

· 冶炼与凝固 ·

旋流水口对大方坯结晶器内流场和钢渣界面行为的影响



张建宇¹, 王杏娟¹, 朱立光^{1,2}, 宋元龙¹, 司旭林¹, 郑雪龙¹

(1 华北理工大学冶金与能源学院, 唐山 063210; 2 河北科技大学材料科学与工程学院, 石家庄 063009)

摘要: 为了提升立式连铸40Mn2大方坯铸坯质量, 提出了一种四分切向旋流水口, 利用粒子图像测速技术, 以某钢厂立式连铸断面尺寸410 mm×560 mm的大方坯结晶器为研究对象, 研究不同拉速和水口浸入深度工况条件下的钢液流动和钢渣界面行为。结果表明, 水口浸入深度为90 mm, 拉速为0.25 m/min时钢渣界面保护渣流动性较差, 拉速为0.35、0.45 m/min时会发生卷渣; 水口浸入深度为100 mm, 拉速为0.25 m/min时钢渣界面保护渣流动性较差, 拉速为0.35 m/min时有利于夹杂物上浮, 钢渣界面活跃且无卷渣现象发生, 拉速0.45 m/min时会发生卷渣; 水口的浸入深度为110 mm, 拉速为0.25 m/min时钢渣界面保护渣流动性较差, 拉速0.45 m/min时会发生卷渣, 拉速为0.35 m/min时无卷渣现象发生, 与同拉速、水口浸入深度为100 mm的工艺条件相比不利于夹杂物的上浮。结合生产实际可得, 水口浸入深度100 mm, 拉速0.35 m/min是立式连铸大方坯结晶器较适宜的操作参数。

关键词: 旋流水口; 立式连铸; 钢渣界面; 大方坯结晶器; 流场

DOI:10.20057/j.1003-8620.2024-00216 **中图分类号:**TF777.2

The Influence of Swirl Nozzle on the Flow Field in the Bloom Mould and the Interface Behavior of Steel Slag

Zhang Jianyu¹, Wang Xingjuan¹, Zhu Liguang^{1,2}, Song Yuanlong¹, Si Xulin¹, Zheng Xuelong¹

(1 School of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China; 2 College of Materials and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 063009, China)

Abstract: In order to improve the quality of vertical continuous casting 40Mn2 square bloom, a four-quarter tangential swirl nozzle was proposed, using a Particle image velocimetry technique, the molten steel flow and slag interface behavior at different casting speeds and nozzle immersion depths were studied in a steel plant's bloom mold with 410 mm × 560 mm vertical continuous casting section. The results show that the fluidity of the mold powder at the interface of steel slag is poor when the depth of the nozzle is 90 mm and the casting speed is 0.25 m/min, and the slag entrapment occurs when the casting speed is 0.35 m/min and 0.45 m/min. When the immersion depth of the nozzle is 100 mm, the fluidity of the mold powder at the interface of steel slag is poor while the casting speed is 0.25 m/min, and at 0.35 m/min casting speed, the inclusion will float upwards. The interface of steel slag is active and there is no slag entrapment, and slag entrapment will occur at 0.45 m/min casting speed. When the immersion depth of the nozzle is 110 mm, the fluidity of the mold powder at the interface of steel slag is poor while the casting speed is 0.25 m/min. When the casting speed is 0.45 m/min, the slag entrapment will occur. When the casting speed is 0.35 m/min, no slag entrapment will occur, compared with the same casting speed and 100 mm immersion depth of nozzle, it is unfavorable to the floating of inclusions. Combined with the actual production practice, the optimum operating parameters of the vertical continuous casting bloom mold are the depth of nozzle immersion 100 mm and casting speed 0.35 m/min.

Key Words: Swirl Nozzle; Vertical Continuous Casting; Slag Interface; Bloom Mould; Flow Field

立式连铸是最早用于工业生产的连铸类型, 经过几十年的大力发展, 立式连铸技术已经走向成熟和稳定^[1-3], 立式连铸较弧形连铸的优点有: 1) 有利于夹杂物上浮; 2) 铸坯的冷却均匀, 凝固组织对称性好; 3) 铸坯在凝固过程及在铸机内不受弯曲、矫直等外力的作用, 铸坯内部不会有机械应力引起的

裂纹缺陷^[4-6]。

多年来, 冶金学者一直将改善水口来作为流场研究的重点^[7-10]。直通式水口应用在很多钢厂生产中, 但这种水口会在去除夹杂物方面的能力不如旋流水口^[11-13], 虽然许多企业采用直通式水口配合电磁搅拌的方式来促进夹杂物上浮去除, 但是电磁搅

基金项目: 国家自然科学基金项目(52374335); 国家自然科学基金项目(51974133); 河北省自然科学基金重点项目(E2022208019)

作者简介: 张建宇(1999—), 男, 硕士; **E-mail:** zhuliguang@ncst.edu.cn; **收稿日期:** 2024-09-04

通信作者: 王杏娟(1978—), 女, 博士, 教授; **E-mail:** wxingjuan@ncst.edu.cn

拌设备价格高昂,吨钢成本也会因为电能大量消耗而增加^[14]。近年来,旋流水口的发展引起了越来越多的关注。吴耀光等^[15]对新型旋流水口条件下结晶器内的流场和温度场和直筒形水口进行了计算分析,发现改变旋流水口的出口方向可以实现钢液旋转,而且旋流水口能显著降低钢水的冲击深度,促进夹杂物上浮。程晓文等^[16]通过热流体动力学的耦合数学模型,深入研究了旋流水口对大方坯连铸结晶器冶金过程稳定性的作用,发现用旋流水口来替换直通水口可以提高铸坯等轴晶率。张志霄等^[17]利用三孔旋流水口研究了结晶器流场和水口结构的关系,发现三孔旋流水口对于净化钢液具有重要作用。四分切向旋流水口主要应用于立式连铸生产,四分切向旋流水口的优点是可以形成上下两个回流和水平旋流,上回流可以促进夹杂物的上浮,水平旋流可以减缓钢液波动^[18-19]。

从以上研究可以看出,至今为止还缺乏立式连铸大方坯结晶器内流场和钢渣界面行为模拟,且某钢厂在生产尺寸为 410 mm×560 mm 的 40Mn2 大方坯的过程中,结晶器钢渣界面不稳定,影响铸坯质量^[20],所以,本研究以某钢厂立式连铸大方坯结晶器为研究对象,在保护渣黏度为 0.25 Pa·s、液渣层厚度为 6 mm 及四分切向旋流水口条件下,用 PIV (particle image velocimetry) 技术研究不同拉速和水口浸入深度下的钢液流动和钢渣界面行为,以寻求有利于夹杂物上浮,钢渣界面活跃且无卷渣现象发生的最佳工艺参数。

1 实验模拟

1.1 实验方法

本研究采用立式连铸大方坯结晶器和四分切向旋流水口,水口的倾角为 15°,其中定义水口侧孔向下时倾角为正。水口的正视图、剖面图和大方坯结晶器如图 1 所示,结晶器使用的工艺参数见表 1。

本实验基于相似原理,在保证原型和模型的雷诺准数(Re)、弗鲁德准数(Fr)各自相等的条件下^[21-23],采用 5:6 比例的结晶器水模型,结晶器断面尺寸为 350 mm×460 mm,高度为 1 000 mm。实验假设水为不可压缩性流体,水模型装置如图 2 所示。实验过程中加入直径 25 μm 的示踪粒子,再加入黏度与保护渣近似的调和油^[24],将 CCD 相机对准结晶器宽面进行实时拍摄,激光脉冲对准结晶器窄面中心照射,通过计算分析得到结晶器流场,PIV 实验装置如图 3 所示^[25-26]。

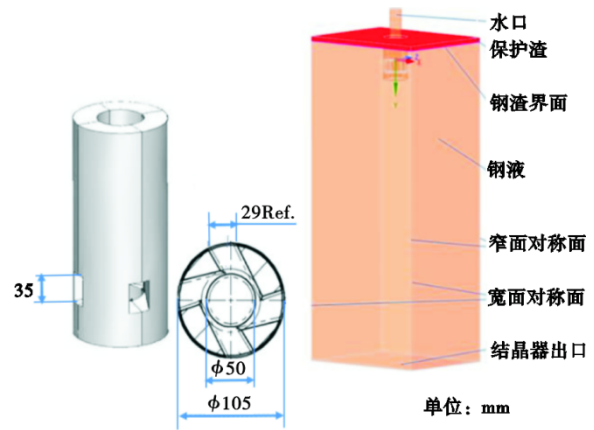


图 1 四分切向旋流水口结构图和大方坯结晶器示意图
Fig. 1 Schematic diagram of four-way tangential swirl nozzle and schematic diagram of bloom mould

表 1 铸坯结晶器使用的工艺参数

Table 1 Process parameters used in bloom mould

结晶器长度/mm	结晶器断面尺寸/mm	拉速/(m·min ⁻¹)	水口浸入深度/mm
1 200	410×560	0.25、0.35、0.45	90、100、110

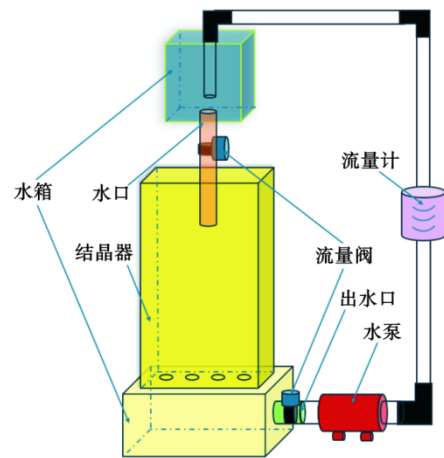


图 2 水模型装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of water model device

由于采用模型与原型几何尺寸比例为 5:6,模型与原型的速度之比经公式(1)~(2)推导所得。

$$V_m^2/l_m = V_p^2/l_p \quad (1)$$

$$V_m/V_p = \sqrt{l_m/l_p} = \sqrt{5/6} = 0.9 \quad (2)$$

式中, V 为钢水流速, m/s; l 为特征长度, m; 下标 m 代表模型; 下标 p 代表原型。表 2 水模型实验的主要参数,为了方便对比,水模实验的结果图依然用原型的参数表示。

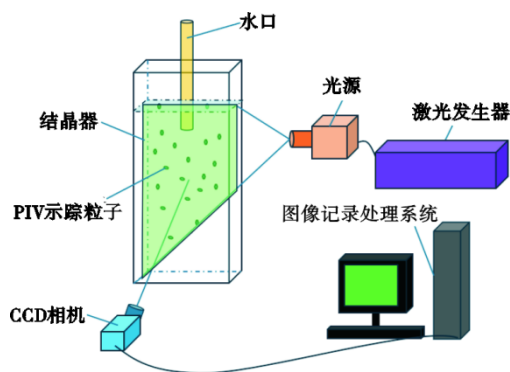


图3 PIV粒子测速系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of PIV particle velocity measurement system

表2 40Mn2钢水模型的主要参数

Table 2 Main parameters of 40Mn2 molten steel model

结晶器长度/mm	结晶器尺寸/ mm	拉速/ ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	水口浸入深度/mm
1 000	350×460	0.2、0.3、0.4	75、85、90

1.2 实验步骤

1) 安装好实验装置,保证参数达到实验设计要求;

2) 把水预装到实验位置,打开水泵并调整到实验流速;

3) 液面位置稳定后,打开激光发生器,使激光照射在结晶器窄面中心;

4) 调整CCD相机的角度和高度,使相机正对着结晶器宽面拍摄;

5) 加入示踪粒子,用相机预拍摄5张图像,观察示踪粒子分布情况;

6) 缓慢加入油样模拟保护渣并照相,评价钢渣界面液面情况。

2 实验结果与讨论

2.1 流场分析

图4为不同工况条件下结晶器内流场,其中,图4(a)、图4(b)、图4(c)为水口浸入深度90 mm条件下钢渣界面和结晶器内典型流场。由图4可知,随着拉速增加,冲击深度逐渐增加,产生的上回流流股速度增加,对钢渣界面角部起到了一定的冲刷作用,可以看出,在图4(c)工况条件下结晶器右侧上回流非常明显,说明拉速增大后结晶器的稳定性变差,导致对称性变差,在实际生产过程中容易引起卷渣,所以,不能盲目提高拉速来提高产量,需要结合生产实际优化连铸参数和结晶器流场。

图4(d)、图4(e)、图4(f)为水口浸入深度100 mm条件下钢渣界面和结晶器内典型流场。不同时刻结晶器内钢液的流态都在不断变化,这是湍流的特点^[27],但是工艺参数选择合理可以使流场维持较为稳定的双辊流。由图4可知,在图4(e)工况条件下结晶器内形成了较稳定的双辊流,在图4(f)工况条件下结晶器内流场右侧流股较强,冲刷结晶器窄面,容易降低铸坯质量。

图4(g)、图4(h)、图4(i)为水口浸入深度110 mm条件下钢渣界面和结晶器内典型流场。由图4可知,随着浸入深度增加,回流中心点下移,上回流到达钢渣界面的距离增加,虽然浸入深度较大时流场相对稳定,但是夹杂物随着流股进入结晶器较深处,不利于夹杂物的上浮;当拉速为0.25 m/min时,可以看到各浸入深度条件下上回流强度都较弱,也不利于夹杂物的上浮^[28],所以不能为了流场的稳定盲目降低拉速,应该在能保质保量地去夹杂物的前提下合理选择拉速和水口浸入深度。

2.2 钢渣界面分析

图5为不同工况条件下的结晶器钢渣界面角部液渣厚度。如图5所示,在相同的浸入深度下,拉速从0.25 m/min增大到0.45 m/min时,钢渣界面角部液渣含量明显减少,这是因为随着拉速增大,出钢口的钢水流量增加,流股速度增加,从而增加了上回流区对钢渣界面的扰动,并且从结晶器壁面向旋流水口的回流速度增大,让卷渣的可能性大大增加,在水口浸入深度90 mm,拉速0.45 m/min的工况条件下可以看出钢渣界面角部出现明显裸漏,而且CCD相机可以捕捉到渣滴卷入钢液的现象,如图6所示。

在相同的拉速下,水口浸入深度从90 mm提高到110 mm,流股冲击点下移,能量也随之衰减更多,对钢渣界面的扰动作用减弱,钢渣界面角部液渣含量明显增加,液面波动减小。在相同的浸入深度下,随着拉速提高,冲击深度增加,钢渣界面也更加活跃。拉速增加带动了冲击点下移,不利于夹杂物的上浮与去除。虽然低拉速可以提高铸坯质量,但是提高拉速可以让钢水流动活跃,减少钢水流动死区,有利于保护渣的熔化,增加铸坯坯壳的表面质量^[29];随着浸入深度增加,流股冲击点下移,钢渣界面逐渐稳定,减少卷渣现象的发生,但是浸入深度增加,钢中夹杂物的上浮机会也随之降低,可能会导致更多的铸坯缺陷,而且浸入深

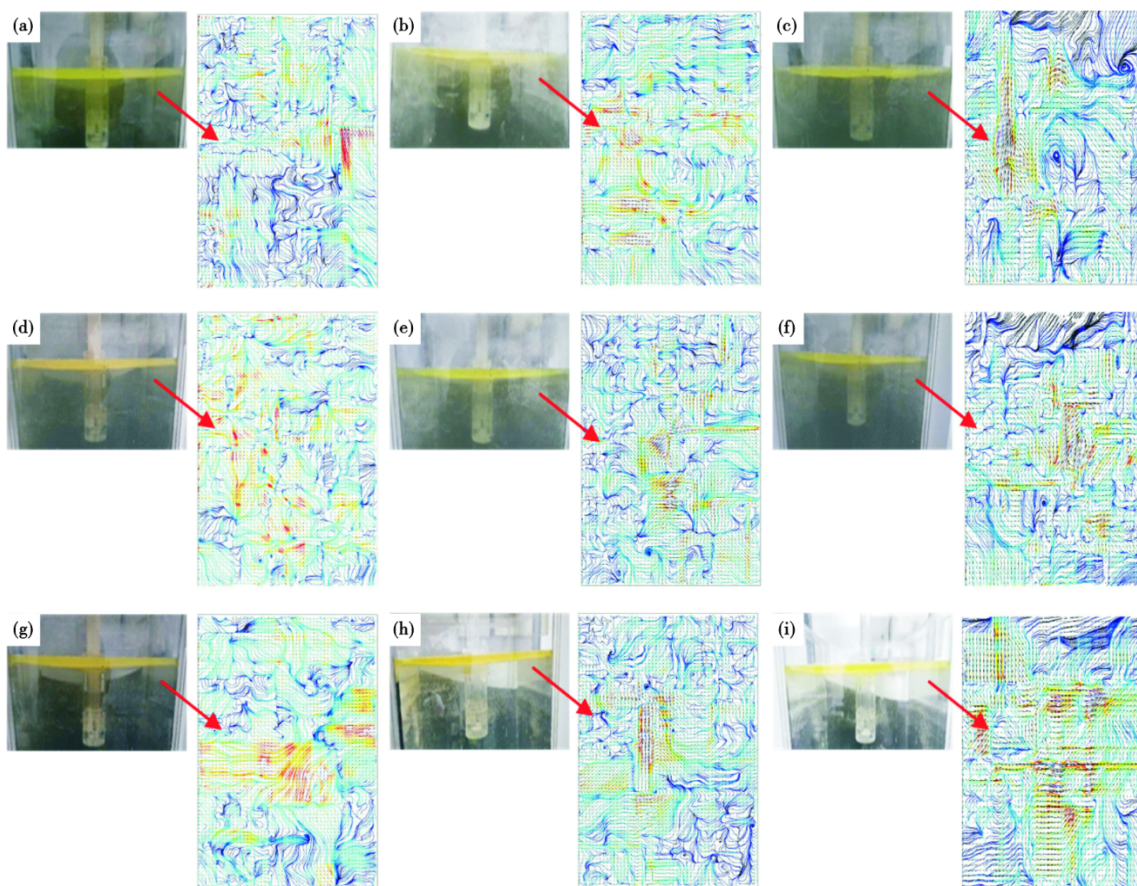


图 4 不同工况条件下结晶器内流场: (a)浸入深度 90 mm,拉速 0.25 m/min; (b)浸入深度 90 mm,拉速 0.35 m/min; (c)浸入深度 90 mm,拉速 0.45 m/min; (d)浸入深度 100 mm,拉速 0.25 m/min; (e)浸入深度 100 mm,拉速 0.35 m/min; (f)浸入深度 100 mm,拉速 0.45 m/min; (g)浸入深度 110 mm,拉速 0.25 m/min; (h)浸入深度 110 mm,拉速 0.35 m/min; (i)浸入深度 110 mm,拉速 0.45 m/min

Fig. 4 Flow field in mould under different working conditions: (a) immersion depth of 90 mm, casting speed of 0.25 m/min; (b) immersion depth of 90 mm, casting speed of 0.35 m/min; (c) immersion depth of 90 mm, casting speed of 0.45 m/min; (d) immersion depth of 100 mm, casting speed of 0.25 m/min; (e) immersion depth of 100 mm, casting speed of 0.35 m/min; (f) depth of immersion 100 mm, casting speed of 0.45 m/min; (g) depth of immersion 110 mm, casting speed of 0.25 m/min; (h) depth of immersion 110 mm, casting speed of 0.35 m/min; (I) depth of immersion 110 mm, casting speed of 0.45 m/min

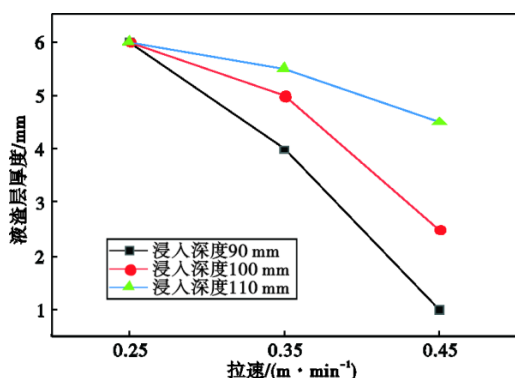


图 5 不同工况条件下的结晶器钢渣界面角部液渣厚度
Fig. 5 Thickness of liquid slag at the interface corner of mould steel slag under different working conditions

度过大会导致铸坯被过分冲刷甚至导致漏钢事故^[30-31]。因此,铸坯拉速和水口浸入深度都应该控

制在合理的范围之内。

为了进一步探究各工况条件对钢渣界面的影响,需要用PIV系统计算出钢渣界面的流速。图7为不同工况条件下的结晶器钢渣界面速度图,图像的横坐标是在钢渣界面均匀选择的200个采集点,纵坐标是这些采集点在各个工况下的移动速度。如图7(a)所示,从水口浸入深度为90 mm,拉速为0.25、0.35、0.45 m/min时,钢渣界面处的钢液最大流速分别为0.125、0.21、0.26 m/s,钢液流速标准差分别为0.012、0.025、0.037 m/s;如图7(b)所示,水口浸入深度为100 mm时,在上述拉速下钢渣界面处的钢液最大流速分别为0.11、0.17、0.23 m/s,钢液流速标准差分别为0.01、0.02、0.031 m/s;如图7(c)所示,水口浸入深度调为110 mm时,在上述拉速下钢渣界面

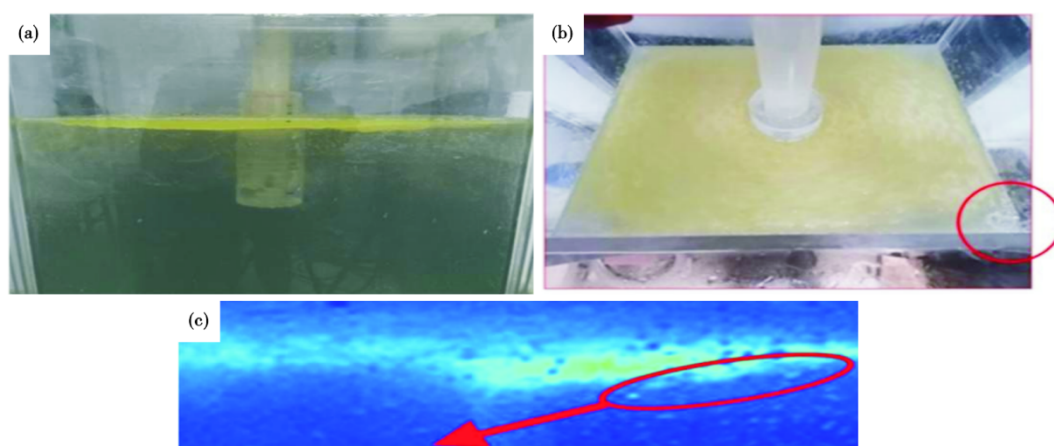


图 6 水口浸入深度 90 mm、拉速 0.45 m/min 工况条件下的结晶器钢渣界面:(a)结晶器宽面正视图,(b)结晶器俯视图,(c)PIV 拍摄到的卷渣现象

Fig. 6 Mould steel slag interface under the working conditions of water inlet immersion depth of 90 mm and casting speed of 0.45 m/min: (a) broad front view of the mold, (b) top view of the mould, (c) slag entrapment on PIV

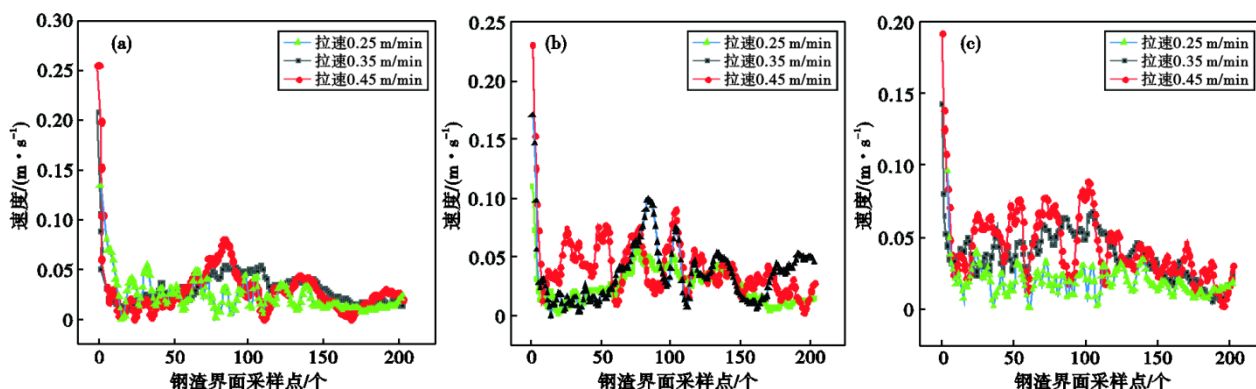


图 7 不同工况条件下的结晶器钢渣界面速度图:(a)浸入深度 90 mm,(b)浸入深度 100 mm,(c)浸入深度 110 mm

Fig. 7 Interface velocity diagram of mould slag under different operating conditions : (a) immersion depth 90 mm, (b) immersion depth 100 mm, (c) immersion depth 110 mm

处的钢液最大流速分别为 0.09、0.14、0.19 m/s, 钢液流速标准差分别为 0.008、0.016、0.022 m/s。采用固体石蜡来模拟钢液中的固态夹杂物, 利用高速摄像机拍摄固体石蜡的运动过程, 计算得到夹杂物的上浮时间, 如表 3 中给出了各工况条件下结晶器内夹杂物上浮时间和钢渣界面情况, 可以明显看出, 在拉速 0.35 m/min, 水口浸入深度 100、110 mm 工况条件下钢渣界面液面情况基本良好, 液面比较活跃, 但是浸入深度 110 mm 相对而言不利于夹杂物的上浮, 所以, 该钢厂立式连铸大方坯结晶器铸坯较适宜的工况条件为拉速 0.35 m/min, 水口浸入深度 100 mm。

3 现场验证结果

3.1 结晶器液渣层变化

采用旋流水口, 在拉速为 0.35 m/min, 浸入深度

100、110 mm 的工况下, 采用浸入深度 100 mm 时结晶器保护渣消耗量略高, 说明采用浸入深度 100 mm 钢渣界面更活跃。在水口与结晶器窄面距离分别为 1/2、1/4、0 的位置, 同时测结晶器保护渣液渣层厚度。在拉速为 0.25 m/min 时, 液渣层厚度都几乎没有变化; 在拉速为 0.35 m/min, 浸入深度 90 mm 时液渣层厚度分别为 6、6、4 mm; 浸入深度 100 mm 时液渣层厚度分别为 6、6、5.5 mm; 浸入深度 100 mm 时液渣层厚度分别为 6、6、5.8 mm。在拉速为 0.35 m/min 时液渣层厚度变化过大。

3.2 铸坯皮下夹杂

在拉速为 0.35 m/min, 浸入深度 100、110 mm 的工况下浇铸的铸坯, 皮下夹杂总量分别为: 0.15%~0.90%、0.25%~0.85%, 这说明, 采用浸入深度 100 mm 时, 更有利于夹杂物上浮。

表 3 不同工况条件下 40Mn2 钢结晶器内夹杂物上浮时间和钢渣界面情况

Table 3 The floating time of inclusions and the interface of steel slag in 40Mn2 steel mould under different operating conditions

浸入深度/mm	拉速/(m·min ⁻¹)	夹杂物上浮时间/s	液面情况
90	0.25	8.0	液面不活跃
	0.35	8.4	偶有卷渣,液面比较活跃
	0.45	8.9	明显卷渣,液面比较活跃
100	0.25	10.2	液面不活跃
	0.35	10.6	基本良好,液面比较活跃
	0.45	11.2	明显卷渣,液面比较活跃
110	0.25	12.0	液面不活跃
	0.35	12.5	基本良好,液面比较活跃
	0.45	13.2	偶有卷渣,液面比较活跃

4 结论

(1)水口浸入深度为 90 mm,拉速为 0.25、0.35、0.45 m/min 时,钢渣界面处的钢液最大流速分别为 0.125、0.21、0.26 m/s,拉速 0.25 m/min 时钢渣界面保护渣流动性较差,不利于化渣,拉速为 0.35、0.45 m/min 时会发生卷渣。

(2)水口浸入深度为 100 mm,在上述拉速下钢渣界面处的钢液最大流速分别为 0.11、0.17、0.23 m/s,拉速 0.25 m/min 时钢渣界面保护渣流动性较差,不利于化渣,拉速为 0.35 m/min 时钢渣界面活跃,无卷

渣现象发生,拉速为 0.45 m/min 时会发生卷渣。

(3)水口浸入深度为 110 mm,在上述拉速下钢渣界面处的钢液最大流速分别为 0.09、0.14、0.19 m/s,拉速 0.25 m/min 时钢渣界面保护渣流动性较差,不利于化渣,拉速为 0.35 m/min 时钢渣界面活跃,但浸入深度较大,相对而言不利于夹杂物的上浮,拉速 0.45 m/min 时会发生卷渣。

(4)为了防止卷渣现象的发生、促进保护渣熔化和夹杂物上浮,该钢厂立式连铸 40Mn2 大方坯结晶器铸坯较适宜的操作参数为拉速 0.35 m/min,水口浸入深度 100 mm。

参考文献

- [1] 陈远清. 连铸大圆坯宏观碳偏析的控制研究[D]. 北京: 钢铁研究总院, 2019.
- [2] SGRO A, RINALDI M, ACCARDO G. A New Benchmark in Special Steel Casting: New Twin-Strand Vertical Caster at Posco Specialty Steel, Korea: Proceedings of the 6 th International Congress on the Science and Technology of Steelmaking(I) [C]. Beijing: The Chinese Society for Metals, 2015:5.
- [3] Zhang L W, Wang Z L, Xu C J, et al. A vertical continuous casting machine for large blooms [J]. Ironmaking & Steelmaking, 2019, 46(8): 742-746.
- [4] 张连望. 大规格合金钢圆坯立式连铸过程综合冶金行为研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2021.
- [5] 景志俊. 特厚板坯结晶器内水口流场及温度场研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015.
- [6] 金业磊. 圆坯结晶器水口优化的模拟研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2016.
- [7] Odenthal H J, Pfeifer H, Lemanowicz I, et al. Simulation of the submerged energy nozzle-mold water model system using laser-optical and computational fluid dynamics methods[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2002, 33(2): 163-172.
- [8] Chen J, Su Z J, Li D G, et al. Flow behavior in the slab mold under optimized swirling technology in submerged entry nozzle [J]. ISIJ International, 2018, 58(7): 1242-1249.
- [9] 石红燕, 吴春雷, 刘利, 等. 电磁旋流水口对圆坯结晶器液面波动的控制[J]. 连铸, 2021, 46(6): 24-28.
- [10] 吴光辉, 唐海燕, 程鹏飞, 等. 浸入式水口结构对 180 mm×240 mm 断面连铸结晶器内钢液流动行为的影响[J]. 炼钢, 2017, 33(4): 31-38+45.
- [11] 张静, 马靓, 吴会平. 水口结构对连铸中低碳钢流场和温度场的影响[J]. 钢铁, 2019, 54(8): 116-123.
- [12] 张静, 赵登飞, 吴会平. 结晶器电磁搅拌对连铸 GCr15 钢温度场分布的影响[C]//中国金属学会. 第十一届中国钢铁年会论文集——S02. 炼钢与连铸. 燕山大学车辆与能源学院能源与动力工程系, 2017:6.
- [13] 王超, 张慧, 马忠伟, 等. 圆坯结晶器水口优化的模拟研究[C]//钢铁研究总院,《钢铁研究学报》编辑部. 钢铁流程绿色制造与创新技术交流会议论文集. 钢铁研究总院连铸技术国家工程研究中心; 钢铁研究总院先进钢铁流程及材料国家重点实验室, 2018:7.
- [14] 潘鹏, 侯栋, 戈文英, 等. 连铸坯凝固末端电磁搅拌位置及连铸工艺优化[J]. 连铸, 2022, (2): 66-76+88.
- [15] 吴耀光, 陈远清, 仇圣桃, 等. 大圆坯连铸用新型旋流水口的数值模拟[J]. 钢铁钒钛, 2009, 30(4): 49-54.
- [16] 程晓文, 付谦惠, 戴方钦, 等. 旋流水口浇铸技术在大方坯连铸的应用研究[J]. 炼钢, 2015, 31(5): 32-37.
- [17] 张志霄, 韩蕾蕾, 李向龙, 等. 旋流水口对大圆坯结晶器内流动及夹杂物去除行为影响[J]. 连铸, 2023, 48(4): 48-54.

- [18] 孙海波, 韩占光, 钱宏智, 等. 注流方式对大方坯连铸结晶器内钢水流动与温度状态影响[J]. 北京科技大学学报, 2010, 32(9): 1131-1137.
- [19] 任磊, 张立峰, 王强强, 等. 基于PIV技术的板坯连铸结晶器内钢水流动行为研究[J]. 工程科学学报, 2016, 38(10): 1393-1403.
- [20] Jiang D B, Peng X X, Ren Y, et al. Water modeling on slag entrainment in the slab continuous casting mold [J]. Metallurgical Research & Technology, 2022, 119(6): 601.
- [21] Hakamura H, Kohira S, Kubota J, et al. Technology for production of high quality slab at high speed casting [C]//Steelmaking Conference Proceedings. 1992, 75: 409-415.
- [22] Teshima T, Osame M, Okimoto K, et al. Improvement of surface property of steel at high casting speed[J]. Iron and Steel Society, Inc., Continuous Casting., 1992: 115-122.
- [23] Kubota J, Okimoto K, Suzuki M, et al. Mechanism of level fluctuation and mold powder catching in slab continuous casting at high speeds[C]//IISC. The Sixth International Iron and Steel Congress. 1990, 3: 356-363.
- [24] 杨文轩, 王勇, 高锦国, 等. 1500 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[J]. 特殊钢, 2022, 43(2): 21-26.
- [25] 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): 63-70.
- [26] Yuan Q, Vanka S P, Thomas B G, et al. Computational and experimental study of turbulent flow in a 0.4-scale water model of a continuous steel caster [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2004, 35(5): 967-982.
- [27] 程鹏飞, 唐海燕, 吴光辉, 等. 方坯连铸结晶器内表面流速与卷渣行为模拟[J]. 连铸, 2017, 42(2): 1-6.
- [28] 倪升起, 彭世恒. 电磁制动条件下板坯结晶器内钢液冶金行为的数值模拟[J]. 钢铁钒钛, 2011, 32(4): 36-41.
- [29] 张青学. 吹氩板坯连铸结晶器内钢/渣界面行为的物理模拟[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
- [30] 贺美乐. 大方坯结晶器流场与温度场数理模拟的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2016.
- [31] 刘鹏, 郑万, 王君驰, 等. 薄板坯连铸漏斗形结晶器内卷渣行为物理模拟[J]. 中国冶金, 2023, 33(2): 80-88.