

1 500 mm × 230 mm 板坯结晶器液面波动与 卷渣行为水力学模型试验和应用

杨文轩 王 勇 高锦国 刘 威 杨树峰 李京社

(北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083)

摘 要 基于相似理论,以钢厂 1 500 mm × 230 mm 板坯结晶器为原型建立 1:2 的结晶器水力学模型。结果表明,吹气量一定时,水口中心处到窄边的液面波动先增大后减小,吹气量大于 0.8 L/min 时,开始发生卷渣现象,并且结晶器内的气泡数量变多。浸入深度的增加使液面波动减弱,浸入深度在 65 ~ 95 mm 时对卷渣影响的效果不显著;拉速增加使流股的冲击深度增大,拉速大于 1.1 m/min 时有大渣滴被卷入;当结晶器的拉速为 1.0 ~ 1.1 m/min,吹气量为 0.6 ~ 0.8 L/min,浸入深度为 75 ~ 85 mm 时较合理。C45E 钢生产实践表明,当拉速由 0.9 ~ 1.2 m/min 调整至 1.0 ~ 1.1 m/min,浸入深度由 130 ~ 190 mm 改进为 150 ~ 170 mm 时,铸坯缺陷率由 6% 降至 1.9%。

关键词 结晶器 液面波动 卷渣 吹气 浸入深度

Water Hydraulic Model Test on Liquid Level Fluctuation and Slag Entrapment Behavior of 1 500 mm × 230 mm Slab Mold and Application

Yang Wenxuan, Wang Yong, Gao Jinguo, Liu Wei, Yang Shufeng and Li Jingshe

(School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

Abstract A 1:2 water hydraulic model is established based on similar theory for a 1 500 mm × 230 mm slab mold as a prototype at a steelworks. The results show that when the blowing gas flowrate is certain, the fluctuation of the liquid level from the center of the nozzle to the narrow side first increases and then decreases, and when the blowing gas flowrate is more than 0.8 L/min, the phenomenon of slag entrapment begins to occur and the number of bubbles in the mold becomes more. The increase of immersion depth makes the liquid level fluctuation weaker, and the effect of immersion depth in the range of 65 ~ 95 mm on the effect of slag entrapment is not significant. Increasing casting speed increases the impact depth of the flow strand, with large slag droplets being involved at casting speeds more than 1.1 m/min. When the casting speed of the mold is 1.0 ~ 1.1 m/min, the blowing gas flowrate is 0.6 ~ 0.8 L/min, and the immersion depth is 75 ~ 85 mm is more reasonable. The production practice of C45E steel shows that as the drawing speed is adjusted from 0.9 ~ 1.2 m/min to 1.0 ~ 1.1 m/min and the immersion depth is improved from 130 ~ 190 mm to 150 ~ 170 mm, the billet defect rate is reduced from 6% to 1.9%.

Material Index Mold, Liquid Surface Fluctuation, Slag Entrapment, Blowing, Immersion Depth

结晶器内的流场和自由液面对铸坯的表面质量有很大的影响,一般通过改变结晶器工艺参数来得到较合理的钢液流场和自由液面的特征^[1]。影响结晶器流场的主要工艺参数有拉速、吹气量、浸入深度、水口形状等^[2]。

在连铸生产过程中,一般采用结晶器吹氩进行保护浇注,其有利于避免空气吸入发生二次氧化,防止水口结瘤,均匀钢水成分和温度,同时能够促进夹杂物上浮等^[3]。但不合理的吹氩工艺会导致钢渣液面波动剧烈或气泡在水口逸出破碎,造成卷渣,且

随流股冲击到结晶器深部的气泡来不及上浮会造成铸坯产生表面质量缺陷^[4],并且液面波动较大会导致空气直接与钢液接触,污染钢水,使保护渣的润滑作用减弱,影响钢水与渣层的传热及渣滴卷入钢液等。要获得高质量的铸坯,一般需要将液面波动控制在 ±5 mm 以内,质量要求更高的通常在 ±3 mm 以内^[5]。结晶器吹氩会造成钢渣液面波动加剧,因此,需要采用适宜的吹氩工艺将液面波动控制在合理的范围内。在合理的波动范围内,合适的吹气量有利于产品质量的提高。吴颖东等^[6]通过研究 1:4

的水模型发现 500 mm × 75 mm 的板坯结晶器在拉速从 0.667 m/min 增加到 1.022 m/min 过程中,水口附近的波动先减小后增大,窄边附近的波动逐渐增大;浸入深度的增加液面波动减弱,吹气使液面波动加剧,并会造成卷渣。马范军等^[7]研究 200 mm × (700 ~ 1 350) mm 板坯结晶器时发现,吹氩量一定时,拉速较低时气泡沿着水口壁逸出,水口附近液面波动大,易造成钢液裸露;拉速较大时,流股获得的动能增大即其冲击力强,气泡随流股运动在结晶器内分布均匀有利于夹杂物的上浮。徐海伦等^[8]研究表明,结晶器的液面波动对拉速的影响最大,吹气量次之,最后是浸入深度。随着拉速的增大,结晶器的液面波动增大,吹气量的增大,液面波动也增大,浸入深度的增大液面波动减小。

卷渣一般分为气泡卷渣,剪切卷渣,漩涡卷渣及抽吸卷渣;最常见的是由拉速和气泡引起的剪切和气泡卷渣。Kubo 和 Toshio Ishii 等^[9]研究表明,气泡是引起表面缺陷的主要原因,当气泡没有被捕获而冲出结晶器液面时,保护渣易被卷入钢水中造成铸坯缺陷。陈登福等^[10]研究表明,吹氩量较小时,渣层较死,覆盖良好;随着吹氩量的增大,渣层逐渐变得活跃,覆盖良好;吹氩量过大时,渣层过于活跃,并且水口附近出现裸露及翻滚;显然卷渣不利于钢水的洁净,通过对比不同的参数选出卷渣情况较少的工艺参数。

以钢厂生产的 1 500 mm × 230 mm 中厚板坯(精冲钢 C45E,拉速 0.9 ~ 1.2 m/min)为原型,其生产过程中铸坯发现少量的缺陷,根据其工艺参数设计试验,利用结晶器水力学模拟的试验,改变结晶器的工艺参数(拉速、浸入深度、吹气量),比较各工艺参数下结晶器内流体的表面流速、波高、观察其流场及卷渣情况;本文波高选取 1/3 大波平均波高,因为试验后分别统计了 1/10 大波和 1/3 大波,发现后者规律更加明显,所以选用 1/3 大波。通过综合分析得出最优的工艺参数区间。

1 水模试验原理及方法

采用的水模型几何相似比为 1:2。根据相似原理,为了准确模拟钢液内的流动,应保证模型的雷诺数(Re)和弗罗德数与原型相等,由于结晶器内的流场大部分区域处于紊流状态,Re 数大于第二临界值,流体的湍流程度及速度分布不再受 Re 数的影响^[11],考虑惯性力和重力的关系,即保证 Fr 准数的相等。

$$Fr_m = Fr_p \quad (1)$$

$$\frac{u_m^2}{gl_m} = \frac{u_p^2}{gl_p} \quad (2)$$

式中:下标 m 表示模型,下标 p 表示原型, u - 流速/($m \cdot s^{-1}$); g - 重力/($m \cdot s^{-2}$); l - 特征长度/m,结晶器由有机玻璃制成,用水来模拟钢液,蓝色墨汁显示流场,试验中油应与保护渣的运动黏度相似:

$$\frac{v_{\text{钢液}}}{v_{\text{渣}}} = \frac{v_{\text{水}}}{v_{\text{油}}} \quad (3)$$

式中: v_{steel} , v_{slag} , v_{water} , v_{oil} - 分别表示钢,渣,水,油的运动黏度/($m^2 \cdot s^{-1}$);1 500 °C 钢液运动黏度约为 0.9×10^{-6} ($m^2 \cdot s^{-1}$),液渣运动黏度在 1 350 °C 为 $(3.4 \sim 5.5) \times 10^{-6}$ ($m^2 \cdot s^{-1}$);计算出模拟渣层的油运动黏度为 $(3.8 \sim 6.1) \times 10^{-6}$ ($m^2 \cdot s^{-1}$);选用二甲硅油模拟渣层[黏度 $(0.5 \sim 1.0) \times 10^{-4}$ ($m^2 \cdot s^{-1}$)]。

试验中采用氮气模拟结晶器吹氩,吹气位置在塞棒处和浸入式水口处,氮气与工业使用的氩气处于两个不同的体系,需经过修正的准数相等,按照如下公式计算相似比^[12]。

$$\frac{\rho_{N_2} V_{N_2}^2}{(\rho_w - \rho_{N_2}) glm} = \frac{\rho_{Ar} V_{Ar}^2}{(\rho_{st} - \rho_{Ar}) glp} \quad (4)$$

ρ_{N_2} - 氮气的密度/($kg \cdot m^{-3}$); ρ_{Ar} - 氩气的密度/($kg \cdot m^{-3}$); V_{N_2} - 氮气的流量/($L \cdot min^{-1}$); V_{Ar} - 氩气的流量/($L \cdot min^{-1}$); ρ_w - 水 25 °C 的密度/($kg \cdot m^{-3}$); ρ_{st} - 钢液 1 500 °C 下的密度/($kg \cdot m^{-3}$)。

由于 $Q = AV$, $\lambda_L = l_m/l_p$,代入(4)式。假设 Ar 在常温下的密度近似等于标准状态下的密度^[13-15],则根据理想气体状态方程得:

$$Q_{Ar} = 0.8692 \times (1/\lambda) 5/2 \cdot Q_{N_2} \quad (5)$$

$$Q_{Ar} = 0.203 \times Q_{N_2} \quad (6)$$

表 1 结晶器原型与模型工艺参数

Table 1 Process parameters for model and prototype of mold

项目	参数	
	原型	模型
断面尺寸/(mm × mm)	1 500 × 230	750 × 115
水口内径/(mm)	68	34
水口倾角/(°)	15	15
水口侧孔尺寸/(mm × mm)	60 × 80	30 × 40
水口浸入深度/(mm)	130, 140, 170, 190	65, 75, 85, 95
吹气量/($L \cdot min^{-1}$)	2, 3, 4, 5	0.4, 0.6, 0.8, 1.0
拉坯速度/($m \cdot min^{-1}$)对	0.9, 1.0,	54.89, 60.99、
应的模型流量/($L \cdot min^{-1}$)	1.1, 1.2	67.09, 73.19

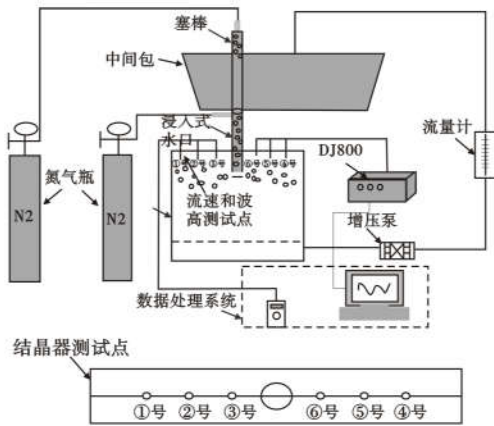


图1 水模型模拟装置示意图

Fig.1 Schematics of water modeling apparatus

已知 $\rho_{N_2} = 1.25 \text{ (kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{)}$, $\rho_w = 1\ 000 \text{ (kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{)}$, $\rho_{st} = 7\ 000 \text{ (kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{)}$, $\rho_{Ar} = 1.783 \text{ (kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{)}$, $=1\ 500 \text{ }^\circ\text{C}$

表1 为结晶器原型与模型相应的参数。

试验装置如图1所示,为了减少物理模拟导致的误差,结晶器延长了100%,并在底部增加了紊流板。①号、②号、③号表面流速的测试点;④号、⑤号、⑥号液面波动的测试点。

2 不同参数对波动和卷渣的影响

2.1 吹气量对结晶器液面波动及卷渣的影响

试验中使用智能旋桨式流速仪(相对误差 $\leq \pm 5\%$)测量结晶器液面的表面流速,采用中国水利水电研究院研制的DJ800(误差 $\pm 0.5\%$ F.S.)监测结晶器液面波动情况(1/3大波),图2(a)明显看出,随着吹气量增加,3个位置液面波动(1/3大波)逐渐增加,因为气流量的增加,气泡体积变大,数量变多,大量气泡在液面溢出使液面波动更加剧烈;并且气泡对流股具有浮升作用,在流股喷出水口后上移,

增加流股对液面的冲击。浸入深度75 mm时,⑥号(靠近水口)的液面波动最大,波高0.06~0.12 cm;⑤号(介于窄边和水口之中)的波动次之,波高0.05~0.085 cm;④号(靠近窄边)的波动最小,波高0.04~0.08 cm;吹气量从0.4 L/min到1.0 L/min,液面波动平均增幅90%。⑥号位置靠近水口,大部分气泡直接从水口附近上浮溢出,导致⑥号波动增大的最明显;④号位置靠近结晶器窄边,距离水口较远,大量气泡在运动过程中上浮,数量不多的气泡冲击到窄边,从而④号液面波动最小。

图2(b)表明了吹气量对液面流速的影响,浸入深度75 mm时,①号(靠近窄边)表面流速先减小后增大,流速0.01~0.03 m/s,拉速一定时,随着吹气量的增加,表面拉速先减小后增大,起初气泡流量较小,流股的冲击动能大,对于窄边的表面流速,流股的冲击作用大于气泡浮力;随着气流量的增大,大量的气泡抵消了一部分流股的冲击动能,导致冲击到窄边的流股变弱,流速减小;气泡流量的逐渐增大,对于窄边液面流速的影响,气泡作用大于流股的冲击,随着气泡流量的增大液面流速也逐渐增大。②号(介于窄边和水口之中),流速范围0.02~0.06 m/s,流股在冲击过程中,气泡对流股有向上的浮力,因此流股以一定的角度向液面冲击,即②号位置的动能最大,③号(靠近水口),流速范围0.02~0.05 m/s,大量气泡直接从水口附近溢出,受气泡的影响较大,随着气流量增大液面流速增大。试验中通过统计5 min内结晶器出现卷渣的次数,得到每分钟出现的平均卷渣次数,即为卷渣频率。图3是拉速1.0 m/min时吹气量对卷渣的影响,在一定范围内,吹气量增大液面的卷渣频率随之增大。

由于该板坯属于中厚板坯,在此工况条件下卷渣效果不是很明显,当吹气量 $\geq 1 \text{ L/min}$ 时,偶尔会出现卷渣情况。在试验中吹气量不宜过大,吹气量过大会使结晶器中的气泡数量增多,气泡易被流股冲击到结晶器深部区域,不易上浮,最后被凝固坯壳捕获,造成产品最终的气泡缺陷,吹气量太小不利于夹杂物的上浮去除^[16];通过吹气量,0.6~0.8 L/min

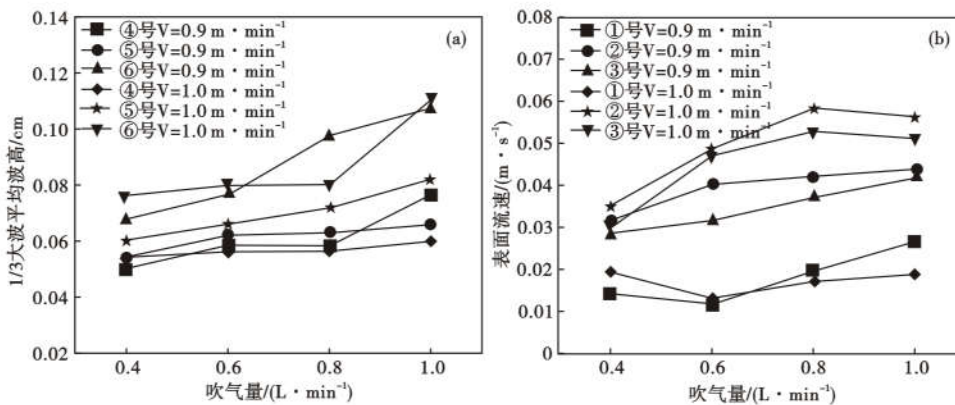


图2 吹气量对液面波动(a)和表面流速(b)的影响

Fig.2 Effect of blowing gas flowrate on liquid level fluctuation (a) and surface flow rate (b)

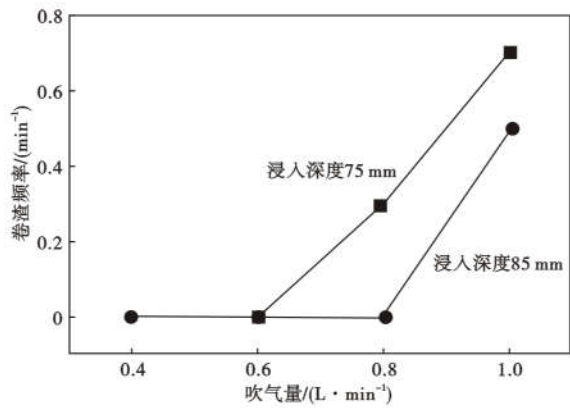


图 3 吹气量对卷渣频率的影响

Fig. 3 Effect of blowing gas flowrate on slag entrapment frequency

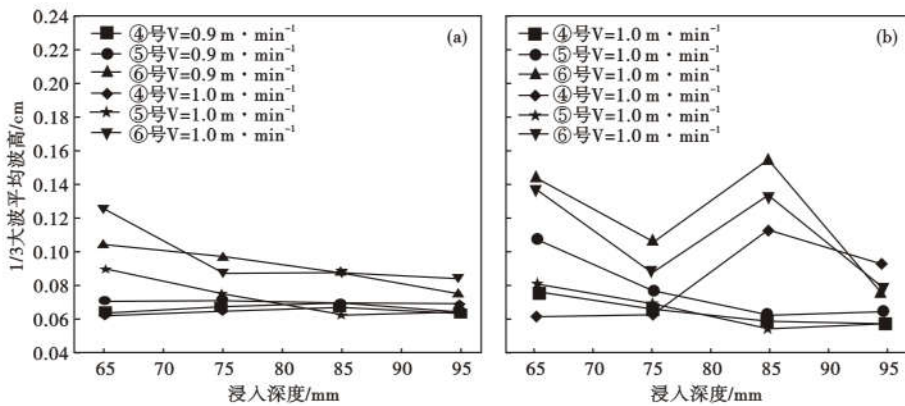


图 4 水口浸入深度对液面波动的影响,吹气量 0.8 L/min

Fig. 4 Effect of nozzle immersion depth on liquid level fluctuation, blowing gas rate 0.8 L/min

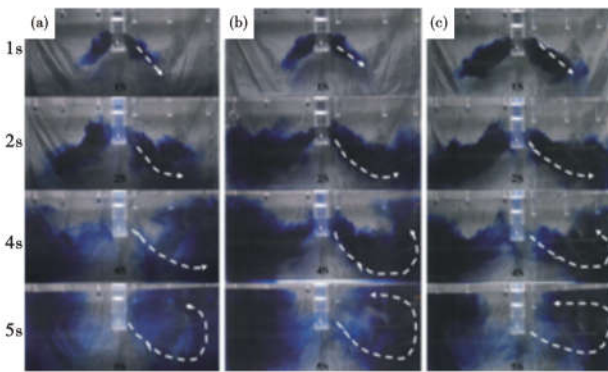


图 5 浸入深度 65 mm(a), 75mm(b) 和 85 mm(c) 时间 1 ~ 5 s 的流股形态

Fig. 5 Flow shape with immersion depth 65 mm(a), 75mm(b) and 85 mm(c) for time 1 ~ 5 s

液面波动较稳定,卷渣次数比其他参数少,是相对合适的范围,即对应原型吹氩量为 3 ~ 4 L/min。

2.2 水口浸入深度对结晶器液面波动及流场影响

从图 4(a) 中看出,当拉速和吹气量一定时,随

着浸入深度的增加,④号、⑤号、⑥号三个位置的波高均有减小的趋势,说明在一定的范围内液面波动随浸入深度增加而减小,这有利于液面的稳定。其原因是浸入深度增加,从水口冲出的流股碰撞窄边后向上流股到达液面的距离变大^[17],冲击到液面的动能变弱,从而液面波动减小。

而在图 4(b) 中,当浸入深度从 75 mm 增加到 85 mm 时,⑥号位置和拉速在 1.1 m/min 的④号位置液面波动明显增加,可能是由于从窄边处回流到水口中心的流股被反弹,在窄边和水口之间来回运动的驻波,在液面上形成两个相反方向的流股,当流股的频率相等时,两波峰叠加起来,造成液面波动变大。

图 5 表示拉速

1.0 m/min, 吹气量 0.4 L/min 时浸入深度对应流股的形态。从水口流出的流股呈锥形分布向窄边两侧斜向下冲击,如图 5 中箭头所示的方向;水口中心线的正上方和正下方墨汁的浓度最小,说明该处流动性差,液面比较平稳,不利于保护渣的熔化和结晶器内钢水热流的传递;水口斜向下两侧流股墨汁浓度最大,说明该位置

处的流速最大,两侧流股与窄边碰撞后,分成向上和向下两个流股,向上流股聚集到结晶器角部位置后向中心水口方向扩散,向下流股冲击浸入结晶器下部。1 s 时流股速度 $c > b > a$, 5 s 时墨汁在液面扩散范围 $a > b > c$, 即表面流速 $a > b > c$, 距液面距离变短,对液面的冲击力会增大,浸入深度越小液面越不稳定;图中可以看出,冲击深度 $c > b > a$;冲击深度大会使夹杂物上浮的距离变大,不利于夹杂物的上浮去除;但冲击深度过小,液面波动剧烈;在浸入深度 75 ~ 85 mm 时,两流股分布,混匀时间相差不大,表面流速和液面波动均属于正常波动范围,相比与其他参数更合理;即对应原型浸入深度为 150 ~ 170 mm。

2.3 拉速对结晶器液面波动及卷渣的影响

图 6(a) 浸入深度 75mm, 不同吹气量下拉速对液面波动的影响。拉速在 0.9 ~ 1.0 m/min 液面波动的幅度变化小于 1.1 ~ 1.2 m/min 时液面波幅变化。⑥号位置波高最大,波高 0.066 ~ 0.104 cm,⑤

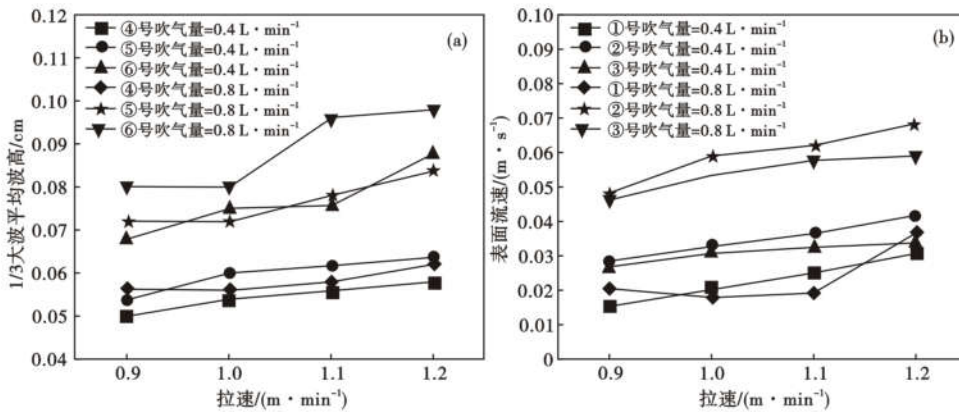


图6 拉速对液面波动(a)和表面流速(b)的影响

Fig. 6 Effect of casting speed on liquid level fluctuation (a) and surface flow rate (b)

号位置波高次之,波高 0.054 ~ 0.084 cm,④号位置波高最小,波高 0.049 ~ 0.066 cm;流股冲出水口后,由于气泡的作用,使流股有一定角度的向上冲击,造成⑥号、⑤号波动较大,④号靠近窄边流股冲击相对较弱。随着拉速的增大,液面波动逐渐增加。因为拉速的增加使得流股喷出水口的速度增大,流股本身的动能也增大,在与窄边碰撞之后向上流股的速度增大,对液面的冲击也增大,导致液面波动变大^[18]。由图 6(b) 可得,浸入深度 75 mm,拉速从 0.9 ~ 1.2 m/min 表面流速的最大增幅(②号)为 88.5%,最小增幅(③号)为 11.1%;①号流速 0.012 ~ 0.0336 m/s,②号流速 0.0248 ~ 0.0714 m/s,③号流速 0.0282 ~ 0.0578 m/s;拉速增大,流股结晶器窄边的冲击深度增大,导致液面流速增大;随着距离水口中心位置的增大,表面流速是先增加后减少,即②号和③号表面流速大于①号。

图 7 所示浸入深度 75 mm,吹气量 0 L/min 时不同拉速的流股显示图,箭头为流股冲击的方向;在 1 s 时,拉速 1.1 m/min 的流股距离窄边壁面最近,拉速 1.0 m/min 距离次之,拉速 0.9 m/min 距离最远,即拉速越大,流股的冲击深度越大;冲击深度过深,夹杂物上浮距离变大,易被凝固坯壳捕获,不利其上浮除去。拉速 0.9 m/min 水口正上方混匀时间大于 1.0 m/min 和 1.1 m/min,在 5 s 时拉速 0.9 m/min 流股的混匀面积小于 1.0 m/min 和 1.1 m/min 的混匀面积,拉速 0.9 m/min 流股的浓度也小于 1.0 m/min 和 1.1 m/min 浓度,即拉速 0.9 m/min 液面相对平稳,不利于化渣。拉速 1.0 m/min 和 1.1 m/min 的流股分布大致相同。

图 8 浸入深度 75 mm 为拉速对卷渣频率的影响

响,在该工况下,卷渣现象不是很明显,试验中在 1 min 内至多可以发现两次卷渣现象,而且渣滴很小;可以看出,随着拉速的增大,卷渣频率也是逐渐增大,因为拉速增大,回流产生的剪切力较大,易发生卷渣;拉速较小时,回流的剪切力较小,不易发生卷渣^[19]。图 8(a) 中拉速为 1.2 m/min 时,吹气量 0.8 L/min 的卷渣率稍大于 1.0 L/min,是因为吹气量的增加,气体对流股的阻力增大,抑制因回流产生剪切力而导致的卷渣,同时,气泡的上浮对于回流剪切产生的液渣有向上的推力,使其有回到渣层,进而减少剪切卷渣。水油界

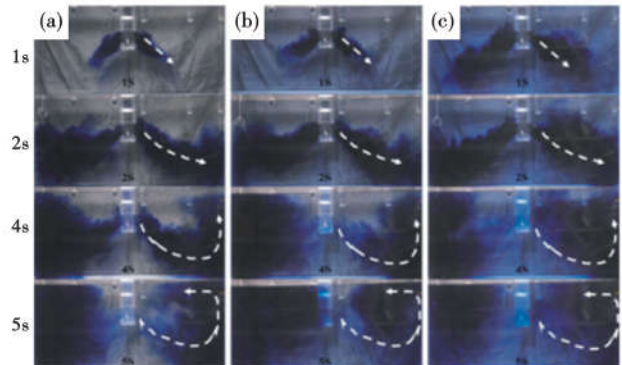


图7 拉速/(m · min⁻¹):0.9(a),1.0(b)和1.1(c)时间1~5 s的流股形态

Fig. 7 Flow shape with casting speed/(m · min⁻¹):0.9(a), 1.0(b) and 1.1(c) for time 1 ~ 5 s

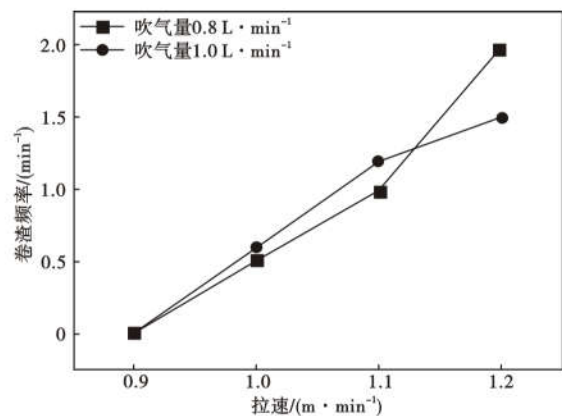


图8 拉速对卷渣频率的影响

Fig. 8 Effect of casting speed on slag entrapment frequency

表 2 优化前后工业试验结果对比

Table 2 Comparison of industrial test results before and after optimization

工艺	炉次	拉速/ ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	吹氩量/ ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	浸入深 度/mm	液面波 动/mm	缺陷 率/%
优化前	第 1 炉	0.9~1.2	2~5	130~190	± 6.5	6
优化后	第 2 炉	1.0~1.1	3~4	150~170	± 4	2
	第 3 炉	1.0~1.1	1.0~1.1	150~170	± 4.5	1.9

面卷渣试验表明,当拉速大于 1.1 m/min 时,才能观察到较大渣滴。综合比较拉速在 1.0~1.1 m/min,各方面参数相对较优,即对应原型拉速也是 1.0~1.1 m/min。

3 优化参数后工业试验结果对比

表 2 是第 1 炉(4006775)使用优化前的参数,第 2、3 炉精冲钢 C45E(5007258、6007655)使用优化后的参数,钢种均为优化前后工业试验结果对比:优化前液位波动约 ± 6.5 mm;优化后液位波动约 ± 4.5 mm 左右,减少了液面波动过大的情况出现,波动趋于平稳;根据现场统计优化后的板坯缺陷率(缺陷块数/生产块数)从 6% 降到 1.95%,并观察到未优化时铸坯的气泡缺陷大面多,优化后铸坯的气泡缺陷小而少。

4 结论

(1)在拉速和浸入深度不变时,随吹气量的逐

渐增大,液面的波动就会加剧,水口处溢出的大气泡数量增加,钢液内的气泡数量也增加;在浸入深度为 75 mm,波高 0.04~0.16 cm,吹气量在 0.8 L/min 时才开始发生卷渣;当吹气量为 0.6 L/min 和 0.8 L/min 时液面波动相差不大,合理的吹气量 0.6~0.8 L/min(对应原型参数 3~4 L/min)。

(2)拉速和吹气量对液面波动及流场的影响强于浸入深度的影响,当浸入深度由浅变深,液面波动由大到小;浸入深度在 75~85 mm(对应原型参数 150~170 mm)时其波动和流场优于其他浸入深度。

(3)拉速 0.9~1.2 m/min 表面流速的最大增幅(②号)为 88.5%,最小增幅(③号)为 11.1%,从水口中心到窄边得波动先增大后减小,液面整体波动增加;拉速大于 1.1 m/min 时有明显的卷渣,综合比较,拉速在 1.0~1.1 m/min 较为合理。(对应原型参数 1.0~1.1 m/min)。

(4)对比了不同参数的优劣性,得出了最佳的工艺参数,通过工业试验验证效果较好,缺陷率从 6% 降到 1.9%。

国家自然科学基金(51734003,51822401);中央高校基本科研业务费(FRF-18-009C1);中国博士后科学基金(2020M680010)

参考文献

- [1] Thomas B G, Mika L J, Najjar F M. Simulation of Fluid Flow Inside a Continuous Slab-Casting Machine[J]. Metallurgical and Materials Transactions: B, 1990, 21(2): 387-400.
- [2] 王伟,朱立光,张彩军,等. 180 mm × 610 mm 板坯连铸结晶器内流场水模型及数值模拟[J]. 中国冶金, 2020, 30(2): 49-56.
- [3] 邓小旋,熊霄,王新华,等. 高拉速板坯连铸结晶器浸入式水口的水模型研究[J]. 北京科技大学学报, 2013, 35(10): 1304-1312.
- [4] 王田田,杨树峰,李京社,等. 连铸坯皮下气泡缺陷成因及控制[J]. 中国冶金, 2020, 30(12): 35-46.
- [5] 郭银涛. 包晶钢结晶器液面波动的原因及控制[J]. 河北冶金, 2021(3): 51-56.
- [6] 吴颖东,刘中秋,全明杰,等. 连铸结晶器内钢/渣界面波动及卷渣行为的试验研究[J]. 材料与冶金学报, 2020, 19(1): 13-19.
- [7] 马范军,文光华,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.
- [8] 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.
- [9] Kubo N, Ishii T, Kubota J, et al. Two-phase Flow Numerical Simulation of Molten Steel and Argon Gas in a Continuous Casting Mold[J]. ISIJ International, 2002, 42(11): 1251-1258.
- [10] 陈登福,张献光,张立峰,等. 板坯连铸结晶器内气泡行为的模拟研究[J]. 钢铁, 2010, 32(4): 20-25.
- [11] 胡群,张硕,王璞,等. 大方坯结晶器内液面波动与卷渣行为[J]. 中国冶金, 2020, 30(6): 66-73.
- [12] 吕亚,刘磊,徐刚,等. 薄板坯连铸结晶器内保护渣卷渣的研究[J]. 特钢技术, 2020, 103(2): 23-28.
- [13] 伍旋,王明林,张延玲,等. 高拉速板坯结晶器流场影响因素的模拟研究[J]. 炼钢, 2020, 36(1): 27-33.
- [14] Wang P, Zhang Z, Tie Z C, et al. Initial Transfer Behavior and Solidification Structure Evolution in a Large Continuously Cast Bloom with a Combination of Nozzle Injection Mode and M-EMS[J]. Metals, 2019, 9(10): 1083-1098.
- [15] 刘启龙,仇圣桃,占树华,等. 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[J]. 特殊钢, 2018, 39(2): 1-8.
- [16] 张涛,聂海棋,罗志国,等. 连铸结晶器内气泡运动行为及影响因素[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2018, 39(1): 61-66.
- [17] 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, 288(4): 736-741.
- [18] 郑淑国,周海斌,朱苗勇. 吹气宽厚板坯连铸结晶器内液面波动行为的水模型研究[J]. 过程工程学报, 2009, 9(S1): 214-219.
- [19] 包燕平,朱建强,蒋伟,等. 薄板坯结晶器内卷渣现象的研究[J]. 北京科技大学学报, 1999(6): 530-538.

杨文轩(1996-),男,硕士生(北京科技大学),2019年江西理工大学(本科)毕业,钢铁冶金工艺研究。
E-mail:1225083795@qq.com

收稿日期:2021-08-01