

方坯连铸机中间包流场流动特性研究

窦为学^{1,2}, 郑淑国¹, 邢飞¹, 朱苗勇¹

(1. 东北大学, 辽宁沈阳 110819; 2. 敬业钢铁有限公司, 河北石家庄 050409)

摘要: 利用物理模拟的方法研究了十流方坯连铸机中间包内钢液的流动特征。通过研究不同控流装置对中间包流动特性的影响规律, 提出了中间包内液态金属夹杂物去除的最佳控流方案, 并将该控流方案应用于实际工业现场。现场试验结果表明, 所开发的控流方案可将铸流温度差控制在5℃以内; 相比原控流方案, 可使液态金属夹杂数量降低大约26%, 大于50 μm的夹杂数量降低大约59%, 大幅度提高了铸坯质量。

关键词: 方坯; 连铸中间包; 控流方案

作者简介:

窦为学(1973-), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事连铸工艺研究。
E-mail: 15030896666@126.com

通讯作者:

郑淑国, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: zhengsg@smm.neu.edu.cn

中图分类号: TG232

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)02-0138-06

基金项目:

国家自然科学基金资助项目(51474059, 51774077); 中央高校基本科研业务专项资金资助项目(N172504030)。

收稿日期:

2018-06-09 收到初稿,
2018-12-11 收到修订稿。

中间包冶金技术^[1-2]是实现高效连铸必不可少的一种技术。促使夹杂物的上浮是中间包的重要冶金功能之一, 而夹杂物的上浮去除又和中间包内钢液的流动状态有着密切的关系。因此, 使用合理的控流装置使中间包内液态金属的流场有利于夹杂物上浮去除至关重要。对于多流中间包, 除了要考虑夹杂物的上浮外, 各流间温度和成分的一致性也是一个令人关注的问题, 对此研究者们进行了大量的模拟。Koria等^[3-4]采用挡墙和挡坝来控制中间包内钢液的流动; Schade等^[5]用水力模拟试验研究了无控流装置、二重挡墙和二重挡墙加湍流控制器的中间包内钢液的流动行为; 郑淑国等^[6]利用水力模拟试验对一个六流中间包内活塞区、混合区、死区体积分数等流动特性进行了定量计算; 钟良才等^[7]在试验室建立了1:2.5的六流方坯连铸中间包模型, 通过测定停留时间分布曲线, 研究不同结构中间包的流动特性。

本研究针对敬业钢铁有限公司炼钢厂3#铸机现有165 mm × 165 mm十流连铸中间包技术装备和连铸工艺, 采用物理模拟方法研究了不同控流装置对中间包内流场流动特性的影响, 提出了优化控流方案, 并将提出的控流方案应用于工业现场, 验证了该方案对不同流液态金属的控温效果和减少液态金属之间夹杂方面的实际应用效果。

1 物理模型及试验方法

1.1 物理模型

中间包物理试验装置示意图如图1所示, 由钢包、中间包、钢包长水口、中间包浸入式水口、中间包内控流装置、示踪剂加入装置、出口示踪剂浓度电导探头、电导率仪、数据采集计算机等组成。由于本试验所用中间包内部结构以中心截面对称, 故只需采集右侧1、2、3、4、5流的RTD曲线(出口示踪剂浓度与时间的关系曲线, 即Resident Time Distribution曲线)。

1.2 试验原理

对于中间包水力模拟试验, 水易于操作且20℃水的运动黏度与1600℃钢液的运动黏度很接近, 水的流动主要是重力和惯性力起主导作用的湍流流动。为保证中

间包原型与模型的运动相似，采用 Re 系数和 Rr 系数同时相等或近似相等。试验表明^[2, 8]，中间包在湍流流动条件下，不论中间包几何形状和尺寸大小，在几何相似的中间包内流动过程的湍流雷诺数非常近似，即 Re 系数得到了满足。当中间包内钢液流动与模型中流体的流通处于同一自膜区时，只要 Fr 系数相等就可满足动力相似条件。因此，中间包水力模型试验大多采用比例缩小的模型进行模拟试验，为保证湍流流动特性相近，在 Re 系数相近的情况下，选用弗鲁德准数作为试验的决定性准数。

1.3 试验方法

在水力模拟试验时，选取模型与原型几何相似比为1:2.5，采用刺激—响应法，得到RTD曲线。

流动特性计算公式如下：

活塞流区体积分数

$$V_p = \frac{1}{5}(\theta_{1min} + \theta_{2min} + \theta_{3min} + \theta_{4min} + \theta_{5min}) \quad (1)$$

死区体积分数

$$V_d = 1 - \frac{1}{5} \left(\frac{Q_{1a} \cdot \bar{\theta}_{1c} + Q_{2a} \cdot \bar{\theta}_{2c} + Q_{3a} \cdot \bar{\theta}_{3c} + Q_{4a} \cdot \bar{\theta}_{4c} + Q_{5a} \cdot \bar{\theta}_{5c}}{Q_i} \right) \quad (2)$$

全混区体积分数

$$V_m = 1 - V_p - V_d \quad (3)$$

式中： $\theta_{i\min} = \frac{t_{i\min}}{t}$ ($i=1\sim 5$)， $\bar{\theta}_{ic} = \frac{\bar{t}_{ic}}{t}$ ；理论停留时间 $\bar{t} = \frac{V}{Q}$ ；平均停留时间 $\bar{t}_{ic} = \frac{\sum t c_i(t)}{\sum c_i(t)}$ ； Q_{ia} 为各流的活跃

区体积流量 Q_{ia} 与该流的体积流量 Q_i 之比（数值上分别等于各流的无因次RTD曲线上 θ 从0到2的面积与该流RTD曲线总面积之比）； $t_{i\min}$ 为各流示踪剂的响应时间； $c_i(t)$ 是在采样时间点为 t 时各流的浓度值； V 为试验时中间包内水的体积。

多流中间包各流一致性判断方法如下：首先，将各流的RTD曲线在每一个采样时间点下的无因次浓度值($C_i(\theta_j)$)， $i=1\sim 5$ ， $j=1\sim Z$ 求标准差，然后将整个采样时间范围内的所有标准差取平均值。即：

$$\bar{S}_5 = \frac{1}{Z} \sum_{j=1}^Z \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (C_i(\theta_j) - \bar{C}(\theta_j))^2}{4}} \quad (i=1\sim 5, j=1\sim Z) \quad (4)$$

式中： \bar{S}_5 为中间包各流无因次浓度的总体平均标准差； $C_i(\theta_j)$ 为在采样时间点为 θ_j 时各流的无因次浓度值($i=1\sim 5$ ， $j=1\sim Z$)； θ_j 为RTD曲线的第 j 个无因次采样时间点； Z 为采样时间点的总数； $\bar{C}(\theta_j)$ 为在采样时间点为 θ_j 时各流无因次浓度的平均值。 \bar{S}_5 越小，多流

中间包各流流动特性的一致性越好。

1.4 试验方案

试验设计了几组不同的“多孔挡墙+抑湍器”控流装置，本研究选取其中具有代表性的三组方案进行分析。抑湍器结构及尺寸如图2所示。

图3所示为两种多孔挡墙(A、B)的结构及尺寸：(1)多孔挡墙A上开孔中心线与挡墙垂线的夹角分别为 30° 和 27° ；(2)多孔挡墙B上开孔中心线与挡墙垂线的夹角分别为 30° 和 28° 。通过改变挡墙上开孔中心线与挡墙的夹角，来研究液态金属流动规律。

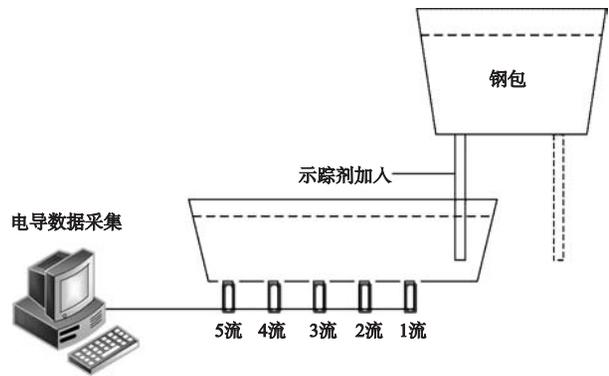


图1 试验装置示意图
Fig. 1 Schematic of experiment facility

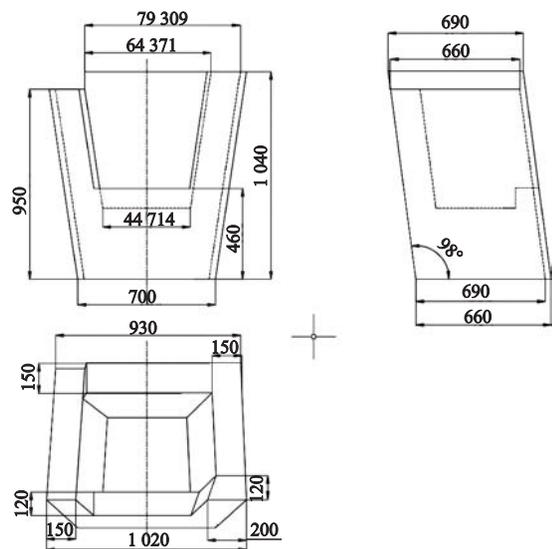


图2 方坯中间包抑湍器尺寸图
Fig. 2 Dimensions of inhibitor of billet tundish

图4所示为三种控流试验装置示意图。其中,方案一为正在使用的控流装置;方案二在原有控流装置中增加了多孔挡墙A,以改变液态金属在中间包中的流动特性;方案三通过增加多孔挡墙B改变液态金属在中间包中的流动特性。通过对比方案一、方案二和方案三的控流效果,研究不同控流装置的活塞区体积分数、四区体积分数、各流无因次浓度的总体平均标准差等,以获取最佳控流方案。

1.5 结果与分析

本研究主要考察不同的“多孔挡墙+抑湍器”方案的控流效果,来最终优化钢液在中间包内的流动。该多流中间包的控流装置组合见图2-4,对应的RTD曲线分析结果如表1和图5所示。从表1和图5对比分析可知:

(1) 方案一(原方案)的活塞区体积分数偏小,死区体积分数偏大, V_p/V_d 偏小,说明钢液的流动性较差;各流无因次浓度的总体平均标准差 \bar{S}_5 偏大,说明各流一致性较差。

(2) 方案二和方案三的流动性均好于方案一,其中方案二的活塞区体积分数最大,死区体积分数最小, V_p/V_d 最大,各流无因次浓度的总体平均标准差 \bar{S}_5 最小,可见方案二(采用挡墙A)是这三个方案中的最优方案。

2 现场试验与应用效果

为检验上述最佳控流方案的应用效果,对原方案和最佳控流方案在炼钢厂3#铸机现有165 mm × 165 mm十流连铸中间包上进行了工业试验,试验钢种为20#钢(优质碳素结构钢GB/T 669-1999)。现场试验中间包控流装置如图6所示。

现场试验过程中,在左右两个中间包上,分别采用原控流方案和优化控流方案。具体铸流编号为:1-5流为左中间包(采用原控流方案)上从大包长水口依次至中包边缘;6-10流为右中间包(优化方案)上从大包长水口依次至中包边缘。

2.1 中间包温度控制效果对比

采用测温探头对采用上述方案中间包水口温度进行检测,获取150组数据并对其进行对比分析,原方案各流最大温差平均值为12℃,而优化方案的各流最大温差显著降低,平均值为5℃,降低了58%。由此可见,优化方案能很好的控制中间包的铸流温差。

2.2 铸坯夹杂检测

图7为试验20#钢连铸坯取样位置示意图。在连铸坯

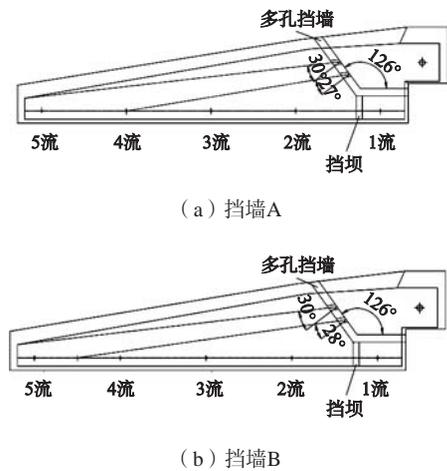


图3 方坯中间包多孔挡墙尺寸图

Fig. 3 Dimensions of porous baffle of billet tundish

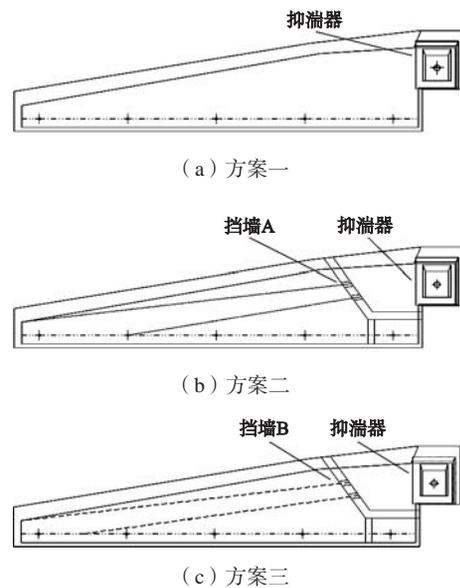
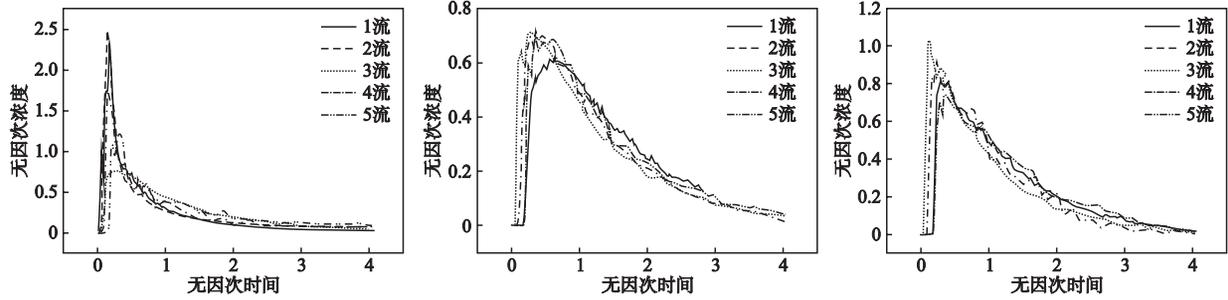


图4 方坯中间包各方案示意图

Fig. 4 Schematic of each flow-control method

表1 RTD曲线分析结果
Table 1 Analysis results of RTD curves

方案	V_p	V_m	V_d	V_p/V_d	\bar{S}_5
方案一	0.117 0	0.478 0	0.405	0.289	0.125 2
方案二	0.151 5	0.643 5	0.205	0.739	0.050 2
方案三	0.126 5	0.618 5	0.255	0.496	0.059 1



(a) 方案一

(b) 方案二

(c) 方案三

图5 各方案RTD曲线

Fig. 5 RTD curves of each solution

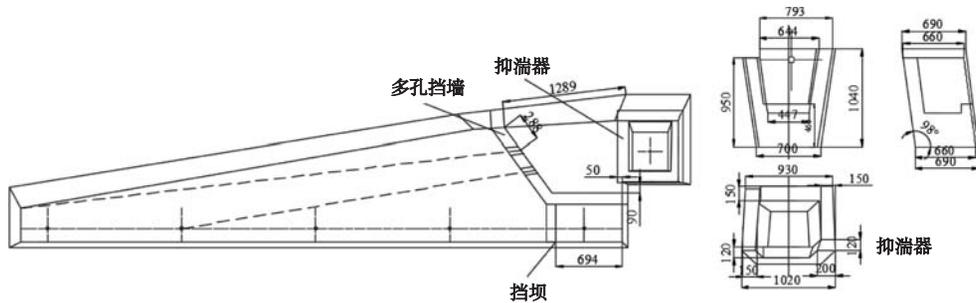


图6 控流装置

Fig. 6 Flow-control device

靠近内弧侧1/4处分别取铸坯样，对所取铸坯样采用砂纸打磨，再对打磨后的铸坯样进行抛光，最后对抛光后的试样采用金相显微镜对不同尺寸的夹杂物数量进行统计。图8为20#钢连铸坯优化前后金相照片。

采用优化方案前后的20#钢连铸坯低倍夹杂统计如表2和表3所示。由数据可知，对于20#钢，采用原方案，夹杂总量为231.62 个/ μm^2 ，采用优化方案，夹杂总量为170.24 个/ μm^2 ，优化后单流夹杂总量降低了26%；与原方案相比，优化方案5~15 μm 、15~30 μm 、30~50 μm 、>50 μm 尺寸范围的夹杂依次降低了24%、67%、44%、59%。综上所述，采用优化方案后夹杂数量降低均在24%以上，其中，大于50 μm 的夹杂数量降低了59%。因此，与原方案相比，优化方案有很好的去夹杂效果。

3 结论

针对敬业钢铁有限公司炼钢厂3#铸机165 mm × 165 mm十流连铸中间包，利用物理模拟方法考察了不同控流装置对中间包内流场的影响，提出了优化控流

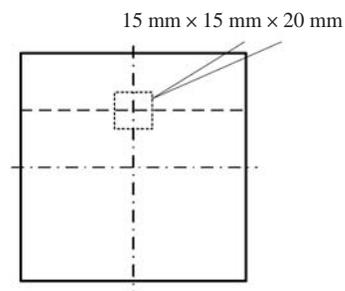


图7 铸坯取样位置示意图

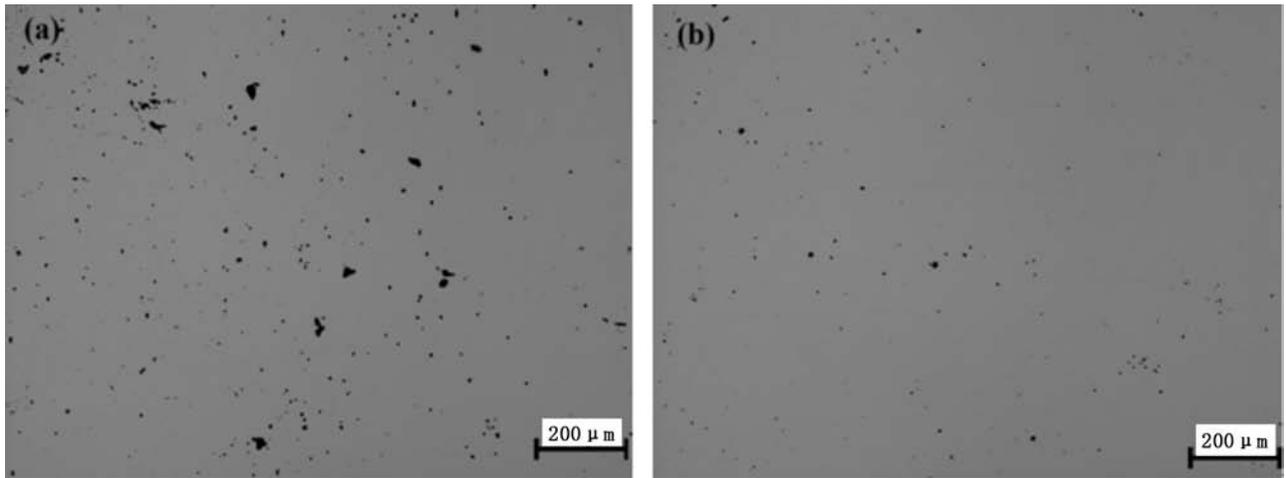
Fig. 7 Schematic diagram of sampling site in casting billet

方案，主要结论如下：

(1) 采用原方案（方案一）控流效果比较差，其各铸流最大温差平均值为12 $^{\circ}\text{C}$ ；采用优化方案的各流最大温差显著降低，平均值为5 $^{\circ}\text{C}$ ，比原方案降低了58%。与原方案相比，优化方案能很好的控制中间包的铸流温差。

(2) 与原控流方案相比, 采用优化方案使单流夹杂总量降低了26%, 且大于50 μm 的夹杂数量降低了59%, 所提出的控流方案在降低夹杂方面有显著效果。

(3) 方案二是所有试验方案中的最佳控流方案, 并将该方案为成功应用于3#铸机165 mm \times 165 mm十流方坯中间包连铸生产, 不但缩小了各流的温度偏差, 同时有效降低了夹杂, 显著提高了铸坯质量。



(a) 原控流方案

(b) 优化控流方案

图8 20#钢夹杂物对比

Fig. 8 Comparison of inclusions in 20# steel before and after use of the improved control flow method

表2 原方案夹杂物数量统计
Table 2 Statistics of inclusions for original flow-control method

流数	不同尺寸范围夹杂物数量, 个/ μm^2				夹杂 总量
	5~15 μm	15~30 μm	30~50 μm	>50 μm	
1	24.31	1.23	0.17	0.02	25.73
2	43.03	1.85	0.23	0.03	45.14
3	51.97	2.68	0.26	0.04	54.95
4	62.44	3.24	0.28	0.05	66.01
5	37.84	1.74	0.18	0.03	39.79
5个流夹杂总量	219.59	10.74	1.12	0.17	231.62

表3 优化方案夹杂物数量统计
Table 3 Statistics of inclusions for the improved flow-control method

流数	不同尺寸范围夹杂物数量, 个/ μm^2				夹杂 总量
	5~15 μm	15~30 μm	30~50 μm	>50 μm	
1	31.12	0.37	0.11	0.009	31.61
2	35.79	0.45	0.12	0.015	36.37
3	41.02	1.80	0.17	0.023	43.01
4	36.81	0.65	0.15	0.018	37.63
5	21.26	0.28	0.08	0.001	21.62
5个流夹杂总量	166.00	3.55	0.63	0.07	170.24

参考文献:

- [1] Sahai Y, Emi T. 洁净钢生产的中间包技术(朱苗勇译) [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- [2] 张立峰, 蔡开科. 连铸中间包钢液流动和夹杂的去除 [J]. 炼钢, 1995 (6): 43.
- [3] Korla S C, Singh S. Physical modeling of the effects of the flow modifier on the dynamics of molten steel flowing in a tundish [J]. ISIJ Int, 1994, 34 (10): 784-793.
- [4] Mazumdar D, Yamanoglu G, Guthrie R I L. Hydrodynamic performance of steelmaking tundish systems: a comparative study of three different tundish design [J]. Steel Research Int, 1997, 68 (7): 293-300.
- [5] Schade J, Smith M P, Palmer S E. Doubling tundish volume at Ak steel's middle town works: structural criteria, design considerations and operating results [J]. Iron & Steelmaker, 1996, 23 (10): 93-103.
- [6] 郑淑国, 朱苗勇. 多流连铸中间包内钢液流动特性的分析模型 [J]. 金属学报, 2005, 41 (10): 1073-1076.
- [7] 钟良才, 陆定贤, 汪灿荣, 等. 六流方坯连铸中间包流体流动控制物理模拟 [C]//中国钢铁年会论文集, 2009: 582-587.
- [8] Singh S, Korla S C. Physical modeling of steel flow in continuous casting tundish [J]. Ironmaking and Steelmaking, 1993, 20 (3): 221-230.

Study on Flow Behavior of Flow Field in Billet Continuous Casting Tundish

DOU Wei-xue^{1,2}, ZHENG Shu-guo¹, XING Fei¹, ZHU Miao-yong¹

(1. Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China; 2. Jingye Steel Co., Ltd., Shijiazhuang 050409, Hebei, China)

Abstract:

The physical simulation method was applied to study the flow behavior of molten steel in the tundish of the ten-strand billet continuous casting machine. The influence of different flow control devices on the flow characteristics of molten steel in the tundish was investigated. An optimal flow-control method was proposed to remove the inclusions from liquid metal in the billet tundish, and applied to the trial production of billet continuous casting. The experimental results showed a significant control effect for casting flows with a temperature deviation of less than 5 °C, and the proportion of inclusions in liquid metal was reduced 26%, with a decrease of 50% for the inclusions greater than 50 μm, which greatly improved the quality of casting billet when compared to original flow-control method.

Key words:

billet; continuous casting tundish; flow control proposal