板坯结晶器内流场的物理模拟及分析

党爱国^{1,2},任子平¹,陈远清²,彭世恒²,刘 坤¹

(1. 辽宁科技大学材料与冶金学院, 辽宁 鞍山 114044; 2. 钢铁研究总院中达连铸技术国家工程研究中心, 北京 100081)

摘 要:以涟钢板坯结晶器为原型,进行水力学模型试验,通过调节拉速、水口浸入深度,研究了结晶器的流场形 态、液面波动情况和流场冲击深度。试验选出适合涟钢板坯连铸机每个断面的最佳工艺参数,为进一步提高产品 质量、优化结晶器流场以及降低成本提供了依据。

关键词:板坯连铸;结晶器;流场;液面波动;物理模拟

中图分类号:TF777 文献标识码:A 文章编号:1004-7638(2010)04-0080-06

Physical Simulation and Analysis of Flow Field of the Slab Mold

Dang Aiguo^{1,2}, Ren Ziping¹, Chen Yuanqing², Peng Shiheng², Liu Kun¹

(1. School of Material and Metallurgy, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114044, Liaoning, China;
2. National Engineering Research Center of Continuous Casting Technology, Central Iron and Steel Reaserch Institute, Beijing 100081, China)

Abstract: With the slab mould of Lianyuan Iron and Steel Copany (LISC) as a prototype, the hydraulic model experiment is carried out. Through adjusting the casting speed and nozzle immersion depth, the flow form, Liquid surface wave and flow field impact depth are studied. the best parameters of slab caster for each section through this test are determinated, which provide a basis for further improving the product quality, the optimization of mould flow field and reducing cost.

Key words: slab continuous casting; mould; flow field; liquid surface fluctuations; physical simulation

0 引言

结晶器是连铸过程的主体设备之一,在连铸过 程中起着重要作用。作为控制钢水洁净度的最后环 节,结晶器内的钢液流动行为不仅对夹杂物的分离 去除、保护渣的卷入影响很大;而且对初生凝固坯壳 的均匀形成,防止注流冲刷局部凝固壳而造成拉漏 或产生铸坯表面裂纹有重要影响。笔者针对涟钢 210转炉炼钢厂板坯连铸机,采用物理模拟方法研 究了现行工艺和设备条件下结晶器内的传输行为, 对结晶器内的流动状态(包括速度场、液面波动、冲 击深度等)、温度场进行综合分析。通过物理模拟 研究得出水口插入深度、拉速、结晶器宽度以及通气 量对结晶器液面波动和流场冲击深度的影响,以达 到结晶器流场优化的目的。

- 1 研究方法
- 1.1 试验装置及方法

结晶器的水模试验装置如图1所示,主要由水路系统和数据采集系统组成。

收稿日期:2010-08-02

基金项目:十一五国家重点科技支撑计划项目(2006BAE03A04-2-4)。

作者简介:党爱国(1984-),男,甘肃民乐人,在读硕士研究生,主要从事连铸质量预报模型研究。



图 1 结晶器模拟试验装置 Fig. 1 Chart of mold simulation experiment device

试验采用"中间包 - 浸入式水口 - 结晶器 - 水 泵 - 流量计 - 中间包"的闭环水路系统,流量计和 塞棒用来调节拉速和控制液面。数据采集采用中国 水利科学院研制的 DJ800 型水工采集处理系统,试 验所采用的工艺参数如表1 所示。

表 1 试验选用的工艺参数 Table 1 Process parameters in the experiment

拉速/(m・min ⁻¹)	水口浸入深度/mm	结晶器宽度/mm
0.8.0.9.1.0.1.1.1.2.1.3	110,130,150	1 250,1 550,1 850

1.2 物理模型的建立及方法

钢液在结晶器内运动时受到了惯性力、重力、粘 性力和表面张力的作用。包含这些力的相似准数 有:雷诺准数(Re)、弗鲁德准数(Fr)和韦伯准数 (We)。对连铸结晶器来说,在注流的动量和重力作 用下,在结晶器内大部分区域处于湍流状态,粘性力 的影响可以忽略,所以流体主要是惯性力和重力的 作用,须满足 Fr 准数相等。即:

 $(Fr)_{m} = (Fr)_{p}(m - 原型, p - 模型, 以下相同)$ 则: $(\frac{u^{2}}{gl})_{m} = (\frac{u^{2}}{gl})_{p}$ (1)

试验用水作模化介质,根据实验室条件,建立 1:2的缩小物理模型,模型用有机玻璃制成,结构如 图1所示,考虑到水箱出水口对结晶器出口流体的 影响,结晶器模型在满足相似比的基础上延长了一 倍多。

根据式(1)和长度相似比 $\lambda_1 = \frac{l_m}{l_p} = 0.5$,可以推导出速度相似比、时间相似比和流量相似比如式(2)~式(4)所示。

速度相似比:
$$\lambda_u = \frac{u_m}{u_p} = \sqrt{\lambda_1} = 0.707 1$$
 (2)

时间相似比:
$$\lambda_1 = \frac{\lambda_l}{\lambda_u} = \frac{\lambda_l}{\sqrt{\lambda_l}} = \sqrt{\lambda_l} = 0.707 1$$
 (3)

流量相似比:
$$\lambda_{Q} = \frac{Q_{m}}{Q_{p}} = \frac{u_{m} \cdot A_{m}}{u_{p} \cdot A_{p}} = \lambda_{u} \cdot \lambda_{l}^{2}$$

= $\lambda_{s}^{2.5} = 0.177$ (4)

通过相似原理可以按现场的情况得出原型与模型介质的主要参数对照,如表2所示。

表 2 原型与模型介质的主要参数 Table 2 The main parameters of prototype and model medium

方案	断面	拉速/	流量/(m ³ ・h ⁻¹)	
编号	(mm × mm)	(m. min ⁻¹)	厚型	模型
1	230 × 1 250	0.9	16.9	3.0
2	230 × 1 250	1.1	20.6	3.6
3	230 × 1 250	1.3	24. 3	4.3
4	230 × 1 550	0.9	20.9	3.7
5	230 × 1 550	1.1	25.5	4.5
6	230 × 1 550	1.3	30. 2	5.3
7	230 × 1 850	0.8	22.2	3.9
8	230 × 1 850	1.0	27.7	4.9
9	230 × 1 850	1.2	33. 3	5.9

注:浸入深度(mm)选择110(55)、130(65)、150(75)三组参数,括号 外为原型参数,括号内为模型参数;同理,吹氩量(L/min)选择5 (1.5)、10(3.0)、15(4.5)、20(6.0)四组参数。

2 试验内容

2.1 液面波动的测量

液面波动是衡量结晶器内流场合理性的重要因素,液面波动过大会造成保护渣的卷入和二次氧化, 液面过于平静会造成保护渣熔化不良,严重时还会 造成液面结壳。

采用中国水利水电科学院开发的 DJ800 型多功 能监测系统来采集和分析结晶器液面波动曲线,进 而可以得到液面波动参数^[1]。

试验中通过观察结晶器液面的波动特征,选取 了三个具有代表性的波高测点,如图 2 所示,其中 1^{*}测点在结晶器窄边附近,距离窄边约50 mm;2^{*}测 点在大约宽面 1/4 处;3^{*}测点在水口附近,距离水口 外壁约 50 mm。测量时间为 30 s,取测量时间内的 平均波高作为最终波高值。为减少误差,每一工况 条件下的试验重复三次,取平均值^[2]。

某试验条件下结晶器内液面波动的采集曲线如 图 3 所示。



图2 液面波高测点位置







2.2 流场显示及冲击深度的测量

为了了解钢水在结晶器内的流动轨迹,在模型 试验中在水口中部加入染色剂使流体着色,用摄像 机记录下染色剂在结晶器模型内的扩散情况即可以 近似再现钢水在结晶器内的流动轨迹,这就是所谓 的流场显示,试验中用墨水作染色剂^[3]。图4为某 工况某时刻结晶器模型的流场形态。

钢液从水口进入结晶器时,具有一定的速度, 从而在结晶器内具有一定的冲击深度,冲击深度的 大小影响结晶器热中心位置,也影响夹杂物的上 浮。试验中采用在水口上方加墨水的方式测量结晶 器内流股的冲击深度。以墨水出现回流点为冲击最 低点,冲击深度为液面到冲击最低点的距离。



图 4 某工况某时刻结晶器模型的流场形态 Fig. 4 Photo of flow field of the mold at one moment in the experiment

3 试验结果及分析

3.1 液面波动的测量结果及分析

3.1.1 拉速对液位波动的影响

不同拉速下结晶器的液面波动情况的变化规律 如图 5 所示(结晶器断面 1 250 mm × 230 mm;插入 深度为:130 mm)。





由图5可以看出,不同位置处液面波动是不一样的,通常情况下窄边附近的1[#]测点的波高要比其他测点的波高大。现用水口试验条件下,结晶器内液面波高都较小,绝大多数情况下的波高都在0.1 mm以下,液面十分平静,即使在拉速较高(窄断面1.3 m/min,宽断面1.2 m/min)时结晶器液面波动仍然较小,平均波高都在1.0 mm以下。根据相似比可知原型中的平均波高都在2 mm以下。根据相似比可知原型中的平均波高都在2 mm以下。在拉速较低(断面230 mm×1 250 mm和230 mm×1 550 mm时,大于1.1 m/min;断面230 mm×1 850 mm时,小于1.0 m/min)时,液面波动都很小,尤其是水口附近,液面过于平静,不利于保护渣的熔化和均匀流入。

3.1.2 浸入式水口插入深度对液位波动的影响

不同的水口插入深度下,结晶器的液面波动的变化规律如图6所示(结晶器断面1250mm×230mm,拉速为1.1m/min)。

由图6可以看出,随着浸入式水口插入深度的 增加,液面波动有明显减弱。这是因为冲击深度增 加,即射流在结晶器窄面的撞击点明显降低,上升回 流股沿结晶器窄面上升到结晶器液面的距离变大, 从而上部回流的阻力增大,使得回流股动能损失较 大,这样对液面冲击的流股的速度和冲力就会减弱。





3.1.3 水口通气量对液位波动的影响

不同的测点,结晶器的液面波动的变化规律如 图7所示(结晶器断面1250mm×230mm,拉速 1.1m/min,水口插入深度130mm)。

由图 7 可以看出,不同吹气量对不同位置处液 面波动的影响。随着吹气量的增加,整个液面的波 动都会加强,在合适的气量下,产生的气泡可以起到 搅拌钢液、均匀成分及温度、促进夹杂物上浮和防止 水口堵塞的作用。但气量过大时,将产生不利影响。





3.1.4 结晶器宽度对液位波动的影响

不同断面下,为使数据有可比性,各结晶器宽 度下的波高测点位置应相同,所以采用1[#]测点的数 据。比较1[#]测点在各个断面处的波高可以看出结 晶器的液面波动的变化规律,如图8所示(浸入式 水口插入深度130 mm,拉速1.1 m/min)。



图 8 结晶器宽度对液位波动的影响 Fig. 8 The influence of mold width on liquid surface wave

由图7可以得到:在水口插入深度和拉速相同 的情况下,断面越宽,结晶器内液面波动越大。在相 同工况下,1 850 mm 宽度结晶器的液面波动为最 大,1 550 mm次之,1 250 mm 最小。这是因为:当拉 速相同时,大宽度结晶器水口流量大,导致了射流股 速度较大,其对结晶器内流体扰动剧烈,射流撞击到 结晶器窄面后,向上回流的速度也较大,增大了上部 回流对液面的冲击,从而使结晶器液面波动和表面 流速加大。且结晶器宽度增加,使得流场的不对称 因素更加突出,增加了产生漩涡的可能性,这样就增 大了水口附近液面波动。而对于结晶器弯月面处, 则是由于结晶器宽度增加,使产生驻波的可能性以 及驻波的波幅增大,于是增大了结晶器弯月面处的 液面波动和表面流速。通过以上分析可以得出:随 着结晶器宽度的增加,液面波动和表面流速明显增 强。因此在工业生产中,当换大断面的结晶器时就 应该考虑到它对流场带来的影响。这时就应该改变 其他工艺参数来设法减小液面波动和表面流速,以 获得较好的流场,为生产高质量的铸坯提供良好的 保证^[4]。

3.2 流场冲击深度的测量结果及分析

对3个断面(每个断面3种拉速)条件共9种工 况下的结晶器进行了流场显示试验,并记录了冲击 深度。断面230 mm×1250 mm的结晶器模型在不 同拉速条件下、不同时刻试验染色剂扩散过程如图 9 所示。

通过对三个断面不同拉速条件下的示踪剂试验 可以得出表3所示的结果,通过此结果可以观察流 场的运动情况和冲击深度。

· 83 ·



(c) 拉速 1.3 m/min casting speed 1.3 m/min

图9	不同时	刻的染色剂	则扩散结	果(断面	:230 mm ×	1 250 mm)
	Fig. 9	The ink	spread	result in	n different	time

	表	3	不同断面时的流股冲击深度				
Table	3	The	impact	depth	of	various	conditions

230 mm × 1 250 mm		230 mm × 1	150 mm	230 mm × 1	230 mm ×1 850 mm	
拉速/(m·min ⁻¹) 冲击深度/mm 拉速/		拉速/(m・min ⁻¹)	冲击深度/mm	拉速/(m・min ⁻¹)	冲击深度/mm	
0.9	185	0.9	190	0.8	190	
1.1	210	1.1	215	1.0	225	
1.3	245	1.3	250	1.2	260	

由表3可以看出,230 mm×1250 mm、230 mm ×1150 mm、230 mm×1850 mm各断面条件下,随 着拉速增加,冲击深度呈增加趋势,但都不超过260 mm。从水口流出的流股冲击窄边后分成上下两个 部分,上部分流股沿窄边冲击液面后向水口流动形 成上部回旋区,下部分流股沿窄面向下运动一段距 离后向宽面中心流动形成下回旋区。流股从水口流 出时,水口侧孔的充满度较好,流股张角较大,分 布较分散,冲击到窄边较大面积上,这样流股对窄 边的冲击压力较小。各试验条件下流场形态相差不 大,只是在拉速增大时,流股速度加快,冲击深度 变大,扩散加快。

4 结论

1)随着拉速的增大结晶器的液位波动越来越 大,流场冲击深度也越来越深。

2)水口插入深度越深结晶器液位波动越小。

3) 拉速和插入深度相同情况下,结晶器宽度越 宽液位波动越大,在宽度较小断面的情况下液位波 动相对偏小。

4) 实际生产中要综合考虑这些因素,选出最合理的工艺参数,使其液面波动、流场形态、流场冲击深度在一个合理的范围,以保证正常的生产和较高的连铸坯质量。

参考文献

[1] Liu Heping, Wang Zhongying. Mathematical and hydromechancal modelling of features of the surface disturbance in a slab casting mold[J]. Iron & Steel Research, 2002, 25(2):17 - 52.

(刘和平,王忠英. 板坯结晶器液面波动的数学物理模拟及其特点[J].钢铁研究,2002. 25(2):17-52.)

- [2] Wang Yongsheng, Hou Zewang, Wang Xinhua, et al. Water model of the surface wave and fluid flow in slab continuous casing mold[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2009,30(1):55-59.
 (王永胜,侯泽旺,王新华,等. 板坯连铸结晶器流场及液面波动的水模研究[J]. 钢铁钒钛,2009.30(1):55-59.)
- [3] Ma Fanjun, Wen Guanghua, Li Gang, et al. Water modelling of fluid flow pattern in slab continuous caster mold at Pangang [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 1999. 20(1):11-15.

(马范军,文光华,李刚,等.攀钢板坯连铸结晶器内流场的水力学模拟研究[J].钢铁钒钛,1999.20(1):11-15.)

[4] Wu Xun, Jin Youlin, Tang Dechi, et al. Reaserch on water model experiment of slab mold[J]. Henan Metallurgy, 2009, 17(1): 20-22.

(武珣,金友林,唐德池,等. 板坯连铸结晶器水模型实验研究[J]. 河南冶金,2009,17(1):20-22.)

编辑 余文华

(上接第72页)

[7] Zhang Hongli, Wang Engang. Influence of geometric parameters of linear stirrer on distribution of electromagnetic fields and flow fields in molten steel[J]. Iron and Steel Research, 2002, 14(4):10-15.

(张宏丽,王恩刚. 搅拌器的结构参数对钢液内电磁场和流场分布的影响[J]. 钢铁研究学报, 2001, 13(5):19-23.)

- [8] Joonpyo Park, Hoyoung Kim, Heetae Jeong, et al. Continuous casting of steel billet with high frequency electromagnetic field
 [J]. ISIJ International, 2003, 43(6): 813 819.
- [9] Fujisaki K. In mold electromagnetic stirring in continuous casting [J]. IEEE Transitions on Industry Applications, 2001, 37 (4): 1098 1104.
- [10] Partinen J, Saluja N, Szekely J, et al. Experimental and computational investigation of rotary EMS in woods metal system[J].
 ISIJ Internetional, 1994, 34(9): 707 714.
- [11] Mao Bin, Wang Shiyu. Electronmagnetic hydromechanics basic of electromagnetic stirring in molten steel continuous casting
 [J]. Iron and Steel Research, 1988, 2(1): 11-15.
 (毛斌,王世郁. 钢水连铸电磁搅拌的磁流体力学基础[J]. 钢铁研究, 1988, 2(1): 11-15.)
- [12] Chung S I, Shin Y H, Yoon J K. Flow characteristics by induction and gas stirring in ASEA SKF ladle[J]. ISIJ International, 1992, 32(12) :1287 - 1296.

编辑 余文华