

基于示踪剂法板坯连铸40 t中间包内钢液流动行为的物理模拟

倪国龙 艾立群 赵定国 冯聚和 王书桓

(华北理工大学冶金与能源学院,唐山 063009)

摘要 通过中间包1:3水力学模型,利用激光片光源对中间包水模型进行切片照射,加入示踪剂显示流体流动特性等手段,研究了钢厂板坯连铸双流40 t中间包水模型挡墙挡坝的相对位置,长水口插入深度(50~105 mm)和流量(拉速)(0.7~0.9 m³/h)对流动行为的影响。结果表明,流量0.8 m³/h,长水口插入深度93 mm,挡坝内移1 cm的工艺设计较为合理,优化后工艺条件下中间包流动状态较好,有利于减少“死区”比例和夹杂物上浮去除。

关键词 双流板坯连铸 40 t中间包 水模型 流动行为 死区比例

Physical Simulation on Behavior of Liquid Flow in 40 t Tundish for Slab Casting Based on Tracer Method

Ni Guolong, Ai Liqun, Zhao Dingguo, Feng Juhe and Wang Shuhuan

(College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063009)

Abstract The effect of submerging depth of long nozzle (50~105 mm), flow rate (casting speed) (0.7~0.9 m³/h) and relative location between dam and weir in water model of 40 t tundish for double strands slab casting at steelworks on behavior of liquid flow has been studied by established 1:3 water model of tundish using the methods including illuminating the different section layer of tundish water model with laser light and adding tracer agent to display the liquid flow characteristics. Simulation results show that process design with flow rate 0.8 m³/h, submerging depth of long nozzle 93 mm and weir moving into dam by 1 cm is reasonable, and with the optimized process the liquid flow condition in tundish is better it is available to decrease dead zone ratio and favourable to remove inclusions from liquid and float off.

Material Index Double Strands Slab Casting, 40 t Tundish, Water Model, Flow Behavior, Dead Zone Ratio

连铸过程中间包内钢液的流动行为会对铸坯质量产生重要的影响,而中间包作为连接钢包和结晶器的纽带和钢液分配器,可均匀钢液的成分和温度,调节钢液的流动行为,中间包冶金已成为钢液进入结晶器之前的一种精炼手段^[1-3]。通过中间包内型结构及工艺参数的优化和应用,可以改善中间包内钢液流动特性,从而改善夹杂物的运动条件,促进夹杂物上浮去除,许多冶金工作者也对此进行了大量研究^[4-8]。

实验以钢厂板坯连铸双流中间包(实际钢液容量40 t)为原型,通过建立1:3比例的中间包水力学模型,对中间包内钢液流动行为进行了物理模拟,利用激光片光源和示踪剂显示流体流动特性,对板坯中间包内不同挡墙、挡坝配合结构及不同长水口插入深度、不同流量等工艺参数进行了物理模拟研究,采用“单一因素变量法”分别考察其对钢液流动形态的影响。

1 实验方法及实验方案

1.1 实验方法与实验装置

实验以钢厂板坯连铸双流中间包为原型,在保证中间包内型结构相同的条件下,按照1:3($\lambda = 1/3$)的比例制作有机玻璃模型,保证几何相似。选取弗鲁德准数作为定性准数,保证模型与原型的弗鲁德准数相等,就能基本上满足动力相似条件^[9-10]。

根据弗鲁德准数^[11] $Fr = \frac{\rho g l}{\rho v^2} = \frac{g l}{v^2}$ 可知:

$$\frac{g L_1}{v_1^2} = \frac{g L_2}{v_2^2}; v_1 = \frac{Q_1}{S_1}, v_2 = \frac{Q_2}{S_2}; S_1 = 9 S_2, L_1 = 3 L_2$$

式中: L_1 -中间包原型结构某一尺寸; L_2 -中间包模型结构某一尺寸; v_1 -原型流速; v_2 -模型流速; Q_1 -原型中间包钢水流量; Q_2 -模型中间包钢水的流量; S_1 -原型中浸入式水口横截面积; S_2 -模型中浸入式水口横截面积。

通讯作者:赵定国,博士,副教授,华北理工大学冶金与能源学院,唐山 063009

E-mail:gyzhao@163.com

实验装置分别由中间包水力学模型、EP532 型片光激光器、摄影机等组成。中间包水力学模型基本结构尺寸及模拟系统分别如图 1、图 2 所示。

1.2 实验内容与实验方案

(1) 在基本结构下,使用激光片光源对中间包内“钢液”进行切片照射,待系统稳定 10 min 以上,通过示踪剂加入装置加入适量示踪剂(Al 粉)表征中间包内液体流动行为,同时用摄影机进行拍摄,可以清晰的观察到横纵不同切面上示踪剂的运动轨迹,从而研究不同切面的流动特性,根据对中间包内不同切面流动特性的观察,可以从立体上分析中间包内的整体流动状态,为分析中间包“死区”部位的产生和中间包内的流动特性提供依据。中间包基本结构及尺寸如图 1 和表 1 所示。

(2) 采用“单一因素变量法”分别研究不同长水口插入深度 50、93、105 mm,不同流量(拉速)0.7、

0.8、0.9 m³/h,不同挡墙挡坝位置对中间包内液体流动行为的影响。通过示踪剂加入装置加入一定量的高锰酸钾饱和溶液的同时用摄影机进行拍摄,以高锰酸钾为示踪剂从宏观上直接显示中间包内流动形态,可以生动直观地观察液体流动特性,进而分析上述因素对中间包内流动行为的影响,通过对比分析可以得到最优配合方案。

2 实验结果及分析

2.1 基本结构下的中间包流场

在中间包纵、横切面不同位置用激光片光源照射,并用摄影机记录下中间包不同层片位置的流场情况。

(1) 纵切面流场(从挡墙下开始出现示踪剂计时)如图 3 所示。

对比纵切不同时刻的断面图可见,流股越过挡坝迅速向上流动形成上升流,随后沿液面水平方向形成平推流,此过程对夹杂物的上浮去除非常重要;然后由于水口抽力作用形成反向回卷,形成一个弯钩状流,随后弯钩状流逐渐粗化、扩展,向中间包下部区域、塞棒周围区域等铺展,最后到达的区域是挡坝外侧和中间包左上部等部位;靠近塞棒中下部周围区域具有较大的卷吸力,钢液流股一旦到达塞棒周围区域,会被迅速吸入水口中,形成“倒伞状流”,夹杂物达到此区域后,上浮排除的几率比较小;对比同一时刻不同切面图示可见,纵断面由示踪剂表征出的“铺展率”依次增大,并且后侧流股粗大,前侧流股相对细小,说明钢液流股注入中间包越过挡墙挡坝后先到达中间包塞棒后侧区域,形成一股中间包后侧流,该侧速度高于前侧流股。此外在实验过程中发现,在挡坝外侧和中间包左上部等部位,存在一定体积的“死区”。

(2) 横切面流场(加入示踪剂开始计时)如图 4 所示。

分析可知,对于 A、B、C 列,加入示踪剂后分别首先出现在断面后侧中上部,并且前后侧示踪剂铺展不对称,后侧区域都比前侧区域发展的充分一些,同时 E、F 列中示踪剂首先在前侧区域出现,这些现象都充分说明了液体流动是由挡墙的前侧向水口后侧流动的后斜流,与

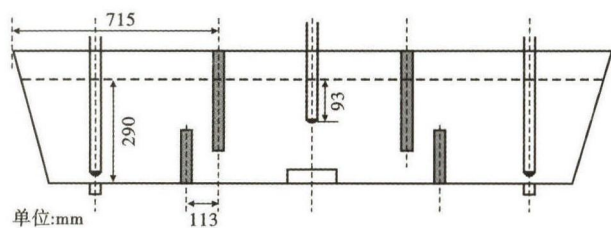


图 1 中间包水模型基本结构示意图

Fig. 1 Schematics of basic structure of tundish water model

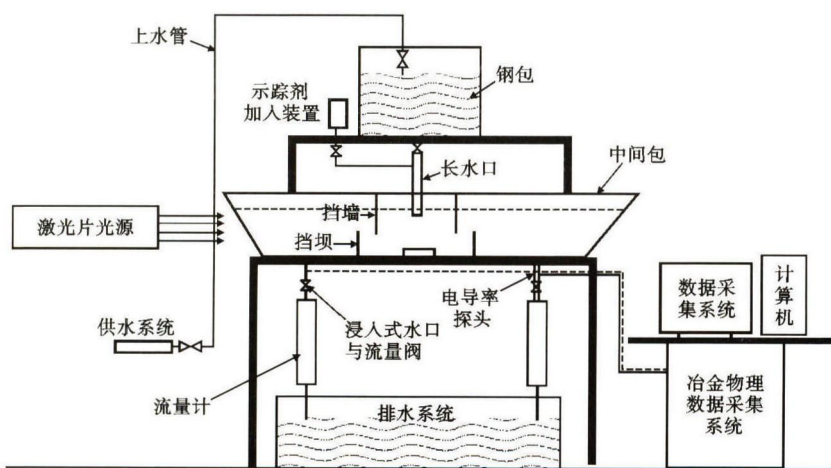


图 2 中间包水力学模拟系统示意图

Fig. 2 Schematics of tundish hydraulics simulation system

表 1 中间包水模型基本结构的相关参数

Table 1 Basic structure and relative parameters of tundish water model

中间包基本结构	挡墙至同侧边缘距离/mm	挡坝至同侧挡墙距离/mm	中间包液面深度/mm	长水口插入深度/mm	浸入式水口流量/(m ³ ·h ⁻¹)
水模型参数	715	113	290	93	0.8

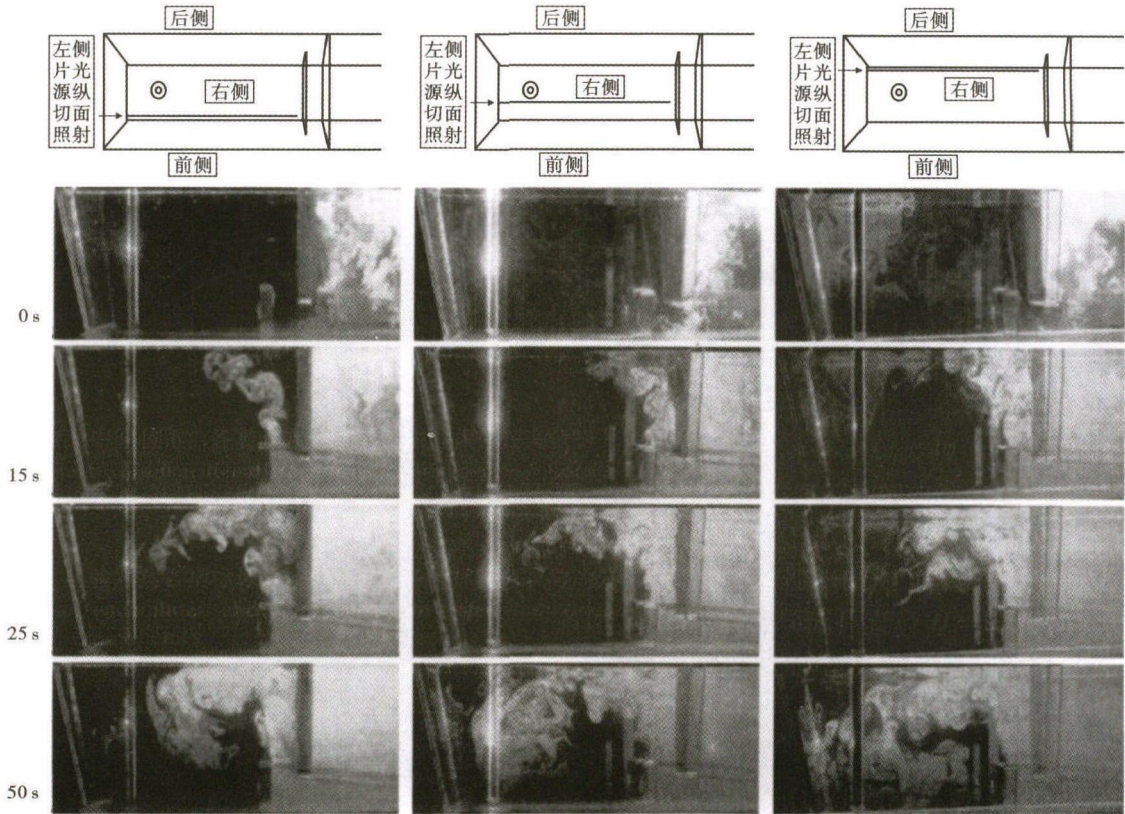


图 3 中间包水模型不同位置纵切面流场激光照射图

Fig. 3 Diagram of flow field at different longitudinal section layer in tundish water model illuminated by laser light

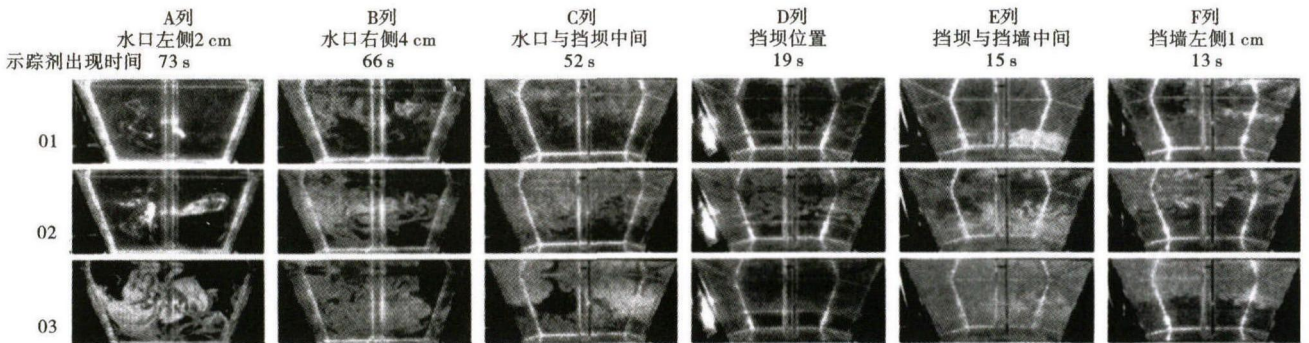


图 4 示踪剂出现时中间包水模型横切面流场

Fig. 4 Flow field at different cross section layer in tundish water model at moment of occurrence of tracer agent

纵切面流场分析基本吻合;观察 A 列可见,塞棒前侧和后侧的中间上部区域均易出现“死区”,并且前侧上部比后侧上部发展更慢,说明这些区域的流动性较差;观察 B 列可见,在靠近塞棒右侧区域,前侧上部位置易出现“死区”,而后侧位置流动较充分;观察 C 列可见,在挡坝左侧远离塞棒的右侧区域,后侧下部位置易出现“死区”,而前侧位置流动较充分。

中间包基本结构下不同时刻由高锰酸钾显示的宏观流场如图 5 所示。

示踪剂加入 15 s 后流股到达墙坝之间,30 s 时冲击液面,40 s 时形成弯钩流,70 s 时弯钩流接近中间包底部,且中上部分流股接近塞棒,80 s 左右到达浸入式水口流出,90 s 时塞棒下部形成倒伞状流,120 s 时发展较充分,高锰酸钾基本铺满中间包,但在挡坝外侧和中间包左上角区域存在一定“死区”。

2.2 长水口插入深度对中间包流场的影响

以高锰酸钾为示踪剂,长水口插入深度分别为 50、93、105 mm(加入示踪剂开始计时)结果如图 6 所示。

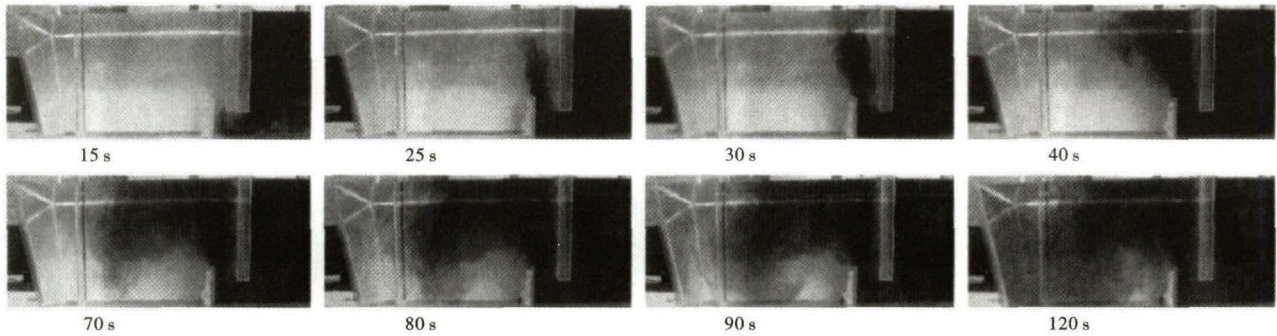


图5 基本结构中间包水模型加入示踪剂15~120 s时的流场

Fig. 5 Flow field of basic structure tundish water model at moment adding tracer agent for 15 ~ 120 s

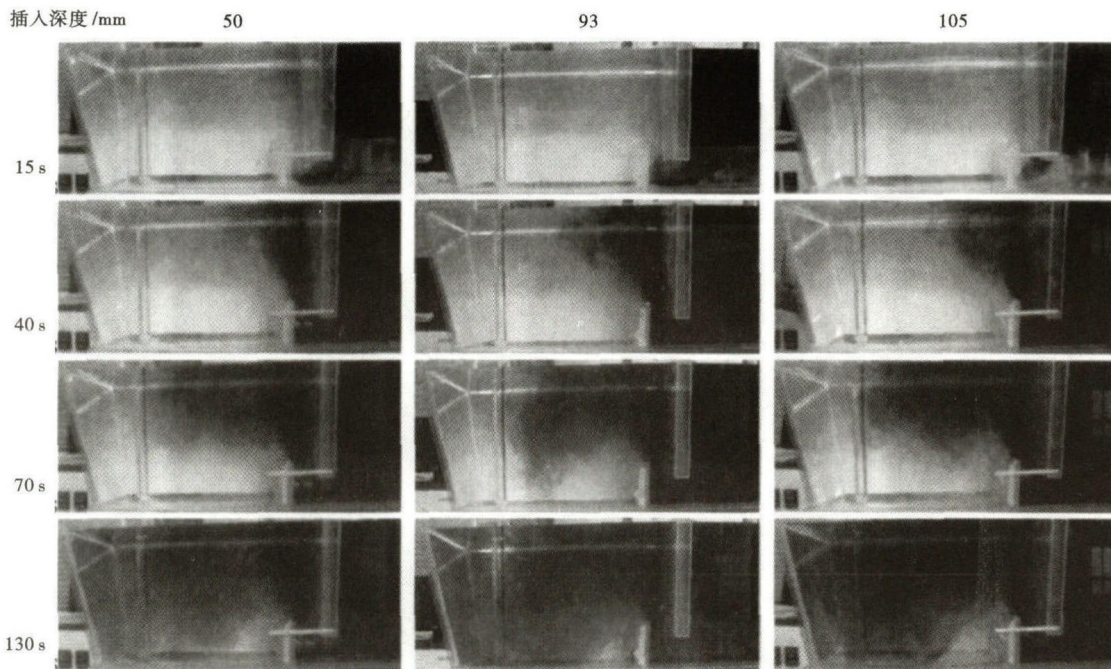


图6 加入示踪剂15~130 s时长水口插入深度对中间包水模型流场的影响

Fig. 6 Effect of submerged depth of long nozzle on flow field of tundish water model at moment adding tracer agent for 15 ~ 130 s

由图6可见,随着插入深度增加,中间包内死区比例先减小后增大。插入过深时,死区比例较大,这是因为插入深度越大,中间包内湍流抑制器的抑制作用越大,钢液注流的冲击能量损失愈多,流速会变慢。但插入深度也不能太浅,否则会使长水口在中间包液面下降时,对液面波动造成影响。

2.3 流量(拉速)对中间包流场的影响

以高锰酸钾为示踪剂,分别设定流量为0.7、0.8、0.9 m³/h(加入示踪剂开始计时)结果如图7所示。

由图7对比可见,相同时刻下高流量(拉速)的流股比低流量的“凸进”发展较远。高流量的流股较粗大,流股中深紫色区域也相对较大。说明随着拉速的增大,中间包钢液流股变强,混匀时间变短。另一方面,在不同流量条件下均存在一定程度的

“死区”,拉速增加,“死区”比例相对减小。

2.4 挡墙挡坝位置对中间包流场的影响

改变挡坝位置,以高锰酸钾为示踪剂,挡坝分别置于内移1 cm、基本结构、外移1 cm、外移2 cm(加入示踪剂开始计时)结果如图8所示。

由图8可见,挡坝位置改变后,钢液流动状态变化较大,挡坝外移导致混匀时间变长,混匀效果变差,而内移后,钢液弯钩流形成的较快,钢液能较好的铺展至整个中间包。此外,挡坝内移下中间包内死区比例相对较少,说明混匀速度快,钢液各部位的温度、成分差异小,并且沿液面平铺流股较长,可以使钢液与覆盖剂充分接触,促进夹杂物的上浮去除。

改变挡墙挡坝整体位置,以高锰酸钾为示踪剂,挡墙挡坝分别置于基本结构、外移1 cm、外移2 cm、

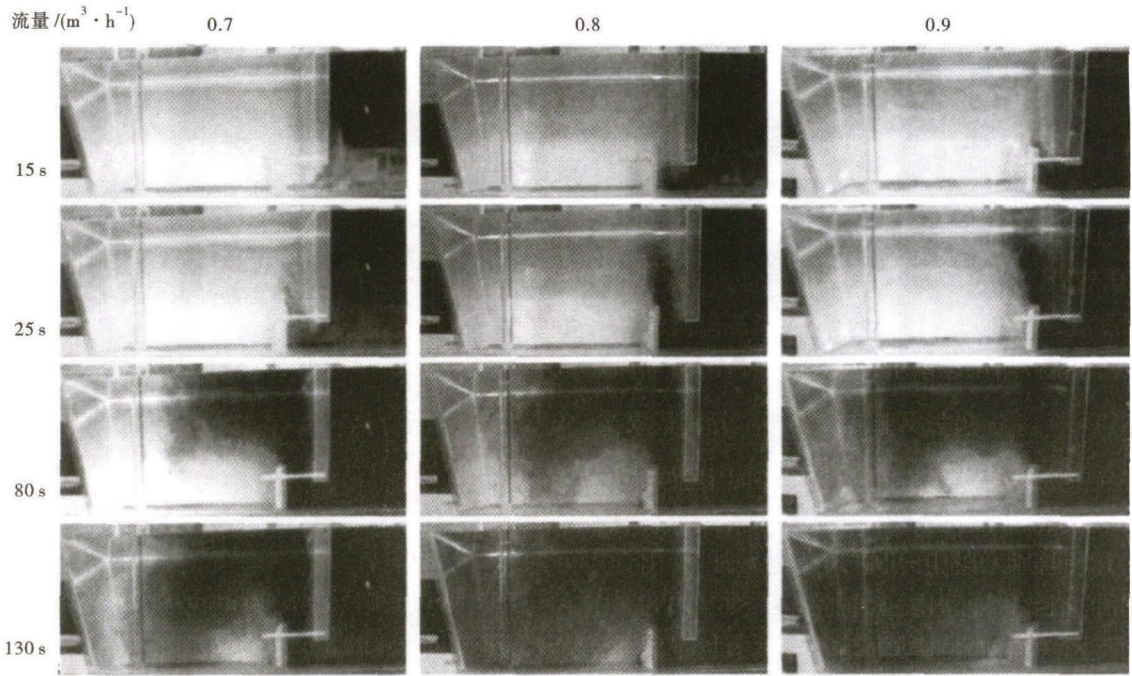


图 7 加入示踪剂 15 ~ 130 s 时流量(拉速)对中间包水模型流场的影响

Fig. 7 Effect of flow rate (casting speed) on flow field of tundish water model at moment adding tracer agent for 15 ~ 130 s

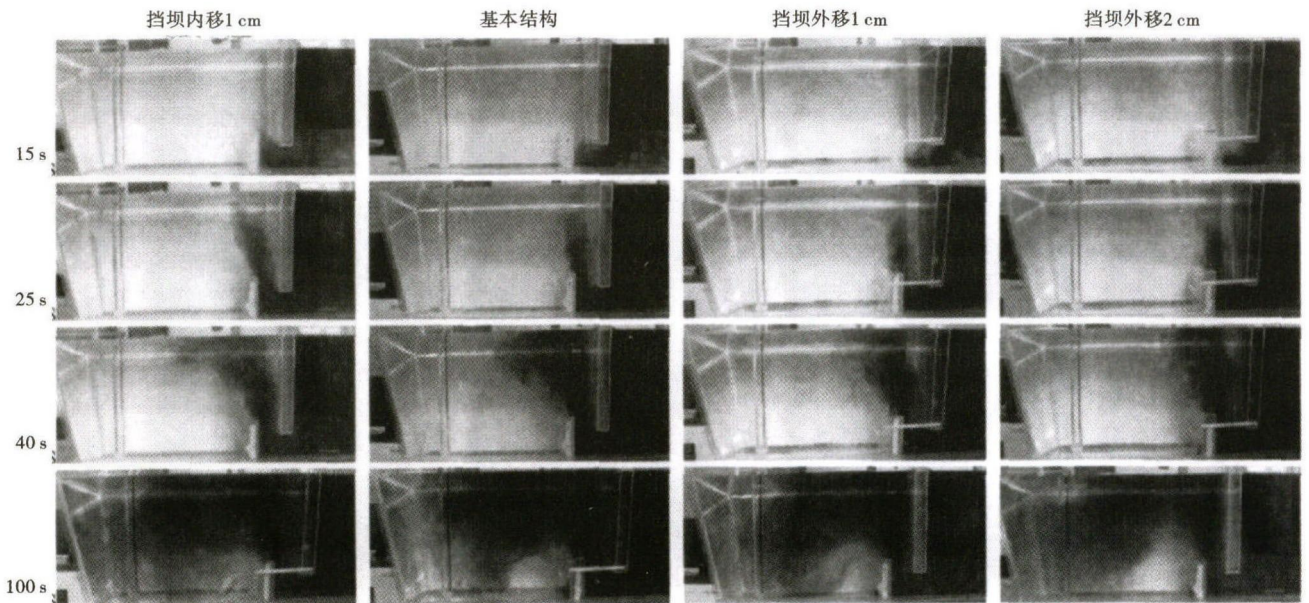


图 8 加入示踪剂 15 ~ 100 s 时挡坝位置对中间包水模型流场的影响

Fig. 8 Effect of weir location on flow field of tundish water model at moment adding tracer agent for 15 ~ 100 s

外移 3 cm、外移 4 cm(加入示踪剂开始计时)结果如图 9 所示。

由图 9 可见,基本结构条件下,中间包死区比例相对最小,铺展效果好。而挡墙挡坝整体外移后,中间包内原有“弯钩状”回卷流明显缩小甚至消失,这是由于墙坝整体外移后,墙坝组合与水口距离缩短,流股越过挡坝后受到水口处卷吸力的作用越来越

强,这就会造成挡坝外侧“死区”比例的增大;同时由于流股在中间包运动轨迹的缩短以及对挡坝外侧回卷冲击作用的减小,使得夹杂物上浮去除的作用明显变差。

3 结论

(1)激光片光源 + 铝粉示踪下的截面流场说明,流股越过挡坝后迅速向上流动形成上升流,冲击

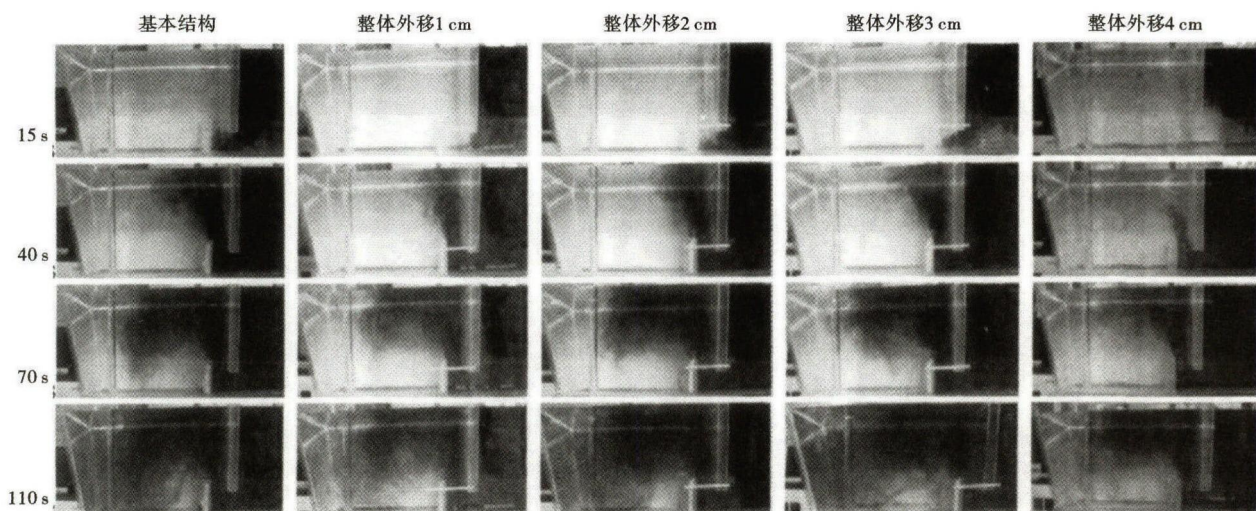


图9 加入示踪剂15~110 s时挡墙挡坝相对位置下对中间包水模型流场的影响

Fig.9 Effect of relative location of dam and weir on flow field of tundish water model at moment adding tracer agent for 15~110 s

中间包液面,形成平推流,有利于夹杂物的上浮去除;由于水口卷吸作用,流股在塞棒下部周边区域形成“倒伞状流”,此状态下的夹杂物上浮去除的几率很小;在挡坝外侧三角区域、中间包左上部和角部等部位的铺展缓慢,易形成“死区”,不利于夹杂物的上浮去除。

(2)在基本结构下用高锰酸钾示踪的宏观流场表明,加入示踪剂15 s后,新流股到达墙坝之间,30 s时冲击液面,120 s时发展较充分,高锰酸钾基本铺满中间包,但在中间包左上部和挡坝外侧三角区域存在“死区”,这与激光片光源+铝粉示踪下的截面流场基本一致。

(3)随长水口插入深度的增大,越过挡坝后的上升流呈现先增强后减弱的趋势,相应“死区”比例先减少再增多,同时考虑流体对湍流抑制器的冲刷

作用等综合因素,长水口插入深度93 mm即实际插入深度270 mm最佳。

(4)浸入式水口流量(拉速)越大,越过挡坝后的上升流越强,越易形成“平推流”,有效减少了“短路流”的产生,“死区”比例越小,越有利于夹杂物上浮去除,考虑到实际生产工艺,浸入式水口流量 $0.8 \text{ m}^3/\text{h}$ 即实际拉速 $1.0 \sim 1.05 \text{ m}/\text{min}$ 较优。

(5)挡墙位置不变挡坝内移1 cm时的效果要明显优于基本结构和挡坝外移,挡墙挡坝整体外移的效果较差不建议采用,建议采用挡坝内移1 cm的内型结构,即实际墙坝距离由340 mm变为310 mm。

国家自然科学基金项目(51304060)、华北理工大学在读研究生创新项目(2015S06)资助

参考文献

- [1] Mazumdar D, Yamanoglu G, Guthrie R I L. Hydrodynamic Performance of Steelmaking Tundish Systems; a Comparative Study of Three Different Tundish Designs [J]. Steel Research International, 1997, 68(7):293-300.
- [2] 王建军,包燕平,曲英. 中间包冶金学[M]. 北京:冶金工业出版社,2001:4-6.
- [3] 景琳琳,袁守谦,李都宏,等. 中间包冶金技术[J]. 金属材料与冶金工程,2011,39(4):56-59.
- [4] 金友林,包燕平,李志斌,等. 板坯连铸单流中间包控流装置优化模拟研究[J]. 炼钢,2009,25(2):48-51.
- [5] 张炯明,邓凤琴,王文科,等. 连铸中间包钢水夹杂物浓度的数值模拟[J]. 北京科技大学学报,2004,26(3):247-250.
- [6] 钟良才,张立,黄耀文,等. 湍流控制装置的结构对中间包流体流动特性的影响[J]. 钢铁研究学报,2002,14(4):6-9.
- [7] 冯捷,唐德池,包燕平,等. 控流装置对板坯中间包流场优化的影响[J]. 特殊钢,2010,31(2):17-20.
- [8] Craig K J, Kock D J de, Makgata K W, et al. Design Optimization of a Single-Strand Continuous Caster Tundish using Residence Time Distribution Data [J]. ISIJ International, 2001, 41(10):1194-1200.
- [9] Sahai Y, Emi T. Melt Flow Characterization in Continuous Casting Tundishes [J]. ISIJ International, 1996, 36(6):667-672.
- [10] 阮小江,李京社,王剑斌,等. 兴澄特钢中间包结构优化[J]. 北京科技大学学报,2007,29(增刊):138-141.
- [11] 沈巧珍,杜建明. 冶金传输原理[M]. 北京:冶金工业出版社,2011.

倪国龙(1989-),男,硕士生(华北理工大学),2014年河北联合大学(本科)毕业,炼钢与连铸新技术,高压冶金研究。E-mail:15032913913@163.com

收稿日期:2016-05-30