

高拉速吹氩板坯连铸结晶器内的卷渣机理研究 *

张胜军 朱苗勇 张永亮 郑淑国
(东北大学材料与冶金学院, 沈阳 110004)

程乃良 宋景欣
(上海宝钢集团梅山钢铁股份有限公司, 南京 210039)

摘要 基于相似理论, 利用物理模型研究了高拉速吹氩条件下结晶器内的卷渣行为, 考察了工艺操作参数对结晶器内液面波动和卷渣行为的影响. 研究表明: 在结晶器水口吹气条件下, 大气泡对渣层的卷混是引起卷渣的主要方式, 其次是漩涡卷渣, 通常认为的剪切卷渣则不易发生. 此外, 本研究还对各种卷渣行为进行了分析, 揭示其内在机理, 提出了避免卷渣的措施.

关键词 连铸结晶器, 高拉速, 吹氩, 卷渣机理, 物理模拟

中图分类号 TF777.1

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2006)10-1087-04

STUDY ON MECHANISM OF ENTRAPMENT IN SLAB CONTINUOUS CASTING MOULD WITH HIGH CASTING SPEED AND ARGON BLOWING

ZHANG Shengjun, ZHU Miaoyong, ZHANG Yongliang, ZHENG Shuguo
School of Materials & Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004

CHENG Nailiang, SONG Jingxin

Meishan Iron and Steel Co. Ltd., Shanghai Baosteel Co., Nanjing 210039

Correspondent: ZHU Miaoyong, professor, Tel: (024)83686995, Fax: (024)23906316,

E-mail: myzhu@mail.neu.edu.cn

Supported by Program for New Century Excellent Talents in University (NCET-04-0285)

Manuscript received 2006-03-07, in revised form 2006-04-30

ABSTRACT A physical model was established to study the mechanism of molten slag behavior in slab continuous casting mould with high casting speed and argon blowing, and the effects of operation parameters on the liquid surface level oscillation and the slag entrapment were investigated. The results showed that the slag entrapment was mainly caused by the turbulent large bubbles at the interface of slag and molten steel in mould with high casting speed and gas bubbling, and the vortex at the surface also was a way to cause the entrapment, but no entrapment occurred due to high shear stress that was considered the main reason previously. In addition, the behavior and mechanism of typical slag entrapment were discussed, and some measures to eliminate slag entrapment were also presented.

KEY WORDS continuous casting mould, high casting speed, argon blowing, mechanism of entrapment, physical modeling

结晶器内保护渣的卷混严重恶化钢产品质量, 而且已成为影响高附加值钢产品生产的主要障碍之一. 近十几年来, 诸多研究者^[1-13]在卷渣机理的探索方面做了大量的工作. Gupta 等^[1]利用摄像机和图像分析设备研究了油覆盖下油水界面的波动规律, Iguchi 等^[2]通过水力学模型研究了油的运动粘度与油-水界面不稳定波的波长之间的关系. 普遍认为结晶器内主要存在以下 3 种类型的卷渣现象: 漩涡卷渣; 剪切卷渣; 氩气泡对渣-金界面

的卷混. 目前, 对漩涡卷渣和剪切卷渣现象的研究成果较多, 而关于高拉速结晶器内, 浸入式水口吹氩条件下, 气泡行为对渣-金界面的影响的研究尚少见报道, 卷渣的主要方式及机理尚不清楚. 本文以物理模型为基础, 对高拉速水口吹氩条件下板坯结晶器内液面卷渣的机理进行了探索性的研究.

1 实验

根据相似原理, 以 Re 数和 Fr 数为相似准则, 用空气近似模拟氩气, 建立了 1 : 2.5 的物理模型, 实验主体装置示意图如图 1 所示, 典型水口尺寸如图 2 所示. 结晶器和浸入式水口均为有机玻璃制成, 为了避免模型结晶器出口对流场的影响, 模型的高度取 1200 mm.

* 教育部新世纪优秀人才支持计划项目 NCET-04-0285 资助
收到初稿日期: 2006-03-07, 收到修改稿日期: 2006-04-30
作者简介: 张胜军, 男, 1981 年生, 硕士生

$$\frac{\nu_{slag}}{\nu_{steel}} = \frac{\nu_{oil}}{\nu_{water}} \quad (1)$$

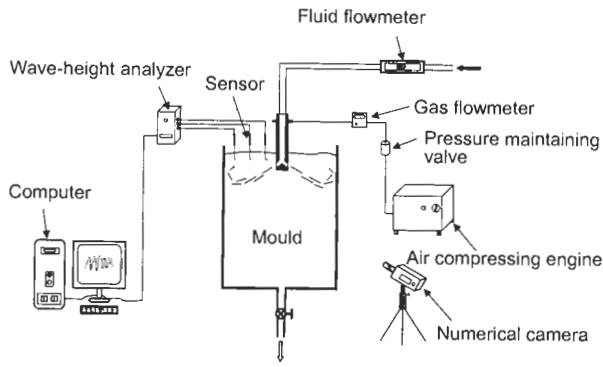


图1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic of experimental set-up

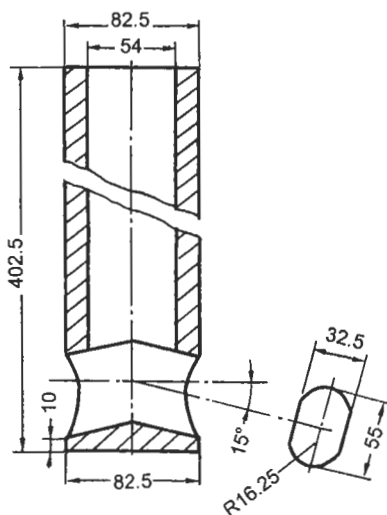


图2 典型浸入式水口示意图

Fig.2 Schematic diagram of a typical submerged entry nozzle

实验整体设备由计算机采集系统、供气系统、供水系统和摄像系统组成。利用 DJ800 型多功能水工监测系统对结晶器内弯月面处、结晶器宽度 1/4 处和浸入式水口附近 3 个点的液面波动进行测量 (见图 1)。对实验过程中的重要现象, 利用高速数码摄像系统进行了详细的拍摄和记录。本实验参数如表 1 所示。为真实模拟钢-渣界面, 采用粘度满足式 (1) 的油来模拟保护渣 [8] (式中, ν 为运动粘度, m^2/s)。

表 1 模型参数和实验条件

Table 1 Parameters of water model and experimental condition

Mould size, mm	(400-520)×88
Casting speed, m/min	1.4-2.4
Argon gas injection rate, L/min	2-10
Port angle/down	10°-20°
Port type	Two oval spouts
Slag viscosity, m^2/s	(198-300)×10 ⁻⁶

2 研究结果与讨论

2.1 操作参数对结晶器液面波动的影响

图 3 为水口吹气量 8 L/min、不同结晶器断面时拉速和水口倾角对结晶器内液面波动的影响。从图中可以看出这样一种现象, 即液面波动在某个拉速下突然增大, 不同断面液面波动突变的拉速也不尽相同: 400 mm 坯宽, 拉速为 1.8 m/min (见图 3a); 460 mm 坯宽, 拉速为 2.1 m/min (见图 3b); 520 mm 坯宽, 拉速为 1.8 m/min (见图 3c)。此现象与水口倾角关系不大, 而主要是由于在该拉速条件下, 水口内产生间歇性的大气

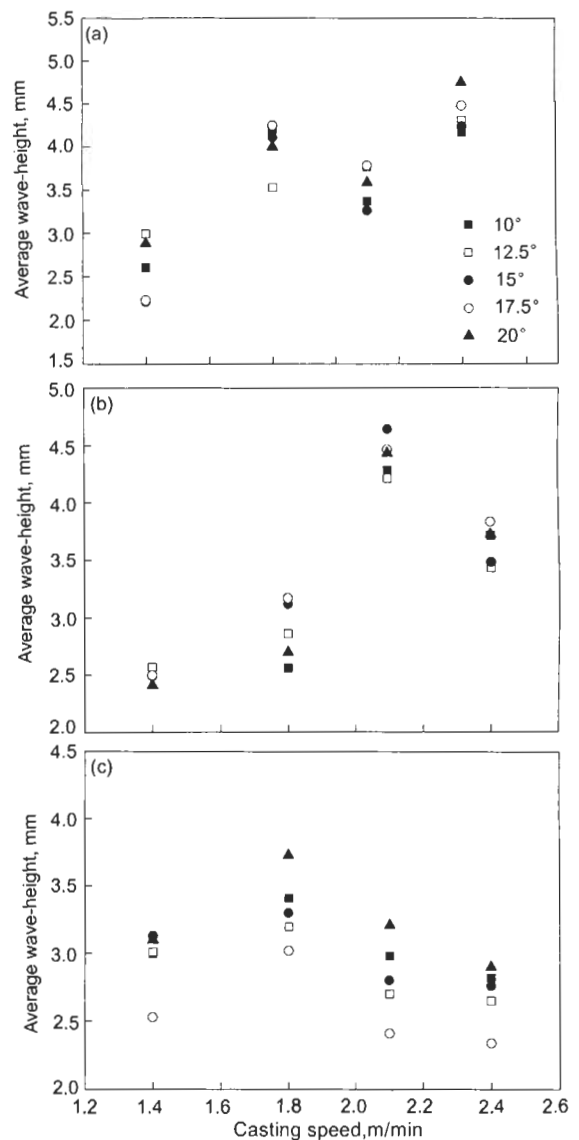


图3 拉速、水口倾角对液面波动的影响

Fig.3 The effects of casting speed and nozzle angle on the surface oscillation in mould (a) mould width 400 mm (b) mould width 460 mm (c) mould width 520 mm

泡所致。大气泡在水口中产生后，流股的抽吸作用被瞬间带出(如图4所示)，由于其直径较大，受水口出口流股的影响较小，在水口出口处靠其自身的浮力脱离主流股而垂直上浮，到达液面后破裂逸出，因此造成靠近水口周围的液面剧烈的湍动，液面波动加剧，从而增大了模拟渣卷入的几率。

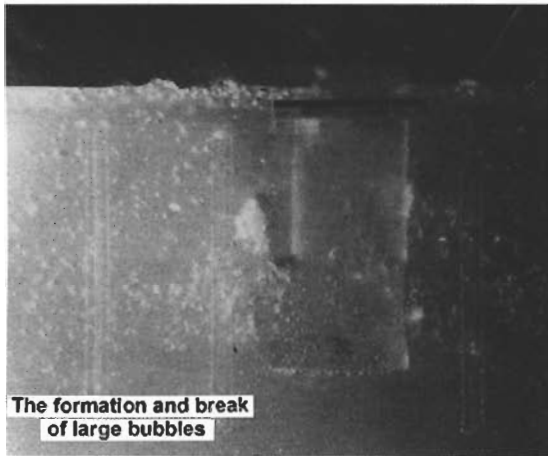


图4 大气泡现象照片图

Fig.4 Picture of large bubbles occurred in the mould

2.2 吹氩时的卷渣机理

2.2.1 卷渣方式 实验显示，水口吹氩条件下，结晶器内液面的卷渣方式主要有两种：漩涡卷渣和大气泡卷渣，如图5所示的A和B。其中大气泡卷渣现象最为突出，漩涡卷渣偶尔发生，没有发现剪切卷渣现象。

大气泡卷渣：大气泡对渣层的翻动较为剧烈，容易发生卷渣(见图6)。通过实验观察到，当拉速达到一定范围内，浸入式水口内有大气泡产生，在水口附近垂直上浮，冲开渣层，逸出并且破裂，由于大气泡的上浮速度较大，水口附近的渣层几乎被瞬间排开，由于曳力的作用，有渣滴形成并卷入。

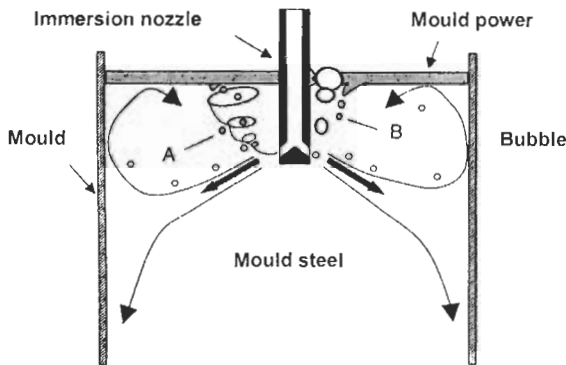


图5 卷渣方式示意图

Fig.5 Schematic of vortex (A) and large bubble (B) slag entrappings in mould

漩涡卷渣：由于水口出口的不对称等因素造成的两流股速度不对称，以至于两上回流股在水口附近相互作用，因为强度的不同，在强度较弱的一侧可能产生旋转流动，进而产生漩涡，见图7。

剪切卷渣：在反复的实验过程中，没有发现如图8在不吹氩时的剪切卷渣现象。这主要是因为气泡存在的作用。剪切卷渣一般发生在靠近弯月面的地方，但在水口吹气条件下，特别是为了防止水口堵塞而吹入较大的气量时，上回流区基本上布满了气泡，气泡连续的到达渣-金界面时，对可能形成的驻波的波谷处有一个向上的推力作用，从而避免了剪切卷渣。

2.2.2 大气泡卷渣机理分析 实验中发现，拉速较小时(1.4 m/min左右)，结晶器中没有大气泡产生，而当拉速增大到一定值时(1.8 m/min左右)，间歇性大气泡

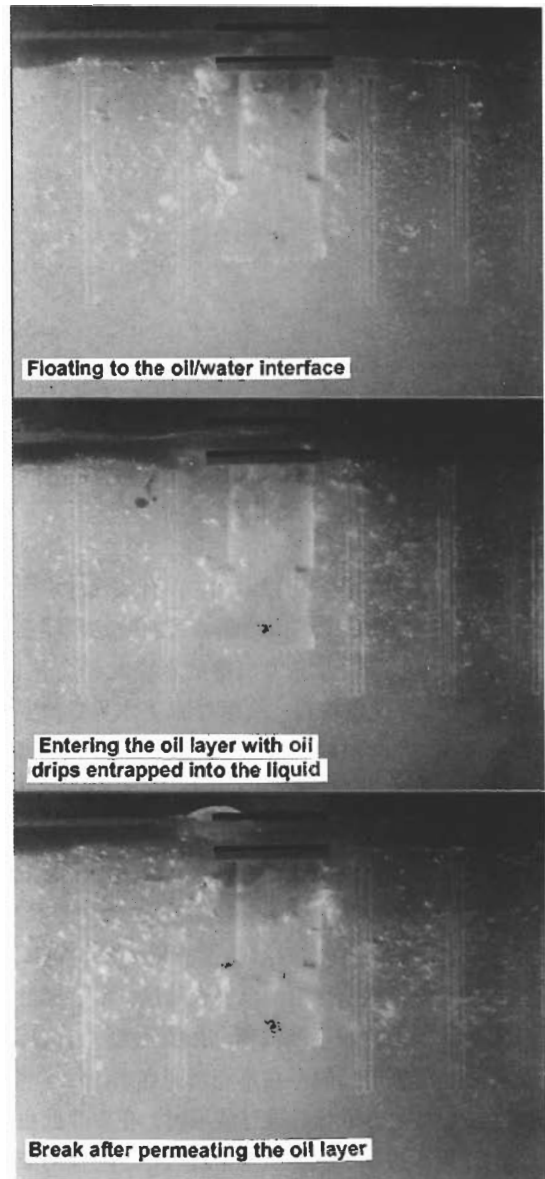


图6 大气泡对结晶器渣-金界面的影响

Fig.6 The effect of large bubbles on the slag-metal interface

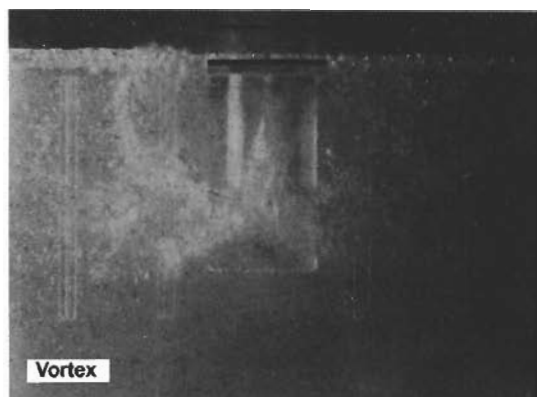


图7 水口附近出现的漩涡

Fig.7 Vortex formation near the SEN

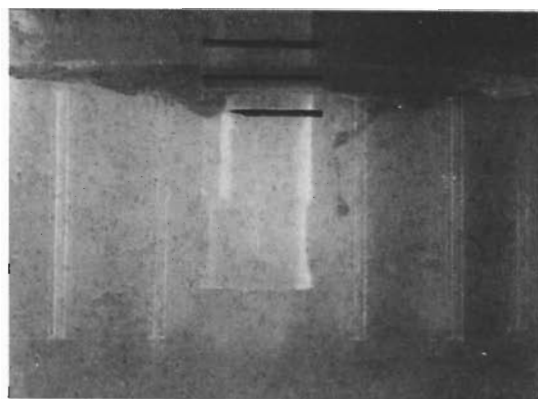


图8 不吹气时结晶器内发生剪切卷渣照片

Fig.8 Oil entrapment due to shearing in mould without gas blowing

开始产生, 从图3中各图可以看出, 在有大气泡产生所对应的拉速条件下(2.1所述), 结晶器液面波动幅度突然增大, 原因是大气泡直径比正常气泡的直径大若干倍(见图4), 出水口后上浮速度较大, 从而对油/水界面造成了较为强烈的冲击, 此时油层极易因曳力的作用而发生卷渣现象. 随着拉速的进一步增大(2.4 m/min左右), 结晶器内液面波动幅度呈减小趋势, 这主要是由于大气泡消失, 气泡直径变小的原因, 同时也说明了在高拉速操作时上回流对液面波动的影响要弱于大气泡的作用.

从水口形成的大气泡对结晶器渣层的冲击可以分3个阶段: 先上浮至钢渣界面, 再进入渣层, 最后透过渣层逸出. 图6清楚地再现了此过程. 上浮至流体与渣层界面处的大气泡, 由于渣层的存在不能瞬间逸出; 大气泡进入渣层后, 渣层被逐渐乳化; 透过渣层时, 在表面处由于表面张力的作用而破裂逸出. 在这个过程中, 乳化的渣层在大气泡通过时引起了较大的湍动, 使得部分渣滴突破了分

子间作用力, 从而被卷入到流体当中, 发生了大气泡卷渣现象.

3 结论

(1) 高速连铸结晶器水口吹氩条件下, 发生保护渣卷混主要存在两种方式: 第一种卷渣现象发生在结晶器水口的水平两侧, 主要是由于防止水口堵塞而吹入的大量氩气形成的间歇性大气泡对保护渣层的卷混. 第二种卷渣方式与非平衡流所引起的漩涡有关.

(2) 在水口吹氩条件下的高拉速连铸生产中, 拉坯速度和吹氩量是引起表面卷渣的主要因素.

(3) 由于结晶器内弥散气泡浮力的作用, 平衡了部分上回流对保护渣层向下的剪切力, 使得剪切卷渣在本研究条件下很难发生.

(4) 水口中大气泡的产生是卷渣的主要方式, 应进一步深入研究拉速与气泡直径存在的定量关系, 同时探索浸入式水口堵塞的机理, 尽量避免用增大水口吹氩量的方法来预防水口堵塞, 从而最大程度上抑制保护渣层的卷混.

参考文献

- [1] Gupta D, Lahiri A K. *Metall Mater Trans*, 1996; 27B: 695
- [2] Iguchi M, Tomoyuki J, Mizuno Y. *ISIJ Int*, 2000; 40: 685
- [3] Tanaka H, Kuwatori H, Nishihara R. *Tetsu Hagané*, 1992; 78: 761
(田中宏幸, 锹取英宏, 西原良治. 铁々钢, 1992; 78: 761)
- [4] Theodorakakos A, Bergeles G. *Metall Mater Trans*, 1998; 29B: 1321
- [5] Wang Z, Mukai K, Izu D. *ISIJ Int*, 1999; 39: 154
- [6] McDavid R M, Thomas B G. *Metall Mater Trans*, 1996; 27B: 672
- [7] Panaras G A, Theodorakakos A, Bergeles G. *Metall Mater Trans*, 1998; 29B: 1117
- [8] Lei H, Xu H H, Zhu M Y, Gan Y, Liu X, Ni M S, Liu J Q. *Iron Steel*, 1999; 34(8): 20
(雷洪, 许海虹, 朱苗勇, 干勇, 刘新, 倪满森, 刘家奇. 钢铁, 1999; 34(8): 20)
- [9] Wen G H, Li G, Zhang J C. *Iron Steel*, 1997; 32(Suppl.): 691
(文光华, 李刚, 张建春. 钢铁, 1997; 32(Suppl.): 691)
- [10] Bao Y P, Zhu J Q, Jiang W, Wang C X, Tian N Y, Xu B M. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2000; 22: 409
(包燕平, 朱建强, 蒋伟, 王昌旭, 田乃媛, 徐宝美. 北京科技大学学报, 2000; 22: 409)
- [11] Tan L J, Shen H F, Liu B C, Liu X, Xu R J, Li Y Q. *Acta Metall Sin*, 2003; 39: 4
(谭利坚, 沈厚发, 柳百成, 刘晓, 徐荣军, 李水全. 金属学报, 2003; 39: 4)
- [12] Qian Z D, Wu Y L. *Acta Metall Sin*, 2004; 40: 1
(钱忠东, 吴玉林. 金属学报, 2004; 40: 1)
- [13] Hu H, Zhao H M, Zhang J M, Wang X H, Wang W J. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2005; 26(1): 1
(胡皓, 赵和明, 张炯明, 王新华, 王万军. 钢铁钒钛, 2005; 26(1): 1)