

## 静磁场对吹氩结晶器内弯月面行为的影响\*

陈芝会 王恩刚 张兴武 赫冀成

(东北大学材料电磁过程研究教育部重点实验室, 沈阳 110004)

**摘要** 用 Pb-Sn-Bi 液态合金模拟了吹氩和施加静磁场时结晶器内弯月面处的流动现象, 观察磁场对吹氩引起的弯月面失稳的抑制作用. 结果表明, 施加磁场改变了 Ar 气泡通过弯月面的漂浮分布规律, 加强了气泡在水口和窄面之间的漂浮, 使 Ar 气泡在结晶器宽度方向上漂浮分布更均匀, 减小了水口附近由于大量气泡上浮对液面的扰动. 施加 0.5 T 磁场能对水口出流以及吹氩所产生的液面波动产生抑制作用. 由相似准则推得, 应用在实际连铸机上抑制吹氩板坯连铸结晶器内液面波动的合适磁场强度为 0.36 T.

**关键词** 连铸, 结晶器, 电磁制动, 弯月面, 液面波动, Ar 气

**中图法分类号** TG111.4

**文献标识码** A

**文章编号** 0412-1961(2007)04-0422-05

## EFFECTS OF STATIC MAGNETIC FIELD ON THE BEHAVIOR OF MENISCUS IN A MOLD UNDER ARGON GAS INJECTION

CHEN Zhihui, WANG Engang, ZHANG Xingwu, HE Jicheng

Key Laboratory for Electromagnetic Processing of Materials, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110004

Correspondent: WANG Engang, professor, Tel: (024)83681739, Fax: (024)83681758,

E-mail: egwang@epm.neu.edu.cn

Supported by National High Technical Research and Development Program of China (No.2001AA337040)

Manuscript received 2006-07-21, in revised form 2006-10-20

**ABSTRACT** The liquid alloy of Pb-Sn-Bi was used to simulate the fluid flow phenomena in the continuous casting mold under argon gas injection and with electromagnetic field. The depressed effect of magnetic field on the fluctuation of meniscus was observed. The results show that when the magnetic field is imposed, the distribution of argon gas bubbles floating is changed, and the floating up of gas bubbles between the nozzle and the narrow side of mold is strengthened, hence the distribution of gas bubbles in the width direction of mold is more uniform, and the disturbance of floating gas bubbles near the nozzle on the meniscus is decreased. The magnetic field of 0.5 T can depress the fluctuation of meniscus caused by both injected argon gas and discharged stream from the nozzle. According to the similarity rule, it is deduced that the suitable magnetic flux density for depressing the fluctuation of meniscus in the slab continuous casting mold with argon gas injection is 0.36 T for the practical continuous caster.

**KEY WORDS** continuous casting, mold, electromagnetic brake, meniscus, fluctuation of meniscus, argon gas

连铸结晶器内钢液的流动对板坯的内部质量具有重要的影响<sup>[1]</sup>. 近年来, 为了防止水口堵塞, 吹氩浸入式

水口得到了应用, 但是, 也带来一些不利影响. 一方面, 吹入的 Ar 气会产生由于卷渣引起的板坯表面缺陷, 另一方面, 流入结晶器内的 Ar 气与钢液的比重差可能改变钢液在结晶器内的流动形态<sup>[2]</sup>. Huang 等<sup>[3]</sup>的研究表明, 喷入 Ar 气提高了钢液表面湍流强度, 改变了湍流分布, 并揭示了湍流和液位波动之间的关系. Kubo 等<sup>[4]</sup>和 Takatani<sup>[5]</sup>的研究表明, Ar 气泡可用来改善和控制钢液的流动. 由此可见, 吹氩水口带入的 Ar 气在结晶器内的行为对流动状态有着重要的影响.

\* 国家高技术研究发展计划项目 2001AA337040、辽宁省科技攻关项目 2005221006 和辽宁省青年人才基金项目 2005221004 资助

收到初稿日期: 2006-07-21, 收到修改稿日期: 2006-10-20

作者简介: 陈芝会, 女, 1960 年生, 讲师, 博士

电磁制动作为控制结晶器内钢液流动技术在连铸中得到迅速发展。自 1980 年起的第一代区域型电磁制动技术 (EMBR)<sup>[6]</sup>，第二代单条型电磁制动技术 (EMBR Ruler)<sup>[7]</sup>，到今天已经发展到可优化流场的第三代结晶器内流动控制技术 (FC-mold)<sup>[8]</sup>。该技术应用双条型电磁场，即两个磁通量方向相反地分别施加于弯月面处和水口出口处，可同时减小弯月面处的钢液流速和结晶器内下降流股的流速。电磁制动抑制了浸入式水口钢液流出对窄面坯壳的冲刷，抑制了液面的波动，从而降低了卷渣和铸坯表面大型夹杂物缺陷的发生比率。实验表明，在连铸中应用电磁制动不仅明显改善板坯的质量，而且可实现高质量下的高速连铸<sup>[9]</sup>。

如上所述，吹入 Ar 气和施加磁场都能改变结晶器内的钢液流动，在电磁制动下 Ar 气对流动状态、液面波动影响还无相关报道。为此，本文针对液面波动行为，采用低熔点合金进行了模拟实验，研究了吹入 Ar 气和施加静磁场时结晶器内弯月面处的流动现象，测量了各种实验条件下的弯月面处液面波动和 Ar 气上浮分布规律。

### 1 实验方法

实验装置如图 1 所示。该装置包括最大磁感应强度可达 1.0 T 的电磁制动装置和水口吹氩结构，可同时实现施加磁场和水口吹氩。为了稳定结晶器内金属液位，在结晶器与金属液储槽间设液面控制器，并不断地向中间包内补充金属液，使金属液在结晶器内形成循环流动。金属液的流量用中间包内的塞棒进行调节。每次实验，均保持 3—

5 min 金属液稳定流动。单条形稳恒磁场施加在结晶器的宽面两侧，位于水口出流附近。

实验介质为 Pb-Sn-Bi 低熔点合金，合金成分 (质量分数，%) 为：Pb 30, Sn 20, Bi 50；密度为 9620 kg/m<sup>3</sup>；熔点为 95 ℃。金属液的浇注温度为 300 ℃，储槽内的金属液温度保持在 160 ℃ 以上，以保证金属液在结晶器内的连续流动状态。实验参数见表 1。模型结晶器的参数按照与实际连铸结晶器之间的相似性服从 Froude 准数  $Fr$  和 Stuart 准数  $St$ <sup>[10]</sup>。

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gL}}, St = \frac{\sigma B^2 L}{\rho U} \quad (1)$$

式中， $U$  为流速，m/s； $g$  为重力加速度，m/s<sup>2</sup>； $L$  为特征长度，m； $\sigma$  为金属液电导率，S/m； $B$  为磁感应强度，T； $\rho$  为金属液密度，kg/m<sup>3</sup>。

实验中采用激光液位仪测量结晶器厚度中心截面、1/4 结晶器宽度处金属液面的波动。用图 2 所示方法测

表 1 实验参数表

Table 1 Experimental condition

Casting item	Operational condition
Mold	
Scale	1/5
Section size	240 mm×60 mm
Height	800 mm
Submerged entry nozzle	
Port type	Two side ports
Angle of ports	30° downward
Immersion depth	100 mm down the meniscus
Location of DC magnetic field	150 mm down the meniscus
Magnetic flux density	Max. 0.5 T
Argon gas rate	2.5, 3.5, 4.5 L/min

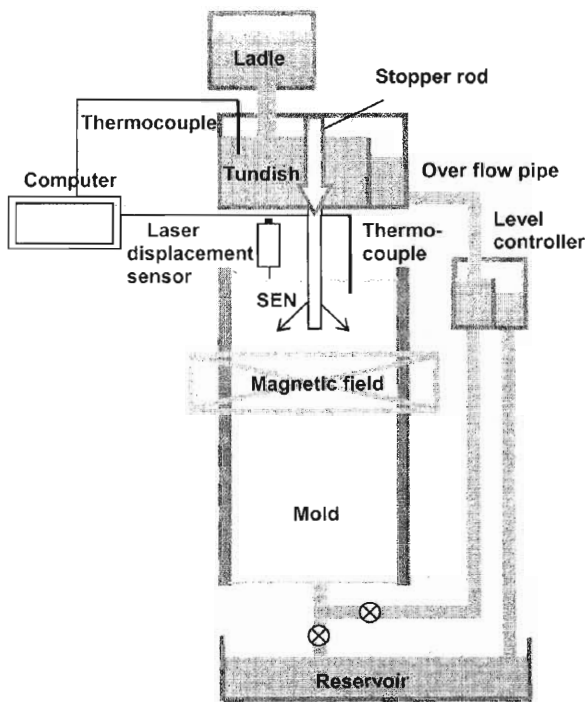


图 1 电磁流动控制热模拟实验系统示意图

Fig.1 Schematic of experimental setup for the simulation of electromagnetic flow control

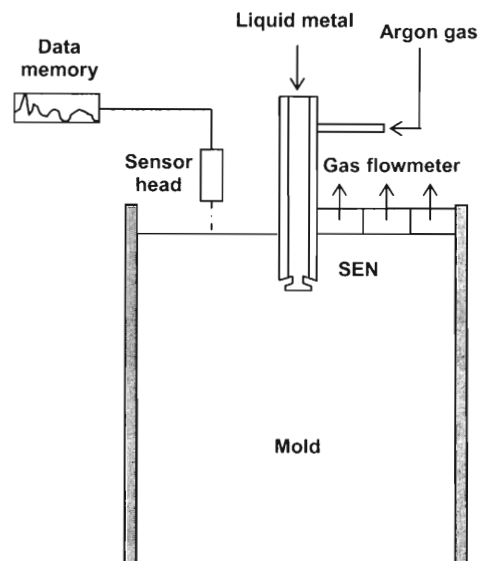


图 2 气体漂浮分布检测示意图

Fig.2 Schematic of detecting apparatus of gas floatation

量 Ar 气在结晶器弯月面处的漂浮分布<sup>[11]</sup>. 研究各种操作参数, 如磁感应强度、Ar 气流量、浇注速度等对液面波动和 Ar 气漂浮分布的影响.

由图 2 可见, Ar 气经过一个设在水口内壁的通气套管与金属液一起通过浸入式水口进入结晶器内. 集气罩放在自由表面的上方, 集气罩分成三个集气室, 分别位于窄面附近、1/4 结晶器宽度处和水口附近, 以测定 Ar 气泡在不同位置的漂浮比例. 向上漂浮的 Ar 气经过每个集气室后通过流量计测量气体流量, 并计算出气体漂浮分布的比例.

## 2 实验结果与分析

### 2.1 无磁场时 Ar 气流量对结晶器内流动行为的影响

**2.1.1 结晶器内 Ar 气的漂浮分布** 图 3 为无磁场时 Ar 气流量对气体漂浮分布的影响. 气体漂浮分布定义为弯月面不同位置处气体漂浮量与总气体漂浮量之比. 由图可见, Ar 气的漂浮主要集中在水口附近, 随着向窄面的流动, 漂浮比例减小, 在 1/4 结晶器宽度处和窄面附近漂浮比例较小. 而且, 随着 Ar 气流量的增加, 水口附近的漂浮比例增大. 当 Ar 气流量由 2.5 L/min 提高到 3.5 L/min 时, 水口附近漂浮比例由 64% 增加到 84%. 这表明无磁场时 Ar 气泡主要在水口附近上升, 而随着 Ar 气量的增加, 在水口附近上升的气泡数量增多, 对弯月面处的扰动加强. 这是由于吹入 Ar 气时结晶器内的流动取决于从水口流出的金属液喷流的惯性力和气泡的漂浮力<sup>[12]</sup>. 在浇注速度不变时, 随着 Ar 气流量的增加, 会形成更多的较大的气泡, 气泡的漂浮力逐渐增大, 因而水口附近的气体漂浮量增大. 而在 Ar 气流量相对较小时, 喷流的惯性力相对于气泡的漂浮力要大, 金属液携带着气泡流向结晶器窄面, 气泡在喷流穿透结晶器宽度的路程中漂浮, 水口附近的气体漂浮量相对较小, 沿着结晶器宽度方向, 气体漂浮量相对增加.

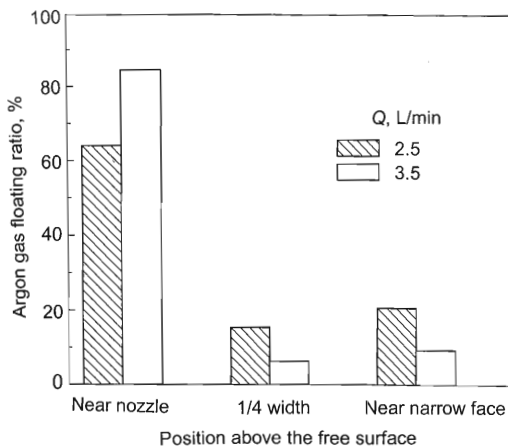


图 3 无磁场时 Ar 气流量对气体漂浮分布的影响

Fig.3 Distributions of argon gas floating at meniscus under without magnetic field and two rates of injected Ar ( $Q$ )

**2.1.2 Ar 气流量和浇注速度对液面波动的影响** 图 4 为不施加磁场时 Ar 气流量对金属液面波动的影响. 为了定量地评价弯月面处液面的波动, 采用平均值  $\bar{y}$  表示液面的平均波动

$$\begin{cases} \bar{y} \equiv \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (\eta - \bar{\eta})^2 dt} \\ \bar{\eta} \equiv \frac{1}{T} \int_0^T \eta dt \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $T$  为测量周期,  $\bar{\eta}$  为平均液位.

据式 (2) 得到 Ar 气量和浇注速度对液面平均波动的影响 (见图 5). 由图 4 和 5 可见, 随着 Ar 气量的增加, 弯月面处液面波动加剧, 波动幅度加大. 这是由于吹入 Ar 气量越大, 上升的气泡越多, 对弯月面产生的扰动越强. 浇注速度为 0.42 m/min, 吹气量为 2.5 和 4.5 L/min 时, 平均波动比吹气量为 0 时分别增加了 2 倍和 3 倍多. 这表明, Ar 气量对液面波动有很大影响. 图 5 的结果还表明, 当浇注速度增加时, 表面波动加大. 这是由于水口出流速度加大, 冲击窄面的速度提高, 从而使弯月面处波动加剧.

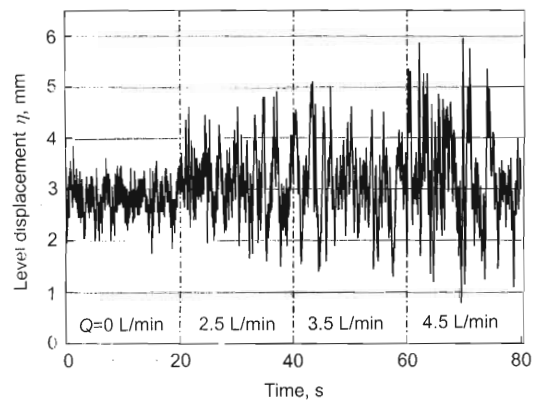


图 4 不同 Ar 气流量下液位随时间的波动

Fig.4 Influence of argon gas flow rate on the fluctuation of meniscus without magnetic field (casting speed  $v_{\text{cast}}=0.42$  m/min)

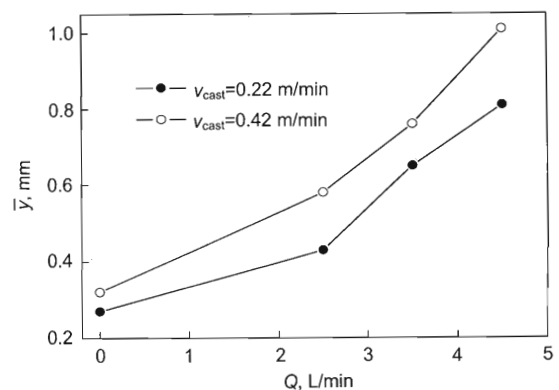


图 5 Ar 气流量和浇注速度对液面平均波动的影响

Fig.5 Effects of argon gas flow rate and casting speed on the average level fluctuation without magnetic field

2.2 磁场对吹 Ar 结晶器内金属流动行为的影响

2.2.1 电磁制动作用下 Ar 气泡的漂浮分布 图 6 为 Ar 气流量  $Q=3.5$  L/min、不同磁感应强度下的气体漂浮分布。由图可见，磁场作用改变了漂浮分布。随着磁感应强度增加，水口附近的漂浮比例减小，而在 1/4 结晶器宽度处和窄边附近的漂浮比例相应增加。这是因为随着磁感应强度增加，产生的电磁力增大，分散了从水口出口流出的金属液流股，使更多的 Ar 气泡破裂成小气泡，因而从水口附近向上飘浮的大气泡数量减少，而沿结晶器宽度向窄面流动的小气泡数量相应增多。施加磁场使 Ar 气泡在结晶器宽度上的漂浮分布更均匀，减小了水口附近由于大量气泡上浮对液面的扰动。随着磁感应强度的增加，在水口附近上浮的气泡数量逐渐减小，而流向窄面后上浮的气泡数量逐渐增多。

2.2.2 施加磁场时磁感应强度对液面波动的影响 图 7 为不同磁感应强度下 Ar 气流量与结晶器内表面波动的关系曲线。当 Ar 气没有吹入时，施加 0.3 T 的磁场时表面平均波动有些增大，这是因为 0.3 T 的磁场使出流冲击窄面的位置向上偏移，上部回流对弯月面扰动增强，从而导致液面波动增加；而当磁感应强度为 0.5 T 时，磁场产

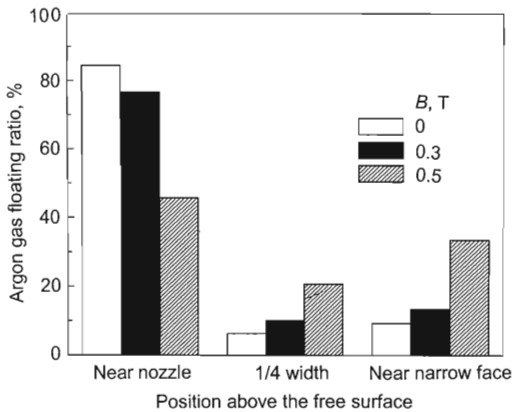


图 6 磁感应强度和 Ar 气流量对气体漂浮的影响

Fig.6 Effects of magnetic flux density and argon gas rate on the distribution of argon gas floating ( $Q=3.5$  L/min)

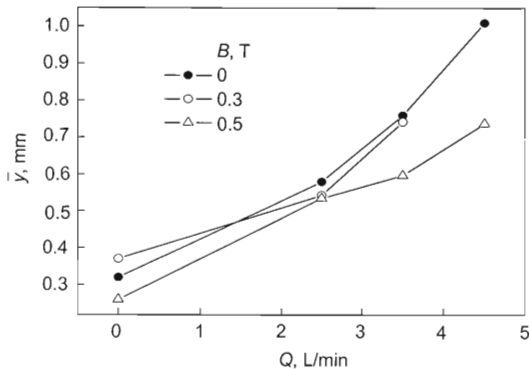


图 7 磁感应强度和 Ar 气流量对液面波动的影响

Fig.7 Effects of magnetic flux density and argon gas flow rate on the average level fluctuation

生的更大的电磁力对水口出口的整个流股产生了很强的抑制作用，使出流更分散，减小了整个出口流股的出流速度，减弱了对窄面的冲击，使结晶器内整个流场的流速降低，也使上部回流的速度减小，因而表面波动被抑制。此时，液面平均波动最小，液面较稳定。

当吹入 Ar 气后，相同 Ar 气流量下，随着磁感应强度加大，液面波动减小。这说明吹入 Ar 气时，特别是吹入较大 Ar 气流量时，施加磁场同样能抑制吹氩带来的表面波动。施加 0.3 T 的磁场对表面波动抑制较小，尤其是当 Ar 气流量为 3.5 L/min 时，液面波动减小很少；而当磁感应强度为 0.5 T 时，当 Ar 气量较大时，如 Ar 气量为 3.5 和 4.5 L/min 时，液面波动显著减小。Ar 气流量为 2.5, 3.5 和 4.5 L/min 时，施加 0.5 T 的磁场使液面波动分别减小了 8%, 21% 和 27%。

2.3 实验结果综合分析

由以上分析可得，无论吹入 Ar 气与否，施加 0.5 T 的磁场都能够对钢液自身的波动以及由于吹入 Ar 气带来的扰动产生抑制作用。根据相似原理式 (1)，可推导出

$$U_m = \lambda^{1/2} U_p = \frac{U_p}{\sqrt{5}} \tag{3}$$

$$\frac{B_p}{B_m} = \sqrt{\frac{\rho_p U_p \sigma_m L_m}{\rho_m U_m \sigma_p L_p}} \tag{4}$$

式中， $\lambda$  为模型与原型的几何比，本实验取 1/5；下标 p 和 m 分别表示原型和模型参数； $U_m=0.42$  m/min； $\rho_p=7200$  kg/m<sup>3</sup>， $\rho_m=9620$  kg/m<sup>3</sup>； $\sigma_p=0.7 \times 10^6$  S/m， $\sigma_m=1.1 \times 10^6$  S/m。将各参数代入式 (3) 和式 (4)，可得

$$\frac{B_p}{B_m} = 0.725 \tag{5}$$

为此可推出在实际连铸机上，同时能够对钢液自身的波动，以及由于吹入 Ar 气带来的扰动产生抑制作用的合适的磁感应强度为 0.36 T，这与常规的电磁制动的磁场强度相当。对应的浇注速度为 0.94 m/min。

由以上实验结果及分析可以看到，吹 Ar 气虽然能有效地防止水口堵塞，但是 Ar 气的吹入可使液面产生明显的扰动。这种扰动，特别是吹入气体量加大时使液面波动较大，易造成卷渣，不利于提高连铸坯的质量。但是，对吹氩水口施加电磁制动，在电磁制动作用下，能够使其波动受到显著的抑制。按照相似准则，可依据本实验结果得到参考的磁场参数。

3 结论

(1) 采用吹氩水口，吹入 Ar 气加剧了表面波动，而且，随着 Ar 气流量的增加扰动加大，且 Ar 气泡主要在水口附近上浮。

(2) 施加磁场改变了 Ar 气通过弯月面的漂浮分布规律，加强了气泡在水口和窄面之间的漂浮，使 Ar 气泡在

结晶器宽度方向上的漂浮分布更均匀, 减小了水口附近由于大量气泡上浮对液面的扰动.

(3) Pb-Sn-Bi 热模拟实验表明, 施加 0.5 T 的磁场能对水口出流以及吹氩所产生的液面波动产生抑制作用. 由相似准则推得, 应用在实际连铸机上抑制吹氩板坯连铸结晶器内液面波动的合适磁场强度为 0.36 T.

#### 参考文献

- [1] Miki Y, Takeuchi S. *ISIJ Int*, 2003; 43: 1548
- [2] Wang Z, Mukai K, Ma Z Y, Nishi M, Tsukamoto H, Shi F. *ISIJ Int*, 1999; 39: 795
- [3] Huang X, Thomas B G. *Can Metall Q*, 1998; 37: 197
- [4] Kubo N, Ishii T, Kubota J, Aramaki N. *ISIJ Int*, 2002; 42: 1251
- [5] Takatani K. *ISIJ Int*, 2003; 43: 915
- [6] Nagai J, Suzuki K I, Kojima S, Kollberg S. *Iron Steel Eng*, 1984; 61(5): 41
- [7] Yamamura H, Toh T, Harada H, Takeuchi E, Iahii T. *ISIJ Int*, 2001; 41: 1229
- [8] Suzuki M, Nakada M. *ISIJ Int*, 2001; 41: 670
- [9] Harada H, Takeuchi E, Zeze M, Ishii T. *Testu Hagané*, 2000; 86: 278  
(原田 宽, 竹内 栄一, 瀬々 昌文, 石井孝宣. 铁と钢, 2000; 86: 278)
- [10] Harada H, Toh T, Ishii T, Kaneko K, Takeuchi E. *ISIJ Int*, 2001; 41: 1236
- [11] Takatani K, Tanizawa Y, Mizukami H, Nishimura K. *ISIJ Int*, 2001; 41: 1252
- [12] Bessho N, Yoda R, Yamasaki H, Fujii T, Nozaki T, Takator S. *ISIJ Int*, 1991; 31: 40