

· 试验研究 ·

气体流量及水口底部形状对板坯结晶器内流场影响的水模型试验

刘启龙^{1,2} 仇圣桃¹ 占树华³ 王志政²

(1 钢铁研究总院连铸技术国家工程研究中心,北京 100081;2 马鞍山钢铁股份有限公司第 4 钢轧总厂,马鞍山 243011;
3 维苏威高级陶瓷(中国)有限公司北亚区流体模拟实验室,苏州 215021)

摘要 采用 1:1 水模型研究了气体流量(0~10 L/min)和水口底部形状(凹底和尖底)对结晶器内流场的影响。在结晶器断面为 230 mm×1 200 mm,浇铸速度为 1.6 m/min 的模拟工况条件下,凹底水口其流体形态优于尖底水口;在结晶器液面波动稳定性方面凹底水口亦优于尖底水口;气体流量在 0~8 L/min,使用尖底水口的流体其表面流速明显高于使用凹底水口的流体;对凹底水口而言,气体流量超过 8 L/min,其流体表面流速低于 0.2 m/s;120 炉 IF 钢生产结果表明,使用优化的凹底水口和吹氩流量 7 L/min,浇铸过程结晶器液面波动在 ±3 mm 以内,铸坯夹杂物比优化前降低 24%。

关键词 230 mm×1 200 mm 板坯连铸 水模型 气体流量 浸入式水口 结晶器流场 夹杂

Water Model Examination on Effect of Gas Flow Rate and Nozzle Bottom Shape on Flow Field in Slab Mold

Liu Qilong^{1,2}, Qiu Shengtao¹, Zhan Shuhua³ and Wang Zhizheng²

(1 National Engineering Research Center of Continuous Casting Technology, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081;
2 No4 Steelmaking and Rolling General Plant, Maanshan Iron and steel Co Ltd, Maanshan 243001;
3 Flow Modelling Center- North Asia, Vesuvius Advanced Ceramics (China) Co Ltd, Suzhou 215021)

Abstract The effect of gas flow rate (0~10 L/min) and nozzle bottom shape (concave bottom and pyramid bottom) on flow field in mold has been studied by using 1:1 water model. In condition of mold section 230 mm×1 200 mm and casting speed 1.6 m/min the fluid pattern in mold with using concave bottom nozzle is better than that with using pyramid bottom nozzle; and the stability of liquid level in mold with using concave bottom nozzle is also better than that with using pyramid bottom nozzle; with gas flow rate 0~8 L/min, the liquid surface velocity with using pyramid bottom nozzle is obviously higher than that with using concave bottom nozzle; for using concave bottom nozzle as gas flow rate is larger than 8 L/min, its surface velocity is lower than 0.2 m/s; 120 heats IF steel commercial production results show that using optimized concave bottom nozzle with argon flow rate 7 L/min the fluctuation of surface of liquid in mold during casting process is within ±3 mm, and compared with before optimization the inclusions amount in casting slab decreases by 24%.

Material Index 230 mm×1 200 mm Slab Casting, Water Model, Argon Flow Rate, Submerged Nozzle, Flow Field in Mold, Inclusions

结晶器是控制钢水洁净度的最后环节,其内部钢水的流场直接影响钢液的污染程度和凝固坯壳对夹杂物的捕捉,浸入式水口结构、塞棒吹氩量、拉速及浸入深度等工艺参数对结晶器内钢水的流场有重要影响;尤其在 IF 钢生产过程中,塞棒吹氩是必要的浇注技术,得到了广泛应用;不但能隔绝空气,防止二次氧化,减轻水口蓄流;而且能均匀钢水温度成分,促进夹杂物上浮;但是如果控制不当,将会极大增加气泡及附着在其表面的非金属夹杂被凝固坯壳捕获造成铸坯皮下缺陷的几率^[1];因此,有必要研究塞棒吹氩及水口型式对结晶器内流场的影响规律。邓小旋^[2]等的研究指出,在拉速为 1.8 m/min 时,凹底水口和平底水口下结晶器内流场的对称性要优于凸底水口,三种水口条件下结晶器液面的表面流速变化规律为凸底水口>平底水口>凹底水

口。丁晖^[3]等的研究表明,随着吹氩量的增大结晶器液面波动逐渐增大,但是适当的吹氩量为夹杂物和气泡碰撞、长大、上浮及其去除提供了良好的物理环境,有利于提高夹杂物的去除率。

本文以马钢 2[#]板坯连铸机断面规格为 230 mm×1 200 mm 的结晶器为研究对象,采用水模型方法,重点研究塞棒吹氩流量、水口底部型式对结晶器流场的影响,从结晶器内流体流动形状、弯月面流速及液位波动水平等方面进行系统评估,对现有工况下塞棒吹氩工艺及水口型式进行优化。

1 实验设备及方法

1.1 物理模拟基础

采用水力模拟的方法,对结晶器内的流场进行研究。模拟中采用水作为介质模拟钢水,空气作为

介质模拟气体,为使模型研究结果与实际生产过程的相关参数有相似性及能将实验数据推演至实际生产中,要求做到模型设计的几何相似、流体内部的运动学相似及流体内部受力的动力学相似,即需要保证几何相似及相关特征无量纲准数相同。

鉴于本研究主要注重的是结晶器内的流体流动形状及结晶器液面的行为(速度大小、波动及湍流),确定采用雷诺数及弗劳德准数作为相似依据进行实验,雷诺数及弗劳德数的表达式如下:

$$Re = \frac{UL}{\nu}, Fr = \frac{U}{\sqrt{gL}} \quad (1)$$

式中: Re - 无量纲雷诺准数; Fr - 无量纲弗劳德准数; U - 特征速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$; L - 特征长度/ m ; g - 重力加速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$; ν - 运动粘度/ $(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ 。

根据雷诺数及弗劳德数相等原则,有:

$$\frac{U_m}{\sqrt{g_m L_m}} = \frac{U_p}{\sqrt{g_p L_p}}, \frac{U_m}{U_p} = \sqrt{\frac{L_m}{L_p}} = \sqrt{\lambda} \quad (2)$$

$$\frac{U_m L_m}{\nu_m} = \frac{U_p L_p}{\nu_p}, \frac{U_m}{U_p} = \frac{L_m}{L_p} = \lambda \quad (3)$$

式中: m 、 p - 分别标注相应模型参数及原型参数,如 U_m 、 U_p 分别表示模型及原型的相应特征速度; λ - 模型与实际原型的几何比例/ $(\text{m} \cdot \text{m}^{-1})$ 。

在水力模拟研究中,通常认为 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 的水与钢水在 $1550\text{ }^\circ\text{C}$ 左右时的运动粘度基本一致,因此,根据公式(2)及公式(3),为保证雷诺数与弗劳德数一致,采用模型与原型的比例为 $1:1$,即 $\lambda = 1$ 。

1.2 模拟装置及方法

图 1 为本实验所用的实验台示意图。图 2 为结晶器模拟系统示意图。实验时,水由进水管进入中间包中,待中间包内水位至工作液位后,中间包内塞棒打开,在塞棒控流机构的控制下进入浸入式水口中,然后分布进入结晶器中,待结晶器内液位至工作液位后,结晶器内的水由排水管排出循环至进水管。

实验中,由超声波液位传感器测量结晶器的瞬时液位,并根据该瞬时液位数据计算驻波高度及液位波动值;由叶轮型速度传感器测得特征点的瞬时速度值,并根据该瞬时速度数据计算相应的速度波动等值。

在模拟吹气的情况,气体由塞棒中心,通过塞棒的头部吹入浸入式水口的钢流通道中。

1.3 水口设计及模拟条件

根据连铸机工艺条件及相关通钢量要求,设计了



图 1 实验台示意图

Fig. 1 Schematics of testing station

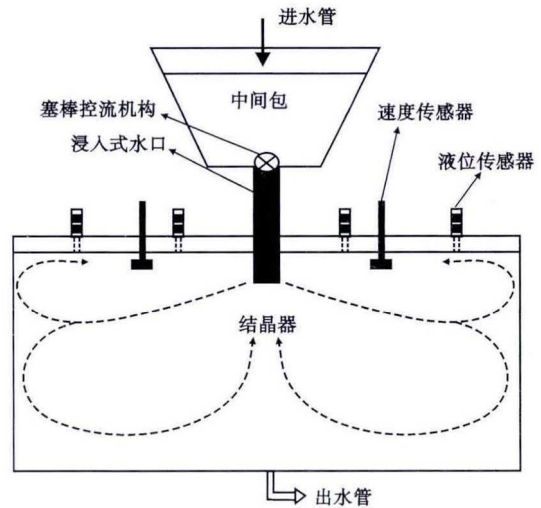


图 2 结晶器模拟系统示意图

Fig. 2 Schematics of mold simulation system

相应尺寸的两类型的水口,见图 3, I 型为凹底水口, II 型为尖底水口。相关实验工况及参数见表 1。

2 模拟结果分析

为方便描述,以下分析中气体流量均指对应的生产实际氩气流量,物理模拟过程中采用的空气流量见表 1 所示。

2.1 气体流量及水口底部型式对结晶器内流体流动形态的影响

图 4 所示为无气体吹入的情况下,在示踪剂从水口注入后 1、2、3 s 时刻流场示踪图片。图 4 中可以看出,采用 I 型水口设计,两侧流股在结晶器内较为对称及稳定,能够在结晶器内形成比较稳定的上循环流,稳定的上循环流对除不锈钢外的板坯浇铸有利,能促进初生坯壳的稳定生成,有助于在弯月面

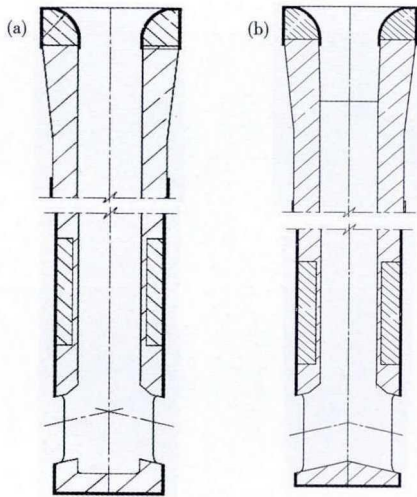


图 3 设计试验水口示意图:(a) I 型,凹底;(b) II 型,尖底
Fig. 3 Schematics of designed test nozzle: (a) I type, concave bottom; (b) II type, pyramid bottom

形成稳定的化渣环境;而采用 II 型水口设计,结晶器内出现了不对称的偏流现象,即一侧流股较另一侧流股提前上卷且呈现不稳定现象。

在塞棒气体的情况下,由于气体的浮力及其对流体的拖曳力的作用,气体流量对流体流动速度、结晶器内的流体稳定性及分布均具有非常大的作用^[4-5]。图 5 所示为采用 II 型水口,吹气量在 0 ~ 10 L/min 的情况下,分别在 1、2、3 s 时刻流场示踪图片。图 5 中可以看出,气体的引入有利于提高结晶器内流体流股的稳定性。在无气体的情况下,流体在结晶器内明显偏向右侧,吹入 4 L/min 气体,流体的对称性得到了明显地提高,而吹入 6 L/min 的气体,流体的对称性及稳定性将得到进一步提高,但弯月面上的流体速度依然较快。

2.2 气体流量及水口底部型式对弯月面流速及波动性的影响

图 6 所示为气体流量及水口底部型式对结晶器宽面 1/4 处弯月面上速度平均值及标准偏差的影响。图 6 中可以看出,使用 II 型水口弯月面的速度都超过 0.30 m/s,整体上比使用 I 型水口大 0.1 m/s 以上,气体的引入,对不同的水口

表 1 水模型和连铸机原型的相关技术参数
Table 1 Relative technology parameters of water model and caster prototype

项目	水模型	原型(铸机)
模型比例	1:1	-
控流机构	塞棒控流	塞棒控流
介质	水	钢水
水口基本特征	I 型:凹; II 型:尖底	I 型:凹底; II 尖底
水口侧孔尺寸/mm	75 × 100	75 × 100
水口侧孔倾角/°	15°	15°
水口中孔直径/mm	82	82
水口外径/mm	140	140
侧孔浸入深度/mm	140	140
结晶器厚度/mm	230	230
结晶器宽度/mm	1 200	1 200
拉坯速度/(m · min ⁻¹)	1.6	1.6
吹气/(L · min ⁻¹)	空气/25 °C, 0/4.6/6.9/9.1/11.4	氩气/1 550 °C, 0/4/6/8/10
介质密度/(kg · m ⁻³)	998.2	7 020
介质运动粘度/(m ² · s ⁻¹)	水 1 × 10 ⁻⁶	钢水 0.95 × 10 ⁻⁶

底部型式影响不同。在当前模拟工况条件下(铸坯宽度 1 200 mm, 拉速 1.6 m/min), 在 0 ~ 6 L/min, 随着气体流量的增加, 采用 I 型水口的结晶器弯月面流速有小幅下降, 而采用 II 型水口的弯月面流速影响不大; 在 6 ~ 10 L/min, 使用两种类型水口的结晶器弯月面流速随气体流量的增加均有较为明显的下降。此外, 从图 6 中可以看出, 虽然使用 II 型水口弯月面的速度整体上比使用 I 型水口大, 但速度的标准偏差大小基本一致; 气体流量对弯月面上的速度

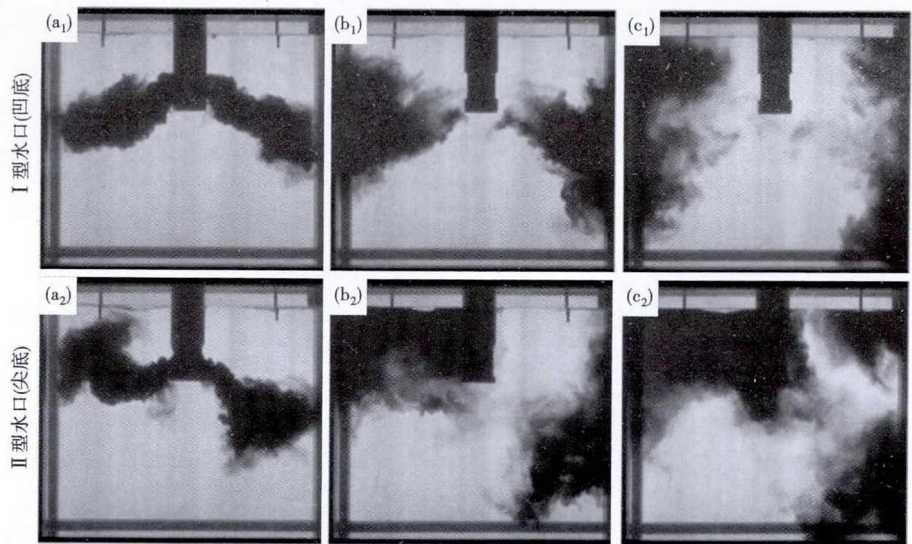


图 4 凹底水口(a₁)(b₁)(c₁)和尖底水口(a₂)(b₂)(c₂)结晶器内流体形态:(a₁)(a₂) 1 s;(b₁)(b₂) 2 s;(c₁)(c₂) 3 s

Fig. 4 Shape of liquid in mold casting with concave bottom nozzle (a₁), (b₁) and (c₁); and with pyramid bottom nozzle (a₂), (b₂) and (c₂): (a₁) and (a₂) 1 s, (b₁) and (b₂) 2 s, (c₁) and (c₂) 3 s

标准偏差影响较小,在 0 ~ 10 L/min,随气体流量的增大,速度标准差的绝对值有较小的下降。

2.3 气体流量及水口底部型式对液位波动及驻波大小的影响

液位波动对结晶器表面卷渣行为具有较大的影响。实验中,采用超声波传感器测量水口两侧1/4点及窄面附近的液位瞬时波动值,并计算其平均值及标准偏差,以平均值及标准偏差之和衡量液面波动的大小,绘制于图 7。从图 7 中可以看出,采用 I 型水口液位波动值较小,且气体流量在 0 ~ 10 L/min,液位波动值基本保持稳定;采用 II 型水口在不吹气及吹气小于 4.0 L/min 的情况下,液面波动值较大,在 0 ~ 10 L/min,液位波动值随着气体流量增大而相应地下降,因此, I 型水口在液位波动的稳定性

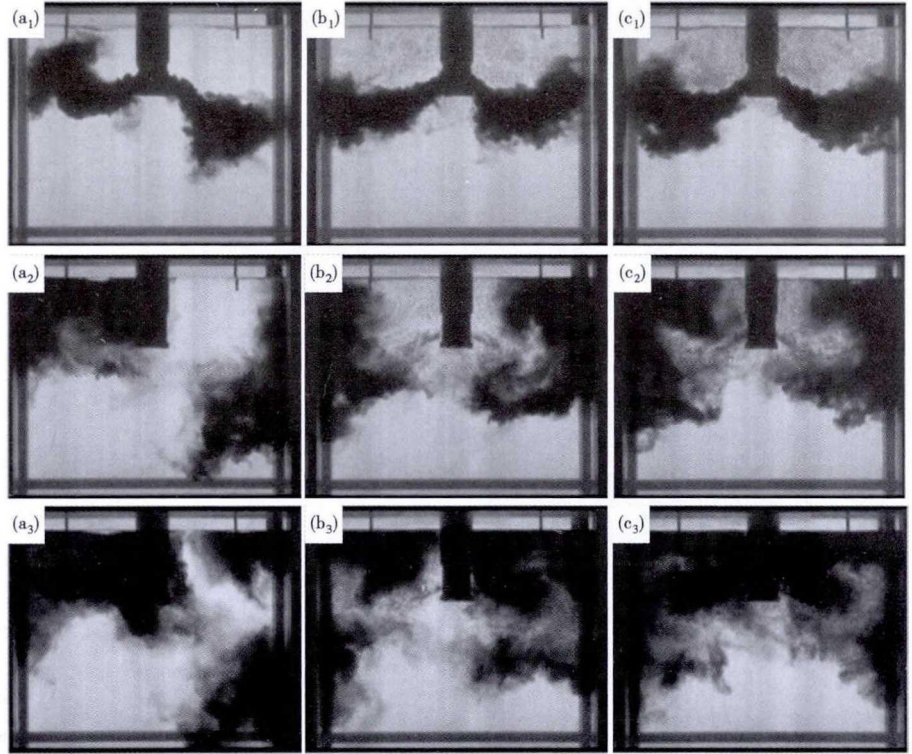


图 5 尖底水口(II型)气体流量/(L·min⁻¹):(a₁)(a₂)(a₃)0,(b₁)(b₂)(b₃)4,(c₁)(c₂)(c₃)6 对结晶器内流体形态的影响:(a₁)(b₁)(c₁)1 s,(a₂)(b₂)(c₂)2 s;(a₃)(b₃)(c₃)3 s

Fig. 5 Effect of gas flow rate [/(L·min⁻¹):(a₁),(a₂) and (a₃) 0,(b₁),(b₂) and (b₃) 4, and (c₁),(c₂) and (c₃) 6] on shape of liquid in mold casting with pyramid bottom nozzle (II type): (a₁), (b₁) and (c₁) 1 s, (a₂), (b₂) and (c₂) 2 s, (a₃), (b₃) and (c₃) 3 s

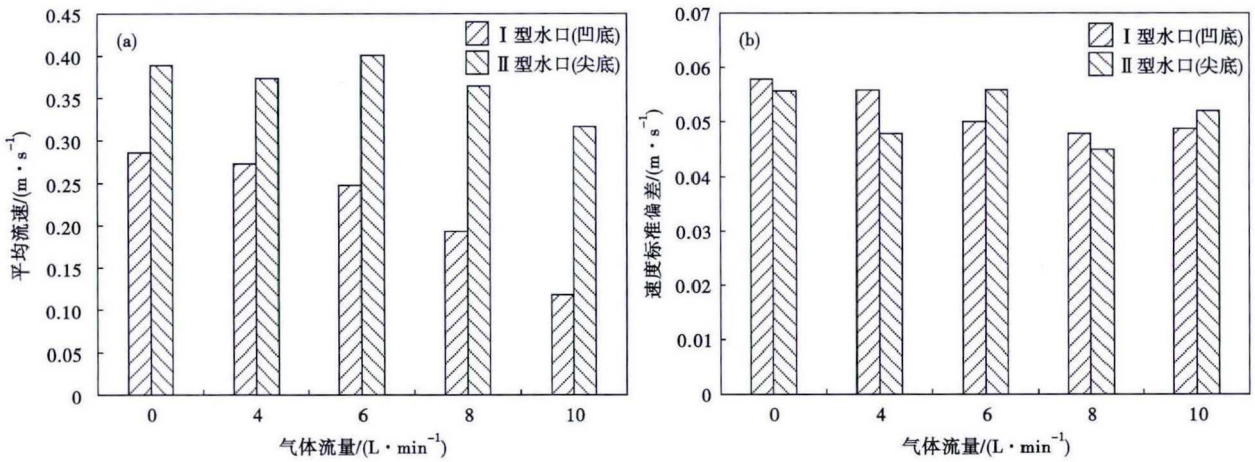


图 6 气体流量及水口底部型式对弯月面流速的影响:(a)平均流速;(b)速度标准偏差

Fig. 6 Effect of gas flow rate and nozzle bottom type on mold meniscus velocity: (a) average velocity; (b) velocity standard deviation

要优于 II 型水口。

结晶器表面驻波对结晶器表面的熔渣行为、液渣的分布及保护渣对铸坯的润滑具有重要影响,将结晶器液面水口两侧1/4点的液位测量值与窄面附近的液位测量值之差用于衡量驻波高度水平,从图

7 中可以看出,采用 I 型水口其驻波高度明显低于 II 型水口,气体流量在 0 ~ 10 L/min,使用两种类型水口的驻波高度都随着气体流量增大而明显地下降,同样表明 I 型水口在液位波动的稳定性方面要优于 II 型水口。

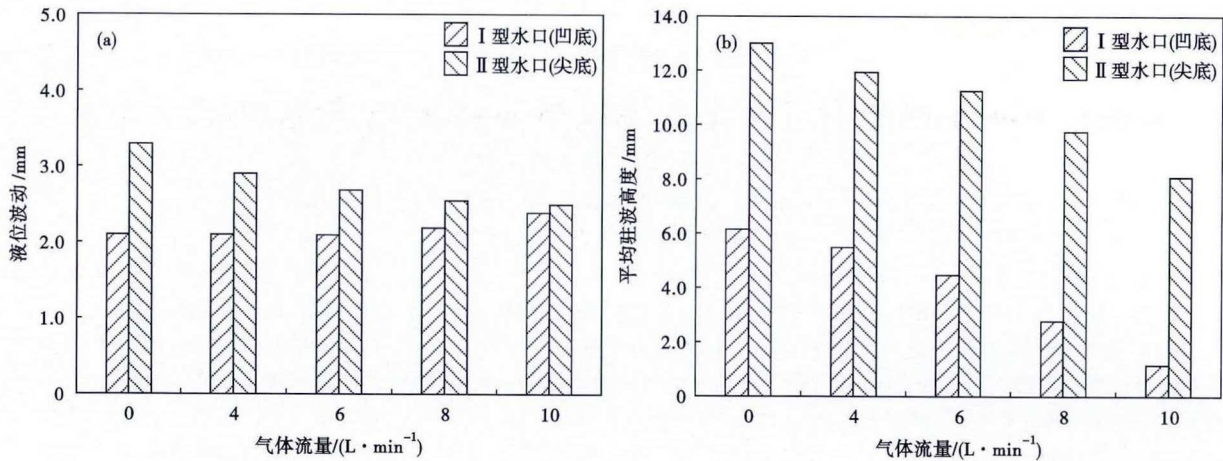


图7 气体流量及水口底部型式对液位波动(a)及驻波高度(b)的影响

Fig. 7 Effect of gas flow rate and nozzle bottom type on mold liquid level fluctuation (a) and standing wave height (b)

综上所述,可知在铸坯断面为 230 mm × 1 200 mm,浇铸速度为 1.6 m/min 的模拟工况条件下,使用 I 型凹底水口的结晶器内流体形状呈现明显的“双辊流”模式,使用 II 型尖底水口的结晶器内流体形态虽然也呈现“双辊流”模式,但偏流现象明显,吹入合适的气体,能改善偏流现象;气体流量在 0 ~ 8 L/min,使用 I 型凹底水口的流体其表面流速平均为 0.25 m/s,而 II 型尖底水口其表面流速平均为 0.38 m/s,合适的弯月面流速不但能为夹杂物去除创造有利条件,而且促进结晶器保护渣的稳定融化,减少卷渣几率,但超过 0.35 m/s 的弯月面表面流速将大幅提高卷渣概率,低于 0.25 m/s 的弯月面表面流速,由于凝固钩过于长大,同样会大幅提高卷渣概率^[6],在采用 I 型凹底水口的条件下,气体流量不能超过 7 L/min; I 型凹底水口其液面波动能稳定控制在 ±2 mm,受气体流量大小影响程度较小, II 型尖底水口其液面波动则控制在 ±2.7 mm,受气体流量大小影响程度较大,液面波动稳定性方面 I 型凹底水口优于 II 型尖底水口。

依据水模拟的结果,对 2[#]板坯连铸机的水口使用策略进行了优化,即铸坯规格为 230 mm × (950 ~ 1 500) mm 使用的水口由优化前的 II 型尖底水口优化为 I 型凹底水口;塞棒吹氩流量控制在 7 L/min 左右,统计 120 炉 IF 钢生产数据表明,浇铸过程中结晶器液面波动稳定控制在 ±3 mm 以内,后工序反馈夹杂比例同比下降 24%。

3 结论

(1) 在结晶器断面规格为 230 mm × 1 200 mm,浇铸速度为 1.6 m/min 的模拟工况条件下, I 型凹底水口及 II 型尖底水口的结晶器内流体形状都呈现

“双辊流”模式,但使用 II 型尖底水口的流体形状有较严重的偏流现象,吹入适当的气体,能改善其偏流现象。

(2) 气体流量在 0 ~ 8 L/min,使用 II 型尖底水口的流体其表面流速明显高于使用 I 型凹底水口的流体;对 I 型凹底水口而言,气体流量超过 8 L/min,其流体表面流速低于 0.2 m/s。

(3) I 型及 II 型两种水口其结晶器液面波动都能控制在 ±3 mm 以内, I 型凹底水口优于 II 型尖底水口,气体流量在 0 ~ 10 L/min, I 型凹底水口其液面波动受气体流量变化影响程度小,而 II 型尖底水口受气体流量变化影响程度大。

参考文献

- [1] Manabu Iguchi, Jin Yoshida and Tomoyuki Shimizu, et al. Model Study on the Entrapment of Mold Powder into Molten Steel[J]. ISIJ International, 2000, 40(7): 685-691.
- [2] 邓小旋,熊霄,王新华,等. 水口底部形状对高拉速板坯连铸结晶器液面特征的影响[J]. 北京科技大学学报, 2014, 36(4): 515-522.
- [3] 丁晖,王延峰,金汉青. 吹氩下不同水口类型的结晶器流场和温度场的数值模拟[C]. 第十届中国钢铁年会暨第六届宝钢学术年会论文集,上海; 2015: 1-5.
- [4] Norifumi Kasai and Manabu Iguchi. Water Model Experiment on Melting Powder Trapping by Vortex the Continuous Casting Mold[J]. ISIJ International, 2007, 47(7): 982-987.
- [5] 肖太平,倪红卫,孔勇江,等. 水口扩张角对 230mm × 1300mm 板坯结晶器流场及氩气泡行为的影响[J]. 特殊钢, 2015, 36(2): 13-16.
- [6] Lance C Hibbeler and Brian G Thomas. Mold Slag Entrapment Mechanisms in Continuous Casting Molds[C]. Association for Iron and Steel Technology Proceedings. Pittsburgh(2013): 1215.

刘启龙(1976-),男,博士生(钢铁研究总院),高级工程师,1999 年华东冶金学院(本科)毕业,连铸坯质量控制及新产品开发。E-mail: LIUQL888@126.com

收稿日期:2017-10-24