

CSP 结晶器内钢液流动的水模型研究

王现辉¹ 景财良¹ 王新华¹ 张炯明¹ 柴毅忠² 洪兵雄²

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083; 2 广州珠江钢铁有限公司,广州 510730)

摘要 采用1:1水力学模型对厚度60 mm薄板坯连铸水口浸入深度220~310 mm、出口角度-30°~-60°、拉速4.2~6.0 m/min条件下CSP结晶器内钢液流动行为进行模拟研究。在拉速4.2~5.0 m/min时双侧孔水口下CSP结晶器流场股流冲击深度达850~1010 mm;流场内存在三个滞区,液面波动不稳定;水口角度对结晶器窄面和水口附近波动影响很显著,拉速对结晶器和窄面中心处波动影响较大,浸入深度对水口附近波动影响较大。

关键词 CSP 结晶器 水模型 液面波动 表面流速

A Study on Water Modeling for Steel Fluid Flow in a CSP Mold

Wang Xianhui¹, Jing Cai liang¹, Wang Xinhua¹, Zhang Jiongming¹, Chai Yizhong² and Hong Bin xiong²

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

2 Guangzhou Zhujiang Iron and Steel Co Ltd, Guangzhou 510730)

Abstract Steel fluid flow behavior in a CSP mold for 60 mm thin slab casting with nozzle submerged depth 220~310 mm, downward angel of outlet -30°~-60°, casting speed 4.2~6.0 m/min has been studied by 1:1 scale water modeling. At cast speed 4.2~5.0 m/min, for nozzle with double side hole, impact depth of CSP mold fluid flow was 850~1010 mm; there were 3 stagnant in flow field and the fluctuation of liquid level was unsteady; effect of nozzle downward angel on fluctuation near mold narrow side and nozzle was very obvious, effect of casting speed on fluctuation at center of mold and middle of narrow side was larger, and effect of submerged depth on fluctuation near nozzle rather large.

Material Index CSP Mold, Water Model, Level Fluctuation, Surface Velocity

不少作者研究了连铸结晶器内的流场^[1-6],但目前国内外对常用的双侧孔水口下CSP(Compact Strip Production)结晶器内部流股运动及自由表面特征较系统的全比例水模型研究少见报道。

1 实验描述

现以珠钢当前生产工艺参数为基础,根据相似原理,建立1:1比例水模型进行实验研究。模型结晶器厚度60 mm,漏斗区长800 mm、最大开度180 mm,结晶器长2000 mm,最大宽度1350 mm,采用双侧孔水口结构(图1)。模型采用了带有挡墙的中间包和塞棒控流技术。实验通过采用塞棒控制上水口

的水流量,利用电子调频器和水泵控制结晶器出口的流量来控制拉速及系统平衡。距结晶器底部300 mm处的缓流槽装置可消除水泵管道流对结晶器流场的影响。

用DJ800波高仪检测水口左侧5个点的液面波动,距窄面50,155,260,365,470 mm;LS1206B型旋桨式流速计对结晶器水模型内表面流速进行了测量。试验的水口浸入深度220~310 mm;出口角为-30°~-60°;拉速为4.2~6.0 m/min。

2 结果及讨论

2.1 结晶器内部流场特征

采用红墨水做示踪剂选择的工艺参数为:结晶器宽度1200 mm,拉速4.5 m/min,水口浸入深度280 mm。由图2可知,出水口的两股射流基本对称于水口的中心线,流股以与水平方向呈较大的倾角冲向结晶器的窄面,几乎未受什么阻力(图2a);流股在运动过程中流速逐渐减小,断面积不断扩大,1.5 s到达窄面(图2b),此时对窄面的冲击深度约为910 mm;流股到达结晶器窄面后大部分沿结晶器窄面流向底部形成较强的下降流,只有少部分沿窄面向上流形成较弱的上升流(图2c)。上升流沿结晶器窄面向上运动到液面后改变方向流向水口中心,在

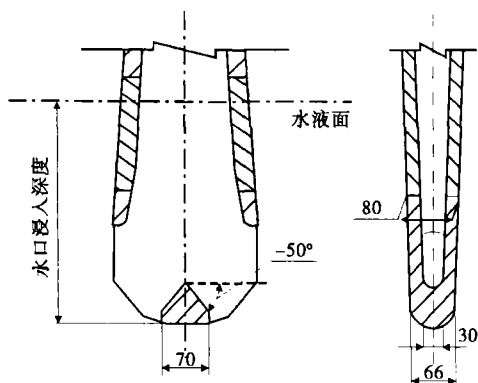


图1 实验的水口结构 Fig.1 Structure of test nozzle

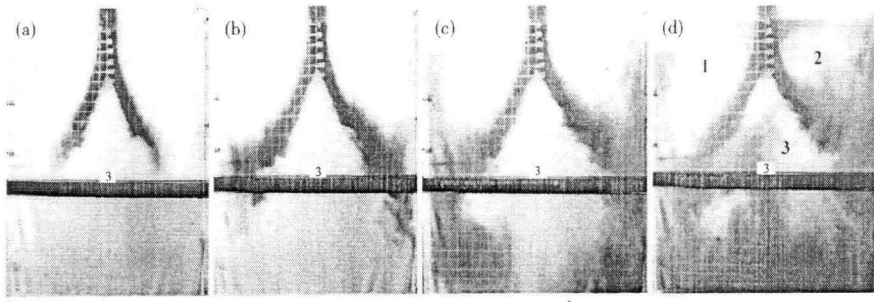


图 2 红墨水示踪流场运动过程(示踪剂出水口时刻 0 s):(a) 0.67 s;(b) 1.5 s;(c) 3 s;(d) 5.66 s

Fig. 2 Mixing pattern of red ink to trace liquid flow, setting 0 s being red ink just leaving nozzle: (a) 0.67 s; (b) 1.5 s; (c) 3 s; (d) 5.66 s

水口左右形成两个上回流区,上回流发展较完全;下降流股则沿结晶器窄面向下运动,达到一定深度后向结晶器中心弯曲,形成两个下回流,5.66 s 时(图 2d),可以看到此时的流场关于水口中心线左右相似,但并非完全对称。流场在运动过程中存在滞区,如图 2(d)中的“1”“2”“3”位置,其着色时间最晚。

2.2 参数对结晶器内部流场特征的影响

由图 3(a,b)可见,随着拉速的增加,流场的上、下流股逐渐增强,其中下流股增强显著,流股对结晶器窄面的冲击深度增大,由原来的 890 mm 增加到 1 010 mm。研究表明,拉速越大流股的冲击深度越大,但当流股冲击深度超过 1 100 mm 时,拉速增大流股冲击深度增加不再明显。

由图 3(c,d)可见,水口出口倾角较小时,流股冲击深度较浅,冲击窄面后上流股相对较强;随着水口向下倾角的增大,流股对窄面的冲击深度增加,上回流股减弱,下回流股相对加强;向下角度超过 -40° 以后,倾角增大对冲击深度的影响不明显。

其他工艺参数不变,水口浸入深度增加,流股的冲击深度几乎呈线性增加,流股的上回流体积增大,

上回流流股到达液面时较分散,对液面的影响减小。流场的形状与图 3(a,b)相似。

2.3 CSP 结晶器内自由液面的特征

2.3.1 液面波动特征

在窄面附近液位波动较大,在 10 s 左右液位出现较大的凸起(图 4c);而对应的距水口中心 350 mm 位置的液位出现凹坑,流动较大如图 4(b);水口附近的液位波动相对于前两者较稳定(图 4a)。

本次试验取 1/3 大波平均值作为波动程度的判定标准。随拉速增加液面波动呈增大趋势(图 5a)。液面波动最大位置位于结晶器窄面附近 50 mm 左右,拉速 4.2 ~ 6.0 m/min 时,此处 1/3 大波平均值集中在 0.4 ~ 0.6 cm。水口浸入深度 250 mm,拉速 5.2 m/min 时,随水口出口倾角增大,液面测点的 1/3

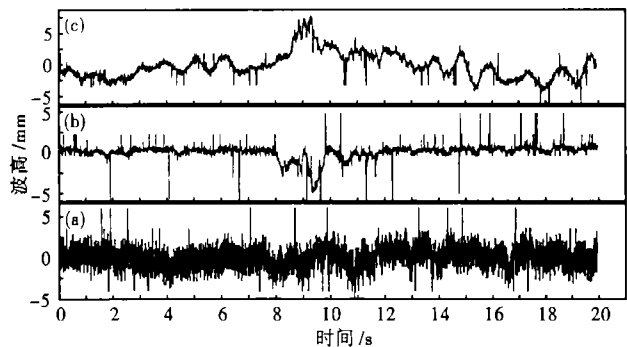


图 4 (a)水口附近;(b)距水口中心 350 mm;(c)窄面附近点的瞬态波高值

Fig. 4 Transient wave height at spot near nozzle (a), 350mm distance from nozzle shaft (b) and near narrow wall (c)

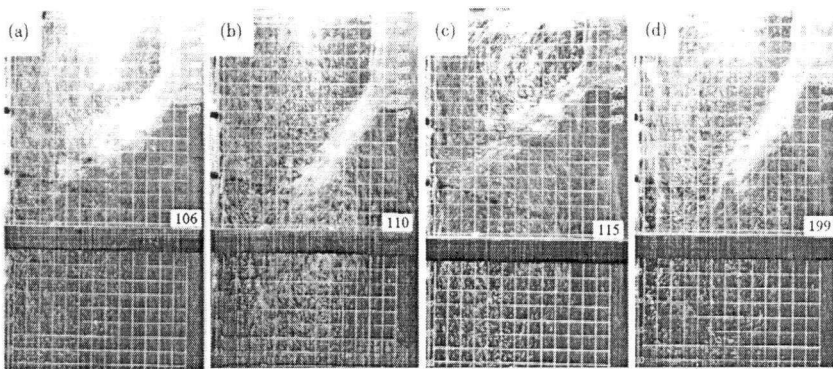


图 3 结晶器流场:水口出口角度 -50° ,浸入深度 310 mm,拉速 4.2 m/min (a);5.0 m/min (b);水口浸入深度 220 mm,拉速 4.8 m/min,出口角度 -30° (c); -60° (d)

Fig. 3 Mold liquid flow patterns; nozzle downward angel -50° , submerged depth of nozzle 310 mm, casting speed 4.2 m/min (a) and 5.0 m/min (b); submerged depth of nozzle 220 mm, casting speed 4.8 m/min, downward angel -30° (c) and -60° (d)

大波平均值有减小趋势(图 5b)。随水口浸入深度的增加,液面波动呈减小趋势(图 5c)。

利用 SPSS 软件的单变量多因素方差对拉速、水口出口角度、水口浸入深度的变化对液面波动的影响程度进行分析。结果表明,水口角度对结晶器窄面附近和水口附近的影响最显著;拉速对结晶器水口与窄面的中心位置影响最显著,浸入深度对此位置影响很

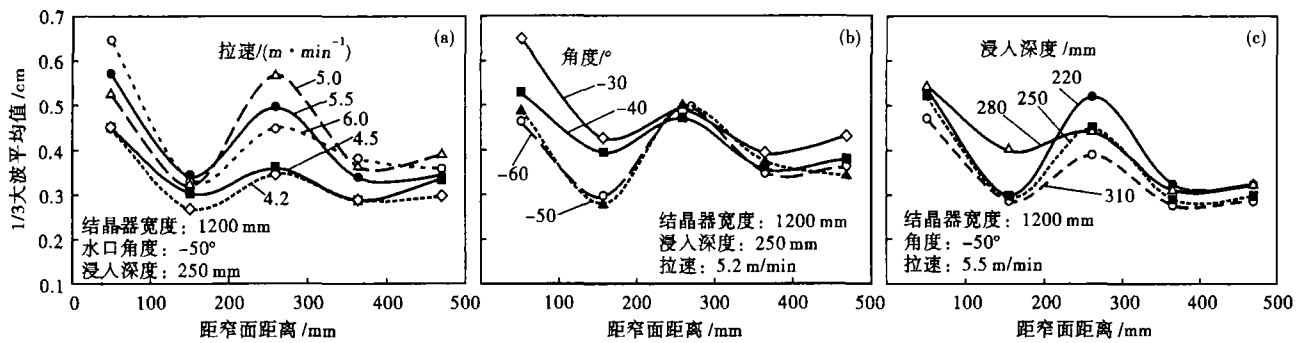


图5 拉速(a),角度(b),浸入深度(c)对液面波动的影响

Fig. 5 Effect of casting speed (a), downward angle (b) and submerged depth (c) on level fluctuation

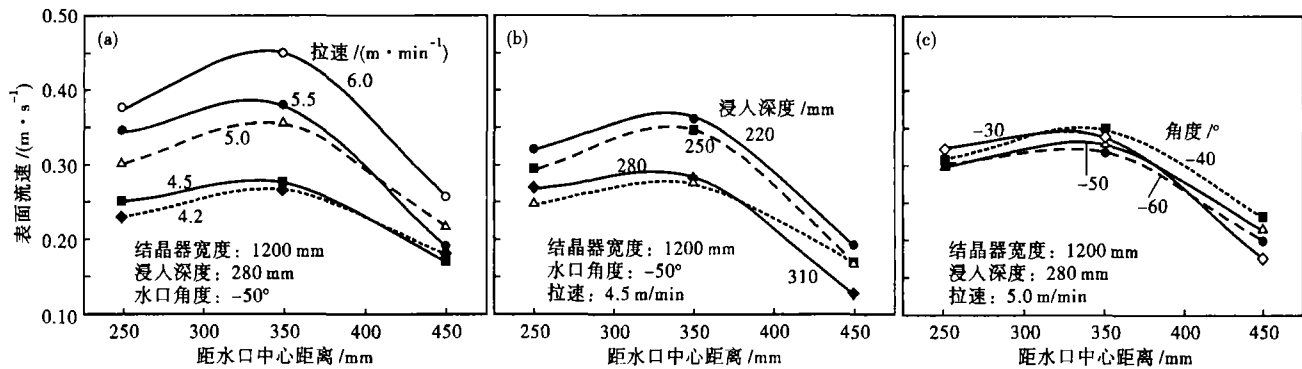


图6 拉速(a),浸入深度(b)和角度(c)对表面流速的影响

Fig. 6 Effect of casting speed (a), submerged depth (b) and downward angle (c) on surface velocity

小;浸入深度对水口附近的液面波动影响相对于其它位置较显著。

2.3.2 表面流速特征

表面流速的最大值基本在水口与窄面的中心位置(距水口中心 350 mm 左右),窄面附近的表面流速最小;拉速由 4.2 m/min 增加到 6.0 m/min,距水口中心 350 mm 处表面流速增加比较明显,由 0.25 m/s 增加到 0.48 m/s (图 6a)。

相同工艺参数下水口浸入深度越浅表面流速越大,且对漏斗区表面流速影响较大,对结晶器窄面附近的影响相对较小(图 6b)。

其它参数不变倾角增大表面流速减小趋势不明显,但是水口倾角由 -30° 变化到 -60° 时,表面流速最大值有向结晶器窄面附近移动的趋势(图 6c)。

用 SPSS 软件分析了水口角度、浸入深度、拉速对距水口中心距离 350 mm 表面流速较大处的影响。比较研究了工艺参数的第三类平方和可知,对此处表面流速影响最大的因素是拉速,其次是水口角度,浸入深度对其影响相对较小。

3 结论

(1) 双侧孔水口下 CSP 结晶器流场呈四对称回流漩涡,上回流发展较完全,下流股较强,拉速 4.2 ~ 5.0 m/min 时冲击深度 850 ~ 1 010 mm。流场内存

在水口的两侧和水口底端下部 3 个滞区。

(2) CSP 结晶器内部流场的不对称引起液面波动不稳定。水口角度对结晶器窄面附近和水口附近的波动影响最明显;拉速对结晶器水口与窄面的中心位置波动影响较显著,而浸入深度对此位置影响很小;浸入深度对水口附近的液面波动影响相对于其他位置较显著。

(3) CSP 结晶器平行与漏斗型的过度区液面表面流速最大,表面流速影响最大的因素是拉速,其次是水口角度,再次是水口浸入深度。

参考文献

- 1 包燕平,祝三胜,田乃媛,等.薄板坯连铸结晶器水模实验研究.特殊钢,1998,19(2):7
- 2 刘小梅,方园. CSP 和 ISP 结晶器水模实验研究.宝钢技术,1997(3):11
- 3 沈丙振,叶世鸿,徐荣军,等.薄板坯连铸 CSP 结晶器液位波动影响因素的水力学模拟研究.钢铁(增刊),2006(4):305
- 4 Nam Hoseok, Park Hwa-Soo, Yoon J K. Numerical Analysis of Fluid Flow and Heat Transfer in the Funnel Type Mold of a Thin Slab Caster. ISIJ International, 2000, 40(9):886
- 5 张慧,赵连刚,陶红标,等.薄板坯连铸结晶器内流动传热行为的研究.钢铁,2006,41(5):24
- 6 Morales R D, Palafox-Ramos J, Garcia-Demedices L, et al. A DPIV Study of Liquid Steel Flow in a Wide Thin Slab Caster Using Four Ports Submerged Entry Nozzles. ISIJ International, 2004, 44(8):1384

王现辉(1979-),男,博士研究生,主要从事薄板坯连铸技术方向研究。

收稿日期:2008-03-17