

250 mm × 1 800 mm 板坯连铸结晶器浸入式水口优化的物理模拟

邱春根^{1,2} 时朋召^{2,3} 徐李军² 仇圣桃² 赵鸿金¹

(1 江西理工大学材料科学与工程学院, 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 江西理工大学冶金与化学工程学院, 赣州 341000)

摘要 采用1:2水模型研究了水口结构(S1-侧孔倾角矩形, 总面积6 868 mm², 倾角-25°; S2-跑道型, 总面积8 468 mm², 倾角-15°; S3-椭圆形, 总面积8 011 mm², 倾角-15°), 拉速0.85~1.05 m/min和浸入深度55~75 mm对结晶器内液面波动、流场分布及保护渣覆盖情况的影响。结果表明, 液面波动量随侧孔面积和倾角减小而增大, 当侧孔面积减小5.4%时, 波动量增加约为32.4%; 波动量随拉速的增加、浸入深度的减小而增加; 冲击深度随侧孔面积、侧孔倾角及拉速的增加而增加。现有水口S2下液面波动过小, 不利于保护渣的熔化与均匀传热; 现有水口S1下的冲击深度过大, 不利于夹杂物的去除。优化水口S3下的液面波动及冲击深度均更加合理, 保护渣更加活跃, 有利于保护渣熔化和去除夹杂物。

关键词 板坯结晶器 水模型 浸入式水口结构 液面波动 流场 保护渣层

Physical Simulation on Optimization of Submerged entry Nozzle for 250 mm × 1 800 mm Slab Casting Mold

Qiu Chunghen^{1,2}, Shi Pengzhao^{2,3}, Xu Lijun², Qiu Shengtao² and Zhao Hongjin¹

(1 School of Materials Science and Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000; 2 National Engineering Research Center of Continuous Casting Technology, Center Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081; 3 School of Metallurgy and Chemical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000)

Abstract With using geometric similarity 1:2 water model, the effect of nozzle structure (lateral holes type, hole dimension and dip angle: S1-rectangle, 6 868 mm², -25°; S2-racing way type, 8 468 mm², -15°; S3-ellipse, 8 011 mm², -15°), casting speed (0.85~1.05 m/min) and immersion depth (55~75 mm) on mold liquid level fluctuation, distribution of flow field and mold flux coverage condition has been studied. Results show that with decreasing dimension and dip angle of lateral holes, the liquid surface wave height increases, as dimension of lateral holes decreases by 5.4%, the wave height increases by about 32.4%; with increasing casting speed and decreasing immersion depth the wave height increases; and with increasing dimension and dip angle of lateral holes and casting speed the impact depth increases. With present nozzle S2 the fluctuation of liquid level is very small it is unfavorable for melting mold powder and uniformly heat-transferring and with present nozzle S1 the impact depth is too large, it is unavailable to remove inclusions in liquid, but with optimized nozzle S3 the fluctuation of liquid level and impact depth are more reasonable, the flux becomes more active, it is available to melt mold powder and remove inclusions in liquid.

Material Index Mold for Casting Slab, Water Model, Structure of Submerged Nozzle, Fluctuation of Liquid Level, Flow Field, Mold Flux Layer

结晶器在连铸生产过程中是高效率的传热器、凝固成型器、钢水净化器、铸坯表面质量控制器^[1]。通过优化结晶器浸入式水口的结构尺寸、浸入深度、拉速等工艺参数可以掌握并改善结晶器内钢液的流动状态,从而提高铸坯质量^[2,4]。而直接研究钢水的流动情况难度较大,可根据相似原理,采用水介质来模拟钢液的流动特性,这不仅使得研究切实可行,而且成本大为降低。针对钢厂在现有水口生产和工艺条件下,出现铸坯边角部夹渣及表面裂纹等质量问题。本文根据连铸结晶器尺寸与工艺参数,建立了水力学实验模型,欲通过水力学模拟实验来优化水

口,确定优化效果。

1 实验原理与装置

惯性力、重力、粘性力和表面张力为钢液在结晶器内流动时受到的作用力,包含这些力的相似准数有雷诺准数(Re)、弗鲁德准数(Fr)和韦伯准数(We)。而对于连铸工艺,在注流的动量和重力作用下,结晶器的原型与模型雷诺数均大于100 000^[5],在结晶器内大部分区域处于湍流状态,流体所受力主要为惯性力和重力。根据相似原理建立物理模型,原型与模型的弗鲁德准数须相等^[6-7]。即:

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

式中： u - 流速 ($m \cdot s^{-1}$)； l - 定性长度 (m)； g - 重力加速度； p - 原型； m - 模型。

实验采用水介质来模拟钢液的流动特性，使用有机玻璃建立 1:2 的缩小物理模型。根据式 (1) 和数值为 0.5 的长度相似比 λ_l ，可以推导出速度相似比 λ_u 为 0.707 1，流量相似比 λ_Q 为 0.177。

结晶器水力学模拟实验装置如图 1 所示，主要包括水路系统和数据采集系统。水路系统为“中间包-浸入式水口-结晶器-水泵-流量计-中间包”的闭环系统，结晶器内液面位置通过阀门调节，拉速通过流量计控制。数据采集使用中国水利科学院研制的 DJ800 型水工数据采集系统。在结晶器宽断面侧放置了高速摄像机，用于记录结晶器内流场。

2 实验方案

本实验中的 3 个水口均为双侧开孔浸入式水口，结构参数如表 1。3 个水口的结构简图如图 2 所示，水口的中下孔截面均为跑道型，侧孔按一定角度朝下，水口 S1 侧孔为带倒角矩形，水口 S2 侧孔为跑道型，水口 S3 侧孔为椭圆形，其中 S1、S2 为现有水口，S3 为优化水口。

根据现场生产工艺参数，在 250 mm × 1 800 mm 断面下 (原型尺寸)，对现有水口及优化水口在不同工艺参数 (拉速、浸入深度) 条件下进行水力学模拟实验，具体实验参数根据现场数据及相似原理确定，工艺参数如表 2 所示，采用控制变量的方法进行实验，实验后对所有数据进行处理分析。

实验选取了 3 个具有代表性的测量点，如图 3(a) 所示，3 个测点均在结晶器厚度中心位置，其中 1# 测点在距离窄面 50 mm 处，2# 测点在大约宽面 1/4 处，3# 测点在距离水口外壁 50 mm 处。对测得的波高数据进行处理分析，一工况的波高数据如图 3(b)。

为考察结晶器内流场状态，在水口中部注入墨水，使得流股着色，以显示流场状态。使用高速摄像机录制流场动态分布视频，然后采用截图软件截取各个时间点的图片。观察流场分布状态，并对冲击深度进行统计，冲击深度为流股冲击到窄面时的冲击点距液面的距离。

保护渣的模拟需保证“油-

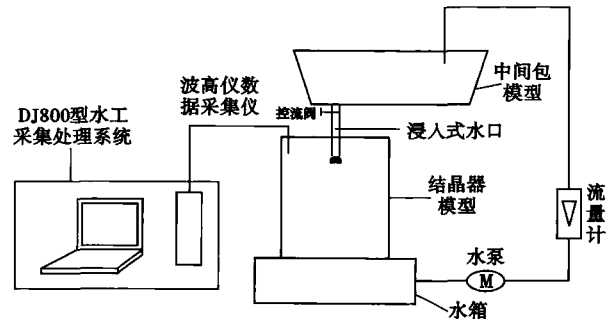


图 1 水模拟实验装置

Fig. 1 Schematics of experimental device of water modelling

表 1 现有水口及优化水口的结构尺寸

Table 1 Structure size of present nozzle and optimized nozzle

水口	侧孔尺寸				侧孔倾角/ $^\circ$
	侧长 L / mm	侧宽 H / mm	倒角半径/ mm	双侧孔总 面积/ mm^2	
S1	80	44	10	6 868	-25
S2	90	54	27	8 468	-15
S3	85	60		8 011	-15

表 2 水模拟实验参数

Table 2 Experimental parameters of water modelling

拉速/ ($m \cdot min^{-1}$)	流量/($m^3 \cdot h^{-1}$)			浸入深度/mm	
	原型	模型	修正	原型	模型
0.85	24.92	4.40	2.08	130	55
0.95	27.85	4.92	2.32	150	65
1.05	30.78	5.44	2.57	170	75

水”运动粘度比值与“渣-钢”的相等，本实验采用 1:3 的煤油和真空泵油的混合油来模拟保护渣。模拟时，混合油的厚度约为 15 mm。在保护渣模拟实验中，钢、渣 (水、油) 界面的流动属两相流动，钢液 (水) 的流动状态受液渣 (油) 的影响，因此需要对其流量进行修正。S3 水口下、拉速 1.05 m/min、浸入深度 130 mm 时保护渣覆盖情况如图 4 所示。

3 实验结果与分析

3.1 液面波动结果与分析

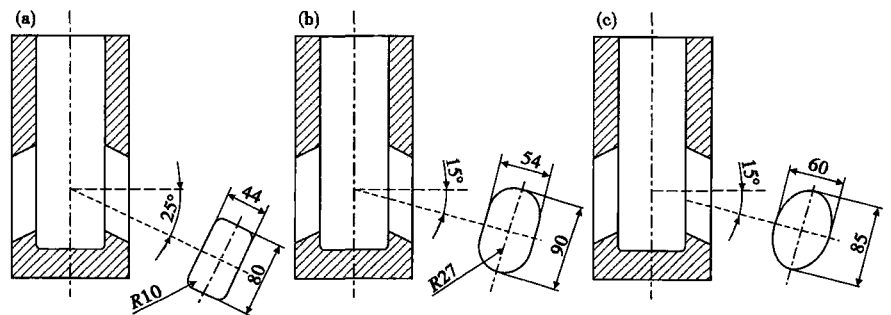


图 2 (a) S1; (b) S2 和 (c) S3 水口侧孔结构简图

Fig. 2 Schematics of lateral holes structure of nozzle S1 (a), S2 (b) and S3 (c)

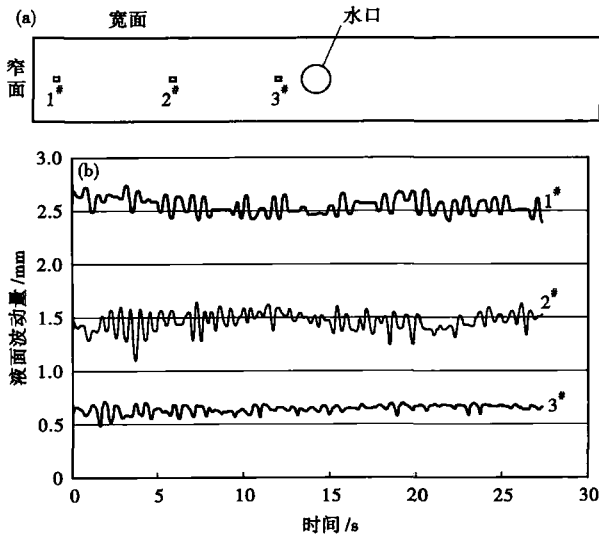


图3 结晶器内液面波高测量点(a)和液面波动曲线(b)
Fig.3 Location of measuring point of liquid level fluctuation (a) and curves of liquid level fluctuation (b) in mold

对现有水口(S1、S2)及优化水口(S3),在250 mm × 1 800 mm 断面下,选取3个拉速(0.85、0.95、1.05 m/min),3个浸入深度(110、130、150 mm)进行实验,使用DJ800系统进行数据采集,并进行数据分析。

3.1.1 水口结构对液面波动的影响

实验中对波高数据进行多次采集,具体实验方案参数如表3,实验后进行数据处理分析,分别得出3个测点的波高值,为对比3个水口的液面波动情况,对3个测点波高值求平均值,实验结果如图5。

水口S1、S2及S3的液面波动情况对比如图5所示,当其它工艺参数相同时,3个水口液面波动大

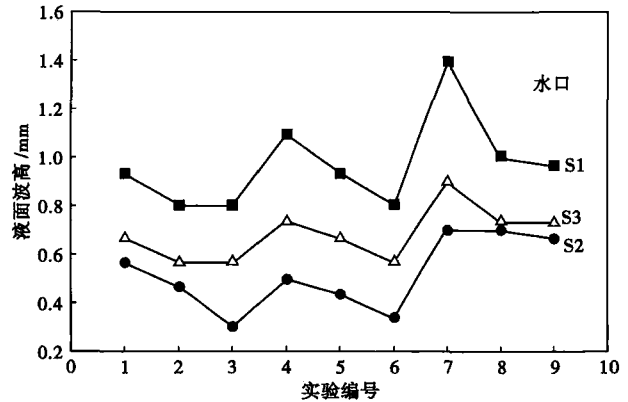


图5 水口S1、S2和S3下的液面波高
Fig.5 Wave height of liquid surface with nozzle S1, S2 and S3

小为 $S1 > S3 > S2$;同时,对比分析3个水口同一测点的波高数据,3个水口下的波动量与上述结果一致。优化水口S3相对于水口S2,其侧孔面积减小5.4%,波动量增加约为32.4%,故随着水口侧孔面积减小,液面波动增加。这是由于随着侧孔面积减小,流股出口速度增加,使得流股冲击到窄面后上回流股的动能增加,从而使得液面波动量增加。优化水口S3相对于水口S1,侧孔面积增加16.6%,侧孔倾角由朝下的25°角变为15°,其波动量减小约29.8%。此时S3~S1侧孔面积改变百分比明显大于S3~S2,而波动量改变百分比与S3~S2相差不大,故其波动量的改变是侧孔面积与侧孔倾角综合作用的结果,其中侧孔面积的影响较大。随着侧孔面积增大,波动量减小。波动量则随着侧孔倾角的增加而减小,这是由于侧孔倾角增加使得流股冲击到窄面的位置下移,上回流股到达液面时的动能减小,从而使得液面波动减小。

3.1.2 拉速对液面波动的影响

为研究拉速对结晶器内液面波动的影响,根据现场拉速,选取3个拉速(0.85、0.95、1.05 m/min)进行实验,针对浸入深度为130 mm,不同拉速下液面波动情况如表4。结合图5可知,随着拉速增加,液面波动愈加剧烈,波动量增加;实验表明,对于110 mm及150 mm浸入深度,其呈现规律与上述基本一致。这是由于拉速增加,使得流股冲击动量增加,

回流股到达液面时携带更大的能量,从而使得波动量增加。

3.1.3 浸入深度对液面波动的影响

为研究浸入速度对结晶器

表3 波高测定实验工艺参数

Table 3 Process parameters in wave height measuring

实验编号	拉速/(m · min ⁻¹)	浸入深度/mm
1	0.85	110
2	0.85	130
3	0.85	150
4	0.95	110
5	0.95	130
6	0.95	150
7	1.05	110
8	1.05	130
9	1.05	150

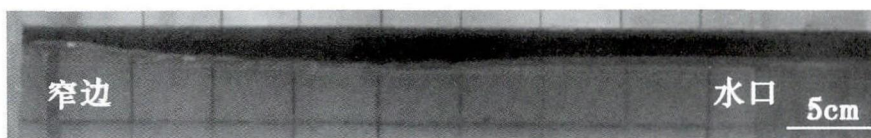


图4 结晶器保护渣覆盖情况
Fig.4 Mold flux coverage condition

表 4 拉速对液面波动的影响/mm

Table 4 Effect of casting speed on liquid level fluctuation/mm

拉速/ (m·min ⁻¹)	水口 S1			水口 S2			水口 S3		
	1#	2#	3#	1#	2#	3#	1#	2#	3#
0.85	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.4	0.7	0.7	0.3
0.95	1.2	0.9	0.7	0.5	0.4	0.4	0.7	0.8	0.5
1.05	1.1	1.1	0.8	0.8	0.8	0.5	0.9	0.9	0.4

内液面波动的影响,选取 3 个浸入深度(110、130、150 mm)进行研究,拉速 0.95 m/min 下的数据如表 5。由表 5 可知,随着浸入深度的增加,液面波动呈现减小趋势,这是因为液面波动是上回流股产生的,当浸入深度增加时,使得流股冲击到窄面的位置下移,上回流股冲击到液面时所经历的距离增加,使得能量损失加大,从而使得波动量减小。对比 3 个测点的波动量大小,发现一般 1# 测点,即窄边处的波动量稍大,这是由于上回流股首先到达 1# 测点附近,能量损失更小,剩余携带的动能较大;在对比拉速对液面波动影响规律时,观察到相同的现象

综合水口结构及工艺参数对液面波动的影响,水口 S2 下的液面波动量在 0.3~0.9 mm(原型中为 0.6~1.8 mm),液面波动量过小,不利于保护渣的熔化和钢液的均匀传热。水口优化后波动量增加,而且波动量介于两个现有水口之间,优化水口 S3 的适用性更强。

3.2 流场分布状态分析

由于浸入深度对流场分布影响不大,本实验固定浸入深度为 130 mm 进行研究,其中冲击深度作为流场研究的重点。3 个水口在不同拉速条件下,着色流股出水口 1.0 s 时的流场分布如图 6 所示。由图 6 可知,各水口在不同拉速下的流场形态相差不大。从水口流出的流股冲击窄边后形成上下两个部分,上流股沿窄边冲击液面后向水口流动,形成上部分回旋区,下流股沿窄面向下运动一段距离后向宽面中心流动形成下回旋区。实验发现,流股从水口流出时,水口侧孔的充满度较好,流股张角较大,冲击到窄边较

表 5 浸入深度对液面波动的影响/mm

Table 5 Effect of immersion depth on liquid level fluctuation/mm

浸入深度/ mm	水口 S1			水口 S2			水口 S3		
	1#	2#	3#	1#	2#	3#	1#	2#	3#
110	1.2	1.2	0.9	0.6	0.4	0.5	0.7	0.9	0.6
130	1.2	0.9	0.7	0.5	0.4	0.4	0.7	0.8	0.5
150	0.9	0.8	0.7	0.4	0.3	0.3	0.6	0.7	0.4

大面积上,这样可以避免流股对窄边坯壳的冲击压力过大。随拉速增加,示踪剂扩散速度加快,流股到达窄边和液面的时间缩短,3 个水口在 0.85、0.95、1.05 m/min 拉速下,流股到达窄面的时间分别约为 1.0、0.85、0.75 s,其中水口 S1 下流股到达窄边时间最短。

对 3 个水口在浸入深度 130 mm,拉速 0.95 m/min 下的冲击深度进行统计,S1、S2、S3 下的冲击深度依次为 266.2、240、234.5 mm,水口 S1 下的冲击深度最大。相对于现有水口(S1、S2),优化水口 S3 下的冲击深度有所降低,说明冲击深度随着侧孔面积减小而减小,这是由于侧孔面积减小时,重力作用效果减弱,惯性力作用效果愈加明显。相对于现有水口 S1,优化水口 S3 冲击深度降低 12%,而此时的侧孔面积是增加的,所以冲击深度同时受侧孔面积与侧孔倾角的影响,其中侧孔倾角对冲击深度的影响大于侧孔面积。针对水口 S3,统计了拉速对冲击深度的影响,拉速由 0.85 m/min 增加到 1.05

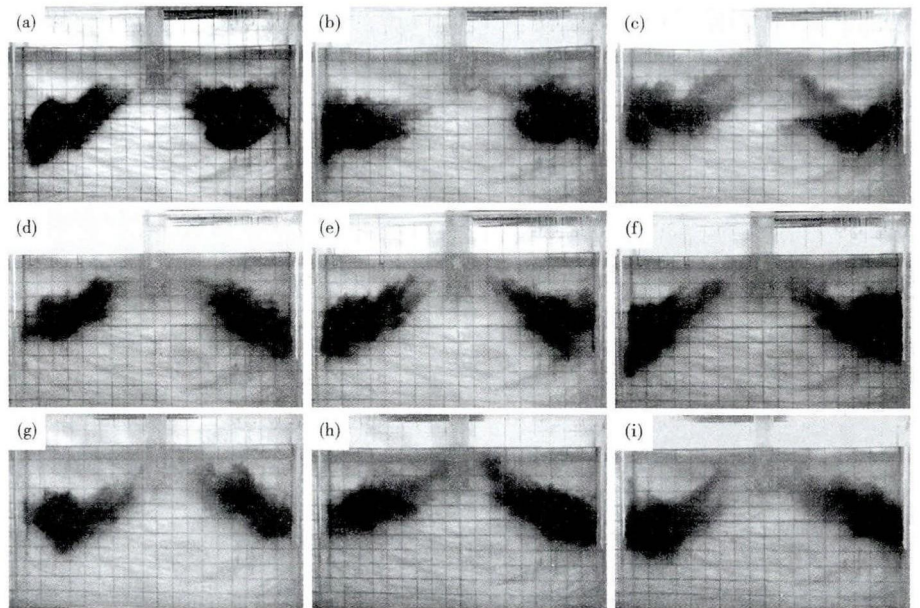


图 6 水口 S1(a)(b)(c)、S2(d)(e)(f)和 S3(g)(h)(i)时流场分布状态,拉速/(m·min⁻¹):(a)(d)(g)0.85;(b)(e)(h)0.95;(c)(f)(i)1.05

Fig. 6 Distribution condition of flow field with nozzle S1 (a) (b) (c), S2 (d) (e) (f) and S3 (g) (h) (i), casting speed/(m·min⁻¹): (a) (d) (g) 0.85; (b) (e) (h) 0.95 and (c) (f) (i) 1.05

m/min时,冲击深度由234 mm增加到247 mm,冲击深度随拉速增加而呈现轻微的增加趋势。

冲击深度越大,夹杂物上浮距离越大,夹杂物在上浮过程中所需克服的静压力增加^[8],不利于夹杂物的去除;而且,冲击深度过大,传输到保护渣的热量不足,导致夹杂物难以被保护渣捕捉。对于现有水口S1,其冲击深度过大,夹杂物留存在钢液中的概率增加。优化水口S3下的冲击深度更加合适,有利于钢液中夹渣物的去除,降低铸坯表面裂纹发生率。

3.3 保护渣覆盖情况模拟

保护渣的铺展情况直接影响夹杂物的吸附效果、熔体传热的均匀性及熔体的吸气特性,对铸坯质量影响重大^[9]。本实验分别考察了3个水口在不同拉速及浸入深度下,保护渣的覆盖情况、钢渣界面的活跃程度及保护渣的厚度差。在0.95 m/min常规拉速下研究了浸入深度的影响,而对于0.85、1.05 m/min拉速,只选取130 mm浸入深度进行研究。

研究发现,保护渣渣层覆盖总体较均匀,不存在钢液裸露现象,且窄边保护渣较薄,距离窄边150~200 mm处渣层较厚,具体情况记录如表6。保护渣在窄边处较薄是因为上回流股对保护渣产生剪切作用,使得窄边处的保护渣向水口方向运动。现有水口S2下的保护渣过于稳定,钢渣界面不够活跃,不利于保护渣的熔化;优化水口S3下,钢渣界面比现有水口下更活跃,并且没有出现卷渣现象。在保证不卷渣的情况下,保护渣活跃有利于保护渣的熔化与均匀传热,因此相对于原有水口,优化水口S3使用性能有所改善。对比分析浸入深度为130 mm时的保护渣覆盖情况,发现拉速加大,渣层最大厚度差

增加,保护渣愈加活跃;而在拉速一定时,浸入深度越大,渣层最大厚度差减小,保护渣愈加稳定。

4 结论

(1)液面波动受侧孔面积与侧孔倾角的综合影响,液面波动量随侧孔面积减小而增大,随着侧孔倾角的增加而减小。其中侧孔面积的影响较大,当侧孔面积减小5.4%时,液面波动量增加约为32.4%。液面波动量随拉速的加大而呈现增加趋势,随浸入深度的增加而呈现减小趋势。

(2)现有水口S2下的液面波动量在0.3~0.9 mm,波动量过小,不利于保护渣的熔化。水口优化后,液面波动量增加,优化水口S3的适用性良好。

(3)冲击深度随侧孔面积减小而呈现减小趋势,随侧孔倾角的增加而呈现增加趋势,随拉速增加而呈现轻微增加趋势。现有水口S1的冲击深度过大,不利于夹渣物的去除,水口优化后,水口使用性能得到提高。

(4)保护渣厚度差随拉速增加而增加,钢渣界面随拉速增加而愈加活跃;保护渣厚度差随浸入深度增加而减小,钢渣界面随浸入深度增加而愈加稳定。优化水口S3下,钢渣界面活跃,保护渣厚度差在4~9 mm,且不存在卷渣现象,水口使用性能得到改善。

参考文献

- [1] 徐海伦. 板坯连铸结晶器内气泡行为和液渣分布规律的研究[D]. 重庆:重庆大学, 2007.
- [2] 孙于萍, 李杰, 乐可襄, 等. 板坯连铸结晶器钢液流场的数学模拟[J]. 特殊钢, 2005, 26(02):12-15.
- [3] 赵志刚, 胡坤太, 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(03):12-14.
- [4] Kuang-Nian H E, Xiao J G, Wei Y H, et al. Experimental Research on Structure of Submerged Entry Nozzle and Operation Parameter Optimization for Wide Slab Continuous Casting Mold[J]. Iron & Steel, 2008, 43(1):26-29.
- [5] 张彩军, 刘磊, 刘中柱. 板坯连铸结晶器内钢液表面流速的水模研究[J]. 铸造技术, 2016, 37(4):736-739.
- [6] 张明国. 连铸浸入式水口结构优化的水模型试验[J]. 钢铁研究, 2014, 42(4):15-18.
- [7] 陆巧彤, 杨荣光, 王新华, 等. 板坯连铸结晶器保护渣卷渣及其影响因素的研究[J]. 钢铁, 2006, 41(7):29-32.
- [8] 万晓光, 杨素波. 连铸板坯结晶器浸入式水口试验研究[J]. 钢铁, 2000, 35(9):20-20.
- [9] Ho Y H, Chen C H, Hwang W S. Three-dimensional Analysis of Molten Steel flow in Slab Continuous Casting Mould with Rotated Ports in Submerged Entry Nozzle[J]. Ironmaking & Steelmaking Processes Products & Applications, 2001, 28(3):258-265.

邱春根(1993-),男,硕士研究生(江西理工大学),2014年景德镇陶瓷大学(本科)毕业,连铸坯质量控制研究。

E-mail:tcqcg117@163.com

收稿日期:2016-10-22

表6 保护渣模拟结果

Table 6 Flux simulations results

水口	拉速/ (m·min ⁻¹)	插入深度/ mm	模拟保护渣覆盖情况	
			液渣层最大 厚度差/mm	水油界面 活跃程度
S1	0.85	130	4~5	较活跃
	0.95	110	8	特活跃
	0.95	130	7~8	活跃
	0.95	150	6~7	活跃
	1.05	130	8	特活跃
S2	0.85	130	2~3	轻微波动
	0.95	110	3~4	轻微波动
	0.95	130	3~4	轻微波动
	0.95	150	3	轻微波动
	1.05	130	5	较活跃
S3	0.85	130	4~5	较活跃
	0.95	110	7~8	活跃
	0.95	130	7~8	活跃
	0.95	150	5~6	活跃
	1.05	130	8~9	特活跃