

文章编号: 1004 - 0609(2006)08 - 1405 - 06

矩形电磁软接触连铸结晶器内弯月面行为^①

张林涛, 邓安元, 张兴武, 王恩刚, 赫冀成

(东北大学 材料电磁过程教育部重点实验室, 沈阳 110004)

摘 要: 通过静态热模拟实验, 采用低熔点 Sn-32% Pb-52% Bi(质量分数)合金作为钢液的模拟介质, 研究不同工艺参数下矩形电磁软接触连铸结晶器内弯月面行为的变化规律。结果表明: 由于矩形电磁软接触结晶器本身的结构限制, 其弯月面沿周向上的分布具有不均匀性; 随电源功率增大, 弯月面高度增大, 同时波动加剧; 实际生产中线圈应尽量靠近结晶器口部位置安装, 有利于提高弯月面高度和增强弯月面稳定性; 浇注过程中, 应该使浇注液面尽可能的控制在线圈中心偏上位置; 当电源频率增大时, 应该同时适当的提高电流来保证软接触效果。

关键词: 电磁软接触; 连铸; 弯月面形状; 结晶器

中图分类号: TG 249.7

文献标识码: A

Behavior of meniscus in soft-contact electromagnetic continuous casting (EMCC) rectangular mold

ZHANG Lin-tao, DENG An-yuan, ZHANG Xing-wu,

WANG En-gang, HE Ji-cheng

(Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials,

Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: According to different technological parameters, meniscus shapes were investigated experimentally. A low-melting-point alloy of Sn-32% Pb-52% Bi was used to simulate the molten steel, and a high frequency magnetic field was applied for realizing soft contacting. The results show that the shape of meniscus is non-homogeneous because of the structure of the rectangular mold, and the height of meniscus will enlarge as increasing the power, and at the same time the meniscus fluctuate aggregately. The coil should be placed near the top of the mold and the initial free surface level should be placed in the middle of the coil in practice. The coil current should be enhanced to ensure the effects of soft-contact electromagnetic continuous casting (EMCC) when increasing the input frequency.

Key words: electromagnetic soft-contact; continuous casting; meniscus shape; mold

在钢的连铸过程中, 结晶器的振动改善了连铸结晶器内的润滑状况, 避免了铸坯初始凝固壳和结晶器之间的粘结和由此引起的事故。但铸坯表面会产生周期性振痕, 严重影响了铸坯的表面质量, 同时在振痕底部会产生横向裂纹和微观组织偏析。为了改善这种状况, Vives^[1]提出了电磁软接触连铸技术。电磁软接触连铸技术是利用交变磁场在液态

金属中产生的电磁压力来减少结晶器内液态金属和结晶器壁之间的接触压力, 以改善连铸的初始凝固过程, 使铸坯的表面质量和微观组织得到改善。近年来的研究结果表明采用该技术生产得到的铸坯的质量明显优于普通连铸铸坯^[2, 3]。

电磁软接触连铸过程中, 对冷坩埚式结晶器内部的磁场分布和弯月面行为的研究最为重要, 这也

① 基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2001AA337040); 辽宁省青年攻关计划重大资助项目(2005221006); 辽宁省青年人才基金资助项目(2005221004)

收稿日期: 2005 - 11 - 09; 修订日期: 2006 - 04 - 30

通讯作者: 邓安元, 副教授; 电话: 024 - 83681716; E-mail: denganyuan@hotmail.com

是当前研究的热点。合理的控制结晶器内部磁场分布和弯月面行为对提高铸坯质量十分重要。国内外许多学者进行了大量的研究^[4~10]。Tho 等^[11]和谷雅弘等^[12]通过实验的方法对弯月面的行为进行了大量的研究,指出了弯月面行为和铸坯表面质量的关系,同时,Nakata 等^[13]对弯月面和磁感应强度之间的关系进行了探讨,Evans 等^[14]对弯月面的形状进行了数值模拟。同时,对于有色金属而言,针对各种形状铸坯的电磁软接触技术已经进行了很多研究^[15, 16],发现该技术可以提高铸坯质量。但由于钢的密度较大,并且在连铸过程中使用的结晶器结构复杂,因此,目前针对钢的电磁软接触技术的研究主要集中在圆坯和方坯的情况,对横截面积大、情况更加复杂的矩形坯的研究较少,尤其是磁场频率对弯月面行为的影响还未见报导。

本文作者以 Sn-32% Pb-52% Bi(质量分数)合金为模拟介质,对不同高频电源频率下 240 mm × 60 mm 矩形软接触结晶器内的弯月面行为进行实验研究。

1 实验

本实验采用通体切缝的铜质结晶器,由于 Sn-32% Pb-52% Bi 低熔点合金的密度及其它性质和钢液相差不大,因此采用该低熔点合金模拟钢液来研究电磁软接触结晶器内的弯月面行为。在实验过程中,测试参数及实验条件如表 1 所示。

表 1 测试参数及实验条件

Table 1 Experimental parameters	
Parameter	Value
Number of segment	24
Width of slit/mm	0.3
Dimension of the mold (length×width×height)/mm	240×60×400
Turns of induction coil	5
Height of induction coil/mm	70
Distance from the top of coil to the top of mold, h_{coil} /mm	35, 55
Distance from initial meniscus to the middle of coil, h /mm (the value is negative when meniscus below the middle of coil)	35, 0, - 35

测试弯月面形状常用方法主要有浸镀法、烧痕法、探针法和激光测位法 4 种。如图 1 所示,浸镀法是指将金属片浸入到交变磁场作用下的液态熔融

金属中,高温液态合金和金属片之间发生轻微合金反应并且粘附其上,从而获得弯月面形状的方法。该方法简单易行,读取数据方便。本实验采用这种方法。

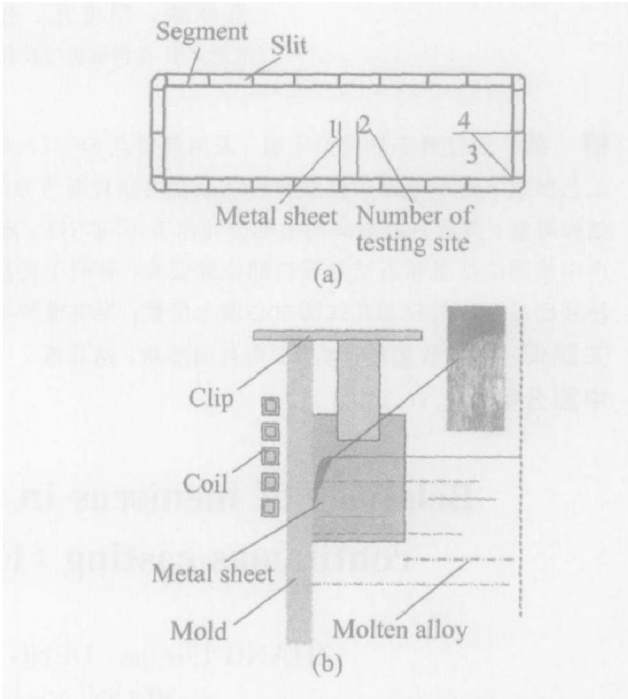


图 1 弯月面测试位置和方法
Fig. 1 Testing sites and method of meniscus
(a) —Site; (b) —Method

考虑到矩形结晶器结构的对称性,选取整体的 1/4 作为研究区域,如图 1 所示,分别选择结晶器宽面切缝处(位置 1)、宽面分瓣体(位置 2)、角部(位置 3)和窄面切缝处(位置 4)作为实验中的测试位置。

2 结果及分析

2.1 矩形软接触结晶器内的弯月面形状

图 2 所示是当工作频率为 22 kHz、电源功率为 57 kW、低熔点合金自由表面和线圈下沿位置平齐($h = -35$ mm,弯月面位置在线圈中心以下时规定为负)、线圈上沿和结晶器上沿距离为 35 mm 时($h_{coil} = 35$ mm),不同测试位置的弯月面形状。

从图 2 中可以看出,矩形软接触结晶器内沿周向上弯月面的变形具有不均匀性。在结晶器的角部位置(位置 3)和窄面切缝处(位置 4)弯月面高度较高,然后依矩形结晶器宽面切缝处(位置 1)、宽面分瓣体处(位置 2)次序降低,它们的弯月面高度依次为 11.4、9.2、8 和 5.7 mm。切缝处的三相点位置要比分瓣体处的三相点的位置低,接触角要大。

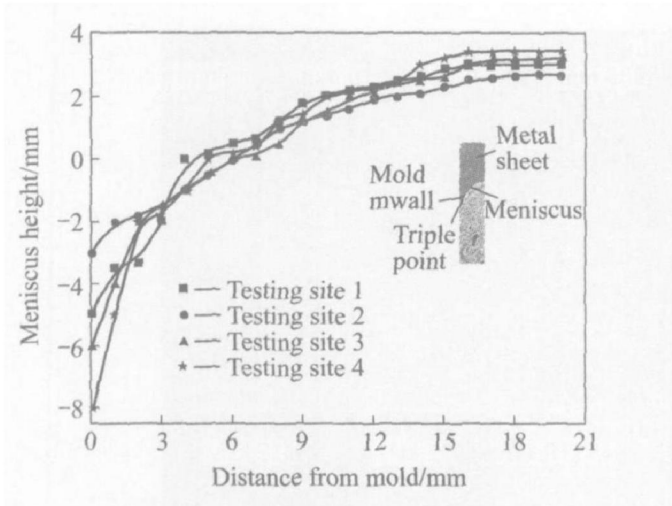


图 2 不同测试位置处弯月面形状

Fig. 2 Shapes of meniscus at different testing sites

($f = 22 \text{ kHz}$, $P = 57 \text{ kW}$, $h_{\text{coil}} = 35 \text{ mm}$, $h = -35 \text{ mm}$)

这是由于窄面上的宽度较短, 磁场从而在角部以及窄面上出现了叠加现象, 引起了该处的磁感应强度增大^[17], 同时增大了角部以及窄面位置上的电磁压力, 引起了接触角增大。同样, 位置 4 的弯月面高度要高于位置 1。随着窄面宽度的增大, 这种叠加的现象会逐渐减弱。当宽面和窄面长度相同时, 弯月面的均匀性最好。

就结晶器宽面中心处而言, 由于结晶器对高频磁场存在集肤效应, 位置 1 和位置 2 的电磁压力主要由通过结晶器上开设的切缝渗透的磁场来决定。因此, 切缝处的弯月面高度要比分瓣体的弯月面高度高。弯月面的不均匀变形是由结晶器的分瓣体的结构所决定的, 为减弱弯月面的不均匀性, 有必要在矩形结晶器宽面增加切缝数, 特别是在宽面中心附近可采用不均匀切缝方案。当电磁参数发生改变时, 该弯月面分布规律不变。因此, 在进行结晶器设计的过程中应该充分考虑由于结晶器结构的不同引起的弯月面分布的不均匀性, 在实际生产中, 也应考虑到由于弯月面的不均匀性引起的铸坯表面质量的缺陷。

2.2 电源功率对弯月面形状的影响

图 3 所示为在断面尺寸为 $234 \text{ mm} \times 54 \text{ mm}$ 的容器中低熔点合金的波动情况。图 4(a) 所示为在 $f = 35 \text{ kHz}$ 、 $h_{\text{coil}} = 55 \text{ mm}$, $h = 0 \text{ mm}$ 时在测试位置 1 处电源功率不同时的弯月面高度。电源功率对弯月面高度的影响最明显。从图 3 和图 4(a) 可以看出, 结晶器内熔融低熔点合金弯月面随着功率变化具有一定规律。

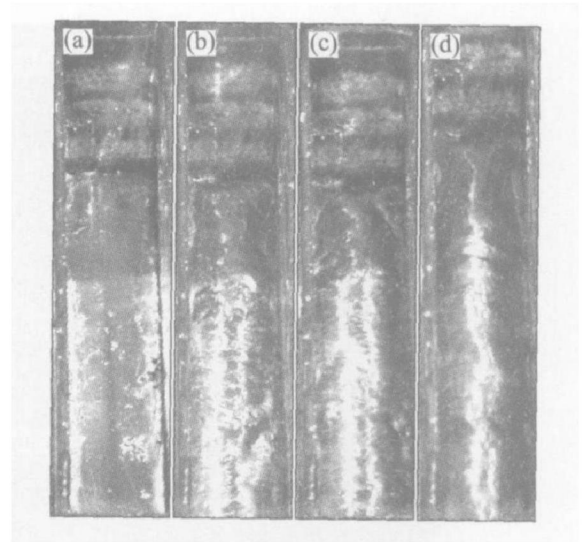


图 3 不同功率下弯月面形状

Fig. 3 Meniscus shapes with different input powers

-0 kW; (b) -40 kW; (c) -76 kW; (d) -109.2 kW

($f = 12 \text{ kHz}$, $h = -35 \text{ mm}$, $h_{\text{coil}} = 35 \text{ mm}$)

随着电源功率增大, 弯月面高度增大, 熔融金属被推离结晶器内壁的程度增大, 三相点位置逐渐下移, 导致保护渣渣道变宽, 同时提高了保护渣的消耗量, 改善了铸坯的初始凝固过程, 提高了铸坯质量。这主要是由于功率的增大引起了激励电流的增大, 最终导致电磁压力的增大, 提高了弯月面的高度。但是实验发现随着电源输出功率的逐渐增大, 弯月面波动加剧, 弯月面的稳定性变差, 使三相点的初始凝固环境恶化, 不利于获得表面质量良好的连铸坯。因此, 在实际的生产中, 要获得表面质量良好的连铸坯就必须选择合适的高频电源的输出功率。同时, 当功率过大时, 还会引起吨钢综合能耗的增大, 不利于节能。从弯月面的变形来看, 在保证适宜高度的情况下, 可将功率控制在 $60 \sim 70 \text{ kW}$ 左右。

2.3 初始液面与线圈的相对位置对弯月面形状的影响

图 5(a) 所示为在 $f = 35 \text{ kHz}$ 、 $P = 56 \text{ kW}$ 、 $h_{\text{coil}} = 55 \text{ mm}$ 时在测试位置 1 处不同 h 时的弯月面高度。图 4(b) 所示是相同条件下实验中所获得的弯月面形状的照片。图 4(b) 所示为在 $f = 35 \text{ kHz}$ 、 $P = 56 \text{ kW}$ 、 $h_{\text{coil}} = 55 \text{ mm}$ 时在测试位置 1 处不同 h 时的弯月面形状的照片。由图 4(b) 可以看出: 在实验过程中其它参数保持不变的情况下, 当初始合金液面在线圈中心偏上位置附近时 ($h = 21 \text{ mm}$), 弯月面的高度较高。在该位置上, 从结晶器切缝处进入

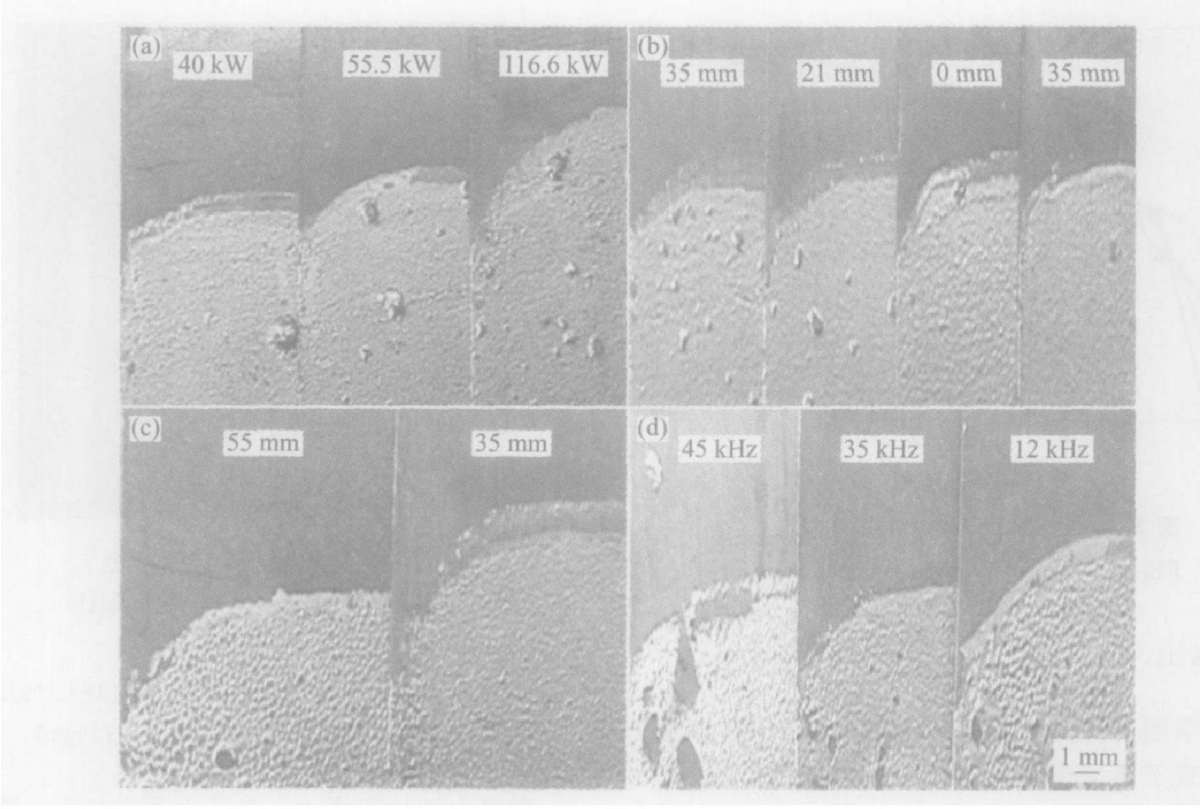


图 4 不同工艺条件下结晶器内弯月面形状

Fig. 4 Meniscus shape under different technological conditions

- (a) —Meniscus shapes with different input power at testing site 1 ($f = 12 \text{ kHz}$, $h_{\text{coil}} = 55 \text{ mm}$, $h = 0 \text{ mm}$);
- (b) —Meniscus shapes with different h at testing site 1 ($f = 35 \text{ kHz}$, $P = 56 \text{ kW}$, $h_{\text{coil}} = 55 \text{ mm}$);
- (c) —Meniscus shapes with different h_{coil} at testing site 4 ($f = 35 \text{ kHz}$, $P = 56 \text{ kW}$, $h = 0 \text{ mm}$);
- (d) —Meniscus shapes with different f at testing site 1 ($P = 56 \text{ kW}$, $h_{\text{coil}} = 55 \text{ mm}$, $h = -35 \text{ mm}$)

结晶器内的磁场、从结晶器口部进入结晶器内的磁场、以及结晶器内熔融金属感应出的磁场的综合效果最佳。此时，熔融金属被推离结晶器内壁的程度最大，保护渣渣道最宽，软接触效果最好。因此，在实际的实验中，对于矩形坯电磁软接触连铸，钢液面的初始位置应该控制在线圈中心偏上位置和线圈上沿之间，此时，可获得较大的电磁力，同时使磁场得到充分利用，从而在获得良好铸坯表面质量的同时，实现节能目的。

2.4 线圈相对于结晶器的位置对弯月面形状的影响

图 5(b) 所示为在 $f = 35 \text{ kHz}$ 、 $P = 56 \text{ kW}$ 、 $h = 0 \text{ mm}$ 时在测试位置 4 处不同 h_{coil} 时的弯月面高度。图 4(c) 所示为在实验过程中相同条件下弯月面形状的照片。可以看出：在其它条件不变的情况下，线圈上沿和结晶器上沿相距为 35 mm 和 55 mm 时，弯月面高度分别为 14 mm 和 12.8 mm。前者要比后者大 9.4%。这主要是由于当线圈的位置向结晶器口部移动时结晶器内部的磁感应强度得到了增强，

使弯月面高度增大。因此，在实际的生产过程当中，为了达到比较好的软接触效果，提高磁场利用率，在工艺条件许可的条件下，线圈应该尽量靠近结晶器的口部位置放置，这样弯月面较高，渣道较

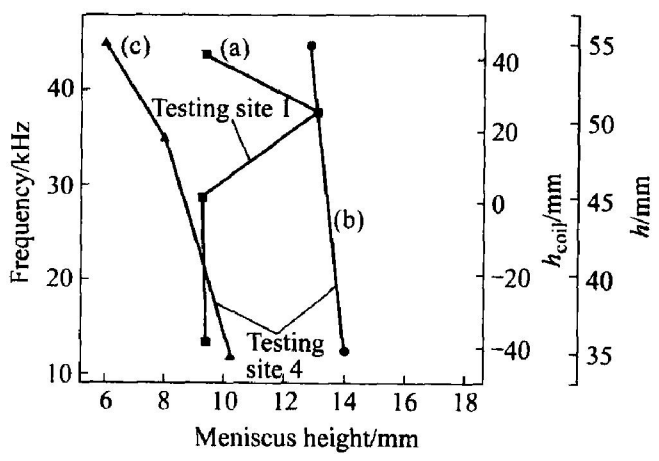


图 5 不同工艺条件下结晶器内弯月面高度

Fig. 5 Meniscus height in mold with different technological parameters ($P = 56 \text{ kW}$)

- (a) —Different h ; (b) —Different h_{coil} ;
- (c) —Different frequency

宽, 软接触效果明显。

2.5 输出频率对弯月面形状的影响

当高频电源的频率发生变化时, 弯月面的形状相应发生变化。

图 5(c) 所示为在 $P = 56 \text{ kW}$ 、 $h_{\text{coil}} = 55 \text{ mm}$ 、 $h = -35 \text{ mm}$ 时不同电源频率时的弯月面高度。当频率分别为 45、35 和 12 kHz 时, 其弯月面高度分别为 6、8 和 10.2 mm, 几乎成线性关系减小。而且, 当线圈和结晶器的相对位置发生变化时, 弯月面高度随电源频率变化的规律保持不变。图 4(d) 所示为实验过程中相同实验条件下的弯月面形状的照片。这说明对于实验使用的高频电源而言, 当频率提高时, 其它工艺参数不变时, 弯月面高度减小, 三相点位置升高, 接触角减小, 其保护渣渣道变小。这是由于当高频电源频率增大时, 等效于系统的总感抗发生了变化。通过对线圈电流的测试表明, 这引起了感应线圈内激励电流的变化, 从而影响到熔融金属弯月面的变化。

因此, 针对本实验中使用的高频电源而言, 在提高电源频率的同时应该适当的增大功率, 来弥补由于电流降低所引起的不利因素。这对今后的实验室实验, 甚至今后的实际生产都有一定的指导意义。

3 拉坯验证

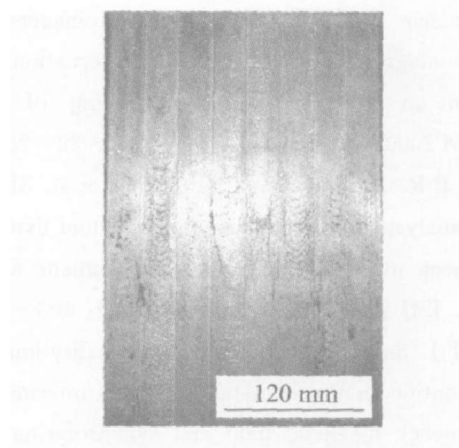
基于上述的实验结果, 确定了最佳的工艺参数, 比如电源功率、电源频率、弯月面和线圈的相对位置等, 利用低熔点的 Sn-10% Pb 合金在连铸机上进行拉坯实验。在拉坯实验过程中, 电磁场频率为 20 kHz, 拉坯速度和结晶器的振动频率分别为 200 mm/min 和 0.7 Hz, 并且控制低熔点合金的自由表面和线圈的上沿保持平齐, 使用 5 匝线圈, 电源功率为 90 kW。

图 6 所示为 Sn-10% Pb 电磁软接触连铸坯的表面状况。由图可以看出, 施加高频交变磁场以后, 铸坯的振痕深度明显减轻。

4 结论

1) 针对矩形电磁软接触结晶器而言, 弯月面的变形具有不均匀性, 可采取不均匀切缝等措施来进行改善。

2) 高频电源功率增大时, 弯月面高度增大, 弯



磁场作用下 Sn-10% Pb 矩形坯的表面状况

6 Surface appearance of Sn-10% Pb rectangular billet with magnetic field (Billet size: 240 mm × 60 mm)

月面波动增大。

3) 实际生产过程中, 线圈应该尽量靠近结晶器口部进行布置, 有利于提高弯月面的高度同时增强弯月面的稳定性。浇铸的自由液面应该尽量位于线圈中心偏上位置, 此时软接触效果最好。

4) 增大电源频率, 弯月面高度减小。在电源频率增大时, 应该同时适当提高电源功率来弥补由于电流降低引起的结晶器内磁感应强度的下降, 以保证软接触效果。

REFERENCES

- [1] Vives C. Electromagnetic refining of aluminum alloys by the CREM process: Part I. Working principle and metallurgical results[J]. Metal Trans B, 1989, 20B(10): 623-629.
- [2] 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.
- [3] Ayata K, Inoue T, Mori H, et al. Improvement of billet surface quality by ultra-high-frequency electromagnetic casting[J]. Kobe Steel, 2001, 11: 1025-1032.
- [4] Asai S. Birth and recent activities of electromagnetic processing of materials[J]. ISIJ International, 1989, 29(12): 981-992.
- [5] Kim H, Joon P, Sim D J, et al. Effect of electromagnetic field on continuously cast steel billet[A]. The 3rd International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials EPM'2000[C]. Nagoya: ISIJ,

2000. 236 - 240.
- [6] Takeuchi E, Miyazawa K I. Electromagnetic casting technology of steel[A]. The 3rd International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials EPM'2000[C]. Nagoya: ISIJ, 2000. 20 - 26.
- [7] Cha P R, Hwang Y S, Chung H S, et al. 3D Numerical analysis on electromagnetic and fluid dynamic phenomena in a soft contact electromagnetic slab caster[J]. ISIJ International, 1998, 38(5): 403 - 410.
- [8] LI T J, Sassa K, Asai S. Surface quality improvement of continuously cast metals imposing intermittent high frequency magnetic field and synchronizing the field with mold oscillation[J]. ISIJ International, 1996, 36(4): 410 - 416.
- [9] Ayata K, Miyazawa K, Takeuchi E, et al. Outline of national project on application of electromagnetic force to continuous casting of steel[A]. The 3rd International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials EPM'2000[C]. Nagoya: ISIJ, 2000. 376 - 380.
- [10] ZHANG Zhifeng, WEN Bin, LI Ting-ju, et al. Effects of imposition of multi-electromagnetic field on quality of cast metal in continuous casting[A]. The 3rd International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials EPM'2000[C]. Nagoya: ISIJ, 2000. 310 - 314.
- [11] Tho T, Takeuchi E, Hojo M, 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.
- [12] Tani M, Toh K, Takeuchi K, et al. Study on initial solidification phenomena by using electromagnetic imposition[J]. CAMP-ISIJ, 1997, 10: 829.
- [13] Nakata H, Inoue T, Mori H, et al. Improvement of billet surface quality by ultra-high-frequency electromagnetic casting[J]. ISIJ International, 2002, 42(3): 264 - 272.
- [14] Evans J W, LI B Q, Cook D P. 2D and 3D mathematical models and a physical model of electromagnetic casters[J]. ISIJ International, 1989, 29(12): 1048 - 1055.
- [15] 张丰收, 寇宏超, 李金山, 等. 交变磁场作用下特种合金的凝固特性[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2005, 10(4): 206 - 210.
- ZHANG Feng-shou, KOU Hong-chao, LI Jin-shan, et al. Solidification characteristics of special alloys under alternating magnetic field[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2005, 10(4): 206 - 210.
- [16] 王宏明, 任忠鸣, 李桂荣, 等. 颗粒增强铝基复合材料的电磁连铸研究[J]. 铸造技术, 2005, 26(3): 199 - 201.
- WANG Hong-ming, REN Zhong-ming, LI Guirong, et al. Research on electromagnetic continuous casting of particle-reinforced aluminum matrix composites[J]. Foundry Technology, 2005, 26(3): 199 - 201.
- [17] 邓安元, 王恩刚, 赫冀成, 等. 矩形软接触结晶器内磁场分布的实验研究[J]. 金属学报, 2003, 39(10): 1105 - 1109.
- DENG An-yuan, WANG En-gang, HE Jicheng, et al. Experimental study of distribution of magnetic flux in rectangular soft-contact mold[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2003, 39(10): 1105 - 1109.

(编辑 何学锋)