

· 试验研究 ·

减轻冲刷的单流通道式感应加热中间包结构优化数学模拟

曾红波 艾新港 李胜利 刘海啸 宁哲 王春松

(辽宁科技大学材料与冶金学院,鞍山 114051)

摘要 以钢厂30 t中间包为原型,设计了一种减轻包壁冲刷的“鼓肚式”单流通道感应加热中间包。采用数值模拟方法研究了“鼓肚式”感应加热中间包的钢液流动行为,探究了前腔体积对钢液流动状态的影响。研究结果表明,“鼓肚”显著减轻了中间包后腔包壁的冲刷,该“鼓肚式”中间包其平均停留时间延长3.83%~6.44%,死区体积减小5.6%~5.93%。前腔体积为1.06 m³时,钢液平均停留时间最长。中间包水口流量分别为150 kg/min和200 kg/min时,平均停留时间最长分别为678 s和569 s;死区体积比例最小分别为5.87%和0.55%。

关键词 30 t单流通道“鼓肚式”中间包 感应加热 数值模拟 物理模拟

Mathematical Simulation on Structure Optimizing of Induction Heating Tundish with Single Flow to Reduce Scouring

Zeng Hongbo, Ai Xingang, Li Shengli, Liu Haixiao, Ning Zhe and Wang Chunsong

(School of Material and Metallurgy, Liaoning University of Science and Technology, Anshan 114051)

Abstract Based on the prototype of 30 t tundish in a steelworks a “belly” induction heating tundish with single channel to reduce the erosion of the wall of tundish has been designed. The flow behavior of liquid steel of the “belly” induction heating tundish is studied by numerical simulation method, and the influence of the volume of the front cavity on the flow state of liquid steel is investigated. The results show that “belly” can significantly reduce the erosion of the wall of tundish posterior cavity, the average residence time of the “belly” tundish is prolonged by 3.83%~6.44%, and the dead zone volume decreases by 5.6%~5.93%; as the front cavity volume is 1.06 m³, the average residence time of liquid steel is the longest; as the nozzle flow of tundish is 150 kg/min and 200 kg/min, the longest average residence time is 678 s and 569 s respectively and the minimum proportion of dead zone volume is 5.87% and 0.55% respectively.

Material Index 30 t Single Flow Channel “Belly” Type Tundish, Induction Heating, Mathematical Simulation, Physical Simulation

在连铸生产过程中,中间包内存在各种热损失,例如钢液与中间包内衬的热交换等。因此,如何对中间包钢液热损进行补偿,实现低过热度的恒温浇注是一个重点研究内容^[1]。目前,通道式电磁感应加热中间包技术是研究较多^[2-4]、应用较广的连铸中间包加热技术。这种通道式感应加热技术的优点是充分利用了电磁场的热效应,使从通道流出的钢液被加热并迅速上浮,进而对钢液温度进行补偿^[5]。但是存在的问题就是钢液经过通道注入分配室,对后腔包壁的冲刷较为严重。同时,钢液通过通道后温度上升,加剧对中间包壁的侵蚀性,影响中间包使用寿命。另外由于内部通道的存在,使得包内钢液的流动状态与传统的中间包有很大不同,中间包内钢液流动状态决定钢液是否能够高质量的稳定浇注^[6]。目前,通常采用控流装置来改变钢液的流动状态以期延长钢液在中间包内的停留时间,减小死

区体积,促进钢液的充分混合以及去除夹杂^[7-10]。

本试验以钢厂30 t单流通道式感应加热中间包为原型设计了一种新型“鼓肚式”感应加热中间包。

1 数学模拟

1.1 基本假设及控制方程

为了在模拟中对中间包内的钢液作出准确且速度相当的计算结果,对模型中间包内钢液作如下假设:中间包内的钢液流动为稳态粘性不可压缩流动;中间包内钢液按均项介质处理;忽略表面渣层和液面波动的影响;整个过程为一恒温过程,不考虑温度对密度的影响,即 ρ 为常数。

钢液在中间包内的流动是一个复杂的湍流流动过程,描述钢液在中间包内流动行为的方程有连续性方程、动量方程($N-S$ 方程)、标准 $k-\varepsilon$ 双方程以及示踪剂扩散方程。其中标准 $k-\varepsilon$ 双方程模型由湍流动能 k 方程及湍流动能耗散率 ε 方程组成^[11]。在

得到稳定的流场后,启用瞬态求解器,在中间包入口瞬态加入示踪剂,求解示踪剂对流扩散方程,在出口处监视示踪剂的浓度变化情况得到 RTD 曲线。

1.2 边界条件及参数设置

中间包流场计算模型边界条件设置如下:

(1)入口与出口。中间包入口处采用速度入口边界条件,入口速度垂直向下,速度大小为 0.569 m/s、0.71 m/s。入口湍动能 k 和湍动能耗散率 ϵ 按照混合长度模型来进行计算,关系式如式(1):

$$k_m = 1.5(iU_m)^2, \epsilon_m = \frac{k_m^{1.5}}{0.3D} \quad (1)$$

式中: U_i - 钢液入口的平均速度;
 i - 湍动能强度,取 $i = 0.037$; D - 入口直径, $D = 80$ mm。

中间包出口处采用压力出口边界条件,相对静压力为零(参考压力为 101.325 kPa)。

(2)自由面。忽略中间包液面渣层的影响,自由液面与气相直接接触,表面切应力很小,可以忽略不计,变量梯度为零。

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\partial k}{\partial z} = \frac{\partial \epsilon}{\partial z} = w = 0 \quad (2)$$

(3)近壁区。壁面采用无滑移边界条件,壁面附近流场采用标准的壁面函数进行处理。

$$u = v = w = k = \epsilon = 0 \quad (3)$$

中间包示踪剂传输行为计算中,除上述计算稳态流体的边界条件外,添加以下边界条件: $t \leq 0.2$ s 时,示踪剂的浓度为 1,表示入口处示踪剂为 100%; $t > 0.2$ s 时,示踪剂的浓度为 0,表示入口处钢液为 100%;在所有固体表面上,各个组分的质量传输为零。具体流场数值模拟参数设置见表 1。

1.3 模型建立

本试验以钢厂单流通道式感应加热中间包为原型,通过 Gambit 软件建立几何模型并对其进行网格划分如图 1 所示。

1.4 模拟方案

针对设计的“鼓肚”式通道感应加热中间包,通过加挡板来缩小其前腔体积。每层挡板厚度为 30 mm,分别添加 0 层、1 层、2 层、3 层、4 层挡板,方案编号为 1、2、3、4、5,每种方案中间包前腔体积分别为 1.06、1.03、1.0、0.97、0.94 m³。原型中间包以及“肚鼓”

表 1 数值模拟参数设置

Table 1 Parameter settings of numerical simulation

项目	参数	数值
钢液物性	密度/(kg·m ⁻³)	7026.8
	层流粘度/[kg·(m·s) ⁻¹]	0.005 3
	热膨胀系数/K	1.197 × 10 ⁻⁴
入口边界	入水口内径/mm	80
	入水口速度/(m·s ⁻¹)	0.569
	湍动能	$k_{in} = 0.01 v_{in}^2$
	湍动能耗	$\epsilon_{in} = 2k_{in}^{3/2}/D$
出口边界	出水口内径/mm	60

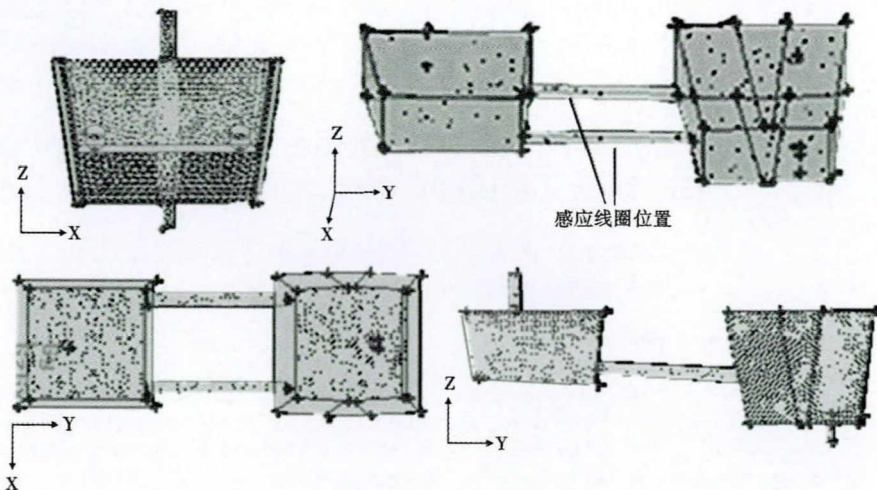


图 1 网格划分示意图

Fig. 1 Schematic diagram of mesh division

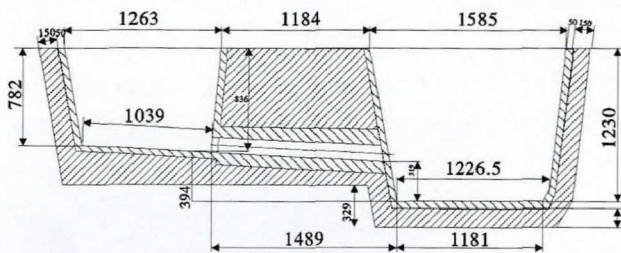


图 2 中间包主视图尺寸

Fig. 2 Main view dimension of tundish

式通道感应加热中间包主视图尺寸如图 2 所示,图 3(a,b)分别为原型中间包与“鼓肚”式中间包俯视图尺寸,挡板模型示意图如图 4(a)所示,挡板位置示意图如图 4(b)所示。

2 原型中间包结构优化模拟分析

原型单流通道式感应加热中间包内钢液经由通道进入中间包后腔时,会对后腔包壁产生冲刷。为减轻对后腔包壁的冲刷,本试验设计一种“鼓肚式”感应加热中间包,并对其钢液的流动行为进行模拟

研究。图5(a)为通道式感应加热中间包和“鼓肚式”中间包平均停留时间,图5(b)和图5(c)为两种流量下,通道式感应加热中间包和“鼓肚式”中间包各区体积比例。

由图5(a)可以看出,同一水口流量下,“鼓肚式”感应加热中间包的平均停留时间要比原型通道式感应加热中间包的平均停留时间延长。中间包水口流量为150 kg/min时,原型中间包和“鼓肚式”感应加热中间包平均停留时间依次为637 s、678 s,平均停留时间延长41 s。中间包水口流量为200 kg/min时,两种中间包平均停留时间依次为548 s、569 s,平均停留时间延长21 s。停留时间越长,钢液混合更均匀,有利于夹杂物的上浮。

由图5(b)和图5(c)可以看出,对比原型中间包,“鼓肚式”感应加热中间包的死区比例更小,活塞区比例更大。中间包水口流量为150 kg/min时,原型中间包和“鼓肚式”感应加热中间包死区比例依次为11.47%、5.87%,死区比例降低5.60%。活塞区比例依次为45.35%、51.92%,活塞区体积增大6.57%。中间包水口流量为200 kg/min时,两种不同结构中间包死区比例依次为6.48%、0.55%,死区比例降低5.93%。活塞区比例依次为48.76%、56.91%,活塞区比例增加8.15%。

图6(a)和图6(b)分别为通道式感应加热中间包和“鼓肚式”中间包各截面速度矢量图,从图6(a)中可以看出,由钢包长水口注入的钢液首先到达中间包底部,然后沿包底向四周散开。在中间包注入流和前腔前后壁之间各形成一个回流区,遇到前腔侧壁后,小部分钢液沿侧壁向中间包钢液面处运动,绝大部分钢液直接流入通道,在通道内,钢液流动速度达到了最大值,钢液经通道进入中间包后

腔时,可以很清楚地看到,从通道流出的钢液以较大的速度直接冲向对面的中间包包壁,接触到包壁后沿着包壁向四周扩散开来,沿着包壁形成上下两股反流。沿着中间包包壁向下扩散的钢液会沿着包壁流向中间包水口,然而沿着中间包包壁向上扩散的钢液会有一个回流,先到达中间包液面,再流向中间包水口。从图6(b)中可以看出,注入中间包前腔的钢液到达中间包底部后,沿包底向四周散开,除了在注入流和前腔前后壁之间形成回流区外,在注入流

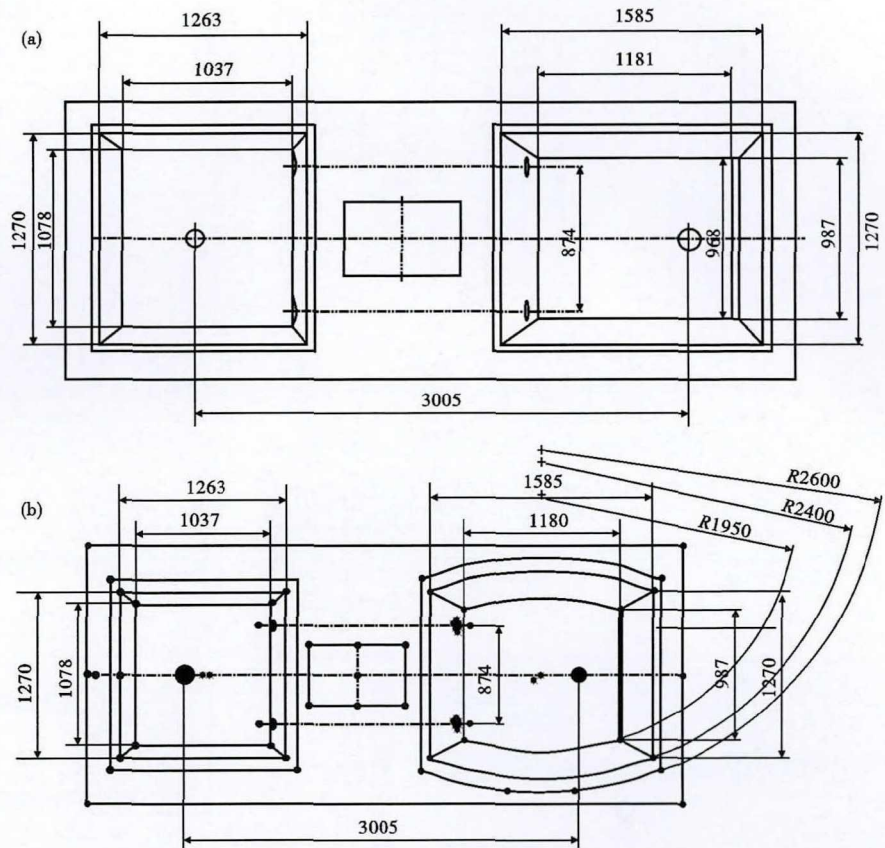


图3 原型(a)“鼓肚”式(b)中间包俯视图
Fig.3 Top view dimension of prototype (a) “Belly drum” type (b) tundish

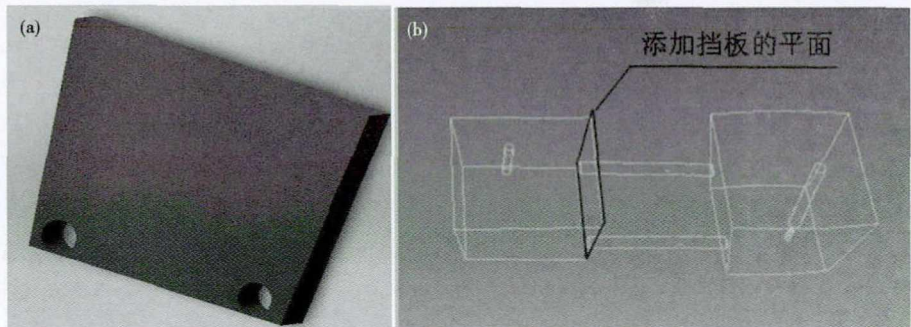


图4 挡板模型(a)和挡板位置(b)示意图
Fig.4 Schematic diagram of model plate (a) and plate position (b)

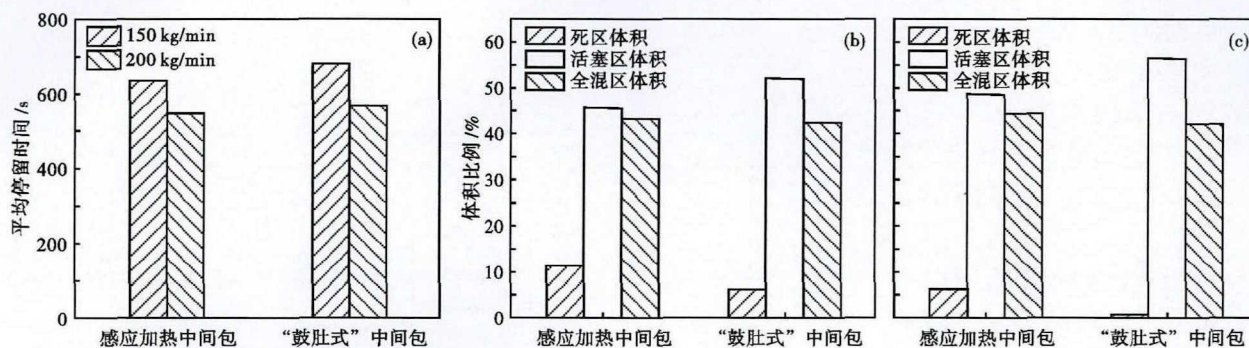


图 5 原型中间包和“鼓肚式”中间包平均停留时间(a);150 kg/min流量(b)和200 kg/min流量(c)各区体积比例

Fig. 5 Average residence time (a); each zone volum with flow rate of 150 kg/min (b) and 200 kg/min (c) in prototype tundish and “belly” tundish

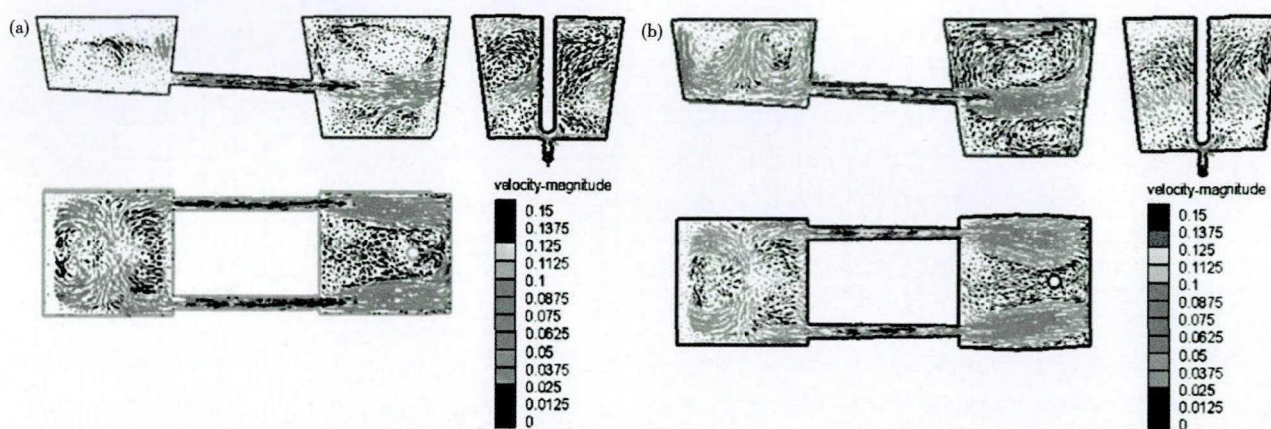


图 6 原型中间包(a)和“鼓肚式”中间包(b)速度矢量图

Fig. 6 Velocity vector diagram of prototype tundish (a) and “belly” tundish (b)

和前腔侧壁之间各形成一个回流区,钢液碰到前腔侧壁后,除小部分钢液直接进入通道外,大部分钢液沿侧壁向钢液面处运动,然后在注流的卷吸作用下,流向通道内,在通道内,钢液流速达到最大,从通道内流入中间包后腔后,可以观察到钢液的速度明显在降低,冲击到后腔包壁处的钢液速度明显要比图 6(a)中的小很多,遇到后腔包壁后,形成的回流区较图 6(a)中的明显,结合 RTD 曲线处理数据,对比两图可以看出,“鼓肚式”中间包死区体积较通道式感应加热中间包的小,而平均停留时间较通道式感应加热中间包的更长。

3 “鼓肚式”中间包前腔体积优化模拟分析

从表 2 中可以看出,两种中间包水流量下,前腔体积越大,钢液在中间包内的平均停留时间越长,死区体积越小。流量为 150 kg/min 时,平均停留时间最长为 678 s,死区体积比例最小为 5.87%,活塞区体积比例最大为 51.92%;流量为 200 kg/min 时,平均停留时间最长为 569 s,死区体积比例最小为

0.55%,活塞区体积比例最大为 56.92%。

由图 7(a)中可以看出,两种流量下,随着挡板数量的增加,即中间包前腔体积的缩小,钢液在中间包内的平均停留时间逐渐减小,挡板的加入不仅改变了中间包前腔的大小,使得钢液在中间包前腔内的流场发生改变,钢液进入通道内的速度也发生了改变,此外,挡板的加入也使得通道的长度加长了,钢液经通道进入中间包后腔的钢液流速也发生了改变,从而影响到了中间包后腔内钢液的流场。两种流量下,随着挡板数量的增加,即中间包前腔体积的缩小,“鼓肚式”感应加热中间包死区体积越来越大,这种实验现象说明,中间包内挡板的加入并不能使中间包内死区体积减少,反而会有相反的效果。死区体积越大,相当于中间包的有效容积被减少。死区部分的钢液由于流动性差,随着时间的推移,温度会变得越来越低,甚至会凝固,这样便会影响到下面钢液的正常浇注,降低了浇注的效率,在中间包冶金中,应尽量避免此现象的发生。因此,从死区体积角度分析,挡板的加入是不合理的,会影响到中间包

的冶金效果。由图7(b)中可以看出,两种流量下,随着挡板数量的增加,即中间包前腔体积的缩小,“鼓肚式”感应加热中间包活塞区体积越来越小,而活塞区体积越大越有利于夹杂物的上浮,钢液的质量就会越好。因此,从活塞区体积角度分析,挡板的加入也是不合理的,会影响到中间包的冶金效果。

从图8中可以看出,方案1(不加挡板)和方案2(加一层挡板)的中间包前腔内钢液冲入包底后会有一明显的回流过程,其他方案下就不是那么明显,流场变得不是那么有规律。钢液在进入中间包后腔后,方案1和方案2中,钢液在进入后腔以后会迅速向上形成一个回流,而在其他几个方案中,钢液的回流时间明显延长,甚至回流现象不是那么明显,而且钢液经通道进入后腔的速度越来越向中间包水口倾斜。由于钢液的回流,会使钢液在中间包内流过的路径变长,路径的加长使得钢液在中间包内的停留时间延长。结合RTD曲线处理数据对其进行分析,方案1下,钢液在中间包内的平均停留时间最长,从流场的角度进行分析,由于不加挡板回流的现象明显,会增强对钢液的搅拌效果,搅拌的效果越好,钢液混匀的效果越好,平均停留时间也越长。

结合RTD曲线处理数据可知,中间包死区体积随着挡板厚度的增加而增加。从图8对比中可以明显看出,中间包后腔的死区主要部分在两个通道之间的区域。在这里钢液的流动速度很慢,随着挡板数量的增加,两通道之间的部分死区体积也随着增加,死区体积的增加对中间包冶金是相当不利的。从这个角度分析,方案1的中间包死区体积最小,更有利于中间包冶金质量。

综上所述,方案1的“鼓肚式”感应加热中间包结构更为合理。即中间包前腔面积为 1.06 m^3 ,钢液在其内的平均停留时间最长,死区体积最小,活塞区体积最大。应用优化结构后的中间包进行现场生产试验,现场测试钢种为Q235,浇注温度 $1535\text{ }^\circ\text{C}$,

表2 150 kg/min 和 200 kg/min流量各方案钢液流动性
Table 2 Liquid steel fluidity in each scheme of 150 kg/min and 200 kg/min flow rate

水口流量/ ($\text{kg} \cdot \text{min}^{-1}$)	实验 方案	平均停留 时间 (t_{av})/s	响应 时间 (t_{min})/s	峰值 时间 (t_{max})/s	死区 体积 (V_{d})/%	活塞区 体积 (V_{p})/%	全混区 体积 (V_{m})/%
150	1	678	14	784	5.87	55.42	38.71
	2	672	13	728	6.67	52.47	40.86
	3	668	13	697	7.18	49.17	43.65
	4	660	12	666	8.40	47.08	44.52
	5	627	12	582	12.86	41.25	45.89
200	1	569	13	784	0.55	56.91	42.54
	2	557	12	728	2.58	54.29	43.13
	3	554	12	697	3.15	52.97	43.88
	4	544	11	666	4.83	51.93	43.24
	5	526	10	582	8.06	41.79	50.15

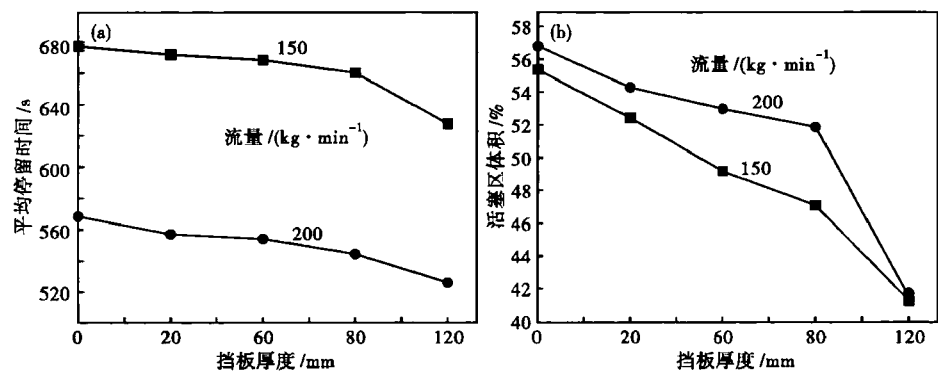


图7 “鼓肚式”中间包钢液平均停留时间(a)和活塞区体积(b)随挡板厚度的变化曲线
Fig. 7 Curve of changing average residence time (a) and piston zone volume (b) of “belly” tundish liquid with baffle thickness

拉速 1.6 m/min ,中间包水口流量为 150 kg/min ,钢液在中间包内平均停留时间为 676.25 s ,数值模拟得出的平均停留时间为 678 s ,相对误差为 0.26% ,小于 5% ,很好说明了数学模型的准确性。另外,现场生产试验中,中间包内的死区体积为 6.11% ,与数值模拟得出的中间包死区体积 5.87% 十分接近。因此,本设计并优化的“鼓肚式”感应加热中间包可以很好地应用在实际生产中,有效提高钢液在中间包内的平均停留时间,减少死区体积。

4 结论

(1)“鼓肚式”感应加热中间包明显减小钢液流对中间包后腔包壁的冲刷。与原型中间包相比,同一水口流量下,“鼓肚式”感应加热中间包钢液平均停留时间更长,死区体积更小,活塞区体积更大。水口流量为 150 kg/min 时,“鼓肚式”感应加热中间包钢液平均停留时间比原型中间包延长 6.44% ,死区体积减少 5.60% ,活塞区体积增加 6.57% 。水口流量为 200 kg/min 时,“鼓肚式”感应加热中间包钢液

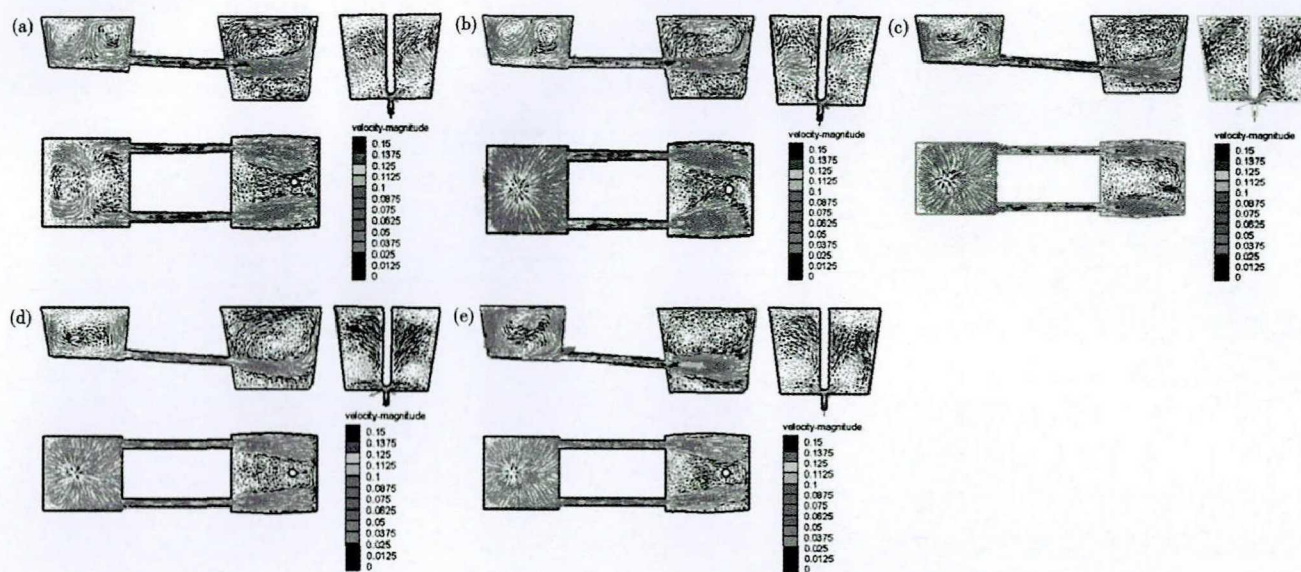


图 8 各方案流场速度矢量图:方案 1(a); 2(b); 3(c); 4(d)和 5(e)

Fig. 8 Velocity vector diagram of flow field in each scheme 1 (a), 2(b), 3(c), 4(d) and 5(e)

平均停留时间比原型中间包延长 3.83%,死区体积减少 5.93%,活塞区体积增加 8.15%。

(2)“鼓肚式”单流通道感应加热中间包钢液的平均停留时间随前腔体积的缩小而逐渐减小;死区体积随前腔体积的缩小而逐渐增大;活塞区体积随前腔体积的缩小逐渐减小。前腔体积为 1.06 m^3 时,通道式感应加热中间包平均停留时间最长,因此不加挡板的“鼓肚式”感应加热中间包结构比较合理。中间包水口流量为 150 kg/min 时,平均停留时

间最长为 678 s,死区体积比例最小为 5.87%,活塞区体积比例最大为 51.92%;流量为 200 kg/min 时,平均停留时间最长为 569 s,死区体积比例最小为 0.55%,活塞区体积比例最大为 56.92%。

“十三”五国家重点研发计划(2017YFB0304201);国家自然科学基金面上项目(51774179);辽宁省自然科学基金指导计划(2019-ZD-0269);海工钢联合基金 SKLMEA-USTLU(201902)资助项目

参考文献

- [1] Yan P, Arnout S and Van Ende M A, et al. Steel Reoxidation by Gunning Mass and Tundish Slag[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2015, 46(3): 1242-1251.
- [2] Wang Q, Li B and Tsukihashi F. Modeling of a Thermo-Electromagneto-Hydrodynamic Problem in Continuous Casting Tundish with Channel Type Induction Heating[J]. ISIJ International, 2014, 54(2): 311-320.
- [3] 丛林,张炯明,雷少武,等.中间包感应加热的数值模拟[J].钢铁研究, 2014, 42(3): 20-25.
- [4] Tang H, Guo L and Wu G, et al. Hydrodynamic Modeling and Mathematical Simulation on Flow Field and Inclusion Removal in a Seven-Strand Continuous Casting Tundish with Channel Type Induction Heating[J]. Metals, 2018, 8(6): 374-383.
- [5] Ai X G, Han D and Li S L, et al. Optimization of Flow Uniformity Control Device for Six-Stream Continuous Casting Tundish[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2020, 27(6): 1035-1044.
- [6] 韩东,艾新港,李胜利,等.基于温度场的 17t 双流中间包控流装置优化模拟[J].特殊钢, 2019, 40(5): 7-11.
- [7] 韩东,艾新港,李胜利,等.控流装置对双流中间包流动影响的模拟实验[J].辽宁科技大学学报, 2019, 42(2): 85-90.
- [8] Merder T. Modelling the Influence of Changing Constructive Parameters of Multi-Strand Tundish on Steel Flow and Heat Transfer[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2016, 43(10): 758-768.
- [9] Siddiqui M I H and Jha P K. Numerical Investigation of Inclusion Behaviour in a Multi-Strand Tundish During Strand Blockages[J]. Journal of the Institution of Engineers, 2015, 96(2): 1-8.
- [10] 张硕,唐海燕,刘锦文,等.六流 H 型通道感应加热中间包的结构优化[J].钢铁研究学报, 2019, 31(9): 787-794.
- [11] 艾新港,张书豪,李胜利,等.挡墙对 H 型中间包温度场影响的数学模拟研究[J].铸造技术, 2015, 36(10): 2484-2489.

曾红波(1992-),男,硕士在读(辽宁科技大学),钢铁冶金研究。E-mail:hd18341262350@163.com

收稿日期:2020-10-10