

两流板坯连铸 58 t 中间包过滤器的水模型试验和应用

钟 巍^{1,2} 赵丹婷^{1,3} 帅 勇^{1,2} 罗仁辉² 仇圣桃¹

(1 钢铁研究总院连铸技术国家工程研究中心,北京 100081;2 新余钢铁集团有限责任公司,新余 338001;
3 北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083)

摘 要 通过几何相似比 0.29 : 1 的水模型试验了湍流抑制器 + 挡墙 + 挡坝和湍流抑制器 + 挡墙 + 过滤器两种控流装置的钢液流动,研究了通道式过滤器对 58 t 中间包钢液流场的影响。结果表明,原中间包(湍流抑制器 + 挡墙 + 挡坝)活塞区体积小,死区体积高达 29.53%,优化中间包加入过滤器后(湍流抑制器 + 挡墙 + 过滤器)短路流基本消失,钢液的实际平均停留时间延长,死区体积由 29.53% 减小至 13.52%。50 t 中间包,230 mm × 1 100 mm 连铸板坯,拉速 1.25 ~ 1.30 m/min 工业生产结果表明,使用过滤器后,中间包浇注区的夹杂物尺寸明显小于冲击区,中间包浇注区 T[O] 由原 86×10^{-6} 降至 30×10^{-6} ,连铸坯大多数夹杂物尺寸 $\leq 10 \mu\text{m}$,没有发现 $\geq 30 \mu\text{m}$ 夹杂物。

关键词 58 t 中间包 通道式过滤器 水模型 流场 夹杂物

Water Model Test of 58 t Tundish with Channel Filter for Two Strands Slab Casting and Application

Zhong Wei^{1,2}, Zhao Danting^{1,3}, Shuai Yong^{1,2}, Luo Renhui² and Qiu Shengtao¹

(1 National Engineering and Research Center of Continuous Casting Technology, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081; 2 Xinyu Iron and Steel Co Ltd, Xinyu 338001; 3 School of Metallurgical and Ecological Engineering, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083)

Abstract The effect of channel filter on fluid field of liquid in a 58 t tundish has been studied by using geometric similarity 0.29 : 1 water model to test liquid flow by both control flow devices- turbulence controller + retaining wall + dam and turbulence controller + retaining wall + channel filter. Results show that in original tundish with turbulence controller + retaining wall + dam the plug flow area is relatively small and the dead area is up to 29.53%, while in optimized tundish adding channel filter with turbulence controller + retaining wall + channel filter the short circuit flow basically disappears, the real resident time of liquid increases and the dead area decreases from original 29.53% to 13.52%. The results of commercial production with 50 t tundish, casting 230 mm × 1 100 mm slab and casting speed 1.25 ~ 1.30 m/min show that after using channel filter the size of inclusions in liquid at casting area in tundish is obvious less than that in impact zone, the T[O] in liquid at casting area in tundish decreases from original 86×10^{-6} to 30×10^{-6} and the size of most inclusions in casting slab is $\leq 10 \mu\text{m}$ and the $\geq 30 \mu\text{m}$ inclusions are not found.

Material Index 58 t Tundish, Channel Filter, Water Model, Fluid Field, Inclusions

由于中间包内钢液的流动状态与铸坯质量关系密切^[1-2],因此,需要设计合理的控流装置^[3-6]来严格控制钢液中的夹杂物。但是在目前的连铸生产中,采用钢包精炼和中间包冶金技术对直径小于 50 μm 的夹杂物去除效果不理想。所以,采用中间包过滤技术对中间包内钢液流动进行了深入研究。

本文提出一种新型通道式钢液过滤器,用物理模拟的方法研究通道式钢液过滤器对中间包钢液流动状态的影响,同时进行了现场工业试验验证。

1 物理模拟实验

1.1 实验原理及方法

本实验以相似原理^[7]为基础,选取弗鲁德准数 $Fr = \frac{u^2}{gl}$ 为定性准数,在几何相似比 0.29 : 1 的基础

上,由 $Fr_m = Fr_p$ 可得:

$$\text{长度比: } l_m = 0.29 l_p$$

$$\text{速度比: } u_m = 0.54 u_p$$

$$\text{流量比: } Q_m = 0.045 Q_p$$

式中: u - 特征速度; l - 特征长度; g - 当地的重力加速度; Q - 中间包内钢液体积流量; λ - 几何相似比; p 、 m - 原型和模型。

本实验以 58 t 两流板坯连铸中间包为原型,板坯截面尺寸为 230 mm × 1 600 mm,拉坯速度 0.8 m/min,具体工艺参数见表 1。

采用“刺激-响应”的方法^[8],在中间包模型入口处瞬间加入含有定量黑墨水的 200 mL 饱和 NaCl 溶液,利用电导率仪在出口处采集电导率数据,采集时间为钢液在中间包内理论平均停留时间的 2 倍,

表 1 中间包原型与模型的主要工艺参数

Table 1 Main process parameters of tundish prototype and model

| 物理模拟实验参数 | 中间包模型 | 中间包原型 | 相似比 |
|--|-------|---------|-------|
| 工作液位/mm | 342 | 1 180 | 0.29 |
| 长水口插入深度/mm | 58,87 | 200,300 | 0.29 |
| 长水口内径/mm | 24.9 | 86 | 0.29 |
| 出水口内径/mm | 20.3 | 70 | 0.29 |
| 长水口流量/(m ³ ·h ⁻¹) | 1.6 | 35.33 | 0.045 |

并用摄像机对墨水在中间包内的运动轨迹进行录像,最后根据修正混合理论模型^[5]计算出中间包内活塞区、死区和全混区的体积分数。

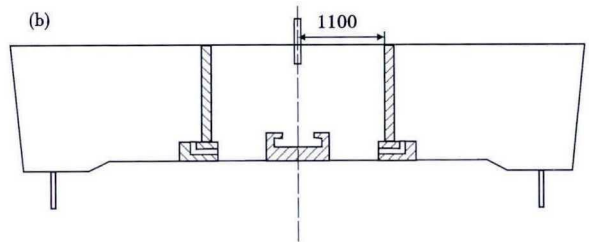
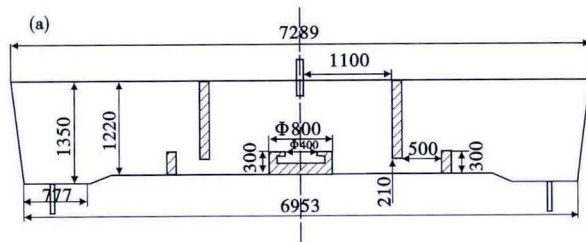


图 1 (a)方案 1(原结构中间包,湍流抑制器+挡墙+挡坝);(b)方案 2(湍流抑制器+挡墙+过滤器)控流装置布置图
Fig. 1 Layout of control flow device of scheme 1 (original tundish, turbulence controller + retaining wall + dam) (a) and scheme 2 (turbulence controller + retaining wall + channel filter)

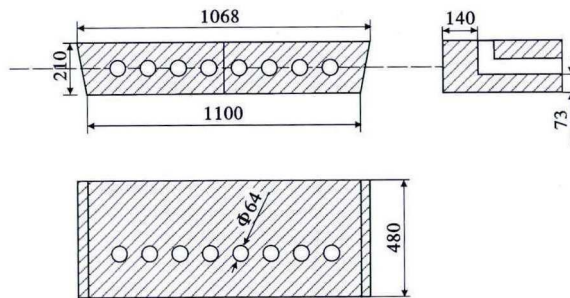


图 2 通道式钢液过滤器结构图
Fig. 2 Schematics of structure of channel filter for liquid

由图 3 可见,方案 2 停留时间分布 (RTD) 曲线多峰尖峰现象基本消失,曲线峰值明显减小,且由窄高型变为宽矮型,表明中间包内短路流基本消除,长水口注入的钢液和中间包内原有钢液混合较为均匀后才从出水口流走,中间包容积得到更加有效利用,流场明显改善。

2 工业实验及结果

2.1 试验条件

试验用中间包为 50 t, 铸坯断面尺寸 230 mm × 1 100 mm, 拉速为 1.25 ~ 1.30 m/min, 正常浇铸过程中间包液位为 1.0 m, 根据

1.2 实验方案

原中间包(方案 1)采用湍流抑制器、挡墙+挡坝的控流方式(图 1a),方案 2(图 1b)在挡墙下方安装过滤器(图 2),去掉挡坝。

1.3 结果与分析

表 2 实验结果显示,和方案 1 相比,方案 2 的峰值时间由方案 1 的 168.6 s 延长至 181.8 s,钢液的实际平均停留时间可以由方案 1 的 239.1 s 延长至 280.19 s,死区体积可以从方案 1 的 29.53% 减小到方案 2 的 13.52%。

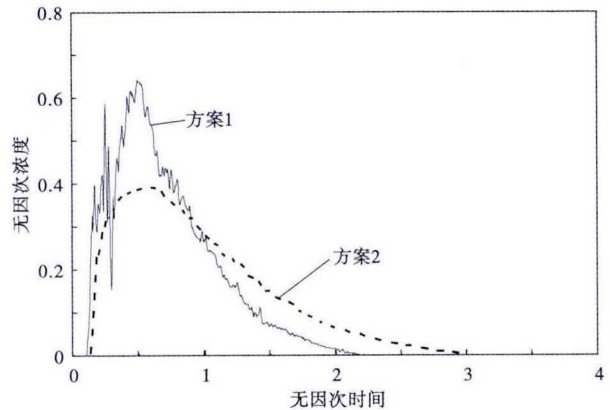


图 3 方案 1(湍流抑制器+挡墙+挡坝)和方案 2(湍流抑制器+挡墙+过滤器) RTD 曲线(水口插入深度 200 mm,拉速 0.8 m/min)

Fig. 3 Curves of residence time distribution of scheme 1 (turbulence controller + retaining wall + dam) and scheme 2 (turbulence controller + retaining wall + channel filter), nozzle submerged depth 200 mm and casting 0.8 m/min

表 2 控流方案 1(湍流抑制器+挡墙+挡坝)和方案 2(湍流抑制器+挡墙+过滤器)的实验结果

Table 2 Experiment results of control flow scheme 1 (turbulence controller + retaining wall + dam) and scheme 2 (turbulence controller + retaining wall + channel filter)

| 方案 | 控流装置 | T_{min}/s | T_{peak}/s | T_{AVG}/s | $V_p/V_R/\%$ | $V_d/V_R/\%$ | $V_m/V_R/\%$ | V_p/V_d |
|----|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|-----------|
| 1 | 湍流抑制器+挡墙+挡坝 | 36.2 | 168.6 | 239.10 | 29.94 | 29.53 | 40.52 | 1.01 |
| 2 | 湍流抑制器+挡墙+过滤器 | 42.0 | 181.8 | 280.19 | 34.54 | 13.52 | 51.94 | 2.55 |

注: T_{min} -开始响应时间; T_{peak} -峰值时间; T_{AVE} -钢液实际平均停留时间; V_p/V_R -活塞区体积分数; V_d/V_R -死区体积分数; V_m/V_R -混合区体积分数; V_p/V_d -活塞区与死区体积比。

表 3 实验用钢种成分/%

Table 3 Chemical composition of tested steel grades / %

| 钢种 | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni |
|-------|-------|------|------|-------|-------|------|------|
| SPHE | 0.005 | 0.02 | 0.25 | 0.015 | 0.020 | 0.10 | 0.10 |
| 200IF | 0.003 | 0.02 | 0.10 | 0.012 | 0.008 | 0.10 | 0.10 |

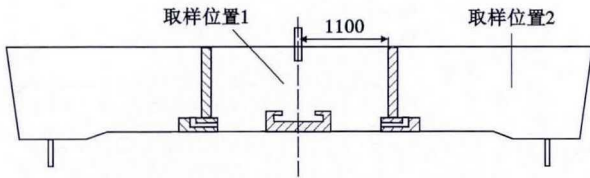


图 4 中间包取样位置

Fig. 4 Location for sampling in tundish

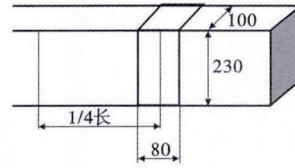


图 5 连铸坯低倍上取电解样的位置与 ASPEX 观察面
Fig. 5 Location for sampling in casting slab for electrolysis test and ASPEX observation surface on slab

现场的实际生产情况,设定每个浇次为 5 炉,试验时生产的钢种均为超低碳钢(表 3),前 2 炉为 SPHE,后 3 炉为 200IF。生产工艺路线为:转炉→吹氩→RH 精炼→连铸。

2.2 取样方案

选取对第 1、3 炉的钢液及铸坯进行取样分析。

(1) 钢包取样。取气体样(球拍样)。

(2) 中间包取样。在第 1、3 炉钢液的浇注中点时间取 3 块钢样:在冲击区取提桶样、塞棒区取球拍样与提桶样,取样位置如图 4 所示。

(3) 铸坯取样。在第 1 炉 SPHE 钢和第 3 炉 200IF 浇注的连铸坯低倍(第 2 块铸坯尾部)上取 1 块铸坯样,在低倍酸洗样上取小块电解样、气体样及扫描电镜和能谱(ASPEX)分析样(图 5)。ASPEX 的观察位置处在表层以下 35 mm,铸坯宽度 30 mm 的横截面位置。

2.3 钢液全氧含量分析

由表 4 可见,炉号 2-9027 的 SPHE 钢液到达连铸平台时全氧含量 T[O] 为 36×10^{-6} ,浇铸过程中浇注区钢液 T[O] 为 25×10^{-6} ,降低了 30.6%。炉号 2-9029 的 200IF 钢液到达连铸平台时 T[O] 为 86×10^{-6} ,浇铸过程中浇注区钢液 T[O] 为 30×10^{-6} ,降低了 65.1%。

2.4 小样电解分析

从图 6 可看出,第 1 炉(SPHE 钢,炉号 2-9027)冲击区夹杂物以 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 系块状为主,几何尺寸

表 4 连铸过程钢液中的全氧含量

Table 4 Total oxygen content in liquid in casting process

| 钢种 | 炉号 | 取样位置 | T[O]/% |
|-------|--------|--------|---------|
| SPHE | 2-9027 | RH 出站时 | 0.002 6 |
| | | 到连铸平台时 | 0.003 6 |
| | | 中间包浇注区 | 0.002 5 |
| 200IF | 2-9029 | RH 出站时 | 0.003 8 |
| | | 到连铸平台时 | 0.008 6 |
| | | 中间包浇注区 | 0.003 0 |

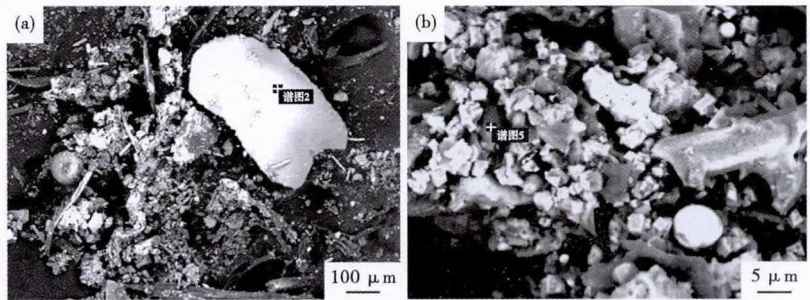


图 6 SPHE 钢炉号 2-9027 夹杂物微观形貌:(a)冲击区;(b)浇注区,SEM
Fig. 6 Morphology of inclusions in heat 2-9027 of steel SPHE: (a) impact area; (b) casting area, SEM

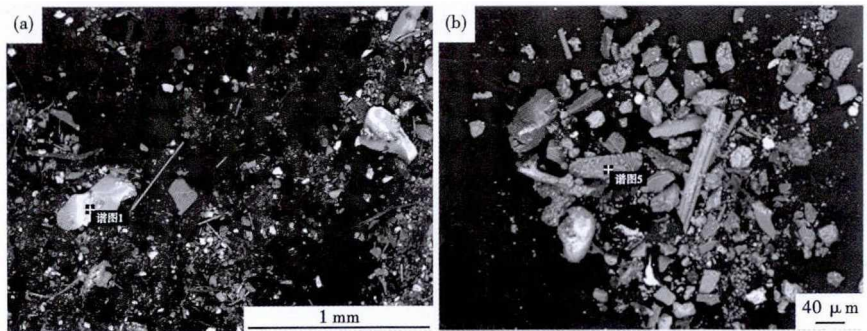


图 7 200IF 钢炉号 2-9029 夹杂物微观形貌:(a)冲击区;(b)浇注区,SEM
Fig. 7 Morphology of inclusions in heat 2-9029 of steel 200IF: (a) impact area; (b) casting area, SEM

较大,为 50 ~ 460 μm,浇注区夹杂物也是多数为 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 系块状夹杂物,但几何尺寸明显减小,大

小不一,最大为 110 μm。

从图 7 看出,第 3 炉(200IF 钢,炉号 2-9029)冲击区夹杂物以 SiO₂-Al₂O₃ 系块状夹杂物为主,数量较多,几何尺寸较大,在 50 ~ 455 μm。浇注区夹杂物类型主要是块状和长条状,块状夹杂物的主要组成为 SiO₂-Al₂O₃,几何尺寸在 20 ~ 110 μm,而长条状以 Al₂O₃-MgO-CaO 为主,几何尺寸在 20 ~ 100 μm。

2.5 ASPEX 分析

试样 CP1 和 CP2 分别为取自第 1 炉(SHPE 钢)和第 3 炉(200IF 钢)的连铸坯低倍。对试样 CP1 选取面积为 72.31 mm² 的区域进行非金属夹杂物自动分析检测,检测到 3 451 个夹杂物,试样中夹杂物数量密度为 47.73 个/mm²。由图 8 试样 CP1 夹杂物的数量及尺寸分布图看出,绝大多数的夹杂物尺寸在 10 μm 以下,其中尺寸在 0.2 ~ 1.0 μm 的夹杂物最多。

对试样 CP2 选取面积为 60.68 mm² 的区域进行非金属夹杂物自动分析检测,检测到 7 453 个夹杂物,试样中夹杂物数量密度为 122.83 个/mm²。图 9 为试样 CP2 夹杂物的数量及尺寸分布图。图 9 表明,绝大多数的夹杂物尺寸在 10 μm 以下,其中尺寸在 1.0 ~ 3.0 μm 的夹杂物最多,基本不存在 30 μm 以上的夹杂物,说明使用过滤器后钢液质量较好。

3 结论

(1) 经过中间包过滤器的过滤后,中间包浇注区的全氧含量可以由 86 × 10⁻⁶ 降低到 30 × 10⁻⁶,降低了 65.1%,说明过滤器对氧化物夹杂的去除效果较好。

(2) 安装过滤器后浇注区的夹杂物尺寸明显小于冲击区夹杂物尺寸,说明中间包过滤器对夹杂物起到了重要的过滤作用。

(3) 连铸坯中也没有发现 ≥ 30 μm 夹杂物, ≤ 10 μm 的小型夹杂物分散在铸坯中。

(4) 综合检测结果分析,中间包过滤器的使用对于氧化物夹杂的去除控制具有明显的效果。

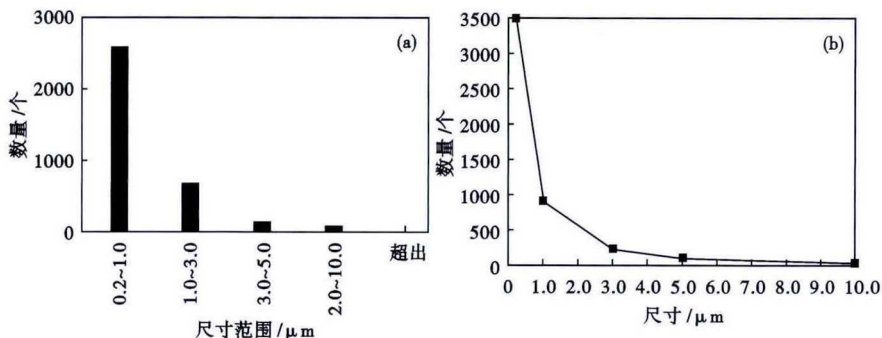


图 8 第 1 炉 SPHE 钢试样 CP1 夹杂的数量及尺寸分布图

Fig. 8 Distribution of amount and size of inclusions in specimen CP1 of first heat of steel SPHE

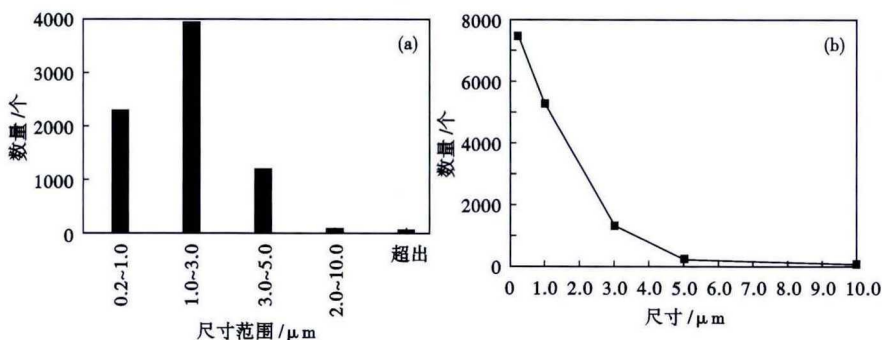


图 9 第 3 炉 200IF 钢试样 CP2 夹杂的数量及尺寸分布图

Fig. 9 Distribution of amount and size of inclusions in specimen CP2 of third heat of steel 200IF

参考文献

- [1] 李光强,付勇,陈先红,等.两流中间包流场的物理模拟与结构优化[J].重庆大学学报,2015,38(2):64-71.
- [2] 阮飞,张红强,刘智宇,等.0.8 m/min拉速 H 型异型坯中间包控流装置对传递性能影响的数值模拟[J].特殊钢,2016,37(5):22-25.
- [3] Zheng S,Zhu M and Zhou Y, et al. Flow Characteristics and Inclusion Removal in a Ten-strand Continuous Casting Tundish: Physical Modelling and Industrial Trials[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2016, 23(2):92-97.
- [4] 许长军,胡小东,胡林,等.中间包导流挡板设计与冶金效果[J].炼钢,2013,29(1):69-69.
- [5] 王德永,冯丽萍,刘承军,等.几种中间包控流装置的作用和比较[J].钢铁研究学报,2008,20(8):21-24.
- [6] 李怡宏,包燕平,赵立华,等.双挡坝中间包内钢液的流动行为[J].钢铁研究学报,2014,26(12):19-26.
- [7] 王建烟,包燕平,曲英.中间包冶金学[M].北京:冶金工业出版社,2001.
- [8] 吴启帆,包燕平,林路,等.单流不对称中间包上下挡墙配合控流优化设计[J].铸造技术,2015,36(3):56-59.

钟巍(1973-),男,博士研究生,高级工程师,1995年南昌航空工业大学(本科)毕业,设备技术和管理。

收稿日期:2017-11-23