坯底部外表面的粗糙度。图 2(a) 为普通水平连铸, 图 2(b) 为水平电磁连铸。由图 2(a) 可以看出, 未施加电磁场的管坯外表面比较粗糙, 有着较深的周向振痕。施加电磁场后, 表面粗糙度由 120 μm 降到 90 μm 。根据电磁感应理论可知, 水平电磁连铸管坯表面质量提高的机理主要在于当线圈中通过交变电流时, 交变电流在周围空间产生交变磁场, 处在交变磁场中的金属将产生感应电流。交变磁场和感应电流相互作用, 产生指向金属液内部的电磁压力。在水平连铸条件下, 电磁压力抵消了部分重力和金属液的静压力, 从而减小了初始坯壳与石墨模具之间的摩擦力, 提高了连铸坯的表面质量。同时, 感应电流的热效应也影响了结晶器的传热过程, 进而改善了液态金属的初始凝固状态, 在一定程度上也提高了管坯的表面质量^[16]。

2.2 电磁场对管坯宏观组织的影响

凝固时液穴内的金属液在电磁场的作用下进行强迫对流, 这种强迫对流一方面使熔融金属液温度趋于一致, 减小了温度梯度, 使得凝固过程表现为液穴内大量晶核在相似环境条件下进行各向同性长

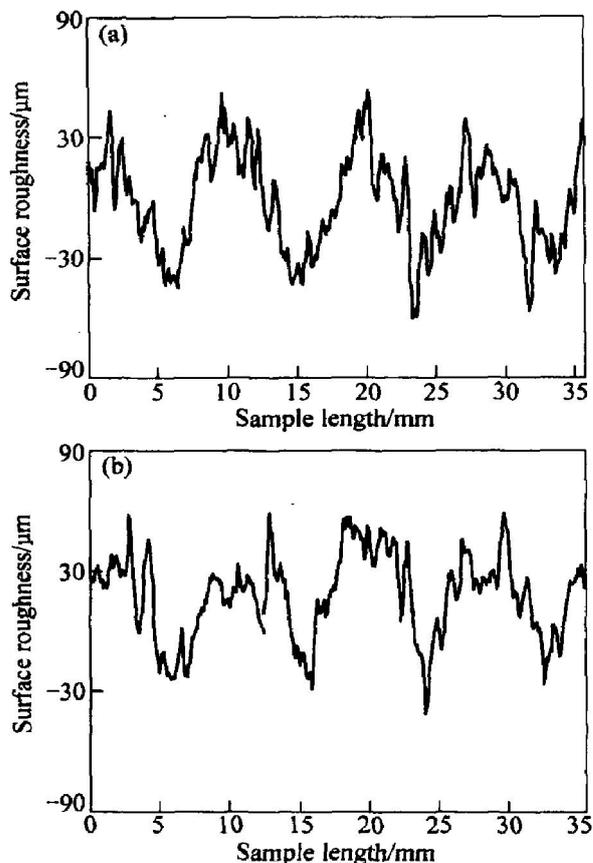


图 2 电磁场对管坯表面粗糙度的影响

Fig. 2 Effect of electromagnetic field on surface roughness of copper hollow billet (a) 0 A; (b) -140 A

大, 抑制了柱状晶的生长; 另一方面将柱状晶打断或击碎, 而这些断碎的细晶又可成为结晶的核心, 增加了形核率, 从而导致了晶粒的细化。

图 3 所示为不同条件下管坯横截面的宏观组织。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, 在管坯中产生了很大的温度梯度。除了内侧和外侧由于激冷作用产生了少量的细等轴晶外, 在整个横截面上基本都是柱状晶, 且晶粒粗大, 穿晶现象非常明显。柱状晶在周向上分布均匀性也很差, 下部及侧面的柱状晶较上部更发达, 这是因为在水平连铸时, 由于重力的影响, 上部产生气隙, 气隙的存在大大地增加了热传导时的热阻, 减小了径向温度梯度, 从而使管坯晶粒组织在上部和下部存在差异。从图 3(b) 可以看出, 在结晶器外施加工频电磁场, 当线圈中的电流强度达到 100 A 时, 柱状晶得到了显著的细化, 粗大的柱状晶基本上得到了消除, 在横截面内侧出现等轴晶区, 虽然仍存在少量的穿晶现象, 但晶粒分布的均匀性有了很大的提高。从图 3(c) 可以看出, 当电流

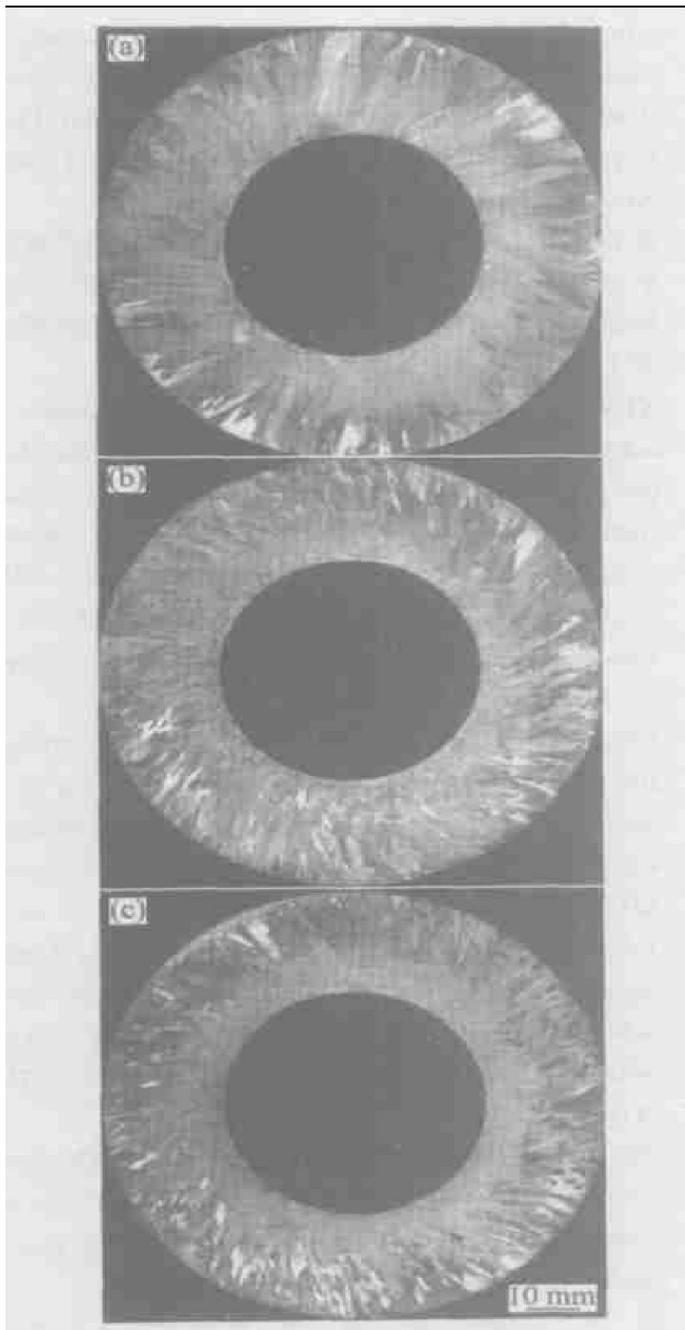


图 3 管坯横截面的宏观组织

Fig. 3 Cross section macrostructures of copper hollow billet (a) -0 A; (b) -100 A; (c) -140 A

强度增加到140 A 时, 粗大的柱状晶及穿晶现象已经消失, 等轴晶区有所扩大, 晶粒周向上分布非常均匀, 这样的组织有利于轧制、拉拔加工。

沿管坯径向从内表面到外表面作一条直线, 用直线(即管坯壁厚 L) 穿过的晶粒数表示晶粒度。晶粒度随着电流强度的变化规律如图 4 所示。

由图 4 可以看出, 随着电流强度的增加, 晶粒度呈增大趋势。这是因为随着电流强度的增加, 起搅拌作用的电磁分力也越大, 从而使枝晶更容易被击碎。

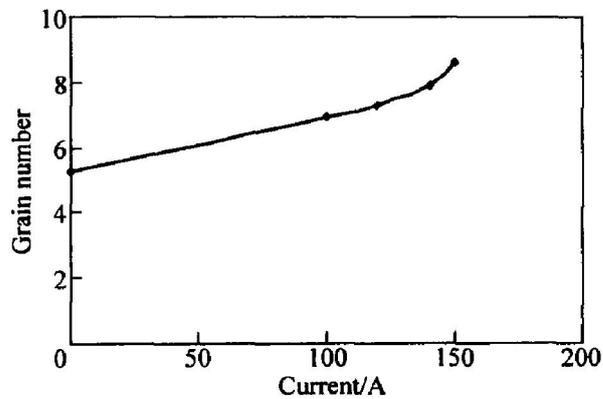


图 4 径向晶粒度随电流强度的变化规律

Fig. 4 Curve of radial grain number vs current

2.3 电磁场对管坯机械性能的影响

2.3.1 电磁场对管坯力学性能的影响

紫铜管坯的抗拉强度和延伸率对轧制以及盘拉具有重要意义。考虑到水平连铸时重力对凝固组织的影响, 分别从未施加磁场及施加磁场的 2 种管坯的上、下和侧面取试样进行拉伸实验, 取其平均值, 参照 GB/T228 - 2002 标准对比抗拉强度及延伸率的差异。

从实验结果来看, 施加了电磁场以后试样的抗拉强度、延伸率均得到了提高。励磁电流为 140 A 时, 试样抗拉强度提高了 15%, 延伸率提高了 10%。这是由于施加了电磁场后, 金属液受到强迫对流, 不但晶粒得到了细化, 而且其分布均匀性也得到了极大的提高, 所以经过电磁场处理后, 试样的抗拉强度和延伸率得到了提高。

2.3.2 电磁场对管坯硬度的影响

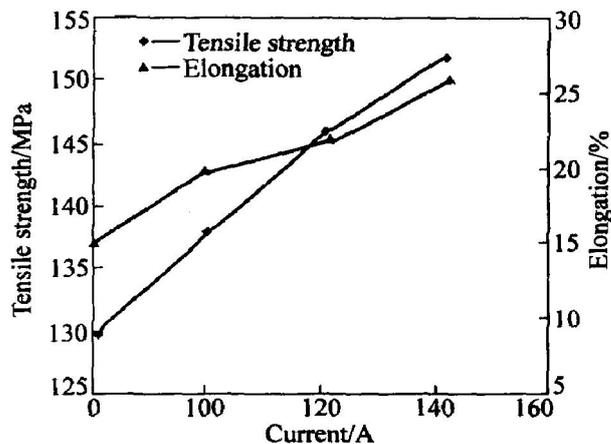


图 5 电磁场对铜管坯力学性能的影响

Fig. 5 Effects of electromagnetic field on mechanical properties of copper hollow billet

为了比较电磁场对铸件硬度的影响，分别选取施加磁场 ($I = 140\text{ A}$) 和未施加磁场的管坯外表面不同部位，利用 HVA-10A 型小负荷维氏硬度计测其硬度，载荷为 9.8 N 。图 6 所示为硬度测试结果，图 6(a)、(b) 和 (c) 分别对应管坯上部、侧面和底部。由测试结果可知，经电磁场处理的管坯各个部位硬度均有一定程度的提高。由于电磁场的旋转搅拌作用，使得晶粒细化，同时使得晶界上微量夹杂物分布更均匀，铸坯的硬度得到提高，其中上部硬度提高最大，为 11%。这说明电磁搅拌对水平连铸管坯上部性能改善更明显。

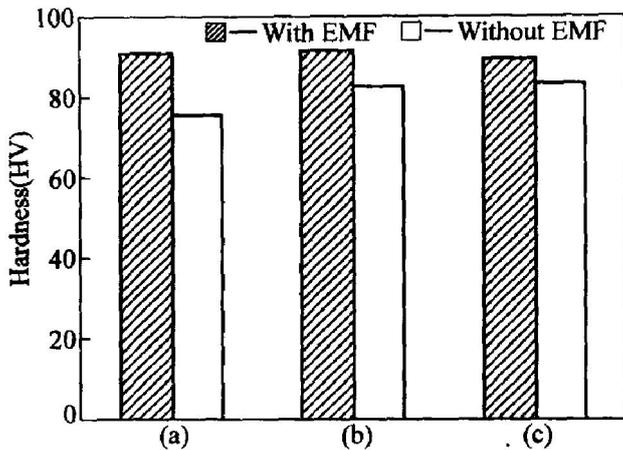


图 6 未施加与施加电磁场管坯不同部位的硬度对比

Fig. 6 Comparison of hardness at different position without and with imposing electromagnetic field (a) —Top; (b) —Side; (c) —Bottom

3 结论

- 1) 施加工频电磁场提高了紫铜管坯的表面质量，表面粗糙度由 $120\ \mu\text{m}$ 降到 $90\ \mu\text{m}$ 。
- 2) 随着电流强度的增加，柱状晶得到了细化，同时在管坯周向上分布均匀性得到了提高；管坯的抗拉强度、延伸率和硬度也得到了相应的提高。

REFERENCES

[1] 王碧文. 中国铜管生产现状及发展趋势—兼论内螺纹铜管突破性进展[A]. 中国有色金属加工工业协会. 中国国际精密铜管技术年会[C]. 新乡: 中国科学院精密铜管工程研究中心, 2003. 7-23.
WANG Biwen. Present situation and development of copper tube industry in China—discussing the great

progress on inner-grooved tube manufacture[A]. China Nonferrous Metals Fabrication Industry Association. China International Precision Copper Tube Technology Annual Symposium Anthology[C]. Xinxiang: Precise Copper Tube Engineering Research Center of Chinese Academy of Sciences, 2003. 7-23.

[2] 肖克建, 祁威, 田福生. 铜管连铸连轧生产线的现状与发展[A]. 中国有色金属加工工业协会. 中国国际精密铜管技术年会[C]. 新乡: 中国科学院精密铜管工程研究中心, 2003. 230-236.
XIAO Kerjian, QI Wei, TIAN Fu-sheng. Present situation and development of CCR production line of copper tubes[A]. China Nonferrous Metals Fabrication Industry Association. China International Precision Copper Tube Technology Annual Symposium Anthology [C]. Xinxiang: Precise Copper Tube Engineering Research Center of Chinese Academy of Sciences, 2003. 230-236.

[3] Praso D C, Evans J W, Wilson I J. Heat transport and solidification in the electromagnetic casting of aluminum alloys (part 1) —experimental measurements on a pilot-scale caster[J]. ISIJ International, 1995, 26B: 1243-1251.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 张奎, 刘国钧, 徐骏, 等. 电磁搅拌法连续半固态铝合金及其凝固组织分析[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(1): 47-50.
ZHANG Kui, LIU Guojun, XU Jun, et al. Semi-solid Al-7% Si alloy prepared by electromagnetic stirring—continuous casting technology and its solidification microstructures[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(1): 47-50.

[7] 张勤, 路贵民, 崔建忠, 等. CREM 法半连续铝合金初凝壳与磁场强度的关系[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(1): 48-51.
ZHANG Qin, LU Guimin, CUI Jianzhong, et al. Relationship between electromagnetic intensity and initial solidified shell height of aluminum alloy produced by CREM process[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(1): 48-51.

[8] 袁晓光, 刘正, 许沂. 电磁铸造对 AZ91D 合金组织及力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(4): 784-790.

- YUAN Xiaoguang, LIU Zheng, XU Yi. Effect of electromagnetic cast on microstructures and mechanical properties of AZ91D alloy [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2002, 12(4): 784 - 790.
- [9] ZAHNG Bei-jiang, CUI Jian-zhong, LIU Gu-min, et al. Effect of electromagnetic field on macrosegregation of continuous casting 7075 aluminum alloys [J]. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2002, 12(4): 545 - 548.
- [10] Kolesinchenko A F, Kolesinchenko 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.
- [11] Vives C. Electromagnetic refining of aluminum alloys by the CREM process (part 1) — working principle and metallurgical results [J]. *Metal Trans*, 1989, 20B(8): 623 - 629.
- [12] Vives C. Effects of forced electromagnetic vibrations during the solidification of aluminum alloys (part 1) — solidification in the presence of crossed alternating electric fields and stationary magnetic fields [J]. *Metal Mater Trans*, 1996, 27B(4): 445 - 455.
- [13] Vives C. Effects of forced electromagnetic vibrations during the solidification of aluminum alloys (part 2) — solidification in the presence of collinear variable and stationary magnetic fields [J]. *Metal Mater Trans*, 1996, 27B(4): 457 - 464.
- [14] ZHANG Zhifeng, LI Ting-ju, WEN Bin, et al. Electro-magnetic continuous casting by imposing multi-electromagnetic field [J]. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2000, 10(10): 741 - 744.
- [15] 李丘林, 李廷举, 金俊泽. 空心管坯热顶电磁连铸工艺的研究 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2004, 33(4): 429 - 431.
- LI Qiu-lin, LI Ting-ju, JIN Jun-ze. Research on hot-top electromagnetic continuous casting of hollow billets [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2004, 33(4): 429 - 431
- [16] 任忠鸣. 软接触结晶器电磁连铸技术的发展 [J]. *钢铁研究学报*, 2002, 14(1): 58 - 62.
- REN Zhong-ming. Development of electromagnetic continuous casting processing with soft-contact mold [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2002, 14(1): 58 - 62.

(编辑 李向群)