

电磁净化中间包传输特性的水模拟

王保军 钟云波 王 赞 雷作胜 任维丽 任忠鸣

上海大学材料学院,上海市现代冶金与材料制备重点实验室,上海 200072

摘 要 为了得到电磁净化中间包中流体的流动及传输特性,以及旋转运动在中间包净化钢液中所起的作用,采用中间包物理模拟方法,对电磁净化中间包中不同控流装置配置和旋转速度下的停留时间分布曲线进行了测试,并对流场进行了显示实验.结果表明:电磁净化中间包圆形腔中的旋转运动能够减小中间包中滞留区分数,增加活塞区比例,同时增长平均停留时间,有利于中间包内夹杂物的去除;但旋转速度不是越高越好,存在一个最佳值.

关键词 电磁净化;中间包;RTD曲线;水模拟;流场形态

分类号 TF 769.9

Water model on a tundish for electromagnetic purification

WANG Bao-jun, ZHONG Yun-bo, WANG Yun, LEI Zuo-sheng, REN Wei-li, REN Zhong-ming

Shanghai Key Laboratory of Modern Metallurgy & Materials Processing, Material Engineering College, Shanghai University, Shanghai 200072, China

ABSTRACT The effect of rotary motion on the fluid flow and the mixing characteristics in a tundish for electromagnetic purification were studied by a physical modeling method. The visualization of flow pattern and the measurement of residence time distribution (RTD) were performed under different rotation speeds and geometric configurations. The result shows that rotational flow in the cylindrical chamber can effectively decrease the dead volume and increase the plug volume. Meanwhile, the mean residence time is prolonged thereby promoting the removal of inclusions. The flow characteristics do not become better with the rise of rotation speed, but there exists an optimum value.

KEY WORDS electromagnetic purification; tundish; residence time distribution curve; water modeling; flow characteristic

近年来,随着能源问题的日益突出以及循环经济理念的深入,生产高强度、高品质的钢铁材料成为钢铁企业发展的必然趋势^[1]. 在各种提高钢铁材料性能的工艺中,提高材料的纯净度是重要环节之一^[2]. 中间包作为连接钢包和结晶器的中间容器,具有均匀温度、稳定流动及促进夹杂上浮等功能,对钢液的洁净度提高起着至关重要的作用^[3]. 因此,优化中间包结构,获得最佳流场和更长的平均停留时间,提高夹杂物的去除效率,成为中间包冶金的主要内容. 提高中间包中夹杂物去除效率的主要方法有扩容、结构优化设计、底部吹氩、氩气保护以及等离子体加热等^[4-6];而随着高效连铸概念的提出,迫切需要更加高效的净化技术,以保证在高钢液流量

情况下仍能得到高纯净度的钢液.

由日本川崎公司开发的中间包电磁净化钢液技术取得了很好的效果,并已在该公司的生产中得到应用^[7-10]. 该技术的基本原理是将中间包分成圆形腔和矩形腔,在圆形腔(大包水口注入区)的外围装置有一个半圆形的旋转磁场发生器,利用旋转磁场在钢液中感生洛仑兹力,驱动钢液旋转,由于钢液中夹杂物密度比钢液小,在离心力作用下向钢液中心迁移,钢液旋转中心区域夹杂物浓度不断增加,进而碰撞长大,上浮而进入渣层,从而使钢液得到净化. 根据 Stokes 定律可知,钢液中夹杂物上浮速度与夹杂物粒径平方成正比,因此这种促进夹杂物碰撞长大的方法对提高夹杂物的去除效率非常有效^[11].

收稿日期: 2008-05-25

基金项目: 上海市科委科技攻关重点项目(No. 065212079)

作者简介: 王保军(1983-),男,硕士研究生, E-mail: csu-me@163.com; 钟云波(1971-),男,教授,博士

此外,这种方法还具有无需与钢液接触、大型夹杂物去除效果明显及夹杂物可开路排放等特点而成为钢液净化去除夹杂的一种颇具潜力的方法. 本文对中间包电磁净化技术中,不同旋转速度和不同中间包控流装置参数的流场特性进行了水模拟研究,以期掌握电磁净化中间包的传输特点,为中间包电磁净化技术的实际应用提供参考.

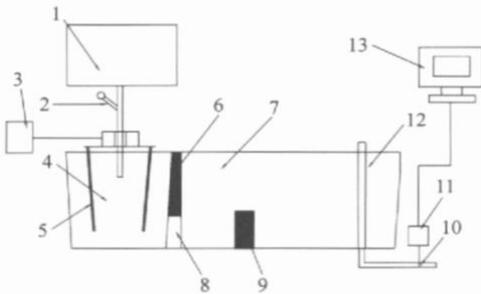
1 实验原理和方案

1.1 实验原理

水模拟研究的依据是相似原理^[12],即模型与原型中液体流动几何相似和动力相似. 对于动力相似,要求模型与原型中的流体的雷诺准数 Re 和弗劳德准数 Fr 分别相等;相似原理认为,当模拟系统进入第二自模化区域,处于自模化状态,即该系统的流动状态和流速与雷诺数无关. 经计算,本实验的原型与模型流体的雷诺数均已进入第 2 自模化区域,因此只考虑保证模型与原型的弗劳德数相等,即可达到动力相似. 为了模拟更为真实和准确,根据实验条件,选择模型与原型的相似关系如下.

尺寸比:

$$L_m/L_p = \lambda = 0.5.$$



1—钢包; 2—加示踪剂柱塞; 3—电动机; 4—旋转室; 5—搅拌桨; 6—挡墙; 7—分配室; 8—出口; 9—挡坝;
10—电导探头; 11—电导仪; 12—塞棒; 13—计算机处理终端

图 1 水模拟实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental devices of a water model

1.3 实验方法

采用“刺激—响应”技术,使用饱和 KCl 溶液为示踪剂. 当中间包液面达到规定值,且流速稳定后,在钢包长水口处迅速加入示踪剂,在示踪剂加入瞬间开始计时,并连续监测和记录(采样间隔:0.2s)中间包水口处流体的电导率变化,得出流体浓度随时间变化的分布曲线(RTD 曲线). 根据 RTD 曲线,得出从长水口注流加入示踪剂开始到流出中间包水口时的最小停留时间(响应时间) t_{\min} 和示踪剂浓度 c 达到最大时的峰值间 t_{peak} ,并以此计算出各微团

速度比:

$$V_m/V_p = \lambda^{0.5} = 0.707.$$

流量比:

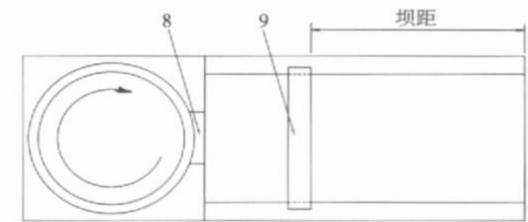
$$Q_m/Q_p = \lambda^{2.5} = 0.177.$$

式中, λ 为几何相似比; L_m 为模型几何尺寸, m; L_p 为原型几何尺寸, m; V_m 为模型流体流速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; V_p 为原型流体流速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; Q_m 为模型流体流量, $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$; Q_p 为原型流体流量, $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$.

根据上述比例关系,就可以由模型实验结果推断出实际生产条件下中间包的传输特性.

1.2 实验装置

针对国内某厂 18 t 中间包,用有机玻璃按照 1:2 的比例制作中间包模型;旋转室的流流由插入圆形腔中带流线型挡板的有机玻璃圆桶旋转产生,用来模拟旋转磁场驱动钢液旋转;旋转电机采用变频装置无极调速,转速可在 $0 \sim 60 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 之间任意设定. 在大包长水口靠近大包底部处设置示踪剂加入口,在中间包出水口处设置电导电极,通过信号转换,信号输入计算机可以实时记录水中盐水浓度变化情况,最小的采样时间间隔为 100 ms. 实验装置如图 1 所示.



在中间包内的实际平均停留时间 t_a ^[13]. 计算式如下:

$$t_a = \frac{\int_0^{\infty} tc(t)dt}{\int_0^{\infty} c(t)dt} = \frac{\sum tc(t)\Delta t}{\sum c(t)\Delta t} \quad (1)$$

式中, t 为停留时间, $c(t)$ 为 t 时间内的示踪剂的浓度.

中间包内流体体积可分为分散活塞区体积、滞流区体积和完全混合流体积. 其中,滞流区体积分数 V_d 由下式计算:

$$V_d = 1 - \theta_{av} \quad (2)$$

活塞区体积分数 V_p 由下式计算:

$$V_p = \frac{\theta_{\min} + \theta_{\text{peak}}}{2} \quad (3)$$

混合流体积分数 V_d 由下式计算:

$$V_d = 1 - V_p - V_a \quad (4)$$

式中, θ_{\min} 为量纲 1 的最小停留时间; θ_{peak} 为峰值浓度时量纲 1 的时间; θ_{av} 为量纲 1 的平均停留时间.

量纲 1 的最小停留时间、峰值浓度时量纲 1 的时间和从活塞流区和完全混合流区流出流体的量纲 1 的平均停留时间用下面公式计算:

$$\theta_{\text{peak}} = t_{\text{peak}} / t_s \quad (5)$$

$$\theta_{\min} = t_{\min} / t_s \quad (6)$$

$$\theta_{av} = t_a / t_s \quad (7)$$

式中, t_s 为理论平均停留时间, $t_s = V / Q_m$; V 为中间包体积; Q_m 为中间包流量.

实验过程中, 通过改变中间包内挡坝位置、液面

深度、大包流速以及出口的位置、大小等措施, 测定不同圆形腔钢液转速下中间包 RTD 曲线, 然后计算得出活塞区、滞留区、混合区体积分数以及实际平均停留时间、最小停留时间、峰值时间等流体流动特性参数, 同时通过加入甲基兰示踪剂, 直观观察流动情况, 最终确定离心中间包的腔内结构以及操作参数的最佳值.

1.4 实验方案

实验模拟的电磁净化中间包的流场湍动程度比传统中间包更剧烈, 流动形式更复杂, 因此该中间包的结构和操作参数都需要重新确定. 圆形腔中钢液旋转后, 钢液从旋转室到分配室的初速度较大, 如果没有坝的阻挡, 极易形成短路流, 同时停留时间也会大大缩短. 因此, 实验直接从有坝中间包入手, 设计了挡坝位置变化、液位深度变化、流速变化以及出口宽度变化等八种方案, 测定了 60 组数据. 实验方案如表 1.

表 1 实验方案

Table 1 Experimental schemes

编号	挡坝距水口侧包壁距离/mm	开口宽度	开口位置	流量/(L·h ⁻¹)	液位深度/mm
1	490	128 mm × 128 mm	正中	1700	380
2	590	128 mm × 128 mm	正中	1700	380
3	690	128 mm × 128 mm	正中	1700	380
4	590	128 mm × 208 mm	正中	1700	380
5	590	128 mm × 128 mm	正中	1500	380
6	590	128 mm × 128 mm	正中	1900	380
7	590	128 mm × 128 mm	正中	1700	300
8	590	128 mm × 128 mm	正中	1700	430

2 实验结果与分析

Ahula 和 Sahai^[14] 认为, 在长期的水模拟实验中, 为了保证在中间包中钢液与杂质的分离效果最好, 应尽量延长流体的平均停留时间, 且使滞留区尽可能小, 活塞流与滞留区比例值尽可能大, 混流区尽可能大, 还要具有一定指向液面的流动, 要保证钢液液面保持平静. 本文采用上述标准对电磁净化中间包的流动特性优劣进行判断.

2.1 不同坝距的流动特性分析

由图 2 可以看到, 坝在不同位置所得到的流动特性也不同. 通过比较可知, 坝的三个位置中, 距中包水口侧包壁距离为 590 mm 的位置在整体上活塞区体积分数最高, 而滞留区体积分数最低, 而且在 10~20 r·min⁻¹ 较低转速下滞留区几乎为零. 虽然

690 mm 的位置在较高转速下混流区比较大, 但它的活塞流区最小, 同时滞留区也是三方案中最大的. 从图中可以看出在低转速下 590 mm 坝距的平均停留时间较大, 因此距水口侧包壁距离为 590 mm 的坝距比较合适.

2.2 不同出口大小的流动特性分析

大包钢液注流必须从圆形腔底部出口进入矩形腔, 而圆形腔底部出口的大小对该处的流速影响较大. 实验考察了不同出口宽度对中间包 RTD 曲线的影响, 影响规律如图 3 所示. 由图 3 可知, 出口宽度较小时, 特别是在较低转速下, 可以获得更高的活塞流区, 同时可以获得更小的滞留区, 活塞流区和滞留区的比值较大. 因此, 相对而言, 较小的出口更有利于钢液中夹杂物去除.

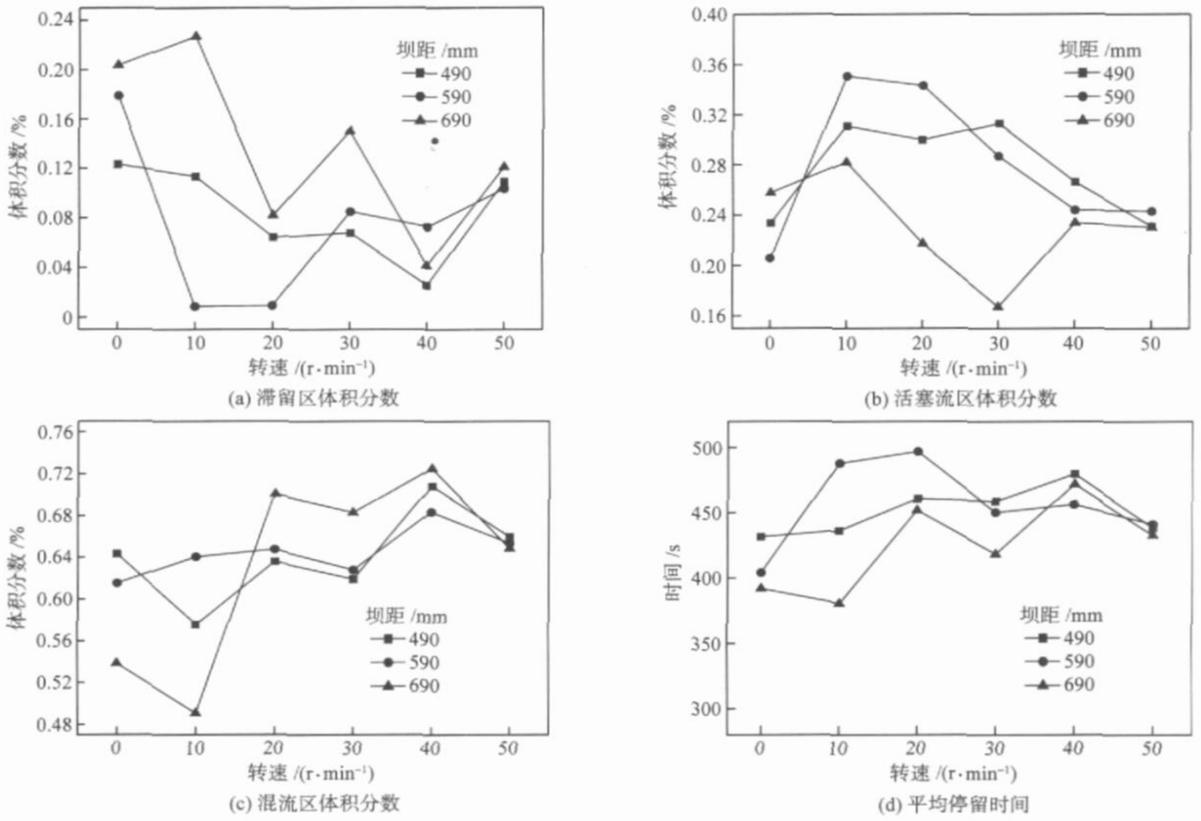


图2 坝距对中间包流动特性的影响

Fig.2 Effect of dam space on the flow characteristics of a tundish

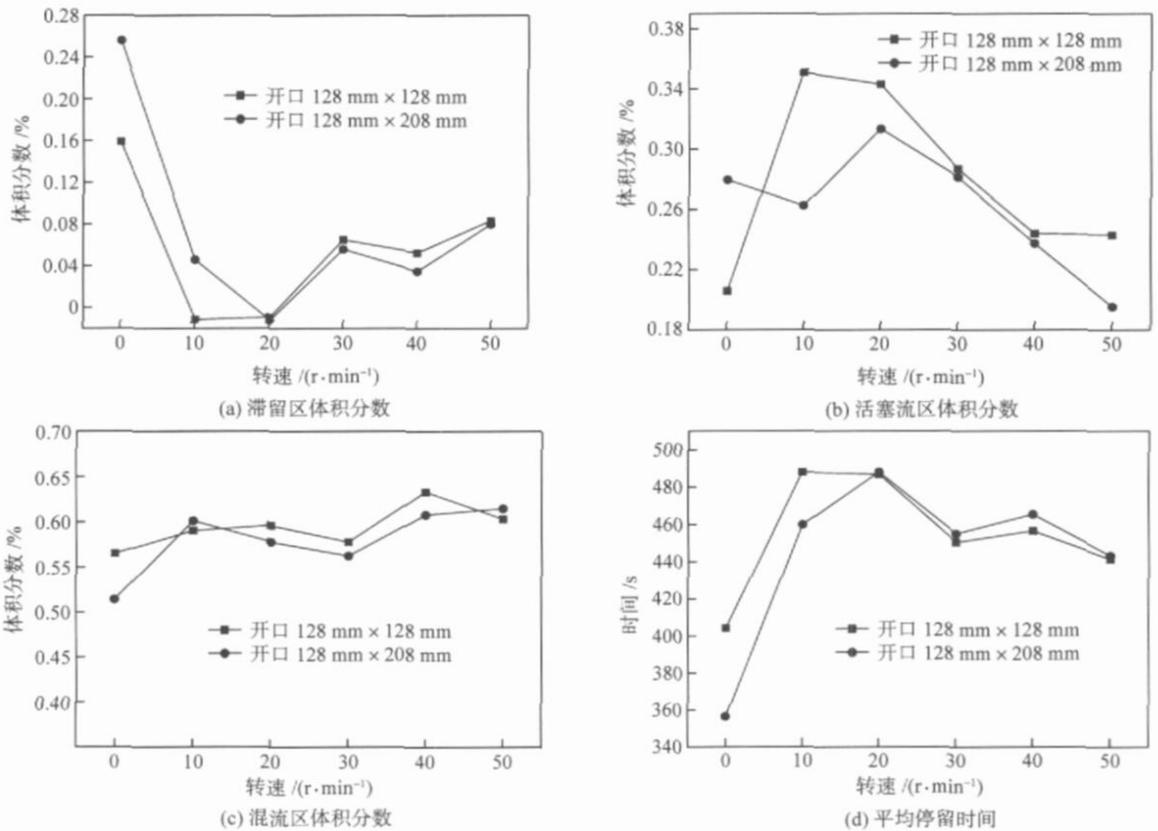


图3 开口宽度对中间包流动特性的影响

Fig.3 Effect of opening width on the flow characteristics of a tundish

2.3 不同流量下的流动特性分析

由图 4 可知,随着流量的增加,有旋转时钢液在中间包中的平均停留时间逐渐减小,但较低的流量会使钢包的浇铸时间延长,导致工作效率的降低^[15](本处流量的确定来自于钢厂的实际生产数据)。从图 4 还可以看出,在较低转速下,流量为 1 700 L·

h^{-1} 的活塞流区比例最大,滞留区的比例最小,活塞流区和滞留区的比值是最大的,混流区比例与 1 900 L· h^{-1} 下的基本相同,都比流量为 1 500 L· h^{-1} 时大。因此对现有容量的中间包而言,1 700 L· h^{-1} 的流量下流动状况最为理想。

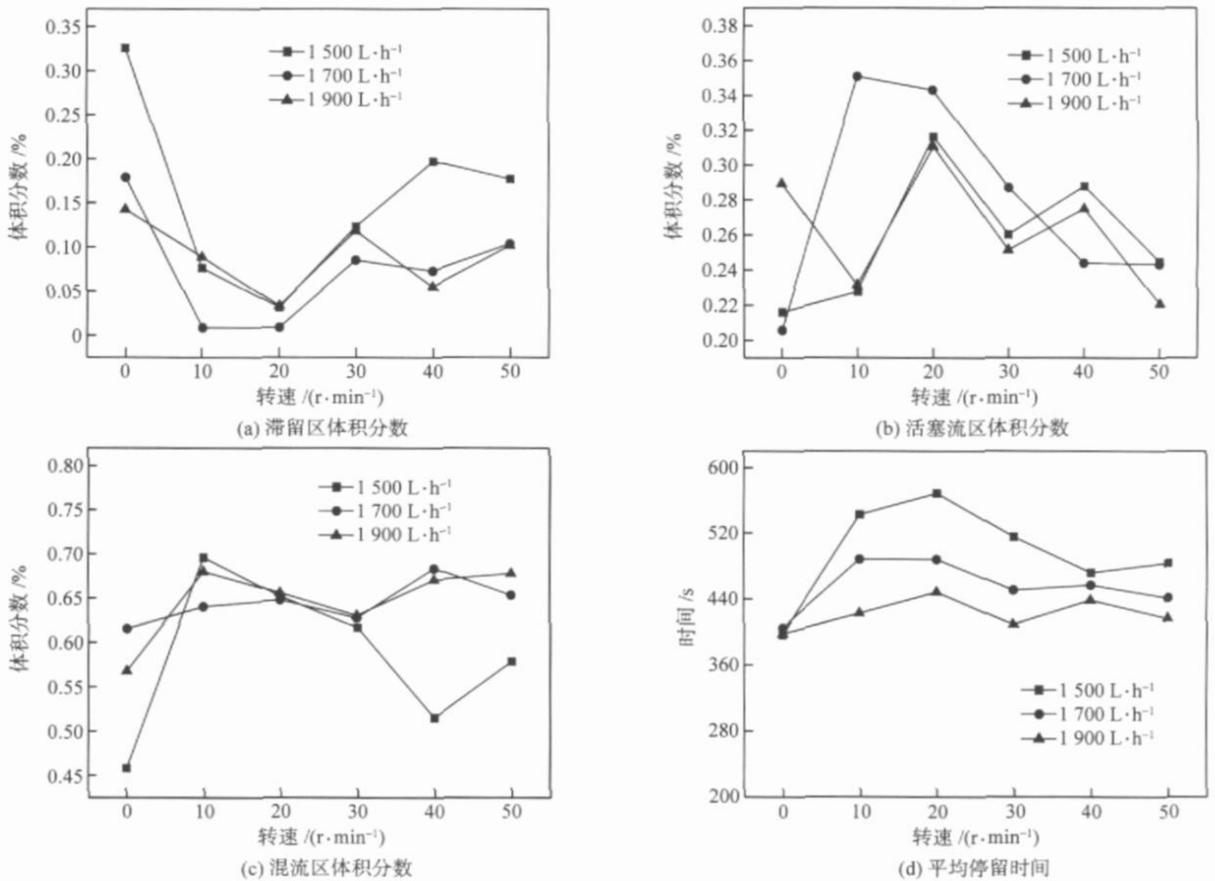


图 4 流量对中间包流动特性的影响

Fig. 4 Effect of flow rate on the flow characteristics of a tundish

2.4 不同液位深度的流动特性分析

由图 5 可知,平均停留时间随着液位深度的增加而增大,430 mm 液位下的平均停留时间最长,高液位下的滞留区整体上明显比其他两种较低液位大,而混流区最小,因此不是最佳液位深度。在 300 mm 的低液位下,虽然混流区比例相对较大,但平均停留时间以及活塞区比例都是最小的,流动特性不是很理想。在 380 mm 的液位下,较低转速下滞留区最小,活塞流区较大,活塞流区与滞留区的比值相对较大,同时混流区以及平均停留时间都比低液位下大,依据判断标准,380 mm 的液位流动特性较好。因此对于本中间包,380 mm 的液位是相对理想的液位深度。

综上所述,在流量为 1 700 L· h^{-1} 、380 mm 液位

深度下,坝距水口侧包壁距离为 590 mm、开口在中间位置且为 128 mm×128 mm 时,平均停留时间较大,滞留区比例相对较小,同时活塞区和混流区比例较大。

2.5 电磁净化中间包及常规中间包中流动形态观察

为进一步了解电磁净化中间包对传输行为的影响机理,采用甲基兰示踪剂,对中间包中不同位置处的流场进行了观察,结果如图 6 所示。为便于对比,本实验中分别进行了圆形腔无旋转和转速为 40 r·min⁻¹时的流场形貌观察。由图 6 可以看出,在圆形腔中,当无旋转时,大包水口注流直接冲击到包底(图 6(a)),然后产生向上的回流,部分直接进入圆形腔出口,进入矩形腔;当施加旋转时,大包水口注

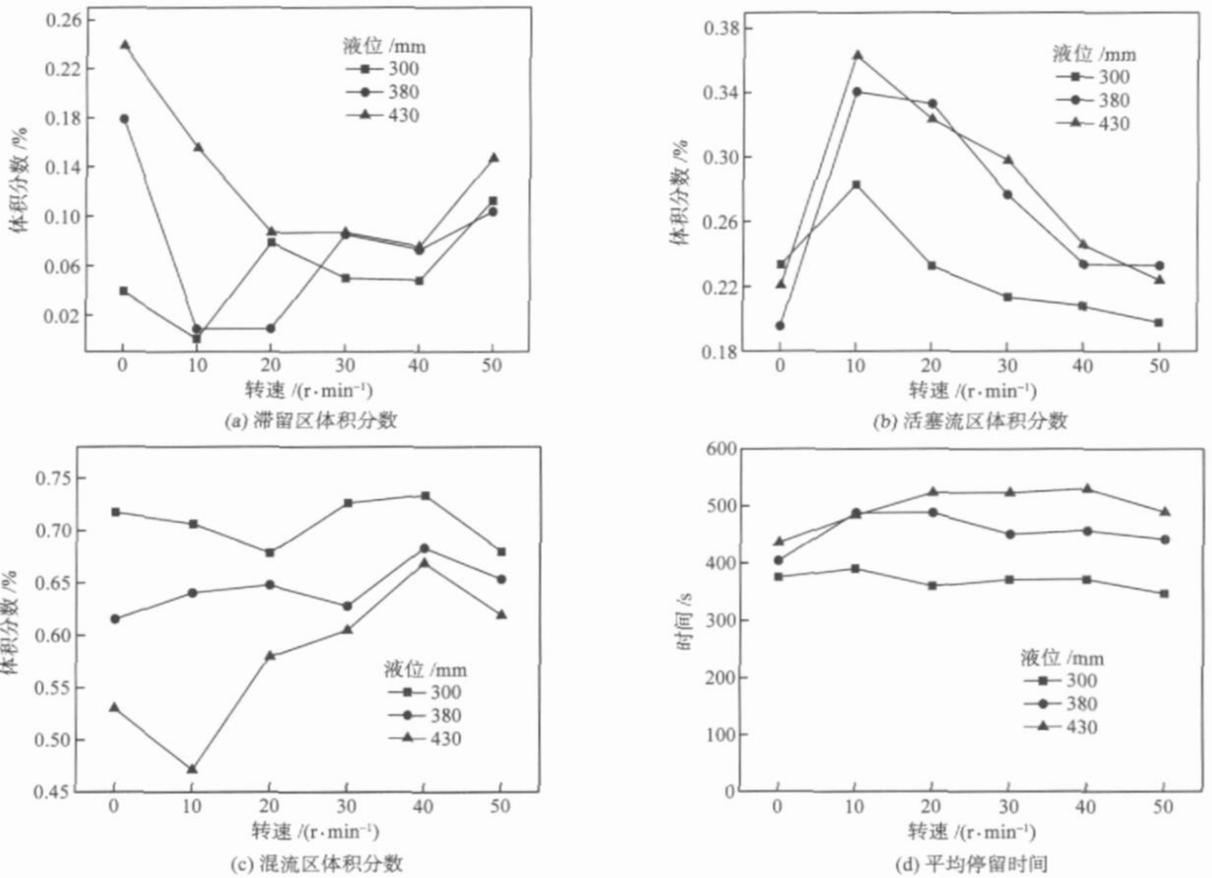


图 5 液位对中间包流动特性的影响

Fig. 5 Effect of liquid level on the flow characteristics of a tundish

流在旋转力下,产生水平旋转(图 6(b)),沿圆形腔中作水平旋流往下,旋转若干圈以后进入圆形腔水口,再进入矩形腔,显然这将有助于延长钢液的平均停留时间.在圆形腔出口,当无旋转中时,圆形腔出口水流垂直于挡坝表面(图 6(c));而旋转时,圆形腔出口水流沿圆形腔的斜线进入矩形腔,与挡坝表面成锐角(图 6(d)).由于圆形腔出口水流出现偏转,导致坝后上方的水流也产生偏流,此时在坝后上方形成水平环流,且由于流动的惯性,在坝后下方也形成相似的环流,导致坝后的滞留区内仍然存在一定的流动,这可以从图 6(h)观察出来,而无旋转时坝后的染料长时间无法散开(图 6(g)),说明此处确实为滞留区;此外,从图 6(i)和(j)也可看出,圆形腔中无旋转时,坝后出现明显的无染料区,而圆形腔中施加旋转后,坝后方全部被染蓝,说明确实存在流动将染料带至坝后方,圆形腔中旋转流动的产生对降低矩形腔中的滞留区非常有效.这些都表明,此种方案有利于钢液中夹杂物的去除.根据上述流场结构推断出的整个中间包中的流场形态如图 7 所示.

电磁净化中间包与传统中间包最大的不同在于

加了一个旋转场,注流从出口出来时有一个较大的初速度,同时方向也是偏向一侧,旋转速度越高,偏转也越厉害.因此,旋转磁场的转速对流场特性影响也很大.从上述各方案的实验结果可知,随着转速的增加,响应时间逐渐减小.这是因为转速的增加,使出口处的注流初速度增加,可以更快地到达出水口,响应时间也就相应减小.相对于零转速下的情况,旋转运动的施加,增加了活塞区的体积,降低了滞留区的体积分数,因此对提高钢液中夹杂物去除效率更为有利;但旋转速度并不是越高越好,存在一个最佳值.根据实验结果,在 $10 \sim 30 \text{ rad} \cdot \text{min}^{-1}$ 的范围内,活塞区比例大,滞留区很小,某些情况甚至接近于零,效果非常好;但当转速增大到一定值后,高流速的注流经过坝的阻挡向上的冲击力过大,会冲开液面,导致液面不是很平稳,同时回流的速度减小,滞留区的体积增大.在实际冶炼过程中,高转速会导致钢液冲开保护渣,使钢液二次氧化,因此转速也不宜过高.从 RTD 曲线上可以看出,旋转运动的施加,降低了击穿流比例,增加了活塞区比例,对钢液在中包中的温度均匀分布也更加有利.平均停留

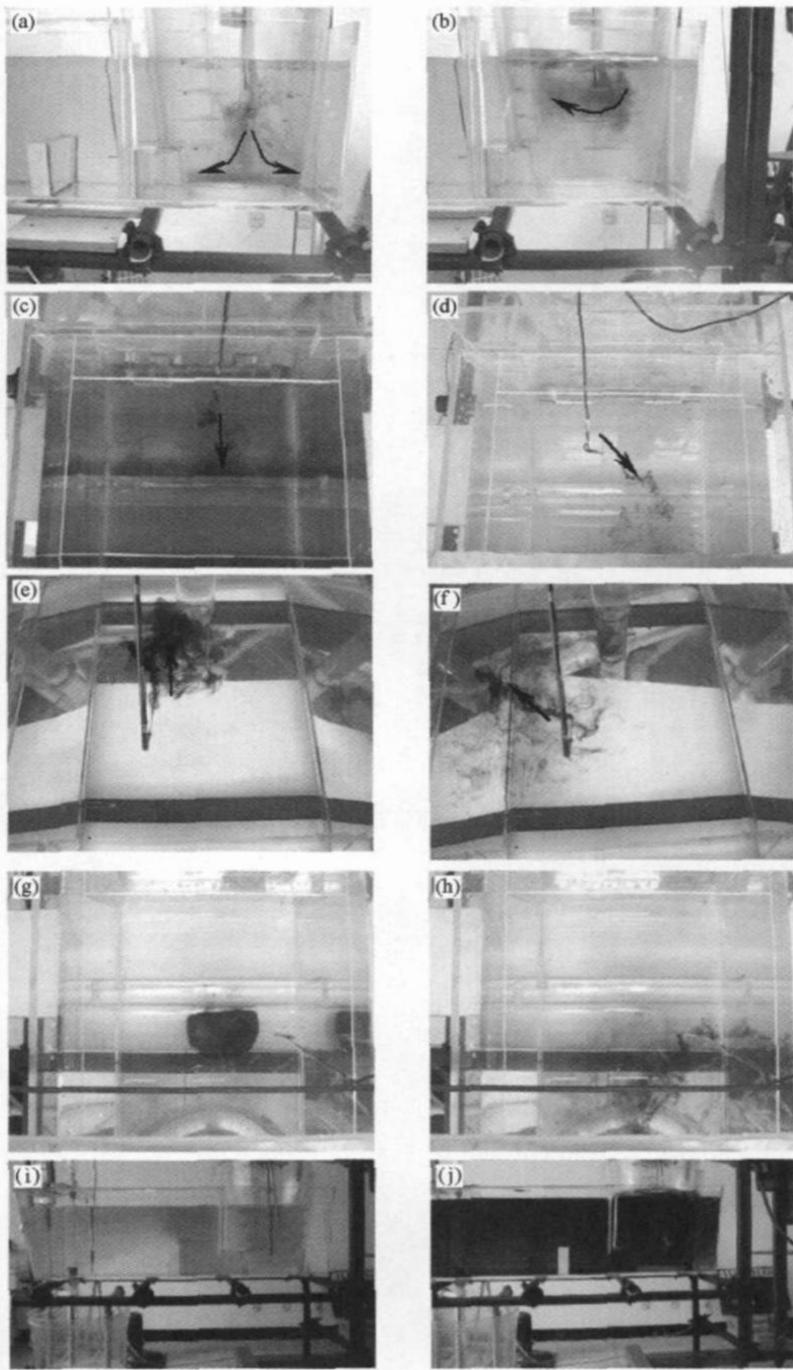


图 6 电磁净化中间包水模拟流场形态: (a), (c), (e), (g), (i) 无旋转; (b), (d), (f), (h), (j) 旋转速度 $40\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$; (a), (b) 圆形腔(示踪剂在大包水口出口处); (c), (d) 示踪剂加在圆形腔出口处; (e), (f) 示踪剂在矩形腔上方(挡坝后上方); (g), (h) 示踪剂在挡坝后方(近包底); (i), (j) 中间包示踪剂侧面形貌(示踪剂加在圆形腔大包水口出口处)

Fig. 6 Flow patterns in a tundish of water modeling: (a), (c), (e), (g), (i) without rotation; (b), (d), (f), (h), (j) with $40\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$; (a), (b) cylindrical chamber; (c), (d) exit of the cylindrical chamber; (e), (f) behind the dam and near the liquid surface; (g), (h) behind the dam and near the bottom; (i), (j) flanks of the water model

时间是影响夹杂物去除的一个重要因素。由以上几幅图片的数据分析可以看到,在有转速的情况下,中间包的平均停留时间远大于零转速下的平均停留时间。虽然旋转运动的施加,使注流在中间包中的运动速度增加,但同时也使注流的运动路线不再像无

转速下的那样笔直,而是在中间包中有一个大的回流(见图 7),使注流的运动路程增加,从而使注流的平均停留时间增加。当转速过大时,即使注流的运动路程增加,但因为流速很大,平均停留时间也会降低,因此旋转速度不宜过高。

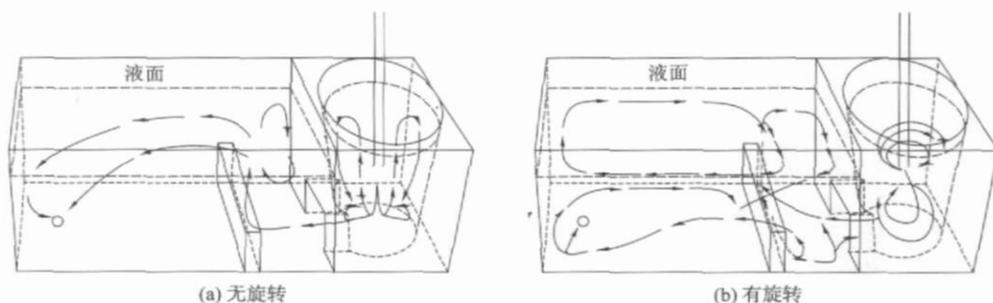


图 7 采用流场示踪方法确定的中间包注流在有无转速下的流动示意图

Fig.7 Schematics of flow pattern in a tundish with and without rotation

3 结论

(1) 旋转磁场在中间包上的应用,增加了活塞区的体积,降低了滞留区的体积分数,因此对提高钢液中夹杂物去除效率更为有利.

(2) 在本文条件下,当流量为 $1700 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 、液位为 380 mm 、坝距水口侧包壁距离为 590 mm 、开口在中间位置且为 $128 \text{ mm} \times 128 \text{ mm}$ 时中间包的滞留区最小,活塞区最大,平均停留时间较长,最有利于钢液中夹杂物的上浮去除.

(3) 电磁净化中间包中,钢液旋转速度不宜过高,否则会导致液面的波动以及滞留区的增加,因此旋转速度存在一个最佳值;此外,旋转运动的施加,降低了击穿流比例,增加了混流区比例,对钢液在中包中的温度均匀分布也更加有利.

参 考 文 献

- [1] Zhang S R. The tendency of world steel industry in the first 2 decades of 21st century and the challenges facing Chinese steel industry // *Proceedings of CSM2007 Annual Meeting*. Beijing, 2007; 107
(张寿荣, 21 世纪前期钢铁工业的发展趋势及我国面临的挑战 // 2007 中国钢铁年会论文集. 北京, 2007; 107)
- [2] Liu Z Z, Cai K K. Purity steel production technology. *Iron Steel*, 2000, 35(2); 64
(刘中柱, 蔡开科. 纯净钢生产技术. 钢铁, 2000, 35(2); 64)
- [3] Qu Y, Liu J. *Introduction of Metallurgical Reaction Engineering*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1988
(曲英, 刘今. 冶金反应工程学导论. 北京: 冶金工业出版社, 1988)
- [4] Gao Y M, Ni H W. Advanced tundish techniques for improving steel cleanliness. *Steelmaking*, 2000, 35(4); 55
(高运明, 倪红卫. 改善钢水洁净度的中间包新技术. 炼钢, 2000, 35(4); 55)
- [5] Liu L, Zeng J Q. Development of clean steel and its production process. *Steelmaking*, 2000, 35(3); 68
(刘浏, 曾加庆. 纯净钢及其生产工艺的发展. 钢铁, 2000, 35(3); 68)
- [6] Li Z B. New progress of super clean steel. *J Mater Metall*, 2002, 1(3); 161
(李正邦. 超洁净钢的新进展. 材料与冶金学报. 2002, 1(3); 161)
- [7] Xiao Y L. Cleaning molten steel with the centrifugal flow tundish. *Wide Heavy Plate*, 2001, 7(4); 39
(肖英龙. 利用离心式中间包提高钢液纯净度. 宽厚板, 2001, 7(4); 39)
- [8] Miki Y, Shibata H, Bessho N, et al. Cleaning molten steel with the centrifugal flow tundish. *Tetsu-to-Hagane*, 2000, 86(4); 37
- [9] Miki Y, Kitaoka H, Sakuraya T, et al. Mechanism for separating inclusions from molten steel stirred with a rotating electro-magnetic field. *ISIJ Int*, 1992, 32(1); 142
- [10] Zhong Y B. Physical simulation of purifying the molten steel by centrifugal flow tundish. *Shanghai Met*, 2006, 28(1); 14
(钟云波. 离心中间包净化钢液的物理模拟. 上海金属. 2006, 28(1); 14)
- [11] Qu Y. *Principle of Steelmaking*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1980; 135
(曲英. 炼钢学原理. 北京: 冶金工业出版社, 1980; 135)
- [12] Wang J J. *Metallurgy in Tundish for Continuous Casting*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2001; 45
(王建军. 中间包冶金学. 北京: 冶金工业出版社, 2001; 45)
- [13] Mazumdar D, Guthrie R I L. Physical and mathematical modelling of continuous casting tundish systems. *ISIJ Int*, 1999, 39(6); 524
- [14] Sahai Y, Ahuja R. Fluid flow and mixing of melt in steelmaking tundishes. *Ironmaking Steelmaking*, 1986, 13; 241
- [15] Wang L T, Li Z B, Xue Z L, et al. Flow control technology and flow feature of liquid steel in tundish for concasting. *Spec Steel*, 2004, 25(2); 32
(王立涛, 李正邦, 薛正良, 等. 连铸中间包内钢液流动特性及控流技术. 特殊钢, 2004, 25(2); 32)