

水口吹氩工艺板坯结晶器内气泡运动行为的物理模拟

冯 巍¹ 胡明谦² 李德强² 刘承军¹ 姜茂发¹

(1 东北大学材料与冶金学院, 沈阳 110004; 2 本溪钢铁集团公司, 本溪 117000)

摘 要 以 1 300 mm × 230 mm 板坯连铸结晶器的相似比 0.4 的物理模型, 研究了拉速 1.1 m/min、水口插入深度 160 mm、水口吹气量 0 ~ 15 L/min 时连铸结晶器内气泡的运动行为, 及其对钢液流股冲击深度、液面波动和液面裸露的影响。实验结果表明, 随水口吹气量增加, 结晶器内气泡的数量和尺寸都有所增加, 气泡在钢液内水平方向扩散范围增大, 且气泡最大穿透深度亦增加; 当水口吹气量增大到 5 L/min 时, 气泡逸出后在液面由全部向水口方向运动变为以集中逸出位置为中心的四散运动。

关键词 板坯结晶器 浸入式水口 气泡运动行为 物理模拟

Physical Simulation on Bubbles Movement in Mold for Slab with Nozzle Argon Injection Process

Feng Wei¹, Hu Mingqian², Li Deqiang², Liu Chengjun¹ and Jiang Maofa¹

(1 School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004;
2 Benxi Iron and Steel Group Co, Benxi 117000)

Abstract The bubbles movement behavior in mold with cast speed 1.1 m/min, nozzle submerged depth 160 mm and gas flow rate in nozzle 0 ~ 15 L/min, and the effect of bubbles movement on impact depth, liquid level fluctuation and surface naked of mold powder have been studied by physical model in the ratio 0.4 to 1 300 mm × 230 mm slab mold. Test results showed that with increasing gas flow rate in nozzle all the amount and size of bubbles in mold increased, the bubbles horizontal dispersion in liquid steel enlarged and the bubbles maximum penetration depth increased; as the gas flow rate in nozzle increased to 5 L/min, the flow pattern of gas bubbles at liquid surface changed from all movement towards nozzle to dispersion movement at the concentration escape position.

Material Index Mold for Slab, Submersed Entry Nozzle, Gas Bubble Movement Behavior, Physical Model

在连铸生产过程中, 采用水口吹氩技术可以防止水口结瘤, 延长水口使用寿命, 防止钢液的二次氧化和促进夹杂物上浮。但是, 在结晶器内, 气泡及其吸附的夹杂物可能被凝固坯壳捕获, 形成铸坯皮下缺陷; 另外, 气泡从保护渣层逸出时会对钢液表面产生扰动, 产生不利的表面湍流, 形成铸坯表面缺陷^[1-3]。本实验通过物理模拟, 系统地研究了不同水口吹气量条件下连铸结晶器内的气泡运动行为。

1 物理模型建立

以本钢二炼钢 1 300 mm × 230 mm 的板坯连铸结晶器为原型, 水口侧孔倾角为向下 15°, 模型与原型相似比为 0.4。实验装置见图 1。

采用水替代高温钢液, 并用一定配比的真空泵油和煤油混合液替代保护渣, 压缩空气替代氩气。为满足结晶器模型与原型动力相似, 须保证二者的 Froude 准数相等。考虑到现场氩气在高温注流中的体积膨胀, 对模型中的吹气量进行了温度修正。

用 DJ800 型水工数据采集系统对液面波动进行测量, 在保证结晶器模型内水口两侧流动对称的前

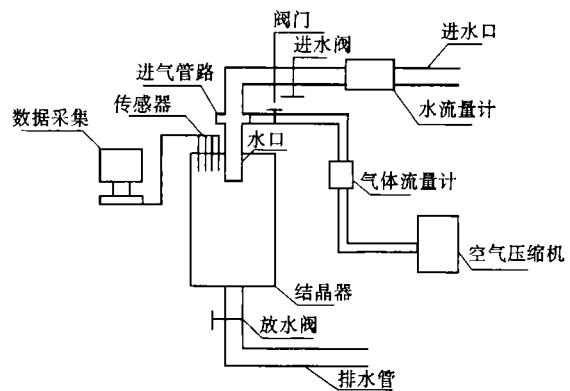


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic of experimental apparatus

提下, 于水口一侧选取 4 个放置传感器的测点: 1# 测点距浸入式水口侧壁 10 mm; 4# 测点距结晶器模型窄面 10 mm; 2#、3# 测点为 1#、4# 测点距离的三等分点(图 2)。采用高锰酸钾溶液作为示踪剂, 显示流股运动轨迹, 并利用摄像机拍摄记录。

2 结果分析与讨论

2.1 水口吹气量对钢液内部气泡运动行为的影响

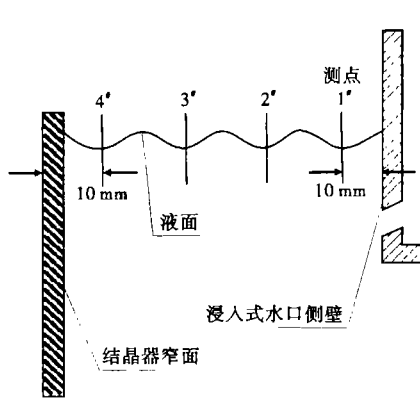


图2 结晶器内液面波动测点位置示意图

Fig. 2 Schematic of measurement location of liquid level fluctuation in a mold

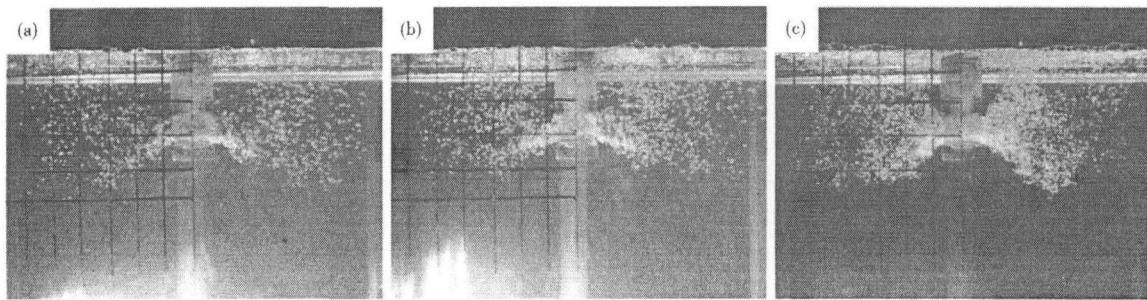


图3 水口吹气量- (a) 4 L/min, (b) 7 L/min, (c) 12 L/min对钢液内部气泡运动行为的影响: 拉速- 1.1 m/min, 水口插入深度- 160 mm

Fig. 3 Effect of gas flow rate in nozzle - (a) 4 L/min, (b) 7 L/min, (c) 12 L/min on pattern of bubble movement in liquid steel; cast speed- 1.1 m/min; nozzle submerged depth- 160 mm

增加,在水口空间内的气体体积分数增大,由于单位时间内的钢液体积流量不变,所以钢液的流速相对增加,从而使气泡受到的惯性力作用增大,所以气泡在结晶器内的水平扩散范围和穿透深度均有所提高。

值得注意的是,当吹气量增加到 12 L/min时,气泡从水口冲出后明显分成两股,一股就在水口附近上浮逸出,而另一股随着向下运动,流股到达一定位置后才开始上浮。出现这种现象的原因是由于水口吹气量过大,形成的气泡较多,一些气泡在水口内部就已经碰撞长大,当这些大气泡从水口侧孔冲出后,立即上浮,形成一股明显的上升气泡流,这股上升流会严重影响钢液上回流的运动形态。

随着吹气量的增加,结晶器内气泡数量明显增多,受气泡上浮作用的影响,水口出口流股在冲向结晶器窄面的过程中,气泡的上浮运动对朝窄面运动的流股的阻滞作用增大,从而减小了流股的动能,流股对窄面冲击深度逐渐减小(图 4a)。

2.2 水口吹气量对钢液表面气泡逸出行为的影响

从图 3 可见,少量粒度较大的气泡冲出侧孔后,立即在沿水口侧壁附近上浮,而绝大部分气泡会在惯性力的驱动下随钢液流股向结晶器窄面方向冲击。在运动过程中,体积较大的气泡由于受到的浮力大,在离水口较远的地方上浮,因此上浮时间短;而小气泡上浮时间长,在离水口较远的地方上浮,此处气泡粒度较小且气泡的数目也较少。随着吹气量的增加,气泡的数量和粒度都有所增加,气泡在钢液中的分布密度也逐渐增大。此时,气泡在钢液内向水平方向的扩散范围增大,少量小气泡已能到达结晶器的窄面,而且气泡的最大穿透深度也有所增加。这是因为在水口直径不变的情况下,随着吹气量的

观察实验现象可知,当水口吹气量小于 5 L/min时,从液面逸出的气泡并未马上破裂,而是在上回流液面流股的作用下,沿液面向水口方向运动,这些气泡绝大多数在水口壁周围聚合、破裂;当水口吹气量为 5 L/min时,气泡逸出后在液面的运动形态发生了变化,以集中逸出的位置为中心的四散运动,除在水口附近聚集破裂的气泡外,有部分气泡运动到结晶器窄面聚集破裂。

当水口不吹气时,各个测点处的液面波动都很小,不超过 1 mm。当有气体吹入时,液面波动加剧,尤其是靠近水口的 1#、2#测点的增幅最大。随着吹气量的增加,液面波动曲线在吹气量为 5 L/min时出现了突变,1#、2#测点的波动值骤然降低,而 4#测点的波动值骤然提高。这是由于从钢液表面逸出的气泡运动形态变化所致。此后,随着吹气量的继续增加,2#、3#、4#测点的波动值逐渐提高,而 1#测点的波动值逐渐降低(图 4b)。

图 5 中结晶器窄面位于左侧,水口侧壁位于右侧。在水口未吹气时,靠近结晶器窄面出现了较大

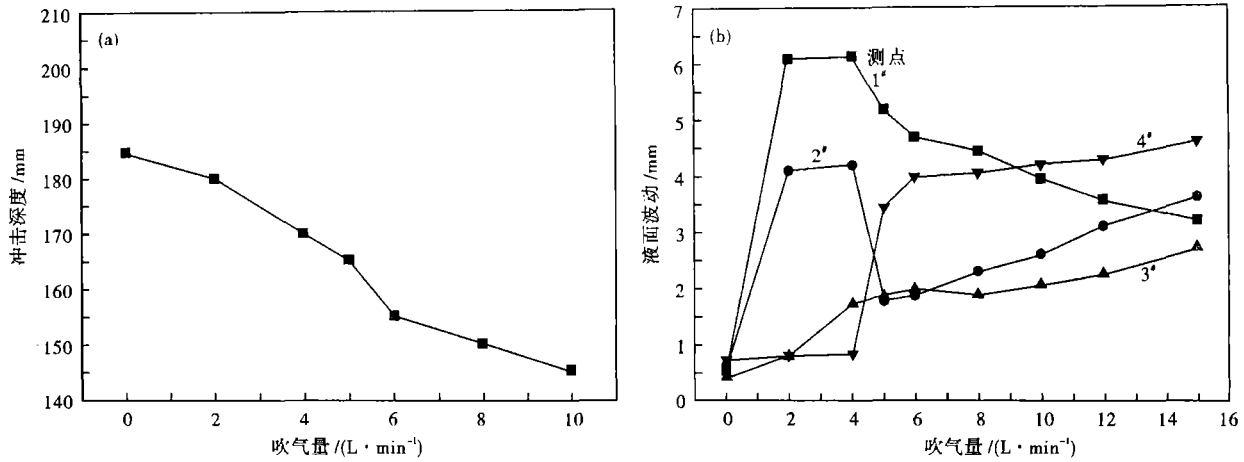


图 4 水口吹气量对连铸结晶器内冲击深度(a)和液面波动(b)的影响:拉速-1.1 m/min,水口插入深度-160 mm
 Fig.4 Effect of gas flow rate in nozzle on impact depth (a) and liquid level fluctuation (b): cast speed-1.1 m/min; nozzle submerged depth-160 mm

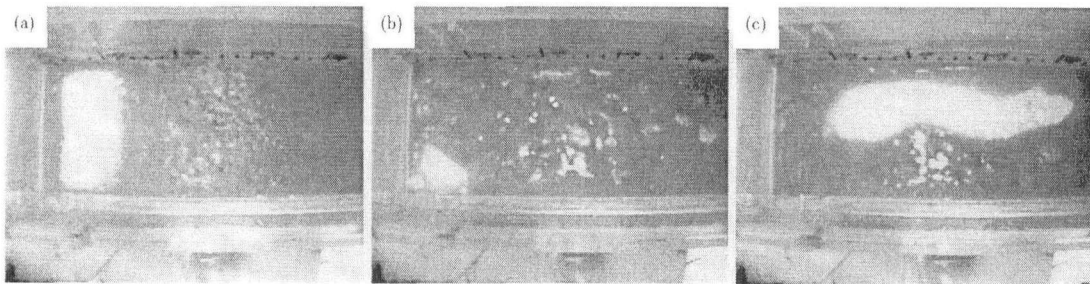


图 5 水口吹气量- (a) 0 L/min, (b) 6 L/min, (c) 12 L/min对连铸结晶器内液面裸露的影响:拉速-1.4 m/min,插入深度-160 mm
 Fig.5 Effect of gas flow rate in nozzle- (a) 0 L/min, (b) 6 L/min, (c) 12 L/min on liquid level naked of mold powder in mold: cast speed-1.4 m/min; submerged depth-160 mm

面积的裸露,这是由于上回流沿液面向水口方向运动流股的作用造成的;随着吹气量的增加,窄面附近的液面裸露面积逐渐减小,这是因为上浮的气泡限制了上回流的发展,降低了窄面附近的液面流速。由于液流向水口方向的剪切力是产生液面裸露的主要原因,而液面流速与这一作用力成正比,所以窄面附近的液面裸露逐渐减小,而上浮逸出的气泡导致水口侧壁附近液面出现小面积的裸露;随着吹气量的进一步增加,窄面附近的液面裸露消失,而在气泡上浮的位置出现大面积的液面裸露,这说明窄面附近的液面流速已变得更低。

3 结论

- (1)随着水口吹气量的增加,连铸结晶器内气泡的数量和粒度都有所增加,气泡在钢液内向水平方向的扩散范围增大,气泡最大穿透深度亦增加。
- (2)随着水口吹气量的增加,钢液流股对连铸结晶器窄面冲击深度减小,液面波动加剧;同时窄面

附近的液面裸露面积逐渐减小,而水口附近的液面裸露面积逐渐增大。

- (3)当水口吹气量增加到 5 L/min时,气泡逸出后在连铸结晶器内液面由全部向水口方向运动变为以集中逸出位置为中心的四散运动。

参考文献

- 1 Thomas B G, Huang X, Sussman R C. Simulation of Argon Gas Flow Effects in a Continuous Slab Caster. Metallurgical and Materials Transactions B, 1994, 25B(4): 527
- 2 Kubo N, Ishii T, Kubota J, et al. Two-phase Flow Numerical Simulation of Molten Steel and Argon Gas in a Continuous Casting Mold. ISIJ International, 2002, 42(11): 1251
- 3 Singh V, Dash S K, Sunitha J S. Experimental Simulation and Mathematical Modeling of Air Bubble Movement in Slab Caster Mold. ISIJ International, 2006, 46(2): 210

冯 巍(1979-),男,东北大学钢铁冶金专业博士研究生,从事连铸工艺数值物理模拟研究。