

薄板坯连铸十字出口形浸入式水口结构优化的水模型研究

张 华 倪红卫 陈光友 刘吉刚

(武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 400081)

摘 要 针对150 t钢包、28 t中间包、60 mm薄板坯连铸的生产条件,采用正交设计的1:2水模型实验,通过测量结晶器液面波高和注流冲击深度,研究了十字出口形浸入式水口出口面积比(2.0~2.4)、出口倾角(15°~35°)、浸入深度(210~270 mm)和拉速(4.0~5.0 m/min)对结晶器流场的影响。结果表明,十字出口形浸入式水口最佳结构为出口面积比2.4,出口倾角25°,在浸入深度240 mm时,可以满足高拉速生产要求。

关键词 薄板坯连铸 十字出口形浸入式水口 结晶器 流场 水模型

A Study on Water Model for Structure Optimization of Submerged Entry Nozzle with Cross Outlet for Thin Slab Concasting

Zhang Hua, Ni Hongwei, Chen Guangyou and Liu Jigang

(Key Lab for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

Abstract In according with production conditions for 60 mm thin slab concasting with 150 t ladle and 28 t tundish, the effect of outlet area ratio (2.0~2.4), outlet angle (15°~35°), immersed depth (210~270 mm) and casting speed (4.0~5.0 m/min) on liquid flow field has been studied by using 1:2 water model test in orthogonal design to measure liquid surface wave amplitude in mode and pouring impact depth. Results showed that the optimized structure of submerged entry nozzle with cross outlet, of which outlet area ratio was 2.4 and outlet angle was 25°, was available to meet the requirement of high speed casting with immersed depth 240 mm.

Material Index Thin Slab Concasting, Submerged Entry Nozzle with Cross Outlet, Mold, Flow Field, Water Model

结晶器是薄板坯连铸核心设备,结晶器内钢液的流动情况对钢液的凝固传热、夹杂物的上浮和凝固坯壳的形成有重要影响,直接关系到铸坯的表面和内部质量。薄板坯连铸拉速快,结晶器断面小,结晶器内钢液流动剧烈,给结晶器液面的稳定、凝固坯壳的均匀形成及连铸工艺带来了新的问题^[1]。而优化浸入式水口的结构是改善钢液流动、提高连铸坯质量的有效途径。目前薄板坯连铸所用浸入式水口已由板坯连铸机使用的第1代演进到现在使用的十字出口形第4代,典型的十字出口形水口结构如图1。

本文结合钢厂薄板坯生产情况,通过水模型实验^[2-5],对使用不同结构十字出口形浸入式水口的薄板坯结晶器流场进行研究,找出最佳浸入式水口结构及操作工艺参数,优化结晶器内钢水流场,对改善薄板坯质量,提高产量具有重要意义。

1 实验方案

1.1 薄板坯连铸生产条件

水模型实验模拟薄板坯连铸工艺和设备主要参数为:钢包容量150 t;中间包容量28 t;铸坯厚度60 mm;铸坯宽度1 000~1 350 mm;结晶器长度1 100

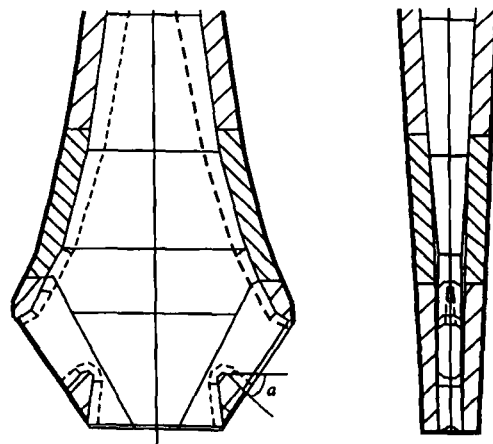


图1 十字出口形浸入式水口结构示意图

Fig.1 Schematic of structure of submerged nozzle with cross outlet

mm;铸机半径3 000 mm;冶金长度6 340 mm。

1.2 水模型实验方案

连铸结晶器内的钢液流动主要受惯性力、重力及粘性力作用。根据相似原理,为保证模型与原型相似,应确保两者的傅鲁德准数(Fr)相等,且雷诺准数(Re)在同一自模区。经计算本实验选用1:2的实验模型。

在实验中,通过改变浸入式水口的出口面积比(水口3个出孔面积之和与主通道面积之比)、出口倾角(α ,图1)、浸入深度及拉速来研究结晶器内的流动情况,得到适合高拉速的浸入式水口结构参数及工艺参数。

为了减少实验次数并且要保证实验的科学性和可靠性,本实验采用正交实验方法。实验采用 $L_9(3^4)$ 正交表,实验的因素和水平如表1所示。

表1 正交实验的因素和水平
Table 1 Factors and levels for orthogonal test

水平	出口面积比		插入深度/ mm	拉速/ ($m \cdot min^{-1}$)
	弯月面处	出口倾角/ $^\circ$		
1	2.0	15	210	4.0
2	2.2	25	240	4.5
3	2.4	35	270	5.0

最佳浸入式水口结构应应在高拉速的条件下,也能保证钢液面不产生剧烈波动,并且同时保证较小的注流冲击深度。实验中采用中科院水力学研究所开发的DJ800型多功能监测仪实时检测结晶器液面波高;采用示踪法和流场照相进行流场显示测量结晶器内注流的冲击深度。

2 水模型实验结果及分析

2.1 结晶器液面波高的影响因素

表3 结晶器液面波高方差分析
Table 3 Variance analysis for liquid surface wave amplitude in mode

项目	出口面积比		出口倾角		浸入深度		拉速		误差	
	弯月面处	水口附近	弯月面处	水口附近	弯月面处	水口附近	弯月面处	水口附近	弯月面处	水口附近
偏差平方和	4.809	7.740	0.462	0.507	0.496	0.827	0.596	0.887	6.36	9.96
自由度	2	2	2	2	2	2	2	2	8	8
F比	3.023	3.108	0.290	0.204	0.312	0.332	0.375	0.356	-	-
显著性	较显著	较显著								

由表3可知,对结晶器弯月面处和水口附近液面波高影响的显著性高低依次为:出口面积比、拉速、浸入深度和出口倾角。因此,减小结晶器液面波高,首先应提高出口面积比,其次为稳定工作拉速,增大水口浸入深度。

2.2 冲击深度的影响因素

水模型实验中注流冲击深度的统计计算结果如表4所示。从表4可见,注流冲击深度随水口出口面积比的增大、出口倾角的增大、浸入深度的增大及拉速的增大而增大。对表4中数据进行方差分析,结果如表5。

由表5可知,对注流冲击深度影响的显著性高低依次为:拉速、水口浸入深度、出口倾角和出口面

积比。因此,减小注流冲击深度,应控制拉速,减小浸入深度,减小出口倾角。

从水模型实验可以观察到,结晶器液面波动较传统两侧孔浸入式水口要小得多。结晶器弯月面处液面波动较大,水口附近产生明显的涡流,液面波动应重点考察这两个位置。

结晶器弯月面处水口附近液面波高实验数据的计算结果如表2所示。

表2 结晶器液面波高指标Y值统计计算数据
Table 2 Statistic calculated value Y for index of liquid surface wave amplitude in mode

水平	出口面积比		出口倾角		浸入深度		拉速	
	弯月面处	水口附近	弯月面处	水口附近	弯月面处	水口附近	弯月面处	水口附近
1	16.1	15.8	13.7	12.9	13.8	13.1	12.3	10.7
2	11.9	10.4	13.3	11.5	13.2	11.7	12.7	12.0
3	11.1	9.5	12.1	11.3	12.1	10.9	14.1	13.0
极差	5.0	6.3	1.6	1.6	1.7	2.2	1.8	2.3

从表2可见,结晶器弯月面处液面波高随水口出口面积比的增大、出口倾角的增大、浸入深度的增大及拉速的减小而减小。水口附近液面波高随水口出口面积比的增大、出口倾角的增大、浸入深度的增大及拉速的减小而减小。其中出口面积比由水平1到水平2,即由2.0增大到2.2,弯月面处和水口附近液面波高明显减小。

对表2中数据进行方差分析,结果如表3。

表4 注流冲击深度指标Y'值统计计算数据
Table 4 Statistic calculated value Y' for index of pouring impact depth

水平	出口面积比	出口倾角	浸入深度	拉速
1	2 820	2 860	2 880	2 780
2	2 880	2 820	2 780	2 680
3	3 000	3 020	3 040	3 240
极差	180	200	260	560

积比。因此,减小注流冲击深度,应控制拉速,减小浸入深度,减小出口倾角。

2.3 方差分析结果的讨论

根据薄板坯连铸结晶器的冶金功能,钢液流动应满足以下要求:(1)减小液面波动,使液渣均匀覆盖钢液,减少卷渣;(2)控制合理的注流冲击深度,

表 5 注流冲击深度方差分析
Table 5 Variance analysis for pouring impact depth

项目	出口面积比	出口倾角	浸入深度	拉速	误差
偏差平方和	5 600	7 467	11 467	59 467	84 001
自由度	2	2	2	2	8
F 比	0.267	0.356	0.546	2.832	
显著性	-	-	有影响	较显著	

减少对凝固坯壳的冲刷,坯壳生长均匀,减少出现裂纹及拉漏的危险。

从减少液面波动的角度出发,首先应增大出口面积比,其次控制拉速,增大浸入深度,增大出口倾角;从减小注流冲击深度的角度出发,首先应控制拉速,其次减小浸入深度,减小出口倾角,增大出口面积。使用十字出口形浸入式水口结晶器液面波动整体较小,而注流冲击深度较大,因此,水口结构优化应侧重考虑减小注流冲击深度。综合考虑各因素的影响后,选取出口面积比水平为 3,出口倾角水平为 2,浸入深度水平为 2,拉速水平为 2,即优化的浸入式水口结构为出口面积比 2.4,出口倾角 25°,优化后的工艺参数为浸入深度 240 mm、拉速 4.5 m/min。

对水模型实验结果正交优化后的参数组合,进行了高拉速下的验证实验。拉速 4.5 m/min 时,弯月面处和水口附近液面波高分别为 3.3 mm 和 3.1 mm,注流冲击深度为 860 mm;拉速 5.0 m/min 时,弯月面处和水口附近液面波高分别为 3.6 mm 和 3.2 mm,注流冲击深度为 920 mm。由此可见,优化结构的浸入式水口能满足薄板坯连铸高拉速生产的要求。

3 结晶器流场特征

采用示踪法和流场照相进行流场显示。水口浸入深度为 240 mm 时,不同拉速下,使用结构优化水口的结晶器流场如图 2。

从图 2 可以看出,使用十字出口形浸入式水口的结晶器流场在水口一侧形成了 3 个回流,即上部 1 个回流、下部 2 个回流,不同于传统两侧孔水口形成的上下两个回流。使用十字出口形浸入式水口结晶器液面波动较小,但注流冲击深度较大。比较图 2(a) 和 (b) 可以发现,随着拉速的增大,结晶器流场的上回流区域增大,结晶器液面波动变化不大;结晶器下部 2 个回流增强,注流冲击深度也明显增大。

4 结论

(1) 薄板坯结晶器液面波高随十字出口形浸入式水口出口面积比的增大、出口倾角的增大、浸入深度的增大及拉速的减小而减小。

(2) 注流冲击深度随水口出口面积比的增大、出口倾角的增大、浸入深度的增大及拉速的增大而增大。

(3) 对液面波高影响的主次顺序为:出口面积比、拉速、浸入深度和出口倾角。

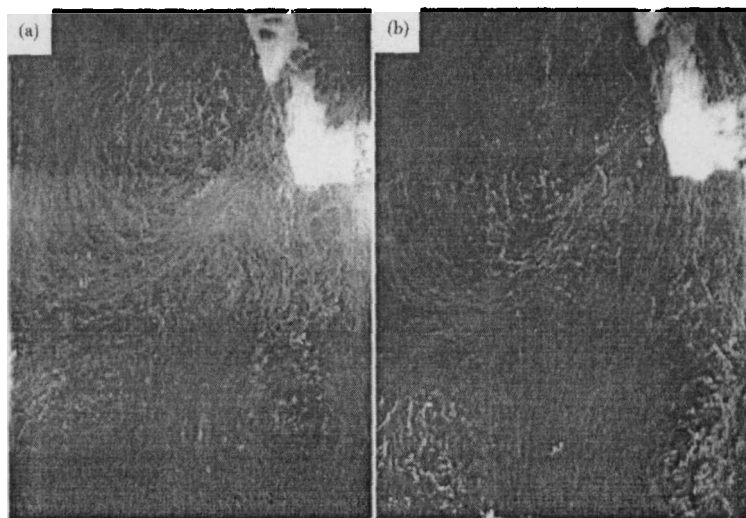


图 2 使用优化结构浸入式水口的结晶器流场图:拉速 4.5 m/min (a);拉速 5.0 m/min (b)

Fig. 2 Flow field pattern in mode using optimized submerged nozzle with casting speed 4.5 m/min (a) and 5.0 m/min (b)

(4) 对注流冲击深度影响的显著性高低依次为:拉速、浸入深度、出口倾角和出口面积比。

(5) 十字出口形浸入式水口的最佳结构为出口面积比 2.4、出口倾角 25°,在浸入深度为 240 mm 时,可满足高拉速生产的要求。

教育部博士点基金资助项目(20050488001)和湖北省教育厅科研基金资助项目(2004Z001)

参考文献

- 田乃媛. 薄板坯连铸连轧. 北京:冶金工业出版社,1998
- 闫清军,李宏新,郭宝志,等. 板坯高效连铸浸入式水口结构优化. 连铸,2006,9(3):22
- 包燕平,田乃媛,徐保美. 薄板坯连铸机新型浸入式水口. 北京科技大学学报,2002,24(3):262
- Gupta D, Lahiri A K. Water Model Study of the Flow Asymmetry Inside a Continuous Slab Casting Mold. Metall Mater Trans B, 1996, 27B(10):757
- 于勇,仇圣桃,萧泽强. 连续铸钢过程数学物理模型. 北京:冶金工业出版社,2001

张 华(1978-),男,在读博士研究生,讲师,2003 年武汉科技大学毕业,连铸新技术、冶金过程模拟仿真与控制研究。

收稿日期:2008-01-12