

通道式钢液过滤器对两流板坯连铸中间包流场的影响

赵丹婷^{1,2} 刘爱强² 仇圣桃² 赖朝彬¹

(1 江西理工大学冶金与化学工程学院, 赣州 341000; 2 钢铁研究总院国家连铸中心, 北京 100081)

摘要 以相似原理为基础, 通过建立几何相似比 0.28:1 的水模型对两流 230 mm × 1 300 mm 板坯连铸 63.27 t 中间包流场进行模拟实验, 研究通道式过滤器对中间包钢液流动状态的影响。结果表明, 单纯的湍流控制器 + 挡墙、挡坝, 中间包活塞区体积偏小, 死区体积偏大; 用钢液过滤器代替挡坝后优化效果明显, 且安装简单, 成本低, 优化后的中间包钢液平均停留时间由 348.22 s 延长至 400.15 s, 峰值时间由原来的 172.4 s 延长至 196.0 s, 死区体积由 22.49% 减小至 9.69%。

关键词 63.27 t 中间包 230 mm × 1 300 mm 板坯 连铸 水模型 RTD 曲线 通道式钢液过滤器 流场

Effect of Channel Liquid Filter on Flow Field in Tundish for Two Strands Slab Continuous Casting

Zhao Danting^{1,2}, Liu Aiqiang², Qiu Shentao² and Lai Chaobin¹

(1 School of Metallurgical and Chemical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000; National Center for Continuous Casting, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081)

Abstract Based on similarity principle and by established geometric similarity ratio 0.28:1 water model, the simulation test on flow field in 63.27 t tundish for two strands 230 mm × 1 300 mm slab casting has been carried out to study the effect of channel filter on tundish liquid flow situation. Results show that only with turbulence inhibitor + wall and dam the plug flow area in tundish is relatively smaller and the dead area is rather larger; with placing dam by channel liquid filter the optimization effect is obvious and the installation is simplified with low cost, and the average resident time of liquid in optimized tundish increases from 348.22 s to 400.15 s, the peak time increases from original 172.4 s to 196.0 s and the dead volume decreases from 22.49% to 9.69%.

Material Index 63.27 t Tundish, 230 mm × 1 300 mm Slab, Continuous Casting, Water Model, Residence Time Distribution Curves, Channel Liquid Filter, Flow Field

随着工业化发展对钢铁产品质量要求的不断提高, 对钢液纯净度的要求也越来越高。中间包作为钢液凝固之前所经过的最后一个耐火材料容器, 除了满足钢液供给、均匀钢液成分和温度以外, 更重要的是起到促进夹杂物上浮排除和纯洁钢液的作用^[1-2]。

目前越来越多的冶金工作者开始采用中间包过滤技术对中间包内钢液和其中夹杂物的运动状态进行深入研究, 设计出合理的控流装置^[3-5], 使夹杂物去除率得到很大提高, 钢液纯净度明显改善。

本实验以梅山钢厂 63.27 t 两流板坯连铸中间包为原型, 对 230 mm × 1 300 mm 断面进行中间包流场分析研究。运用水力学模拟实验研究不同控流装置对中间包内钢液流动状态的影响, 对各方案中间包内死区体积、钢液实际平均停留时间等进行对

比, 进而得到过滤器对中间包流场的影响。

1 实验原理及评价方法

模型与原型中液体流动相似的基本条件是几何相似和动力相似^[6]。本实验几何相似比选取 $\lambda = 0.28$ 。由于模型与原型的 Re 处于第二自模化区 (Re 的第二自模化区的临界 u 为 $1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5$), 故只要保证 Fr 相等即可保证动力相似, 即:

$$\frac{u_p^2}{gl_p} = \frac{u_m^2}{gl_m} \quad (1)$$

式中: u_p - 中间包原型中钢液流动速度/($m \cdot s^{-1}$); u_m - 中间包模型中水的流动速度/($m \cdot s^{-1}$); l_p - 中间包原型的实际尺寸/ m ; l_m - 中间包模型的尺寸/ m ; g - 当地的重力加速度/($m \cdot s^{-2}$)。上式可写成:

通讯作者: 仇圣桃, 博士, 教授级高级工程师, 钢铁研究院国家连铸中心, 北京 100081

E-mail: qjust@vip.sina.com

$$u_m = u_p \cdot \left(\frac{l_m}{l_p}\right)^{\frac{1}{2}} = u_p \cdot \lambda^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$\text{可推出模型流量: } Q_m = Q_p \cdot \lambda^{\frac{5}{2}} \quad (3)$$

本实验采用统一拉速 0.8 m/min, 实际生产流量为 28.6 m³/h, 模型的流量设置为 1.17 m³/h。

钢液的流动行为直接影响着夹杂物的运动轨迹和去除率。大的活塞流体积可延长夹杂物的运动轨迹, 增大夹杂物上浮去除的机会。因此, 钢液在中间包内的平均停留时间和活塞流体积是检验钢液流动行为的重要指标。本文采用死区体积分数和钢液实际平均停留时间来评价钢液的流动行为和夹杂物去除率。

2 实验方案

2.1 流体停留时间的测定及分析

通过“刺激-响应”的方法, 在中间包模型入口处以脉冲方式加入 300 mL 饱和 NaCl 溶液, 利用电导率仪在出口采集电导率数据, 进而转化成停留时间分布曲线 (RTD 曲线), 采集时间为流体在中间包内理论平均停留时间的 2 倍。根据修正混合理论模型计算出中间包内死区比例、活塞区比例和全混区比例。

中间包模型水的理论平均停留时间为:

$$\tau = \frac{V_R}{Q} \quad (4)$$

式中: V_R - 中间包模型的有效容积; Q - 流体的体积流量。

由冶金反应工程学理论^[7]可以计算实际平均停留时间为:

$$\bar{t} = \frac{\sum tC(t)}{\sum C(t)} \quad (5)$$

用组合模型来分析中间包内的流动模式, 组合模型认为中间包内的流体区域由活塞区、全混区和死区组成^[8]。这 3 个区的体积分数由式 (6) ~ (8) 求得。

活塞区体积分数:

$$\Phi_P = \frac{V_P}{V_R} = \frac{t_{\min} + t_{\text{peak}}}{2\tau} \quad (6)$$

死区体积分数:

$$\Phi_d = \frac{V_d}{V_R} = 1 - \frac{\tau}{\bar{t}} \quad (7)$$

全混区体积分数:

$$\Phi_m = \frac{V_m}{V_R} = 1 - \Phi_P - \Phi_d \quad (8)$$

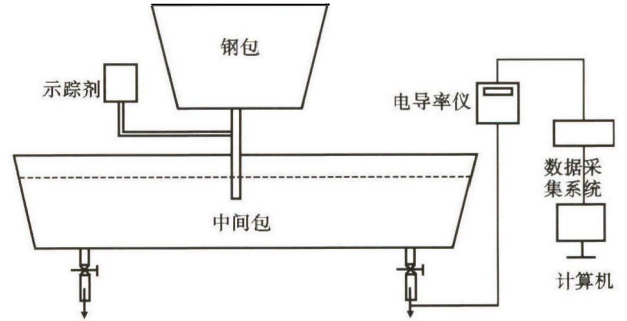


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematics of experimental installation

表 1 水模拟实验方案

Table 1 Tested schemes for water simulation

方案	钢液过滤器	过滤器方向	d_1 / mm	d_2 / mm	h / mm
1	无	无	1 778	300	300
2	有	正向	1 778	300	300
3	有	正向	1 778	400	300
4	有	正向	1 778	200	300
5	有	正向	1 928	300	300
6	有	正向	1 628	300	300
7	有	正向	1 778	300	200
8	有	反向	1 778	无挡坝	无挡坝
9	有	反向	1 928	无挡坝	无挡坝
10	有	反向	1 628	无挡坝	无挡坝

注: d_1 - 挡墙与长水口的距离; d_2 - 挡坝与挡墙的距离; h - 挡坝的高度。

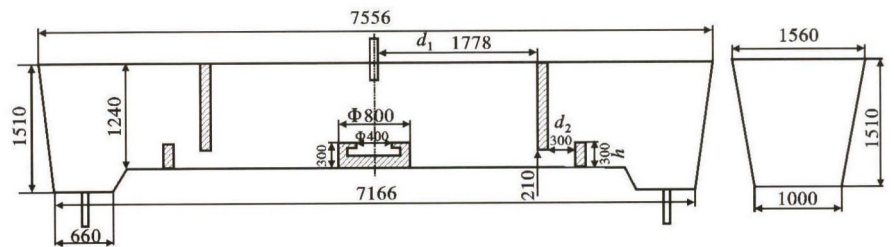


图 2 原中间包控流装置示意图

Fig. 2 Schematics of control flow devices in original tundish

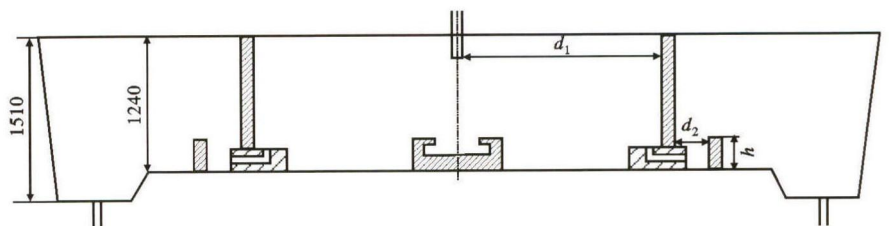


图 3 方案 2~7 优化中间包的控流装置示意图

Fig. 3 Schematics of improved control devices in tundish with scheme No2 ~ No7

式中: t_{min} - 中间包出口开始出现示踪剂的时间; t_{peak} - 示踪剂浓度达到最大值的时间。

实验装置如图 1 所示。整个实验装置除了中间包模型之外还包括示踪剂加入装置、电导率仪、流量计、计算机数据采集系统(采用中国科学院水力科学院研发的 DJ800 多功能监测系统)。

2.2 流场显示

本实验在中间包模型入口处以脉冲方式加入一定量的黑色墨水,观察墨水示踪剂轨迹并用数码相机拍摄,这样就实现了中间包内流场的可视化。具体实验方案如表 1 所示。

3 结果与分析

3.1 控流装置优化

原型中间包(方案 1)控流装置结构如图 2 所示,优化中间包(方案 2~7)控流装置结构如图 3 所示。优化中间包内的通道式钢液过滤器结构如图 4 所示。

原型中间包(方案 1)采用湍流抑制器加上、下挡墙的控制方式。从表 2 中可看出,原中间包控流装置(方案 1)死区体积分数(V_d/V_R)较大,占有效容积的 22.49%,开始响应时间为 85.2 s。可见,原方案的控流效果并不理想,对中间包内控流装置进

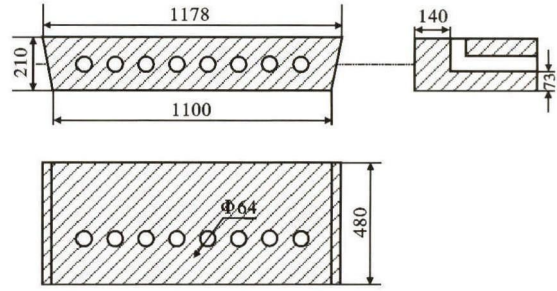


图 4 通道式钢液过滤器结构图
Fig. 4 Schematics of structure of channel liquid filter

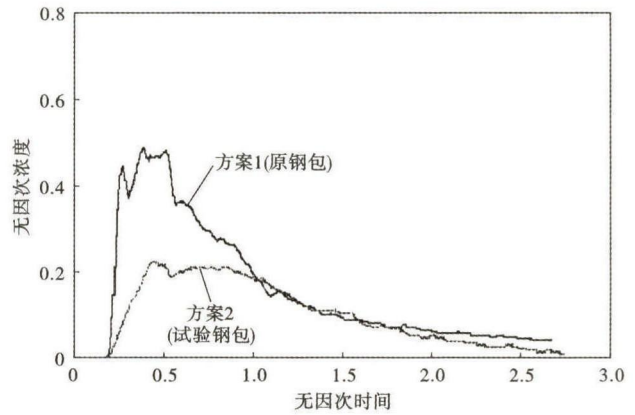


图 5 原方案 1 和优化方案 2 停留时间分布曲线
Fig. 5 Residence time distribution curves of original scheme No1 and improved scheme No2

表 2 中间包控流方案 1~10 的实验结果

Table 2 Experimental results of tundish control flow scheme No1 ~ No10

方案	过滤器	控流结构尺寸/mm			时间/s			体积分数/%			
		d_1	d_2	h	T_{min}	T_{peak}	T_{AVG}	V_p/V_R	V_d/V_R	V_m/V_R	V_p/V_d
1	无	1 778	300	300	85.2	172.4	348.22	28.67	22.49	48.84	1.28
2	有	1 778	300	300	76.0	182.6	409.21	29.60	6.34	64.06	4.67
3	有	1 778	400	300	77.8	238.6	412.57	36.21	5.57	58.22	6.50
4	有	1 778	200	300	78.0	99.2	329.31	20.28	24.63	55.09	0.82
5	有	1 928	300	300	74.2	216.6	368.24	33.28	15.72	51.00	2.12
6	有	1 628	300	300	55.2	151.4	396.37	23.36	10.47	66.17	2.23
7	有	1 778	300	200	72.8	210.6	387.76	32.20	11.87	55.92	2.71
8(优化)	有(反向)	1 778	-	-	70.8	196.0	400.15	30.11	9.69	60.20	3.11
9(优化)	有(反向)	1 928	-	-	62.8	188.0	366.49	28.30	17.29	54.41	1.64
10(优化)	有(反向)	1 628	-	-	55.2	151.4	396.37	23.36	10.47	66.17	2.23

注: d_1 - 挡墙与长水口的距离; d_2 - 挡坝与挡墙的距离; h - 挡坝的高度; T_{min} - 开始响应时间; T_{peak} - 峰值时间; T_{AVG} - 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 - 全混区体积分数; V_p/V_d - 活塞区与死区体积比。

行优化是很有必要的。

方案 2 在方案 1 的基础上安装了钢液过滤器,图 5 为方案 1、方案 2 的 RTD 曲线对比图。

由表 2 和图 5 看出,方案 2 峰值时间和钢液实际停留时间明显大于方案 1,死区体积分数由方案 1 的 22.49% 减小至 6.34%,方案 1 的 RTD 曲线出现明显多峰和尖峰,且曲线上升快,说明方案 1 中间包流场存在短路流,方案 2 安装过滤器后多峰和尖峰现象明显减少,说明安装通道式钢液过滤器能有效

的改善中间包内钢液的流动状态。

方案 3、4 研究安装过滤器后挡坝位置对流场的影响,对比发现,随着挡墙挡坝距离的增大,中间包内钢液停留时间延长,死区体积减小,挡坝距挡墙的距离为 400 mm(方案 3)时,中间包流场最佳,中间包内钢液的流动状态最好。

方案 5、6 研究安装过滤器后注流区域容量大小对中间包内钢液流动状态的影响。对比方案 2、5、6 发现,方案 2 明显好于方案 5、6,方案 2 的开始响应

时间和钢液实际停留时间更长,死区体积更小,说明方案 2 即挡墙和长水口距离保持 1 778 mm 时最好。

方案 7 研究安装过滤器后挡坝高度对中间包内钢液流动状态的影响。对比方案 2 和方案 7 发现,降低挡坝高度以后中间包内钢液的开始响应时间、实际停留时间缩短,死区体积明显增大,说明降低挡坝高度不利于中间包内流场的改善。

方案 8、9、10 研究钢液过滤器代替挡坝的效果(如图 6 所示),方案 8、9、10 分别在方案 4、5、6 的基础上去掉挡坝,并改变钢液过滤器的方向。

对比方案 8、9、10 发现,方案 8 开始响应时间、峰值时间、平均停留时间最长,说明钢液从长水口流出后和中间包内的钢液混合较好后才流出,死区体积分数最小,仅占有有效容积的 9.69%,说明仅安装反方向过滤器挡墙和长水口距离为方案 8 的 1 778 mm 时中间包内钢液的流动状态最佳。

综上所述,方案 3 和方案 8 优化效果都比较明显。但方案 8 安装简单,成本低,而且避免了挡墙和

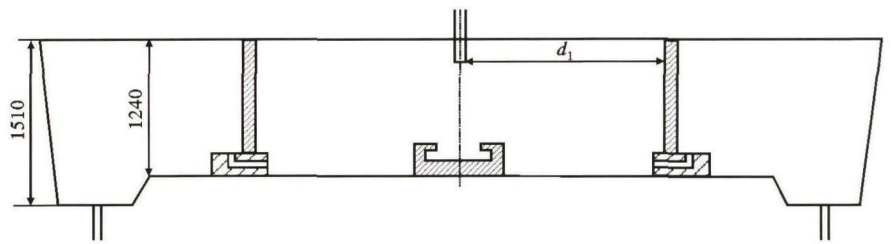


图 6 优化方案 8、9、10 控流装置示意图
Fig. 6 Schematics of layout of control devices for improved scheme No8, No9 and No10

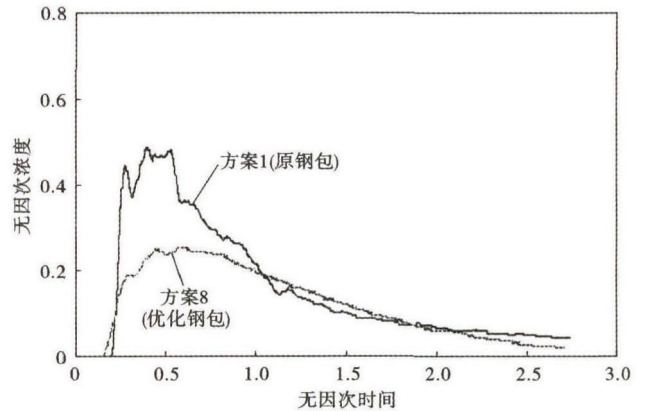


图 7 原方案 1 和优化的方案 8 停留时间分布曲线
Fig. 7 Residence time distribution curves of original scheme No1 and improved scheme No8

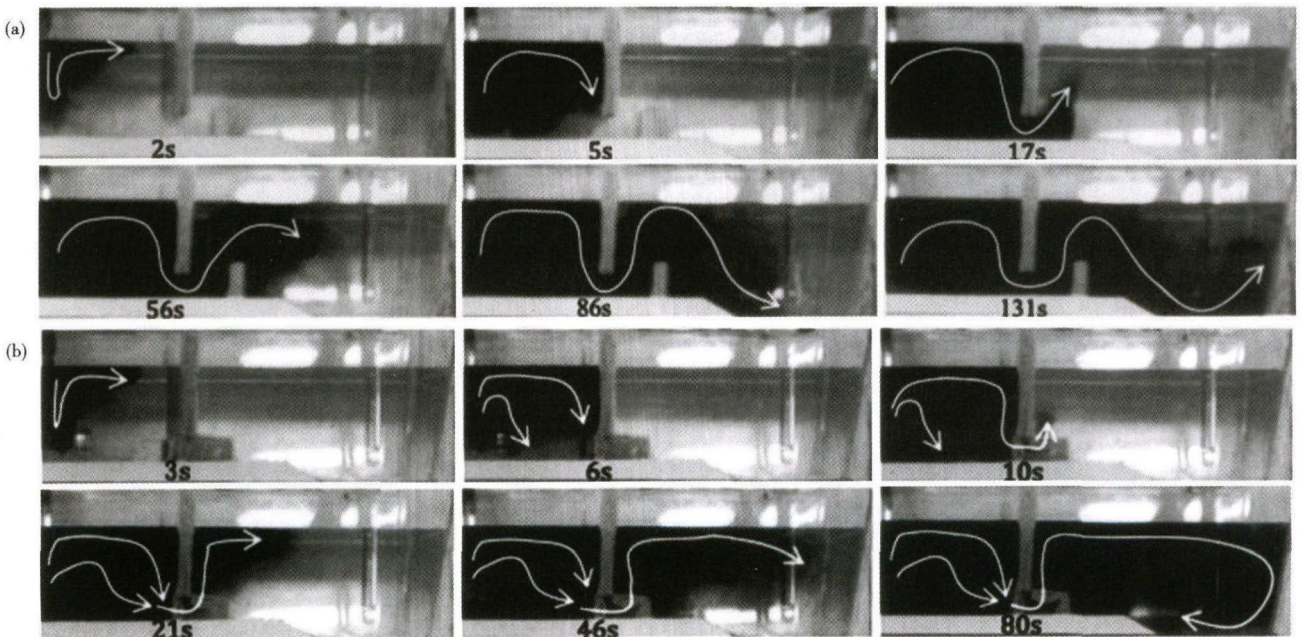


图 8 优化前(方案 1)(a)后(方案 8)(b)中间包不同时刻流场图
Fig. 8 Diagram of flow field in tundish of original scheme No1 (a) and optimized scheme No8 (b)

挡坝的耐火材料熔损进入钢液中增加夹杂物含量。所以综合分析,方案 8 即保持原方案挡墙和长水口距离为 1 778 mm 不变,挡墙下方反方向安装通道式

钢液过滤器为最优方案。

3.2 优化前后实验结果对比

比较原方案 1(表 1)和优化后方案 8(表 2)可

得出,优化后中间包钢液实际平均停留时间由原来的 348.22 s 延长至 400.15 s,钢液峰值时间由原来的 172.4 s 延长至 196.0 s,死区体积由 22.49% 减小至 9.69%。原中间包和优化后中间包的 RTD 曲线见图 7。

对比原方案(方案 1)和优化后方案(方案 8) RTD 曲线,发现方案 8 曲线上升更加平缓,峰值时间延长,且峰值更小,多峰和尖峰现象明显减少,说明方案 8 的长水口钢液注入后与原钢液混合较好后才流向出口。

优化前后中间包内流场如图 8 所示。长水口注入钢液,触及抑湍器底部,在抑湍器侧壁的引导下上浮至中间包液面,并向挡墙方向流动,钢液遇挡墙后沿其下沉并流至挡墙与挡坝之间,遇挡坝后向上流动,钢液刚流动至液面便直接向下沿包底流向中间包出口,中间包上层死区体积很大,夹杂物上浮条件差。

优化以后钢液从长水口注入触及抑湍器底部后,部分钢液上浮至中间包液面,并向挡墙方向流动,钢液沿挡墙下沉,流向过滤器通道。另一部分钢液触及抑湍器底部上浮后沿抑湍器侧壁下降直接流向过滤器通道,在过滤器通道作用下,钢液向上流动至液面,钢液沿液面向右推移至中间包窄面后向下流向出口,中间包内死区体积小,有利于夹杂物的上浮排除。

4 结论

(1)原方案的控流效果并不是十分理想,与其它方案相比,其死区体积分数偏大,活塞区与死区体积分数的比值偏小,有必要对中间包内的控流装置进行优化设计。

(2)安装通道式钢液过滤器后流场得到明显改

善,方案 3 即挡墙挡坝距离 400 mm 时为最佳,改变注流区域容量和降低挡坝高度都不利于大型夹杂物上浮。

(3)用反方向过滤器代替挡坝后,中间包钢液平均停留时间由 348.22 s 延长至 400.15 s,峰值时间由原来的 172.4 s 延长至 196.0 s,死区体积由 22.49% 减小至 9.69%。

(4)方案 3 和方案 8 优化效果都比较好。但方案 8 安装简单,成本低,而且避免了挡墙及挡坝的耐火材料熔损进入钢液中增加夹杂物含量。所以综合分析,方案 8 即挡墙和长水口距离 1 778 mm 并用反方向过滤器代替挡坝为最优方案。

参考文献

- [1] 詹树华,吴夜明,徐李军,等.连铸中间包内钢液流动,传热及夹杂物行为的研究[J].连铸,2007(2):4-7.
- [2] 陈家祥.钢铁冶金学(炼钢部分)[M].北京:冶金工业出版社,2009:14-16.
- [3] 阮文康,包燕平,李怡宏,等.湍流抑制器对中间包钢液流动的影响[J].武汉科技大学学报(自然科学版),2015,38(3):161-164.
- [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):69-73.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 肖兴国,谢蕴国.冶金反应工程学基础[M].北京:冶金工业出版社,1997:126-129.
- [8] Sahai Y,Emi T.Melt Flow Characterization in Continuous Casting Tundish[J].ISIJ International,1996,36(6):667-672.

赵丹婷(1991-),女,硕士研究生,2014年吉林大学(本科)毕业,中间包冶金研究。E-mail:1264517193@qq.com

收稿日期:2016-05-11

欢迎订阅 2017 年《特殊钢》杂志

全国各地邮局均可订阅(可破订)

邮发代号:38-183

定价:16.00 元/期 96.00 元/年

邮编:435001

地址:湖北省黄石市黄石大道316号新冶钢-大冶特殊钢股份有限公司《特殊钢》杂志社