

230 mm 板坯连铸结晶器浸入式水口结构的优化

时朋召^{1,2} 邱春根^{2,3} 徐李军² 仇圣桃² 潘贻芳⁴ 赖朝彬¹

(1 江西理工大学冶金与化学工程学院, 赣州 341000; 2 钢铁研究总院连铸技术国家工程研究中心, 北京 100081;
3 江西理工大学材料科学与工程学院, 赣州 341000; 4 天津钢铁集团有限公司 300399)

摘要 采用几何相似比1:2水模型研究了230 mm × 1 250 mm 板坯结晶器原浸入式水口(下孔直径78 mm, 侧孔长轴80 mm, 短轴66 mm)和缩小孔面积的优化水口(下孔直径65 mm, 侧孔长轴75 mm, 短轴60 mm)结晶器液面波动、冲击深度, 流场分布和保护渣覆盖情况。结果表明, 同种工况下, 优化水口下液面波动更活跃, 液渣层相对均匀, 即减小水口侧孔面积, 能提高流股出口速度, 有利于保护渣熔化; 钢厂生产DP600钢230 mm × 1 250 mm 铸坯测定结晶器内液渣层的厚度表明, 当水口浸入深度130 mm, 通钢量2.8 t/min时, 使用原有水口时液面不太活跃, 液渣层厚度差为12~13 mm, 使用优化水口时, 液面较活跃, 液渣层厚度差为3~5 mm。

关键词 230 mm × 1 250 mm 连铸板坯 结晶器 水模型 浸入式水口结构优化 保护渣熔化

Optimization of Structure of Submerged Nozzle for 230 mm Slab Casting Mold

Shi Pengzhao^{1,2}, Qiu Chungeng^{2,3}, Xu Lijun², Qiu Shengtao², Pan Yifang⁴ and Lai Chaobin¹

(1 School of Metallurgical and Chemical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000;
2 National Research Center of Continuous Casting Technology, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081;
3 School of Materials Science and Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000;
4 Tianjin Iron and Steel Group Co Ltd, Tianjin 300399)

Abstract The mold liquid surface fluctuation, impact depth, distribution of flow field and powder covering condition with using original submerged nozzle (lower hole diameter 78 mm, side hole long axis 80 mm and short axis 66 mm) and with using optimized submerged nozzle of reduced hole dimension (lower hole diameter 65 mm, side hole long axis 75 mm and short axis 60 mm) for mold of 230 mm × 1 250 mm casting slab have been studied by using geometric similarity 1:2 water model. Results show that in same working procedure condition with using optimized submerged nozzle the liquid surface fluctuation is more active, the thickness liquid slag layer is relative uniform, i. e. reducing side hole area of nozzle is available to increase the velocity of flow at outlet and favorable to melt the mold powder. By measured the thickness of liquid slag layer in mold for casting 230 mm × 1 250 mm slab of steel DP600 at steelworks the results show that with nozzle submerged depth 130 mm and steel flow rate 2.8 t/min, by using the original nozzle the liquid surface in mold is less active and the difference of thickness of liquid slag layer in mold is 12~13 mm, but the liquid surface in mold is rather active and the difference of thickness of liquid slag layer is 3~5 mm by using optimized nozzle.

Material Index 230 mm × 1 250 mm Slab Casting, Mold, Water Model, Optimization of Submerged Nozzle Structure, Mold Powder Melting

据统计近80%的表面缺陷起源于结晶器^[1], 而结晶器内钢液流动状态不仅对结晶器的传热和夹杂物上浮有影响, 而且还对结晶器内钢液的净化、凝固, 铸坯表面质量具有重要影响^[2]。因此研究钢液的流动状态显得尤为重要, 国内外众多学者对结晶器内流动状态进行了研究^[3-5], 而研究钢液的流动形态即是: 研究工作拉速、浸入式水口的结构尺寸、插入深度及吹气量等因素对液面波动、流场、冲击深度及保护渣覆盖情况的影响。

钢厂中间包容量70 t, 采用双流浇铸且结晶器断面为230 mm × 1 250 mm, 浇铸钢种有DC04、DP600、Q345B等, 在原有水口条件下铸坯表面裂纹等质量问题时有发生。本文采用水模拟的方法对该铸机水口进行研究, 以液面波动和保护渣覆盖为依据, 在波高合适(1.5~3.0 mm)的前提下, 保护渣稍活跃有利于铸坯质量的提高。

1 实验原理及装置

钢液在结晶器中运动时受到了包括惯性力、重

力、粘性力和表面张力的综合作用,而包含这些力的相似准数有:弗鲁德准数(Fr)、雷诺准数(Re)和韦伯准数(We)。因钢液在大部分区域处于湍流状态,可以忽略粘性力的影响,所以流体主要是重力和惯性力的作用,须满足 $(Fr)_m = (Fr)_p$,由此推出式(1)。

$$\left(\frac{u^2}{gl}\right)_m = \left(\frac{u^2}{gl}\right)_p \quad (1)$$

式中: p -原型参数; m -模型参数,以下相同。

实验采用水作模化介质,根据实验室条件,建立了1:2的缩小物理模型,模型采用有机玻璃制做。由公式(1)及长度相似比 $\lambda = 0.5$ 可得出时间、速度及流量相似比,计算公式及结果如式(2)~(4),并由此计算出具体的实验工艺参数。

时间相似比为:

$$\lambda_t = \frac{\lambda_l}{\lambda_v} = \frac{\lambda_l}{\sqrt{\lambda_l}} = \sqrt{\lambda_l} = 0.7071 \quad (2)$$

速度相似比为:

$$\lambda_u = \frac{u_m}{u_p} = \sqrt{\lambda_l} = 0.7071 \quad (3)$$

流量相似比为:

$$\lambda_Q = \frac{Q_m}{Q_p} = \frac{u_m \cdot A_m}{u_p \cdot A_p} = \lambda_u \cdot \lambda_l^2 = \lambda_l^{2.5} = 0.177 \quad (4)$$

式中: u -速度/ $(m \cdot s^{-1})$; ν -动力粘度/ $(m^2 \cdot s^{-1})$; l -长度/ m ; Q -流量/ $(m^3 \cdot s^{-1})$; λ -相似比; A -面积/ m^2 。

结晶器的物理模拟实验装置(图1),主要由水路系统和数据采集系统组成,形成“中间包-浸入式水口-结晶器-水泵-流量计-中间包”的闭路循环系统。

原有水口及优化水口的具体结构尺寸及示意图如表1、图2所示,两水口均为跑道型,侧孔倾角未变,而优化水口Y1较原有水口X1的侧孔面积更小,且下中孔面积更小。

本实验设计时进行了吹气,采用了透气塞及直

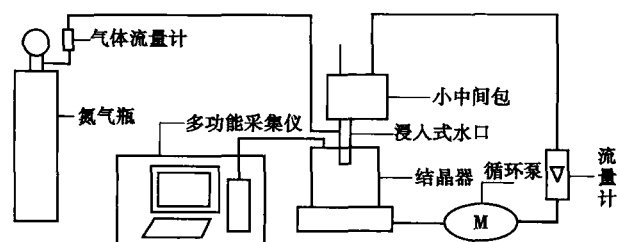


图1 水模型实验装置图

Fig.1 Schematics of experimental device of water model

表1 原有水口X1及优化水口Y1的结构尺寸
Table 1 Size of structure of original nozzle X1 and optimized nozzle Y1

水口	下孔直径/ mm	侧孔/mm		倾角/ $^\circ$
		侧长(L)	侧宽(H)	
原有水口 X1	78	80	66	-15
优化水口 Y1	65	75	60	-15

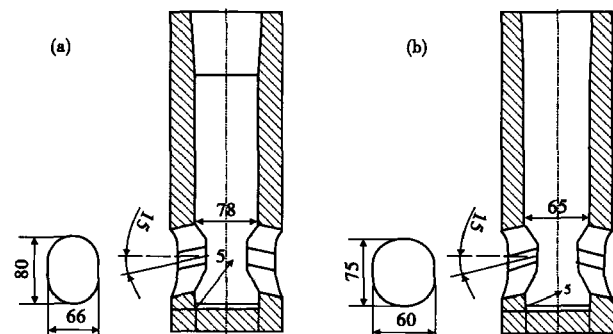


图2 (a)原有水口X1;(b)优化水口Y1结构示意图

Fig.2 Schematics of nozzle structure of original nozzle X1(a) and optimized nozzle Y1(b)

管式吹气两种方式。

2 实验方法及方案

本次实验主要包含测量液面波动、显示流场与测量冲击深度,并用与保护渣运动粘度相似的混合油模拟保护渣覆盖情况。采用了中国水利水电科学院开发的DJ800型多功能监测系统以及设备波高仪来采集结晶器液面波动曲线,从而得到液面波动参数。选取的3个波高测点均在结晶器的厚度方向的轴心线上,其中1#测点在距离窄边约50 mm处,2#测点在宽面1/4处,3#测点在距离水口外壁约50 mm处;实验通过在水口中部注入墨水使水流着色,并用摄像机记录墨水的扩散情况,冲击深度为液面至冲击最低点的距离;模拟保护渣覆盖情况时需满足 $\nu_{液}/\nu_{钢} = \nu_{油}/\nu_{水}$,调节煤油和真空泵油的比例为1:3,并对流量进行修正,然后采用修正流量进行实验。

在铸坯断面230 mm × 1250 mm下,对原有水口X1及优化水口Y1进行物理模拟实验,实验包括3个影响因素,每个影响因素包括3个水平,采用控制变量法进行实验,并对实验结果进行综合分析。根据实际工艺参数及相似原理,得出物理模拟实验中原型及模型的各工艺参数,具体参数如表2所示。若无特殊说明,下文中的断面、通钢量、插入深度、吹气量均指原型中的数据,而波高、冲击深度、液渣层厚度均是指模型中测得的数据。

3 实验结果及分析

3.1 液面波动的结果与分析

结晶器内液面波动过大会导致卷渣,不利于钢液纯净度;而液面波动过小,不利保护渣熔化,同样

对铸坯的质量产生不利影响^[6]。因此,研究了不同的工艺条件对液面波动的影响,对数据进行了处理分析,图3~图5中的取样1#、2#、3#表示的是结晶器中波动仪采集波高的位置。

(1)水口优化前后的液面波动对比。通钢量取2.8 t/min,吹气量和插入深度都一定时,水口优化前后的波高如图3所示。发现优化水口后的液面波动更加活跃,且整体波动更加稳定,优化水口Y1比原有水口X1下的波高大0.3~0.5 mm,而原有水口X1下的窄边波动较小,不利于弯月面保护渣熔化。

(2)吹气量对液面波动的影响。优化水口Y1,通钢量为2.6 t/min,插入深度为130 mm时,改变吹气量的大小,液面波动情况如图4(a)。由图4(a)可知,吹气量由5 L/min增加为9 L/min,液面波动

表 2 原型和水模型的工艺参数

Table 2 Parameters of process of prototype mold and water model

方案 编号	断面/(mm×mm)		通钢量/ (t·min ⁻¹)	流量/(m ³ ·h ⁻¹)			吹气量		插入深度/mm	
	原型	模型		原型	模型	模型 (修正)	原型/ (L·min ⁻¹)	模型/ (L·h ⁻¹)	原型	模型
1	230×1250	115×625	2.6	21.37	3.78	1.78	5	61	110	55
2	230×1250	115×625	2.8	23.01	4.07	1.92	7	85	130	65
3	230×1250	115×625	3.0	24.66	4.36	2.06	9	110	150	75

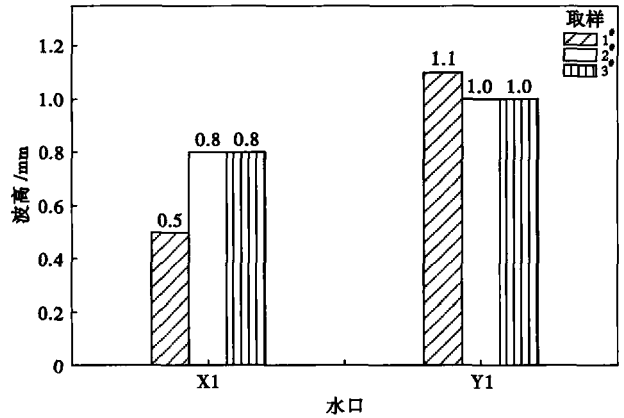


图3 原有水口X1和优化水口Y1结构对结晶器液面波动的影响

Fig. 3 Effect of structure of original nozzle X1 (a) and optimized nozzle Y1 on fluctuation of liquid surface in mold

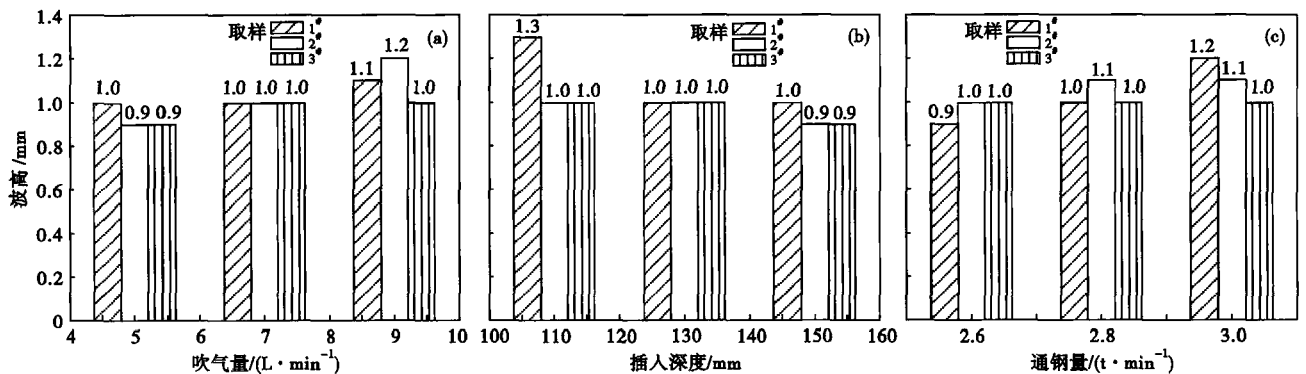


图4 优化水口Y1吹气量(a),插入深度(b)和通钢量(c)对结晶器液面波动的影响

Fig. 4 Effect of optimized nozzle Y1 gas blowing rate (a), submerged depth (b) and steel flow rate (c) on fluctuation of liquid surface in mold

总体加大,波高由0.9~1.0 mm加大为1.0~1.2 mm,且液面整体波动趋于平稳。

(3)插入深度对液面波动的影响。优化水口Y1,通钢量为2.6 t/min,吹气量为7 L/min时,调整水口插入深度的大小,得出液面波动的情况如图4(b)。由图4(b)可发现,随着插入深度由110 mm增加到150 mm时,液面波动总体变小,波高由1.0~1.3 mm降为0.8~0.9 mm。

(4)通钢量对液面波动的影响。在每个固定断

面下,通钢量对应的则是工作拉速,现研究工作拉速对液面波动的影响,即调整通钢量,比较液面波动情况。优化水口Y1下,插入深度取130 mm,吹气量取7 L/min,液面波动统计情况如图4(c)。由图4(c)波动数据可知,随着通钢量由2.6 t/min增加为3.0 t/min时,液面波动量变大,波高由0.9~1.0 mm变大到1.0~1.2 mm,液面整体波动变大。

(5)不同吹气方式对液面波动的影响。在通钢量3.0 t/min、插入深度150 mm、吹气量7 L/min的

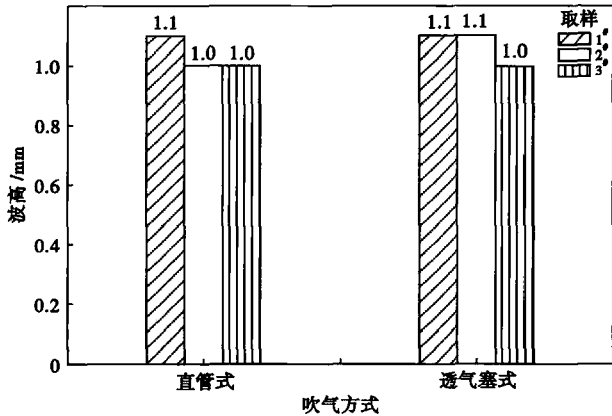


图 5 吹气方式(直管式,透气塞式)对结晶器液面波动的影响

Fig. 5 Effect of blowing mode (straight tube type and vent plug type) on fluctuation of liquid surface in mold

条件下对使用透气塞和不用透气塞(直管式)吹气进行实验,得出的液面波动数据如图 5 所示。由图 5 可知,发现直管式通气与透气塞通气的液面波高差别不大。

3.2 流场及冲击深度的结果与分析

分别列出原有水口 X1 及优化水口 Y1 在一定工艺条件下的流场分布,即通钢量取 2.8 t/min,插入深度取 130 mm,吹气量取 7 L/min 条件下的结晶器内墨水流场分布,比较结果如图 6 所示,同时在表 3 中列出优化前后水口在某工况下的冲击深度测量结果。

比较图 6(a)(b)的流股示意图,可以得出,优化前后水口下的流场形态差别不大,从水口流出的流股冲击窄边后形成成分上下两个部分,流股张角较大,且分布较分散,冲击到窄边较大面积上。根据相同时间内流股的流动距离,可知优化水口 Y1 较原有水口 X1 的冲击速度更大;而从表 3 和图 6 流股的示意图可发现原有水口 X1 比优化水口 Y1 的冲击深度更大,且冲击深度在 8~16 mm。由此可知,在其他条件一定时,侧孔面积越大,冲击深度也越大;同时,侧孔面积增大,冲击速度减小。

3.3 保护渣覆盖情况的结果与分析

保护渣模拟实验时采用修正流量,插入深度为 130 mm,分别在原有水口 X1 和优化水

口 Y1 下调整流量的大小,保护渣覆盖情况如表 4 所示。

从保护渣模拟结果可以看出,一般情况下,靠近结晶器窄边的液渣层略薄,水口中间相对较厚;而且随着通钢量增大,即工作拉速增大,渣层的最大厚度差变大,即液渣层的不均匀程度增加,这主要是上部回流冲击和剪切作用造成的。相同工艺条件下,优化水口 Y1 较原有水口 X1 下的保护渣更加活跃,且优化水口 Y1 最大厚度差在 3~5 mm,原有水口 X1 下的水油界面不太活跃,对化渣不利,而优化水口 Y1 下水油界面较活跃,有利于保护渣熔化。

表 3 原有水口 X1 和优化水口 Y1 的流量、插入深度、吹气量和冲击深度

Table 3 Flow rate, submerged depth, gas blowing rate and impact depth with using original nozzle X1 and optimized nozzle Y1

水口	流量/ (t · min ⁻¹)	插入深度/ mm	吹气量/ (L · min ⁻¹)	冲击深度/ mm
原有水口 X1	2.6	130	7	196.4
	2.8	130	7	188.9
优化水口 Y1	2.6	130	7	180.3
	2.8	130	7	176.3

表 4 原有水口 X1 及优化水口 Y1 的结晶器保护渣覆盖情况
Table 4 Mold powder covering conditions with using original nozzle X1 and optimized nozzle Y1

水口	流量/ (t · min ⁻¹)	液渣 厚度	两窄边	最大厚度 差/mm	水油界面
原有水口 X1	2.6	均匀	-	1.0	轻微波动
	2.8	均匀	较薄	1.0	轻微波动
	3.0	均匀	较薄	2.0	轻微波动
优化水口 Y1	2.6	较均匀	较薄	3.0	较活跃
	2.8	较均匀	较薄	3.0~4.0	较活跃
	3.0	较均匀	较薄	5.0	活跃

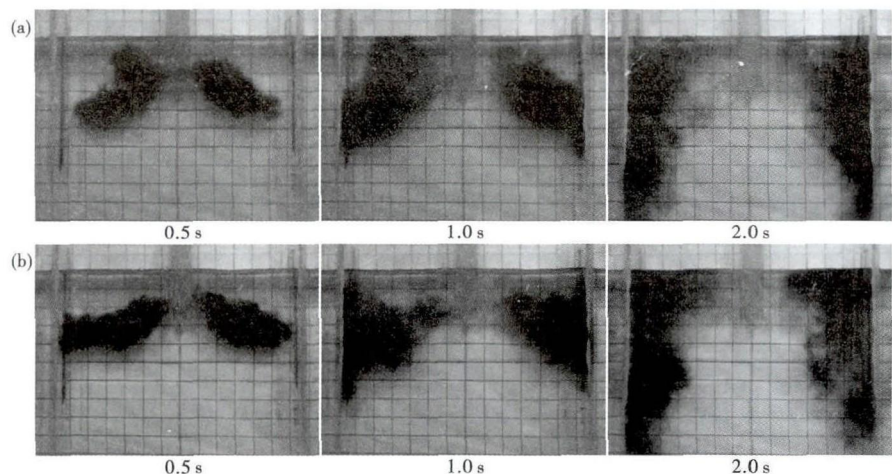


图 6 结晶器流场 0.5, 1.0, 2.0 s 示意图:(a)原有水口 X1;(b)优化水口 Y1
Fig. 6 Schematics of flow field with original nozzle X1 (a) and optimized nozzle Y1 (b) for 0.5 s, 1.0 s and 2.0 s

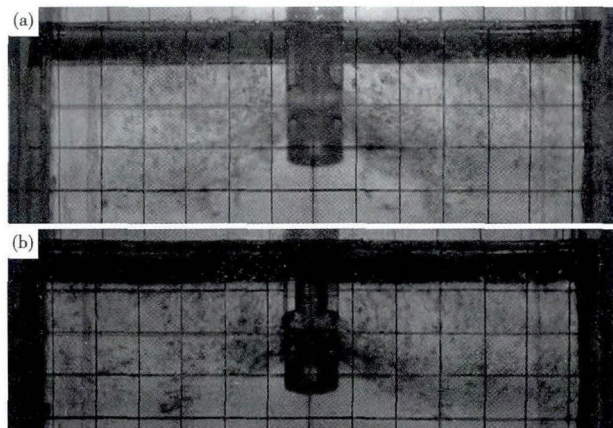


图 7 优化水口 Y1 使用(a)直管式和(b)透气塞式吹气方式的气泡分布图

Fig. 7 Diagram of distribution of bubbles by using straight tube type (a) and vent plug type (b) gas blowing mode, optimized nozzle Y1

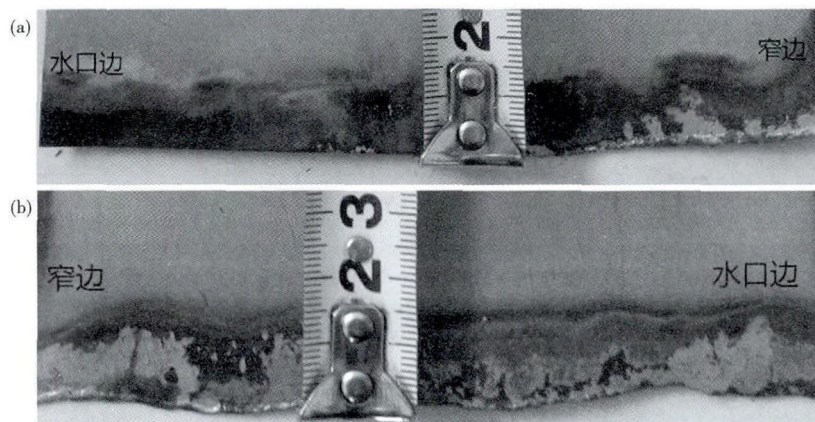


图 8 生产 DP600 钢 230 mm × 1 250 mm 铸坯时,水口浸入深度 130 mm,钢水流量 2.8 t/min 时结晶器液渣层厚度分布:(a)原有水口 X1;(b)优化水口 Y1

Fig. 8 Distribution of thickness of liquid slag in mold during casting 230 mm × 1 250 mm slab of steel DP600 with nozzle submerged depth 130 mm and molten steel flow rate 2.8 t/min; (a) original nozzle X1; and (b) optimized nozzle Y1

3.4 不同吹气方式下气泡分布的结果与分析

在优化水口 Y1 下,取通钢量 2.8 t/min,水口插入深度 130 mm,吹气量 7 L/min 时的气泡分布如图 7。观察图 7 发现,直管式通气与透气塞通气后的气泡分布及分布差别不大,即气泡大小相差不大,在结晶器宽断面上的分布也几乎一致。

4 优化水口现场验证

铸坯断面为 230 mm × 1 250 mm,在现场浇铸 DP600 钢时,当浸入深度 130 mm,通钢量 2.8 t/min 时,用不锈钢板来测量液渣层的厚度,并从渣层的厚度及液面波动情况,来验证优化水口的合理性。

分别采用原有水口 X1、优化水口 Y1 测得的结

晶器内液渣层厚度如图 8 所示,由图 8 可知,原有水口 X1 的液渣层分布均匀,液面不太活跃,液渣层厚度差在 12 ~ 13 mm,而优化水口 Y1 下的液渣层厚度分布较均匀且液面较活跃,此时液渣层厚度为 13 ~ 14 mm,靠近窄边位置的液渣厚度为 10 mm。

5 结论

(1) 优化水口 Y1 较原有水口 X1 下的液面波动更加活跃,即侧孔面积减小,流股冲击速度增加;同种工况下,优化水口 Y1 较原有水口 X1 下的保护渣更加活跃,且优化水口 Y1 最大厚度差在 3 ~ 5 mm,而冲击深度稍小,液渣层厚度分布均匀,且无卷渣情况,故优化水口 Y1 更加适合该断面下的铸坯生产。

(2) 优化水口 Y1 下,吹气量由 5 L/min 增加为 9 L/min 时,波高值由 0.9 ~ 1.0 mm 增加至 1.0 ~ 1.2 mm,且液面整体波动趋于平稳;通钢量由 2.6 t/min 增加为 3.0 t/min 时,波高值由 0.9 ~ 1.0 mm 增加至 1.0 ~ 1.2 mm;而插入深度由 110 mm 增加至 150 mm 时,波高值由 1.0 ~ 1.3 mm 减小为 0.8 ~ 0.9 mm,而水油界面活跃程度降低。

(3) 其他条件一定时,直管式通气与透气塞通气的液面波动总体几乎一致,且气泡大小及分布也差别不大。

参考文献

- [1] Hintikka S, Kontinen J, Leiviska K. Optimization of Molten Steel Flow in Continuous Casting Mold [J]. Steelmaking Conference Proceedings, 1992, 75(5-8): 887.
- [2] 张先焯. 冶金原理[M]. 北京:北京钢铁学院出版社, 1988.
- [3] 张 华, 倪红卫, 陈光友, 等. 薄板坯连铸十字出口形浸入式水口结构优化的水模型研究[J]. 特殊钢, 2008, 29(4): 22-24.
- [4] 周 俐, 徐其言, 岳 强. 板坯连铸结晶器水口优化实验研究[J]. 连铸, 2011, 6(3): 15-19.
- [5] 岳 峰, 包燕平, 刘国林, 等. 板坯连铸机浸入式水口的结构优化[J]. 炼钢, 2004, 20(2): 51-54.
- [6] 赵志刚, 胡昆太, 陈远清, 等. 立式板坯连铸机结晶器内液面波动的物理模拟[J]. 特殊钢, 2011, 32(3): 12-34.

时期召(1990-),男,硕士研究生,2014年江西理工大学(本科)毕业,连铸工艺研究。E-mail:shipengzhao1990@163.com

收稿日期:2016-08-08