

基于 PIV 技术的板坯连铸结晶器内钢水流动行为研究

任磊, 张立峰[✉], 王强强, 赵星

北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083

✉ 通信作者, E-mail: zhanglifeng@ustb.edu.cn

摘要 利用粒子图像测速技术, 以 200 mm × 2040 mm 板坯连铸结晶器为原型, 建立 1:4 水模型进行实验, 对结晶器内钢液流动形态、流速及各流态所占比例、液面波动、以水口为中心结晶器两侧对称点速度随时间的变化、水口两侧液面水平流速、水口两侧对称位置液面至结晶器底部垂直方向速度和钢液对两侧窄面的冲击深度进行系统地研究和分析, 并对比拉速的影响。研究表明, 粒子图像测速技术不仅可以测量结晶器内流场流速, 还可以对流场对称性进行全方位、多角度定量分析, 为研究连铸参数变化, 比如拉速、水口结构和水口浸入深度, 对板坯连铸结晶器内钢液流动及对称性的影响提供一种较为精确的方法和思路。通过分析得出, 在本实验条件下拉速 $0.5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 优于 $0.6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

关键词 连铸; 结晶器; 流体流动; 粒子图像测速技术; 对称性

分类号 TF777.1

Study on fluid flow in a continuous casting slab mold using particle image velocimetry

REN Lei, ZHANG Li-feng[✉], WANG Qiang-qiang, ZHAO Xing

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

✉ Corresponding author, E-mail: zhanglifeng@ustb.edu.cn

ABSTRACT A 1/4 scale water model of slab molds was built to investigate the fluid flow and its symmetry during casting. The model was established according to a 200 mm × 2040 mm actual mold. The velocity in the mold was measured by using particle image velocimetry (PIV). By analyzing the velocity field, the fluid flow behaviors such as flow patterns, level fluctuation, time history of speed on symmetrical points, horizontal speed below the meniscus, vertical speed nearby the narrow face and impingement depth could be studied. The effect of casting speed on the fluid flow behaviors mentioned above was investigated. The results show that the PIV technology can not only measure the velocity field, but also show the flow symmetry in a distinctive perspective so that proposing measures for the continuous casting process, such as casting speed, the geometric of the submerged entry nozzle (SEN) and submergence depth of SEN. After analysis, a conclusion can be drawn that the casting speed at $0.5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ is better than $0.6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ under the casting condition. The results show that the PIV technology is a useful method to optimize the continuous casting conditions.

KEY WORDS continuous casting; molds; fluid flow; particle image velocimetry; symmetry

连铸结晶器内的钢液流动是一个复杂的三维湍流流动, 由于其工作条件和环境所限无法对结晶器内部钢液流动特征进行直接研究, 但生产过程中若对其内部钢液的流动形态^[1]、以水口为中心两侧流股的对称

性^[2]、液面流速^[3]、液面波动^[4]等指标控制不当就会引起液态保护渣卷入钢液^[5-7], 造成连铸坯质量下降。Yoshida 等^[8]研究发现液态保护渣卷入结晶器钢液内部主要有五种方式(如图 1 所示): (1) 钢液从水口两

侧射出时若流速不同,流速较大一侧钢液撞击结晶器窄面后形成上回流冲击弯月面,使钢渣界面剧烈波动,这有可能使液渣被卷入钢液被凝固坯壳捕获。(2)由于滑板控流操作不当、水口未对中、水口堵塞等导致的非对称流使结晶器液面水口两侧流股流速不同,在流速较小一侧会形成卡门涡,该涡会将液态保护渣吸入钢液被凝固坯壳捕获。(3)当大尺寸气泡上浮穿过钢渣界面时,气泡会将部分钢液托举脱离钢液基体,当气泡继续上浮破裂进入大气后被脱离钢液基体的钢液膜由于重力又回到钢液中,该过程会将少量液态渣卷入钢液被流股带至凝固前沿被凝固坯壳捕获。(4)钢渣界面的 Kelvin-Helmholtz^[9] 不稳定现象会使保护渣滴落卷入钢液被流股带至凝固前沿被凝固坯壳捕获。(5)非对称流导致的水口两侧流股的速度差还会使水口两侧形成压力差,流速较小一侧的负压会将液态保护渣沿着水口外壁吸入钢液,当保护渣流至水口出口时被流股冲至凝固前沿被凝固坯壳捕获。其中(3)只有在吹气的情况下才会发生,而(1)、(2)、(4)和(5)均与结晶器内部以水口为中心两侧钢液流动不对称有关,因此生产过程中为了避免发生卷渣应设法使钢液在结晶器内的流动行为稳定且对称。Thomas等^[10]和 Sanchez-Perez等^[11]采用气泡示踪,Torres-Alonso等^[12]采用墨水示踪显示钢液在结晶器内的流动形态,Chaudhary等^[13]在结晶器内某些位置布置探测器测量该点流速,通过对比对称位置的速度大小及随时间的变化研究流场对称性。但是,示踪实验虽能显示流态,无法得知结晶器内水口两侧流速大小是否对称,而探测器只能获得某些位置的流速无法获得流态。随着流体力学的发展,粒子图像测速技术(particle image velocimetry, PIV)被应用于研究冶金反应器内部流场^[14-17],Yuan等^[18]的研究结果中获得结晶器整个范围内的流态和流速的方法是:利用粒子图像测速技术对结晶器分区拍摄,得到结晶器内局部流态及流速,然后将不同区域的多次测量结果求平均后拼接起来,这种方法虽然能得到结晶器内钢液流态和流速,但是由于无法同时得到同一时刻结晶器内以水口为中心两侧流场,所以无法研究连铸参数变化对结晶器内钢液流动对称性的影响。

基于此,本文采用 1:4 比例的水模型,利用粒子图像测速技术并将拍摄区域扩大为整个流场范围,得到不同时刻钢液在结晶器内的速度场,在此基础上研究结晶器内钢液流动特征,包括钢液在结晶器内流动形态、流速、各流态所占比例和液面波动,并进一步分析拉速对板坯连铸结晶器内钢液流动的对称性的影响,对称性优劣的评价指标包括水口两侧对称点速度随时间的变化、水口两侧液面水平流速、水口两侧对称位置液面至结晶器底部垂直方向速度和钢液对两侧窄面的

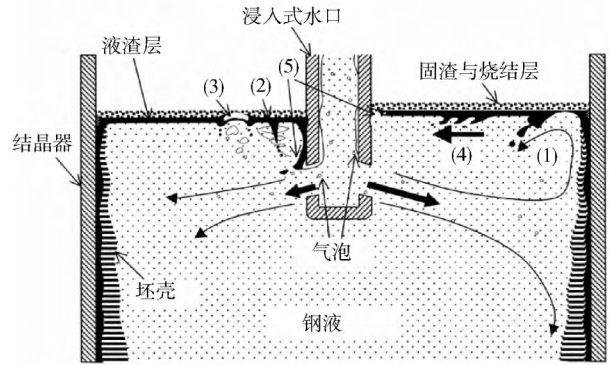


图 1 结晶器卷渣的五种主要形式^[8]

Fig. 1 Five mechanisms of mold powder entrapment

冲击深度。

1 实验

1.1 物理模拟实验方法

本实验的结晶器水模型的建立基于相似原理,模型与原型比为 1:4,且保证其 Fr 准数相等,如式(1)所示为弗鲁德准数。图 2 为结晶器水模拟实验装置示意图,包括中间包、浸入式水口和结晶器,计量泵和玻璃转子流量计。结晶器水模型断面尺寸为 50 mm × 510 mm。浸入式水口出口形状为椭圆形,出口角度为 0°,如图 3 所示。

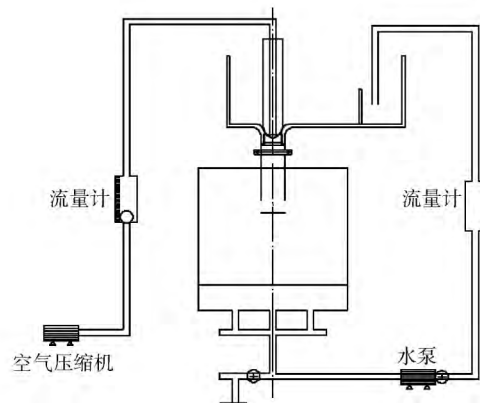


图 2 水模型实验装置图

Fig. 2 Water model of the mold

$$Fr = \frac{V^2}{gl} \quad (1)$$

由于采用模型与原型几何尺寸比例为 1:4,模型与原型的速度之比经公式(2)~(4)推导所得。

$$Fr_m = Fr_p \quad (2)$$

$$\frac{V_m^2}{gl_m} = \frac{V_p^2}{gl_p} \Rightarrow \frac{V_m^2}{l_m} = \frac{V_p^2}{l_p} \quad (3)$$

$$\frac{V_m}{V_p} = \sqrt{\frac{l_m}{l_p}} = \sqrt{\frac{1}{4}} = \frac{1}{2} = 0.5 \quad (4)$$

式中: V 为钢水速度, $m \cdot s^{-1}$; l 为特征长度, m ; g 为重力

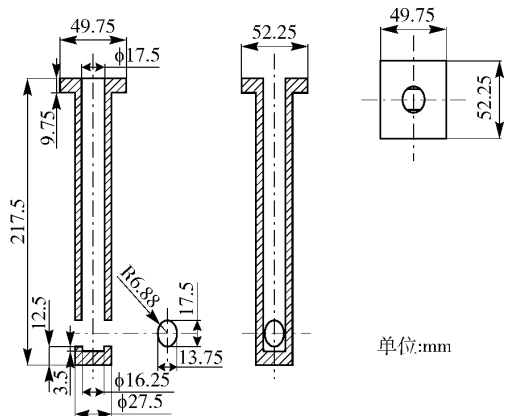


图3 实验所用水口结构及尺寸

Fig. 3 Geometric of the submerged entry nozzle (SEN)

加速度 $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$; 下标 m 代表模型; 下标 p 代表原型.

本文在利用粒子图像测速技术研究结晶器内部流动特征后发现,在拉速为 $0.425\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,流态中单辊流所占比例较多,原因是结晶器原型为宽幅(宽厚比为 11:1),钢液从水口射出后要经过很长一段距离才能到达窄面,动能损失较多,冲击点下移,导致上回流较弱.因此,考虑适当提高连铸拉速.将水模型拉速从满足相似比的 $0.425\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 提升至 $0.5\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$,但是拉速不能一味提高,需要考虑现场连铸的节奏、液面波动等情况,因此本文对比了提升拉速后两种拉速 $0.5\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $0.6\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 下结晶器内的流动特征及对称性.表 1 为结晶器原型与模型的主要参数对比.

1.2 粒子图像测速系统

粒子图像测速技术系统包括激光光源系统、激光器电源、同步控制器、计算机以及电荷耦合器件 (charge coupled device, CCD) 相机,其原理为在流场中散播示踪粒子,用脉冲激光片光源照射所测流场区域,

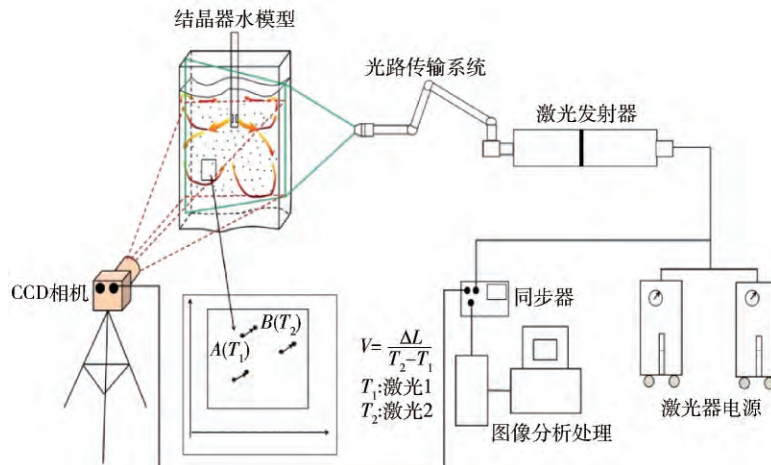


图4 粒子图像测速技术原理图

Fig. 4 Principle of PIV

表 1 原型与模型的主要参数

Table 1 Parameters of the actual and water model

参数	结晶器原型	1/4 水模型
断面尺寸/mm ²	200 × 2040	50 × 510
结晶器长/mm	900	550
工作液位/mm	100	25
水口浸入深度/mm	160	35
拉速/($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	0.85	0.5; 0.6

通过连续两次或多次曝光,粒子的图像被记录在底片上或电荷耦合器件相机上,摄取该区域粒子图像的帧序列,并记录相邻两帧图像序列之间的时间间隔,进行图像相关分析识别示踪粒子图像的位移,从而得到流体的速度场.图 4 所示为粒子图像测速技术原理图.图中 T_1 为激光 1 发射时刻, μs ; T_2 为激光 2 发射时刻, μs ; ΔL 为 $T_2 - T_1$ 时间内示踪粒子移动的距离, m ; V 为 $T_2 - T_1$ 时间内示踪粒子的运动速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

本实验粒子图像测速激光发射器采用北京镭宝光电技术有限公司生产的型号为 Vlite380 脉冲固体激光器系统,电荷耦合器件采用美国 TSI 公司生产的型号为 63062 相机,运用 Insight 4G 软件对图像分析处理.拍摄模式为序列模式,数量设置为 100,激光脉冲频率为 1.92 Hz (相邻两个瞬态的时间间隔为频率的倒数,即 0.52 s,在结晶器液位稳定下抓拍 100 个瞬态),那么连续抓拍时间为 52 s 左右,激光延迟选择 400 μs ,粒子图像测速曝光选择 410 μs ,计算速度矢量时两帧时间间隔 1200 μs .

2 结果分析与讨论

2.1 结晶器内流态显示及流速测量

图 5 为拉速 $0.5\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 结晶器内不同时刻典型流态,将开始拍摄时刻记为 0 s.由图 5(a) 可知,距开

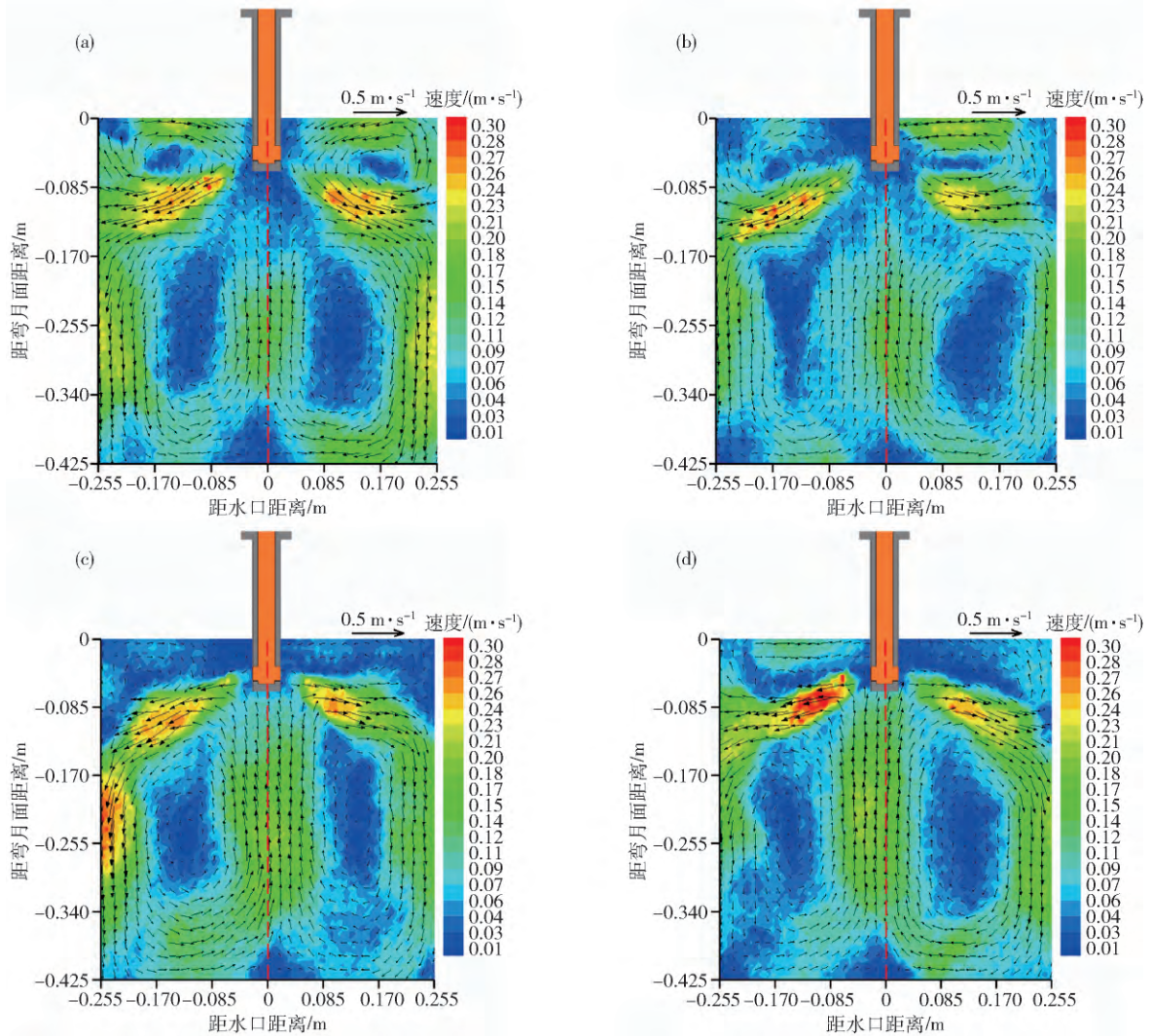


图 5 拉速为 $0.5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 时结晶器内典型钢液流动流态. (a) $t=0.52 \text{ s}$; (b) $t=11.44 \text{ s}$; (c) $t=33.80 \text{ s}$; (d) $t=46.80 \text{ s}$

Fig. 5 Typical flow patterns in the mold at a casting speed of $0.5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$: (a) $t=0.52 \text{ s}$; (b) $t=11.44 \text{ s}$; (c) $t=33.80 \text{ s}$; (d) $t=46.80 \text{ s}$

始拍摄时间 t 为 0.52 s 时钢液从水口射出撞击弯月面后分为上回流和下回流,且左右两侧强度一致,流股较为对称,流态为双辊流;由图 5(b) 可知, 11.44 s 时水口出口右侧钢液流较左侧明显上翘,导致水口右侧上回流强于左侧,形成右强左弱的不对称流;由图 5(c) 可知, 33.80 s 时钢液从水口射出后射流角度较 0.52 s 和 11.44 s 时向下偏转,导致冲击点下移,上回流强度减弱,形成单辊流;由图 5(d) 可知, 46.80 s 时水口出口左侧钢液流较右侧明显上翘,导致水口左侧上回流强于右侧,形成左强右弱的不对称流。

图 6 为拉速为 $0.6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 结晶器内不同时刻典型流态,同样地将开始拍摄时刻记为 0 s 。由图 6 可知,距开始拍摄 0.52 s 时结晶器内钢液流态为左侧强流, 25.48 s 时为单辊流, 37.44 s 时为双辊流, 48.36 s 时为右侧强流。对比图 5 和图 6 可知,当拉速由 $0.5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 增大至 $0.6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,结晶器内钢液流动的典型流态均为双辊流、单辊流、左侧强流和右侧强流,拉

速增大结晶器内钢液流速加快。

图 7 为结晶器内钢液流态及流速的 52 s 时均图。其中图 7(a) 为拉速 $0.5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 时结晶器内钢液时均流场,可以看出不同时刻结晶器内钢液的流态在不停变化,这是湍流的特点,但是只要连铸条件选择合适能使各流态所占比例适中,能使其时均流场维持稳定的双辊流且以水口为中心结晶器左右两侧流股较为对称;图 7(b) 为拉速 $0.6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 时结晶器内钢液时均流场,可以看出当拉速由 $0.5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 增加至 $0.6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 时结晶器内钢液流速增大,左侧强流出现的频率较大,导致其 52 s 时均流态为极其不对称的左侧强流。Gupta 和 Lahiri^[2] 在研究中发现,结晶器水模型内流场的对称性若排除结构的不对称(水口出口角度、形状等在制作时产生的误差)或者操作不当(水口未对中)与以下因素有关:结晶器水模型的出水方式(多孔排水或者蛇形排水)、结晶器的长度和结晶器的断面宽厚比。本实验建立的水模型为多孔排水,此种排水方

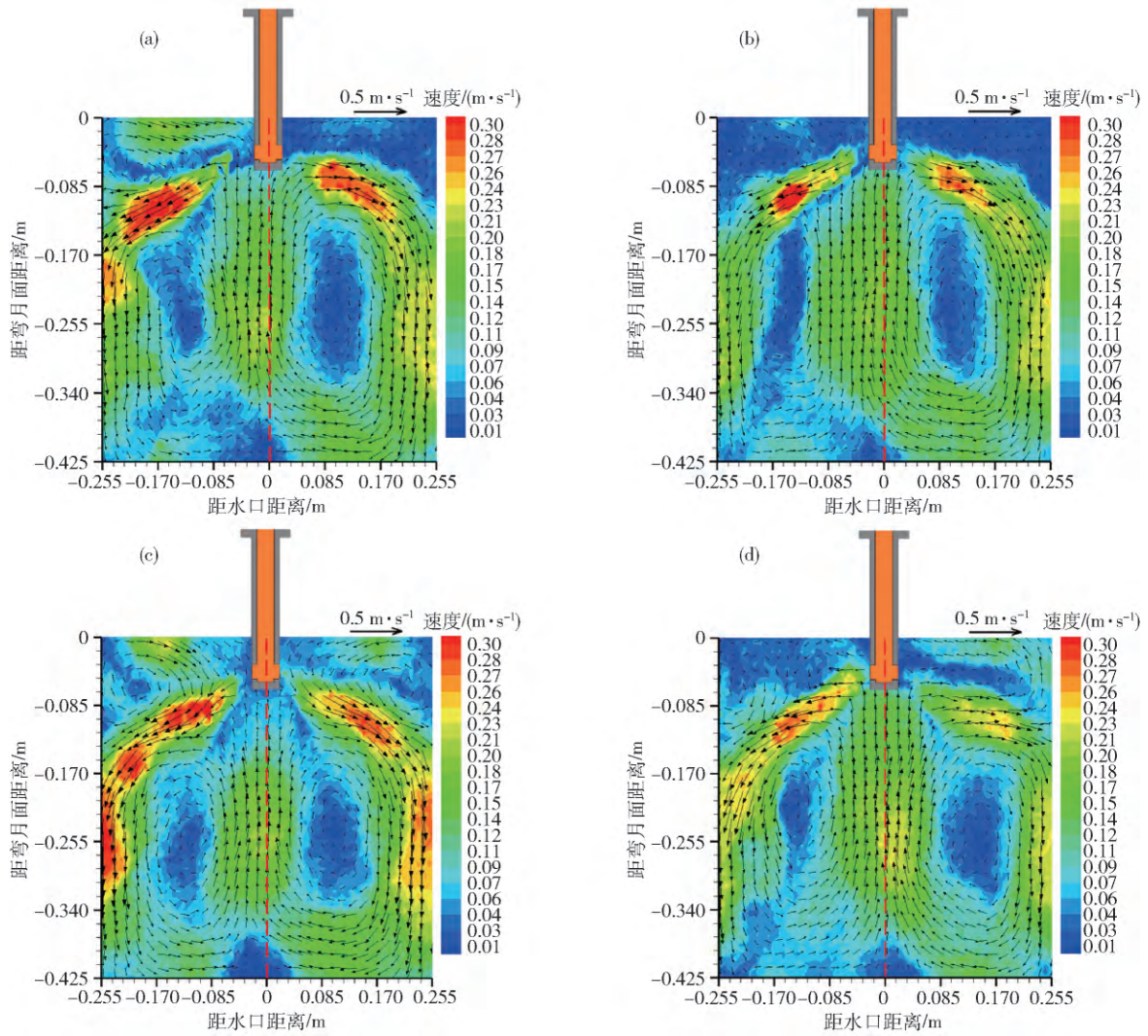


图 6 拉速为 $0.6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 时结晶器内典型钢液流动流态. (a) $t = 0.52 \text{ s}$; (b) $t = 25.48 \text{ s}$; (c) $t = 37.44 \text{ s}$; (d) $t = 48.36 \text{ s}$

Fig. 6 Typical flow patterns in the mold at a casting speed of $0.6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$: (a) $t = 0.52 \text{ s}$; (b) $t = 25.48 \text{ s}$; (c) $t = 37.44 \text{ s}$; (d) $t = 48.36 \text{ s}$

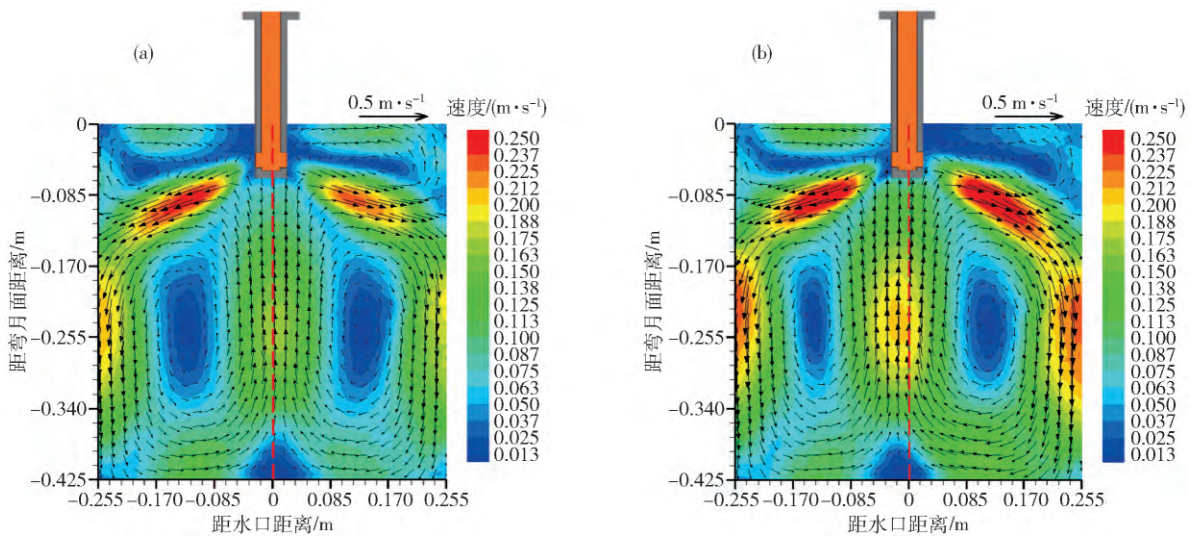


图 7 不同拉速下结晶器内钢液流态 52 s 时均图. (a) $0.5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$; (b) $0.6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Fig. 7 Time-averaged flow patterns at different casting speeds: (a) $0.5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$; (b) $0.6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

式下,流场的对称性的影响因素主要为结晶器的长度和断面宽厚比.在做结晶器水模型实验时,结晶器的实际长度为在根据几何相似原型与模型对应的长度基础上延长一段距离,若这段距离过长,结晶器下部的两个环流不能到达结晶器底部,此时容易引起流场不对称(Gupta的这种说法是否准确还有待进一步考证);若结晶器断面宽厚比大于某个临界值时,流体从水口射出后会先撞击宽面,形成扰动,之后才到达窄面,这样也容易引起流场的不对称.

图8对比拉速为 $0.5\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $0.6\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 下,在拍摄时长52 s内结晶器内钢液流动各典型流态所占的百分比.可以看到:拉速为 $0.5\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 时单辊流占33%,双辊流占31%,左侧强流占18%,右侧强流占18%;拉速为 $0.6\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 时单辊流占15%,双辊流占10%,左侧强流占70%,右侧强流占5%.说明拉速增大结晶器内钢液流动的稳定性变差,导致对称性变差,在实际生产过程中若结晶器内长时间出现这种非对称流股则非常容易引起前述三种方式的卷渣,使连铸坯质量下降.因此如若想提高拉速提高产量,首先必须优化连铸参数优化结晶器内流场.

2.2 结晶器内钢液流动对称性分析

衡量结晶器内钢液流动对称性优劣的指标包括水口两侧对称点速度大小随时间的变化、水口两侧液面水平流速、水口两侧对称位置液面至结晶器底部垂直方向速度和钢液对两侧窄面的冲击深度.图9为衡量结晶器内钢液流动对称性优劣的速度提取位置示意图,设原点为工作液面与水口中心线的交点,水平向右和重力方向分别为 x 轴和 y 轴正方向.图9(a)为水口两侧对称点速度大小随时间变化的提取位置,液面

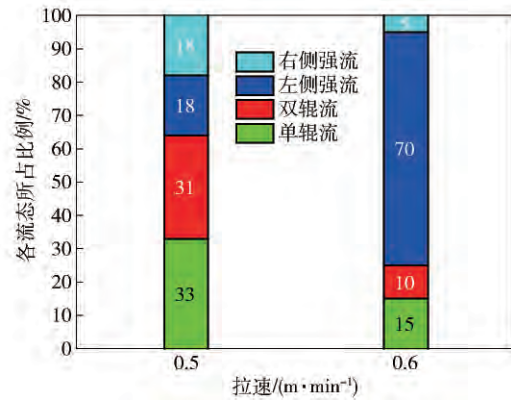


图8 不同拉速下结晶器内钢液各流态所占比例

Fig. 8 Fractions of different flow patterns at different casting speeds

下132 mm,水口两侧距水口中心线116 mm的P1和P11点;图9(b)为水口两侧液面水平流速提取位置,为了排除液面波动对水平流速造成的影响,取液面下10 mm;图9(c)为水口两侧对称位置液面至结晶器底部垂直方向速度提取位置,距水口中心线246 mm的两侧窄面和距水口中心线左右两侧129 mm的宽度1/4处.

2.2.1 对称点速度大小随时间的变化

图10为P1和P11两点 X 方向速度大小随时间的变化.由于水口两侧 X 方向钢液流动方向相反,所以为了研究其对称性取其绝对值.图10(a)为拉速 $0.5\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 时P1和P11两点 X 方向速度大小随时间的变化,P1点处 X 方向速度52 s平均值为 $0.205\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,P11点处 X 方向速度52 s平均值为 $0.212\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,两者差值为 $0.007\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;图10(b)为拉速 $0.6\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 时P1和P11两点 X 方向速度大小随时间的变化,P1点

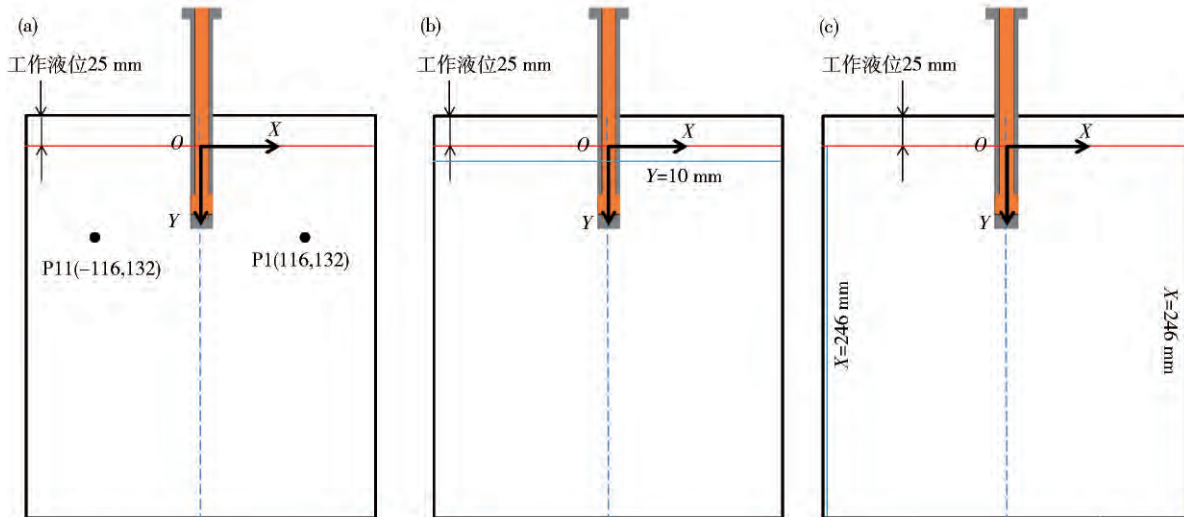


图9 衡量结晶器内钢液流动对称性优劣速度提取位置. (a) 液面下132 mm,且距水口中心线116 mm; (b) 水口两侧液面下10 mm; (c) 距水口中心线246 mm和129 mm

Fig. 9 Velocity contrast locations and orientations: (a) 132 mm below the meniscus and 116 mm to the center line of SEN; (b) 10 mm below the meniscus; (c) 246 mm and 129 mm to the center line of SEN

处 X 方向速度 52 s 平均值为 $0.225 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, P11 点处 X 方向速度 52 s 平均值为 $0.209 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 两者差值为 $0.016 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

图 11 为 P1 和 P11 两点 Y 方向速度大小随时间的变化, 粒子图像测速系统默认重力方向速度为负, 在 P1 和 P11 处 Y 方向速度指向重力方向, 所以其速度为负. 图 11(a) 为拉速 $0.5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 时 P1 和 P11 两点 Y

方向速度大小随时间的变化, P1 点处 Y 方向速度 52 s 平均值为 $-0.042 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, P11 点处 Y 方向速度 52 s 平均值为 $-0.056 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 两者差值为 $0.014 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 图 11(b) 为拉速 $0.6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 时 P1 和 P11 两点 Y 方向速度大小随时间的变化, P1 点处 Y 方向速度 52 s 平均值为 $-0.082 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, P11 点处 Y 方向速度 52 s 平均值为 $-0.030 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 两者差值为 $0.052 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

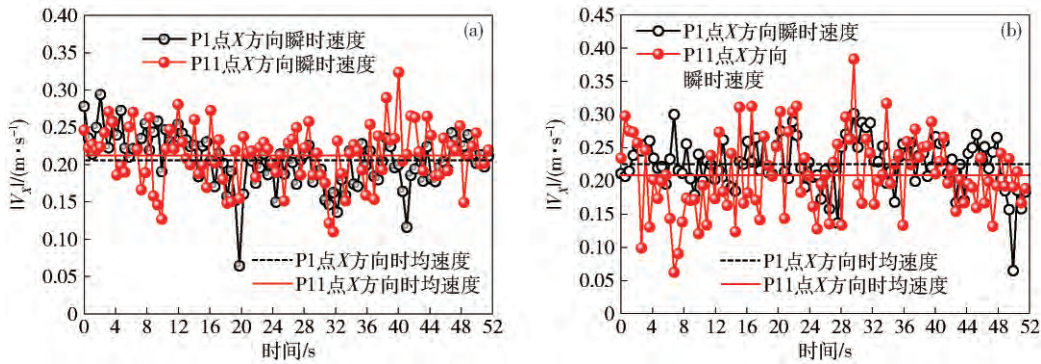


图 10 不同拉速下 X 方向速度大小随时间的变化. (a) $0.5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$; (b) $0.6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$

Fig. 10 Time-history of X direction speed at different casting speeds: (a) $0.5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$; (b) $0.6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$

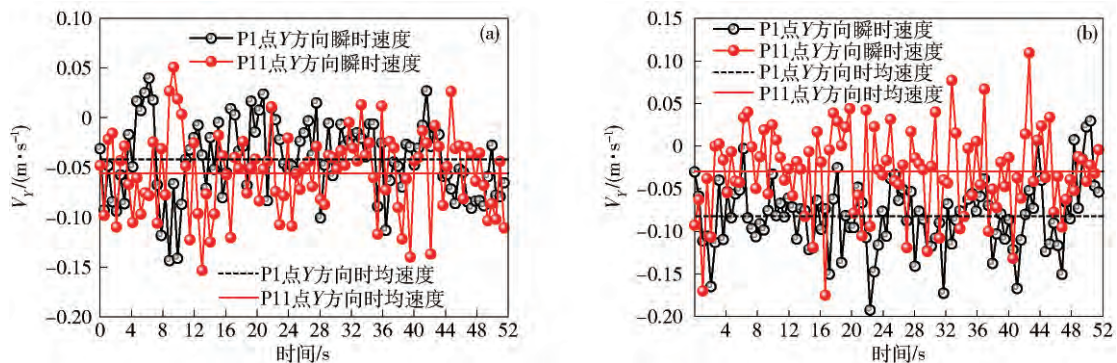


图 11 不同拉速下 Y 方向速度大小随时间的变化. (a) $0.5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$; (b) $0.6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$

Fig. 11 Time-history of Y direction speed at different casting speeds: (a) $0.5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$; (b) $0.6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$

图 12 为 P1 和 P11 两点合速度大小随时间的变化. 图 12(a) 为拉速 $0.5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 时 P1 和 P11 两点合速度大小随时间的变化, P1 点处合速度 52 s 平均值为 $0.213 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, P11 点处合速度 52 s 平均值为 $0.224 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

s^{-1} , 两者差值为 $0.011 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 图 12(b) 为拉速 $0.6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 时 P1 和 P11 两点合速度大小随时间的变化, P1 点处合速度 52 s 平均值为 $0.242 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, P11 点处合速度 52 s 平均值为 $0.216 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 两者差值为

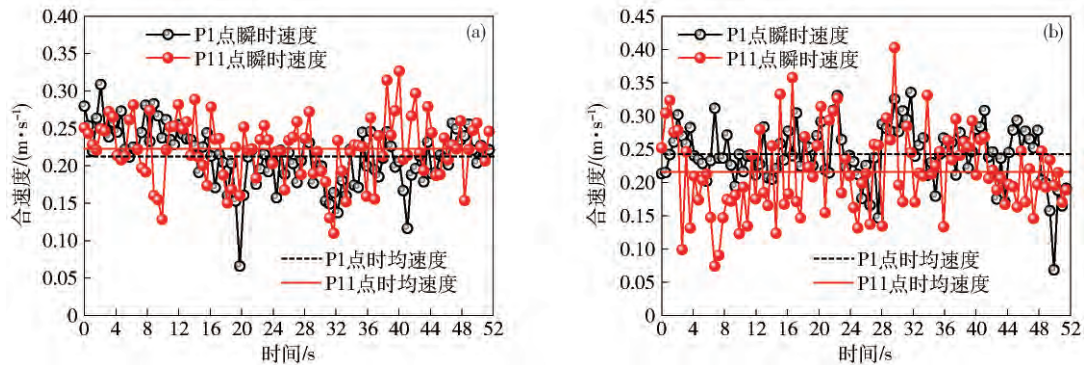


图 12 不同拉速下合速度大小随时间的变化. (a) $0.5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$; (b) $0.6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$

Fig. 12 Time-history of resultant speed at different casting speeds: (a) $0.5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$; (b) $0.6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$

0.026 m·s⁻¹.

对比图 10 ~ 图 12 可知,拉速为 0.5 m·min⁻¹时在结晶器内选取的对称点 P1 和 P11 的速度对称性要优于拉速 0.6 m·min⁻¹,且速度的波动更小.

2.2.2 液面水平流速

图 13 为水口两侧水平方向速度大小 52 s 平均值.图 13(a) 为拉速 0.5 m·min⁻¹时液面下 10 mm 水平速度,水口左侧距水口中心线距离为 0.172 m 时水平速度最大,为 0.097 m·s⁻¹,水口右侧距水口中心线距离

为 0.172 m 时水平速度最大,为 0.103 m·s⁻¹,水口两侧水平速度出现最大值的位置相同,速度最大值相差 0.006 m·s⁻¹;图 13(b) 为拉速 0.6 m·min⁻¹时液面下 10 mm 水平速度大小 52 s 平均值,水口左侧距水口中心线距离为 0.150 m 时水平速度最大,为 0.128 m·s⁻¹,水口右侧距水口中心线距离为 0.172 m 时水平速度最大,为 0.058 m·s⁻¹,水口两侧水平速度出现最大值的位置不同,右侧比左侧远离水口中心 0.022 m,速度最大值相差 0.070 m·s⁻¹.

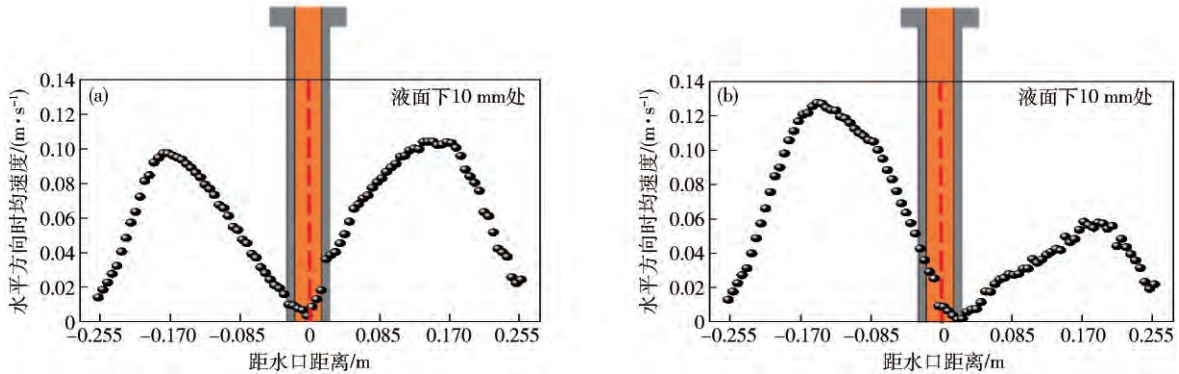


图 13 不同拉速下水平方向速度 52 s 平均值. (a) 0.5 m·min⁻¹; (b) 0.6 m·min⁻¹

Fig. 13 Time-averaged horizontal speed at different casting speeds: (a) 0.5 m·min⁻¹; (b) 0.6 m·min⁻¹

2.2.3 垂直方向流速及冲击深度

图 14 为窄面处由液面至结晶器底部垂直方向速度大小 52 s 时平均值.可以看到由液面至结晶器底部垂直方向速度变化规律为:先朝正方向(垂直向上)变大,达到最大后变小直至减为零,之后朝负方向(垂直

向下)逐渐变大,达到最大后逐渐变小.其中,窄面处垂直方向速度为零的点为钢液流对窄面的冲击点,其距液面的距离即为冲击深度,冲击点以上为上回流区,冲击点以下为下回流区.

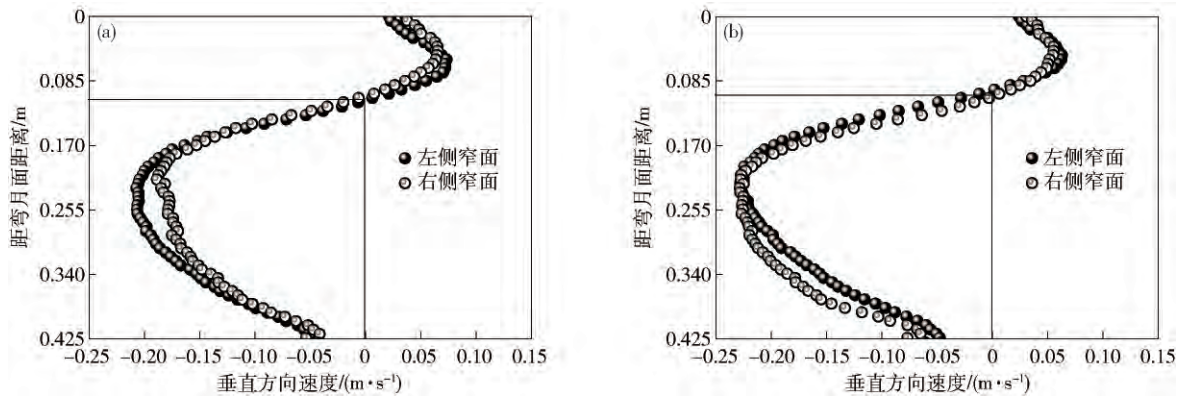


图 14 不同拉速下结晶器内两侧窄面由液面至结晶器底部垂直速度 52 s 时均值. (a) 0.5 m·min⁻¹; (b) 0.6 m·min⁻¹

Fig. 14 Time-averaged vertical speed at different casting speeds from the meniscus to bottom of the mold: (a) 0.5 m·min⁻¹; (b) 0.6 m·min⁻¹

图 14(a) 为拉速 0.5 m·min⁻¹时左右两侧窄面由液面至结晶器底部垂直方向速度大小 52 s 平均值,左侧窄面上回流最大垂直速度为 0.073 m·s⁻¹,出现在液面下 0.056 m 处,右侧窄面上回流最大垂直速度为 0.065 m·s⁻¹,出现在液面下 0.045 m 处;左侧窄面下回流最大垂直速度为 -0.207 m·s⁻¹,出现在液面下 0.226 m 处,右侧窄面下回流最大垂直速度为 -0.189

m·s⁻¹,出现在液面下 0.215 m 处.图 14(b) 为拉速 0.6 m·min⁻¹时左右两侧窄面由液面至结晶器底部垂直方向速度大小 52 s 平均值,左侧窄面上回流最大垂直速度为 0.063 m·s⁻¹,出现在液面下 0.051 m 处,右侧窄面上回流最大垂直速度为 0.055 m·s⁻¹,出现在液面下 0.039 m 处;左侧窄面下回流最大垂直速度为 -0.228 m·s⁻¹,出现在液面下 0.221 m 处,右侧窄面下回流最

大垂直速度为 $-0.228 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 出现在液面下 0.226 m 处。

图 15 为拉速 $0.5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $0.6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 下 52 s 时均冲击深度对比。由图可知: 拉速为 $0.5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 时左侧时均冲击深度为 110.3 mm , 右侧时均冲击深度为 104.6 mm , 左右两侧相差 5.7 mm , 平均值为 107.5 mm ; 拉速为 $0.6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 时左侧时均冲击深度为 99 mm , 右侧时均冲击深度为 104.6 mm , 左右两侧相差 5.6 mm , 平均值为 101.8 mm 。拉速增大, 冲击深度减小。

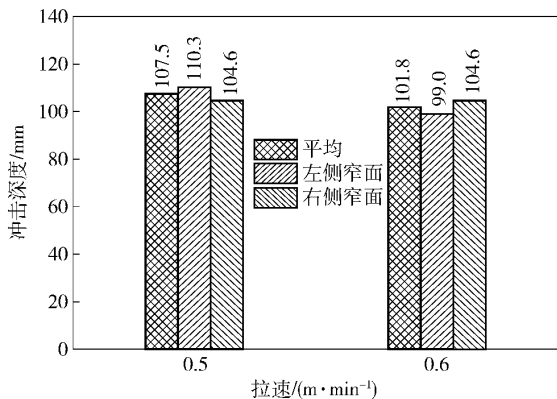


图 15 不同拉速下冲击深度对比

Fig. 15 Impingement depth at different casting speeds

2.3 结晶器液面波动及均方根 RMS 值

2.3.1 结晶器液面波动

结晶器液面的剧烈波动可造成卷渣、气孔等缺陷, 影响铸坯质量。图 16 为利用粒子图像测速中的电荷耦合器件相机捕捉到的某一时刻液面轮廓。图中水平实线为工作液位(液面距结晶器上沿的距离), 在水口两侧各均匀选取 8 个位置作为液面波动的监测点, 如图中垂直短实线所示, 测量每个监测点液面至工作液位的垂直距离, 采用相同的方法测量多个瞬态各监测点液面至工作液位的距离, 对各个监测点的测量值取平均便可得到监测时间内液面的平均轮廓, 每个瞬态各监测点液位偏离平均轮廓的距离即为其波动值。本实验测量了 40 个瞬态, 时长 20.8 s 的 16 个监测点的液面波动值。

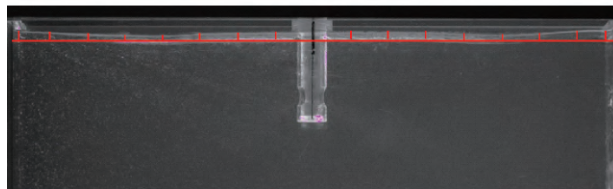


图 16 利用粒子图像测速技术测量液面波动示意图

Fig. 16 Schematic of measuring level fluctuation using PIV

图 17 为不同拉速下监测时间内液面轮廓的平均值, 同时显示监测时间内每个监测点液位的最高值和最低值, 液位在最高值和最低值之间波动。如图 18 (a) 所示, 拉速为 $0.5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 时结晶器内以水口中心线为中心, 水口两侧液面平均轮廓较为对称, 两侧窄面处由于上回流的冲击液面处在较高的位置, 在水口两侧距水口中心线距离为 161 mm 时液面位置最低, 且距水口中心线 161 mm 范围内液面波动较为剧烈; 图 18 (b) 为拉速 $0.6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 时液面平均轮廓及波动, 可知左侧窄面处液位较高, 而右侧窄面液位较低, 说明左侧上回流流速强于右侧, 且该拉速下每个监测点液面波动都很剧烈。

2.3.2 结晶器液面波动均方根值

采用液面波动的均方根 (root-mean-square, RMS) 来衡量结晶器内各监测点 i 液面波动的强弱, 其计算公式为

$$\Delta l_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta l_i)^2}{n}} \quad (5)$$

每一时刻监测点 i 的液面波动值为其偏离平均液位的距离, 即监测点 i 的液面轮廓瞬时值与平均值的差值, 即

$$\Delta l_i = l_i - \bar{l}_i \quad (6)$$

式中 l_i 为监测点 i 的液面轮廓瞬时值, \bar{l}_i 为监测点 i 液面轮廓平均值, n 为监测次数, Δl_i 为监测点 i 的液面波动值。

图 18 (a) 为拉速 $0.5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 下监测时间内结晶

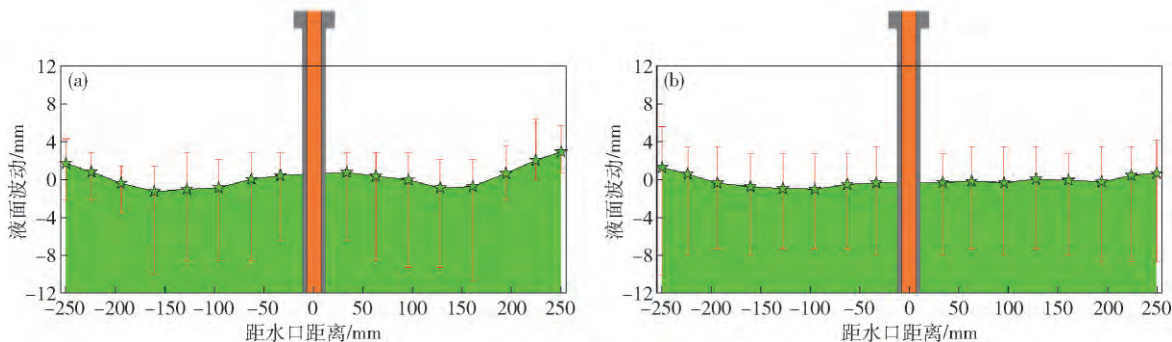


图 17 不同拉速下结晶器液面平均轮廓及波动。(a) $0.5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$; (b) $0.6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$

Fig. 17 Level fluctuation at different casting speeds: (a) $0.5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$; (b) $0.6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$

器液面波动均方根,可以发现以水口中心线为中心水口两侧液面波动均方根较为对称,两侧窄面液面波动均方根最小,说明波动最小;图18(b)为拉速 $0.6\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 下监测时间内结晶器液面波动均方根,可以发现

以水口中心线为中心水口两侧液面波动均方根对称性较差。对比图18(a)和(b)发现拉速 $0.6\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 时液面波动均方根大于拉速 $0.5\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,说明拉速增大液面波动有加剧的趋势。

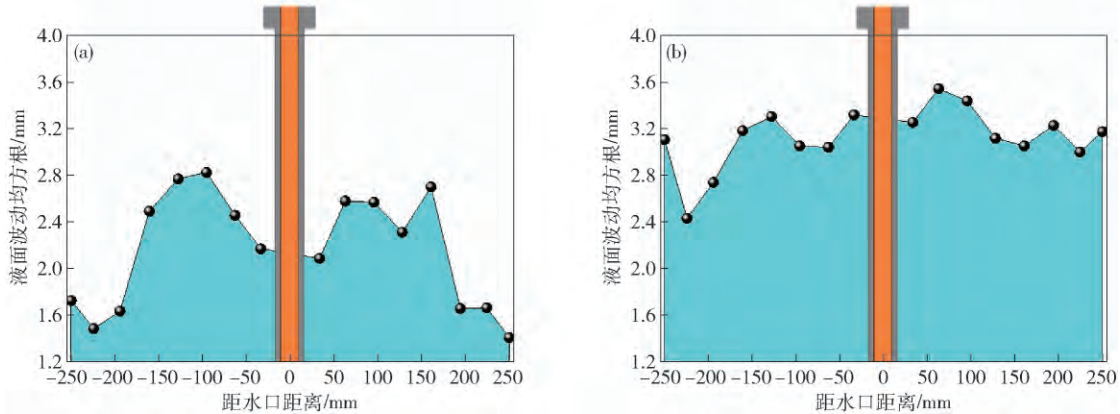


图18 不同拉速下结晶器液面波动均方根值。(a) $0.5\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$; (b) $0.6\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$

Fig. 18 RMS values of level fluctuation at different casting speeds: (a) $0.5\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$; (b) $0.6\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$

4 结论

(1) 基于利用粒子图像测速技术对结晶器内速度场的测量,分析了拉速 $0.5\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $0.6\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 下结晶器内的典型流态及各流态所占的比例。结果表明:拉速 $0.5\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 时单辊流占33%,双辊流占31%,左侧强流占18%,右侧强流占18%;拉速为 $0.6\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 时单辊流占15%,双辊流占10%,左侧强流占70%,右侧强流占5%。

(2) 基于利用粒子图像测速技术对结晶器内速度场的测量,分析了拉速 $0.5\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $0.6\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 下结晶器内流场的对称性。对称性的衡量指标包括:以水口为中心两侧对称点速度随时间的变化、液面水平流速、水口两侧对称位置液面至结晶器底部垂直方向速度和钢液对两侧窄面的冲击深度。结果表明拉速 $0.5\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 时的流场对称性更优。

(3) 基于利用粒子图像测速技术对结晶器内速度场的测量过程中电荷耦合器件相机捕捉的不同时刻液面轮廓,分析了拉速 $0.5\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $0.6\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 下结晶器内液面波动特征。结果表明拉速为 $0.5\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 时平均液面轮廓更加对称,而拉速为 $0.6\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 时液面波动更加剧烈。

参 考 文 献

[1] Ramos-Banderas A, Sánchez-Pérez R, Demedices-García L, et al. Mathematical simulation and physical modeling of unsteady fluid flows in a water model of a slab mold. *Metall Mater Trans B*, 2004, 35(3): 449

[2] Gupta D, Lahiri A K. A water model study of the flow asymmetry inside a continuous slab casting mold. *Metall Mater Trans B*,

1996, 27(5): 757

[3] Panaras G A, Theodorakakos A, Bergeles G. Numerical investigation of the free surface in a continuous steel casting mold model. *Metall Mater Trans B*, 1998, 29(5): 1117

[4] Shen B Z, Shen H F, Liu B C. Instability of fluid flow and level fluctuation in continuous thin slab casting mould. *ISIJ Int*, 2007, 47(3): 427

[5] Kasai N, Iguchi M. Water-model experiment on melting powder trapping by vortex in the continuous casting mold. *ISIJ Int*, 2007, 47(7): 982

[6] Hibbeler L C, Thomas B G. Investigation of mold flux entrainment in CC molds due to shear layer instability // *AISTech 2010 Steel-making Conference Proceedings*. Warrendale, 2010: 1

[7] Hibbeler L C, Thomas B G. Mold slag entrainment mechanisms in continuous casting molds. *Iron Steel Technol*, 2013, 10(10): 121

[8] Yoshida J, Ohmi T, Iguchi M. Cold model study of the effects of density difference and blockage factor on mold powder entrainment. *ISIJ Int*, 2005, 45(8): 1160

[9] Funada T, Joseph D D. Viscous potential flow analysis of Kelvin-Helmholtz instability in a channel. *J Fluid Mech*, 2001, 445: 263

[10] Thomas B G, Mika L J, Najjar F M. Simulation of fluid flow inside a continuous slab-casting machine. *Metall Trans B*, 1990, 21(2): 387

[11] Sanchez-Perez R, Morales R D, Díaz-Cruz M, et al. A physical model for the two-phase flow in a continuous casting mold. *ISIJ Int*, 2003, 43(5): 637

[12] Torres-Alonso E, Morales R D, Garcia-Hernandez S, et al. Influence of straight nozzles on fluid flow in mold and billet quality. *Metall Mater Trans B*, 2008, 39(6): 840

[13] Chaudhary R, Lee G G, Thomas B G, et al. Transient mold fluid flow with well-and mountain-bottom nozzles in continuous casting of steel. *Metall Mater Trans B*, 2008, 39(6): 870

[14] Ramos I C, Morales R D. The role of submerged entry nozzle port shape on fluid flow turbulence in a slab mold. *Metall Mater*

- Trans B* ,2015 ,46(3) : 1314
- [15] Ramos I C , Morales R D , Garcia-Hernandez S , et al. Effects of immersion depth on flow turbulence of liquid steel in a slab mold using a nozzle with upward angle rectangular ports. *ISIJ Int* , 2014 ,54(8) : 1797
- [16] Zhang L F , Li F. Investigation on the fluid flow and mixing phenomena in a Ruhrstahl-Heraeus (RH) steel degasser using physical modeling. *JOM* ,2014 ,66(7) : 1227
- [17] Barreto J , Morales R D , Garcia-Hernandez S , et al. Modeling study of molten steel turbulence control by SEN design improvement in a conventional slab caster. *Steel Res Int* ,2015 ,86(5) : 517
- [18] 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. *Metall Mater Trans B* ,2004 ,35(5) : 967