

水口吹氩工艺参数对180 mm × 700 mm板坯结晶器 宽面含气率分布的影响

王荃¹ 林媛² 苗晓² 张文康³ 王航宇⁴

(1 山西太钢不锈钢钢管有限公司,太原 030008;太钢不锈钢股份有限公司 2 技术中心,

3 冷轧硅钢厂,太原 030003;4 兰州大学物理科学与技术学院,兰州 730107)

摘要 通过建立的6:10几何相似比的模拟180 mm × 700 mm板坯结晶器的水模型(108 mm × 420 mm),使用数字图像处理技术,分析了水量2.54~3.16 m³/h,气量0.037~0.110 m³/h,滑板开口度51%~100%,水口浸入深度78~108 mm等参数对水口吹氩板坯结晶器水模型内宽面含气率分布的影响。结果表明,当水量3.16 m³/h(相当于原型1.50 m³/h),气量0.037 m³/h(原型0.120 m³/h),水口底部形状为凹形,滑板开口度51%,水口浸入深度78 mm(原型130 mm)时,水模型内气泡分布相对均匀,有利于流场的改善和夹杂的上浮去除。180 mm × 700 mm铸坯的生产性试验表明,采用优化的参数生产的超低碳钢连铸坯中≥30 μm的夹杂物量和夹杂物总量均显著降低。

关键词 水口吹氩 数字图像处理技术 宽面含气率 板坯结晶器

Effect of Nozzle Argon Blowing Process Parameters on Gas Ratio Distribution at Wide Side of Mold for 180 mm × 700 mm Slab

Wang Quan¹, Lin Yuan², Miao Xiao², Zhang Wenkang³ and Wang Hangyu⁴

(1 Shanxi Taigang Stainless Steel Tube and Pipes Co Ltd, Taiyuan 030008; 2 Technical Center,

3 Cold-Rolled Electrical Factory, Taiyuan Stainless Steel (Group) Co Ltd, Taiyuan 030003;

4 College of Physics Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730107)

Abstract The effect of process parameters including water rate 2.54~3.16 m³/h, gas rate 0.037~0.110 m³/h, slide gate opening degree (51%~100%) and nozzle submerged depth 78~108 mm on gas ratio distribution at wide side of mold for slab casting with nozzle argon blowing has been analyzed by an established 108 mm × 420 mm water model with geometry similarity ratio 6:10 to simulate 180 mm × 700 mm mold for slab casting and using digital image process technique. Results show that with water rate- 3.16 m³/h (corresponding original type 1.50 m³/h), gas rate- 0.037 m³/h (original type 0.120 m³/h), nozzle bottom being concave shape, slide gate opening degree- 51% and submerged depth of nozzle- 78 mm (original type 130 mm) the distribution of gas bubble is relatively uniform, it is available to improve flow field and inclusions floating off. The results of pilot commercial production of 180 mm × 700 mm cast slab show that the amount of ≥30 μm inclusions and total amount of inclusions in ultra-low carbon steel with using optimizing parameters decrease obviously.

Material Index Submerged Nozzle Argon Blowing, Digital Image Process Technology, Gas Ratio at Wide Side of Mold, Mold for Slab Casting

向钢液中吹氩的目的是使钢液成分和温度均匀化,同时能起到脱气和去除夹杂的作用^[1],通过浸入式水口向钢液吹氩工艺不仅能够防止水口堵塞和钢液二次氧化,还能显著提高水口的使用寿命^[2]。但是,如果工艺搭配不合理,吹入结晶器内的氩气泡及粘附在其表面的非金属夹杂物就很容易被初生坯壳捕获,导致铸坯产生气孔缺陷^[3],因此,研究各工艺条件对钢液内含气率分布规律的影响有非常重要的意义。Damen等^[4]曾利用定量影像分析(QIA)和X射线照相技术探查氩气泡在铸坯厚度和宽度方向上的数量和大小分布情况,本文利用高速摄影捕捉气泡运动图像,结合数字图像处理技术,定量分析

不同工艺条件下结晶器水模型内宽面含气率分布,确定有利于夹杂上浮的生产参数,通过大生产试制,取得较好的效果。

1 物理模拟

1.1 实验原理

根据几何相似和动力学相似原理,以钢厂板坯结晶器为原型,实际铸坯宽度700 mm,铸坯厚度180 mm,以6:10的几何相似比制成水模型,采用水替代高温钢液,压缩空气替代氩气。

考虑板坯结晶器内钢液的流动主要受重力和惯性力的作用,重力占主导作用,粘性力作用很小,要求佛鲁德准数(Fr)和雷诺准数(Re)相似^[5],但是,

经计算,本实验的原型及模型的雷诺数 Re 处于第二自模化区。因此,相似的决定性参数为佛鲁德准数,必须保证模型与原型的佛鲁德准数相等,即 $Fr_m = Fr_p$;对于气液两相流的气相而言,修正佛鲁德准数考虑了密度的差异,比佛鲁德准数更好地表征了气相的物理意义,为此采用修正的 Fr 来计算气相的实验参数。即 $Fr_m' = Fr_p'$,同时考虑现场高温条件引起氩气急剧膨胀,采用状态方程进行修正。

1.2 实验装置

水模型尺寸(mm)为1 200(长)×420(宽)×108(厚),模型的浸入式水口倾角为-12°,水模型液面无顶渣覆盖,采用美国 DRS 公司的 LIGHTNING RDT/2 型高速摄像机,配合 Xcitex 公司的 MIDAS 2.0 软件进行图片采集,使用某医学图像处理软件对采集后的图片进行数字化处理,实验装置见图 1。

1.3 实验方案与宽面含气率计算方法

共进行 5 大组实验,分别研究不同水量、气量、水口底部形状、滑板开口度和水口浸入深度条件下

水模型内宽面含气率的分布。各大组实验条件如表 1 所示,在常量条件下,调整变量,分别进行 2~3 小组实验,合计 12 小组实验。使用图像处理软件定量分析水模型内含气率分布。

某相的流动在任意流通界面上所占的通道截面积与总的流通截面积之比称为该相的真实相含率或截面相含率。对于气液两相流,气相的真实相含率又称为截面含气率^[6]。它反映了两相流的总流量中气相流量所占的真实份额。依据该定义,与拉坯方向垂直的铸坯截面内的含气率最为符合。由于气泡在液面处逸出时会产生碰撞聚合和破碎现象。摄像后这些气泡会出现在照片背景上,作为强烈的背景噪音从而屏蔽了结晶器内截面的气泡分布,本实验条件无法拍摄结晶器顶部或底部的气泡分布,对于常规的板坯而言,人们更关注宽面的含气率(宽面指平行于拉坯方向的铸坯面)。

本文所指的宽面含气率是将铸坯的宽面划分为一定数量的体网格后,每个体网格内的气泡的体积与这一网格的体积之比。它能够更好地表征和比较各种不同条件下气泡的分布特征。

宽面含气率可用某医学专用图形处理软件处理和统计得到。由于流场是对称的,故只分析一侧。以水口中心线和液面水平线交点为原点,将结晶器一侧划分为面网格,如图 2(a)所示。

由于液面气泡聚集,无法区别,因此从液面下 18 mm 处开始划分。共划分 28×9 个网格,每个网格的大小为 19.5 mm×19.5 mm。体网格的体积为面网格面积与结晶器厚度的乘积,计算每个体网格内的含气率。计算方法是:假定该体网格内的气泡均为正球体,然后将所有气泡的体积累加,再将累加值与体网格体积相除,结果作为每个体网格内的含气率。在射流区以外的区域,气泡分散,基本无气泡重叠现象,上述含气率的方法是适用的,分析 1 张图片就可以代表含气率的分布。而在射流区,水口

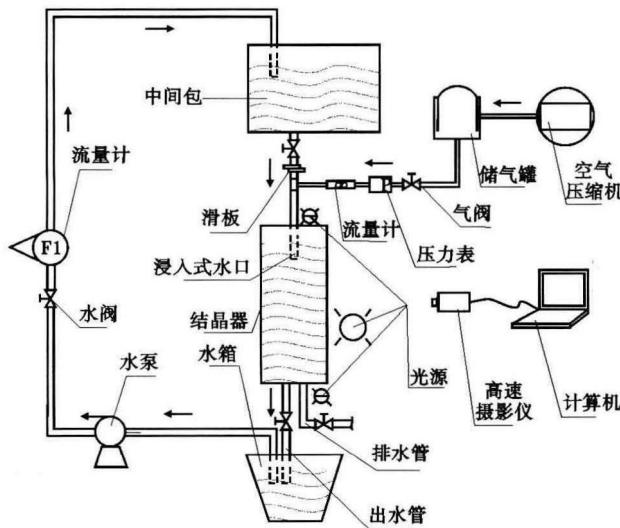


图 1 水模型实验装置示意图
Fig. 1 Schematics of water mold test device

表 1 水模型 5 组试验参数
Table 1 Parameters in 5 test group of water mold

项目	1 组		2 组		3 组	4 组	5 组	
	水量/ ($m^3 \cdot h^{-1}$)	原型拉速/ ($m \cdot min^{-1}$)	气量/ $(m^3 \cdot h^{-1})$				水口底部 形状	滑板开口度/ %
			模型	原型			模型	原型
变量	2.54	1.20	0.037	0.120	凸形 凹形	51 75 100	78 108	130 180
	3.16	1.50	0.074	0.240				
			0.110	0.360				
水模型常量	气量 $0.074 m^3/h$		水量 $3.16 m^3/h$		水量 $3.16 m^3/h$	水量 $3.16 m^3/h$	水量 $3.16 m^3/h$	
	凹形水口		凹形水口		气量 $0.074 m^3/h$	气量 $0.074 m^3/h$	气量 $0.074 m^3/h$	
	开口度 51%		开口度 100%		凹形水口	凹形水口	凹形水口	
	浸入深度 78 mm		浸入深度 78 mm		开口度 51%	浸入深度 78 mm	开口度 100%	

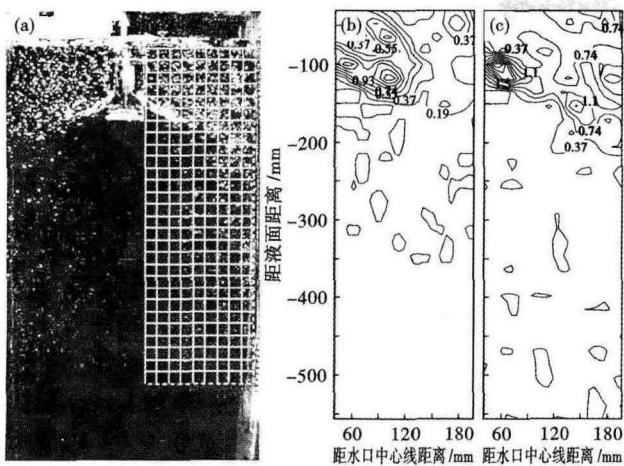


图2 (a)网格划分;水量 $2.54 \text{ m}^3/\text{h}$ (b)和 $3.16 \text{ m}^3/\text{h}$ (c)时结晶器含气率(/%)分布

Fig. 2 (a) Mesh division; Distribution of gas ratio /% in mold with water rate $2.54 \text{ m}^3/\text{h}$ (b) and $3.16 \text{ m}^3/\text{h}$ (c)

出口处气泡密集,重叠现象严重。为消除这一影响,取多张图片分析。在不同的时刻图中气泡的位置不同,从而降低了重叠性。将射流区相同位置的含气率进行累加后,取平均值作为含气率。这一方法同样适用于气泡稀疏的区域,以提高精度。

按照上述方法,处理大批量图片,累加气泡体积后除以所有体网格体积累加值,这一比值作为宽面含气率,以液面与水口中心线的交点为原点做含气率等势图,另外,水口底部以上部分为上回流区,水口底部以下为下回流区。

2 实验结果与分析

2.1 水量对含气率分布的影响

如图2(b,c)可见,当水量为 $2.54 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,上回流场气泡分布不均匀,大多数气泡从水口射出后,未碰触到结晶器窄面,在靠近水口附近区域聚集,直接上浮并逸出液面,聚集区含气率高达 0.93% ,而窄面附近区域含气率仅为 0.17% 。个别气泡碰撞结晶器窄面后进入下回流场。当水量为 $3.16 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,气泡在结晶器内运行范围增大,结晶器上回流场内气泡分布均匀,含气率为 0.74% 左右。比较二者,随着水量的增加,气泡分布范围增加,气泡分布更均匀,去除夹杂的几率增加。

经分析,由于水流量的增加使液体流股的冲击力加强,气泡向下运动趋势增强。马范军等^[7]也指出当拉速较低时,浸入式水口出口钢流小,冲击力弱,气泡的穿透能力弱,气泡在紧挨水口壁处逸出。当拉速增大时,浸入式水口出口钢流大,冲击力强,气泡的穿透能力强,气泡分布较均匀,携带夹杂物一

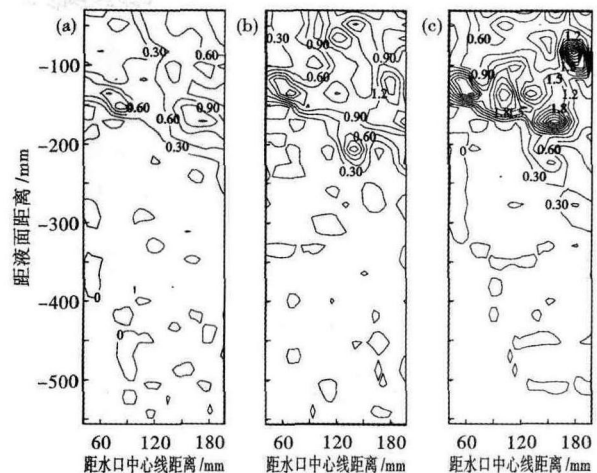


图3 气量 $[(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})]$ (a) 0.037 , (b) 0.074 , (c) 0.110 时结晶器中含气率(/%)分布

Fig. 3 Distribution of gas ratio /% in mold with gas rate $[(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})]$ 0.027 (a), 0.074 (b) and 0.110 (c)

同上浮,改善铸坯质量。因此,一般希望吹氩结晶器内能够形成合适的双回流区(上、下回流区)。

2.2 气量对含气率分布的影响

随着气量的增加,上回流场含气率增加,下回流场含气率没有明显变化,如图3所示。当气量为 $0.037 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,水口附近含气率很低,气泡主要集中在窄面附近,上回流场含气率在 0.60% 左右,含气率分布相对均匀。当气量为 $0.074 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,含气率在 0.90% 左右,气泡在上回流场的分布较前者不均匀。当气量为 $0.110 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,上回流场窄面附近含气率非常高,气泡分布很不均匀,不利于流场稳定。

经分析,气量增大后,气泡上浮速度增大,结晶器水模型内含气率增加,气泡在水口附近和窄面的含气率逐渐增大。从去除夹杂物的角度考虑,在尽可能地增大气量的同时,还要考虑含气率分布的均匀性和气泡的运行范围(行程)。

2.3 水口底部形状对含气率分布的影响

由图4可知,采用凸形水口时,结晶器水模型内上回流中间区域气泡局部聚集,含气率达到 1.9% ,两侧含气率仅为 0.74% 。这说明气泡在上回流场分布极不均匀,液面波动加剧。采用凹形水口时,气泡从水口射出后,迅速向四周散开,除窄面附近区域外,上回流场气泡分布很均匀,含气率为 0.46% 左右。水口底部形状对结晶器下回流场内气泡的分布范围及含气率分布的影响不大。

经分析,凹形水口本身的结构使得钢水从水口射出的速度相对凸形水口要缓慢,气泡上浮速度变缓,停留时间增加,气泡有充足的时间向结晶器各个

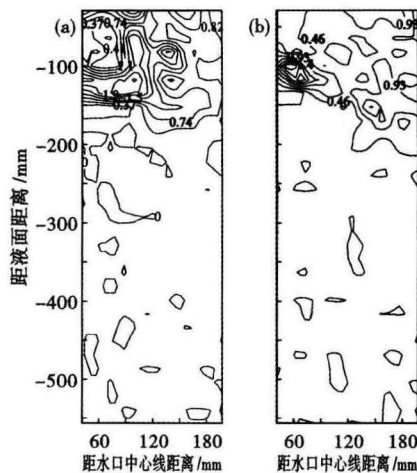


图 4 凸形 (a) 和凹形 (b) 水口底部的结晶器中含气率 (%) 分布
 Fig. 4 Distribution of gas ratio /% in mold with convex (a) and concave (b) nozzle bottom

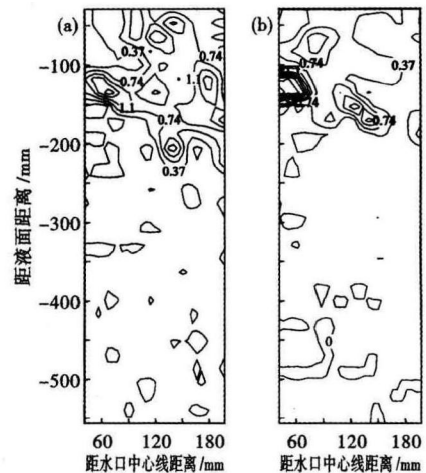


图 6 水口浸入深度 78 mm (a) 和 108 mm (b) 时结晶器中含气率 (%) 分布
 Fig. 6 Distribution of gas ratio /% in mold with immersion depth of nozzle 78 mm (a) and 108 mm (b)

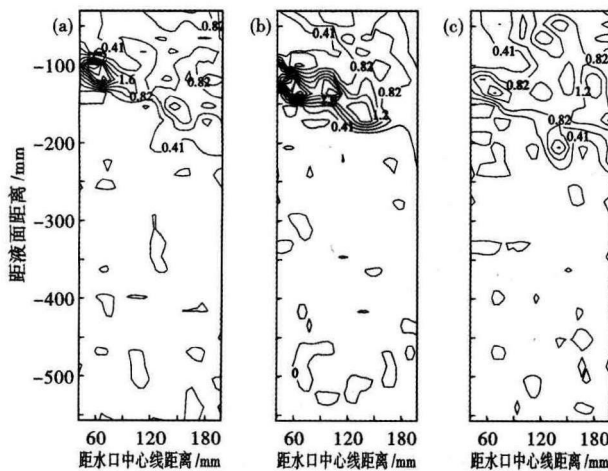


图 5 滑板开口度 51% (a), 75% (b) 和 100% (c) 时结晶器中含气率 (%) 分布
 Fig. 5 Distribution of gas ratio /% in mold with slide gate opening degree 51% (a), 75% (b) and 100% (c)

方向运动,分布较为均匀,有利于夹杂的去除和流程的优化。由于气泡上浮速度缓慢,上回流场水口附近含气率较低。

2.4 滑板开口度对含气率分布的影响

由图 5 可知,随着滑板开口度的增加,除了射流区含气率略有变化外,结晶器水模型内其它区域含气率变化不大,当滑板开口度为 51% 时,结晶器上回流场含气率相对最均匀。

经分析,液体射流冲击力随着滑板开口度的增加而增大,它所携带的气泡的速度相应增加,能够冲击到窄面的气泡的数量随之增加,射流处和窄面处的含气率相应增加。

2.5 水口浸入深度对含气率分布的影响

由图 6 可知,随着水口浸入深度的增加,上回流场内含气率总体降低,水口附近的含气率相对两侧明显偏高,气泡在水口附近聚集,气泡分布不均匀。下回流场含气率随着浸入深度的增加而降低。

经分析,随着水口浸入深度的增加,上回流区面积增大,含气率降低,气泡的上浮时间增加,气泡有充足的时间在上回流作用下向水口聚集,气泡分布极不均匀,大量气泡在局部范围内逸出,对结晶器表面产生了极大的扰动。另外,液体射流冲击力随着水口浸入深度的增加而减弱,液体向下运动速度也极为缓慢,被卷入下回流场的气泡的比例减少,结晶器下回流场含气率降低。

3 生产应用

根据实验结果和相似比设计大生产对应的工艺参数,见表 1。通过调整吹氩量、拉速和水口浸入深度等措施来促进夹杂物的去除,并验证水模型实验结果。大生产冶炼 2 炉钢:1# 和 2# 坯,工艺流程为转炉→精炼→连铸,连铸坯断面尺寸为 700 mm (宽) × 180 mm (厚),结晶器采用浸入式水口吹氩,浸入式水口倾角为 -12°,水口底部形状为凹形,滑板开口度为 51%,1# 和 2# 坯结晶器浸入式水口吹氩流量分别为 0.120 m³/h 和 0.240 m³/h,拉速分别为 1.50 m/min 和 1.20 m/min,水口浸入深度分别为 130 mm 和 180 mm。连铸坯成分均为 (%) 0.004C,0.04Si,0.10Mn,0.010P,0.005S,0.7Al。

分别在 1# 和 2# 连铸坯断面的边部,1/4 处和中心处取样,制成 20 mm × 20 mm 金相样,采用光学显微镜观察连铸坯断面不同位置的夹杂物,统计夹

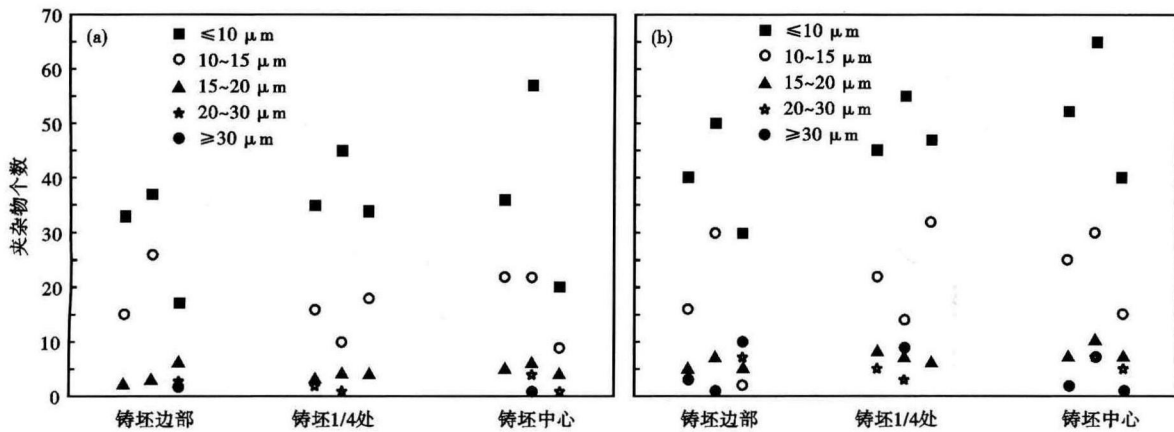


图7 水口吹氩工艺参数对铸坯夹杂物数量和大小影响:(a)1#坯-结晶器浸入式水口吹氩流量 $0.120 \text{ m}^3/\text{h}$,拉速 $1.50 \text{ m}/\text{min}$,水口浸入深度 130 mm ;(b)2#坯-结晶器浸入式水口吹氩流量 $0.240 \text{ m}^3/\text{h}$,拉速 $1.20 \text{ m}/\text{min}$,水口浸入深度 180 mm

Fig.7 Effect of nozzle argon blowing parameters on quantity and size of inclusions in slab: (a) No1 slab- mold submerging nozzle gas rate $0.120 \text{ m}^3/\text{h}$, casting speed $1.5 \text{ m}/\text{min}$, nozzle immersion depth 130 mm ; (b) No2 slab- mold submerging nozzle gas rate $0.240 \text{ m}^3/\text{h}$, casting speed $1.20 \text{ m}/\text{min}$, nozzle immersion depth 180 mm

夹杂物数量和大小,为保证数据具有代表性,铸坯断面各位置处连取3个试样。从图7看出,和2#铸坯相比,1#铸坯断面夹杂物总量降低,尺寸大于 $30 \mu\text{m}$ 的大颗粒夹杂也减少。经分析,通过调整结晶器水口吹氩量、拉速和水口浸入深度等参数能够促进夹杂物的上浮,即当水量为 $3.16 \text{ m}^3/\text{h}$ (原型拉速 $1.50 \text{ m}/\text{min}$),气量为 $0.037 \text{ m}^3/\text{h}$ (原型吹氩量 $0.120 \text{ m}^3/\text{h}$),水口底部形状为凹形水口,滑板开口度为 51% ,水口浸入深度为 78 mm (原型浸入深度 130 mm)的试验条件下,水模型内气泡分布相对均匀,有利于夹杂的上浮去除。

4 结论

(1)随着水量的增加,气泡分布范围增加,气泡分布相对均匀。

(2)随着气量的增加,上回流场含气率增加,气泡上浮速度增加,气泡分布越来越不均匀,下回流场含气率随气量的增加没有明显变化。

(3)采用凹形水口时,钢水从水口射出的速度相对凸形水口要缓慢,气泡分布较为均匀。

(4)随着滑板开口度的增加,射流区含气率略有增加,其它区域含气率变化不大。

(5)随着水口浸入深度的增加,上回流场内含

气率总体降低,气泡在水口附近聚集,气泡分布不均匀。下回流场含气率随着浸入深度的增加而降低。

(6)当水量为 $3.16 \text{ m}^3/\text{h}$,气量为 $0.037 \text{ m}^3/\text{h}$,水口底部形状为凹形水口,滑板开口度为 51% ,水口浸入深度为 78 mm 的试验条件下,水模型内气泡分布相对均匀,有利于夹杂的上浮去除。

参考文献

- [1] 时东生,刘立英. 钢包吹氩工艺的优化与完善[J]. 炼钢,2001,17(1):31-34.
- [2] 倪冰,林媛,罗志国,等. 板坯连铸结晶器水模内气泡运动的实验研究[J]. 材料与冶金学报,2008,7(4):249-253.
- [3] 徐海伦,文光华,唐平,等. 板坯连铸结晶器内吹氩参数优化[J]. 钢铁研究学报,2008,20(3):1-3.
- [4] Damen W, Abbel G, de Gend G. 氩气泡在连铸坯中的不均匀分布[J]. 鞍钢技术,1998(3):56-59.
- [5] 王永胜,侯泽旺,王新华,等. 板坯连铸结晶器流场及液面波动的水模研究[J]. 钢铁钒钛,2009,30(1):55-59.
- [6] 郭烈锦. 两相与多相流体力学[M]. 西安:西安交通大学出版社,2002:15-16.
- [7] 马范军,文广华,李刚. 板坯连铸结晶器内吹入气体对钢液行为的影响[J]. 炼钢,2000,16(3):42-45.

王 荃(1955-),男,高级工程师,1982年北京钢铁学院(本科)毕业,特殊钢开发。E-mail:Wangquan@tisco.com.cn

收稿日期:2014-06-14