

侧壁式感应加热中间包磁/热/流耦合模拟

李 阳^{1,2}, 李 亮^{1,2}, 陈圆圆^{1,2}, 邓安元^{1,2}

(1. 东北大学 材料电磁过程研究教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 提出一种新的中间包感应加热方式,建立了三种线圈模型,模拟研究了三种线圈模型的电磁力分布及其对中间包内流场和温度场的影响,并结合 RTD 曲线评估了最佳线圈模型和加热功率. 结果表明:感应线圈向端部移动有利于改善浇注区远端钢液流动形态及温度分布;相同加热功率条件下,U 形感应加热线圈优于 E 形感应加热线圈,且相较于双侧对称分布 U 形线圈,单侧 U 形线圈的热效率更佳,冶金效果更好;提高感应加热功率有利于改善钢液的流动和提高铸坯的质量;对于四流中间包,加热功率为 800 ~ 1 000 kW 时,可达到均温补热的效果.

关 键 词: 感应加热;中间包;电磁场;流场;温度场;RTD 曲线

中图分类号: TF 777 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2017)07-0966-06

Numerical Simulation of Electromagnetic-Thermal-Hydrodynamic Field in Tundish with Sidewall-Type Induction Heating

LI Yang^{1,2}, LI Liang^{1,2}, CHEN Yuan-yuan^{1,2}, DENG An-yuan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: DENG An-yuan, professor, E-mail: dengay@epm.neu.edu.cn)

Abstract: A new induction heating method was proposed for tundish and three kinds of side-type electromagnetic induction heaters were designed. The distribution of electromagnetic force of heaters, and its effects on flow field and temperature distribution in tundish were studied by numerical simulation. The optimal heater and heating power was obtained by analyzing the RTD (residence time distribution) curve. The results show that the flow field and temperature distribution of the molten steel in the tundish are improved by moving electromagnetic induction heater towards the end of the tundish. With the same heating power, the heating effect of the U-type heater is superior to E-type heater, and compared with bilateral and symmetrical distribution of U-type heater, the unilateral U-type heater has a better thermal efficiency. Increasing the induction heating power is beneficial to improve the flow of molten steel and improve the quality of the casting. For a four-strand tundish, the heating power of 800 ~ 1 000 kW is enough to compensate the heat loss.

Key words: induction heating; tundish; electromagnetic field; flow field; temperature field; RTD curve

在连铸过程中,钢包更换和浇注末期的钢水温降对铸坯的质量影响很大,控制钢液温度保持在一定范围对提高产品质量有重要意义. 等离子

加热^[1]和感应加热是目前主要的中间包补热方式,感应加热以其加热效率高、加热响应性好、易于控制和钢水无污染等优点得到了各国研究人员

收稿日期: 2016-02-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51474065,51574083); 辽宁省博士后科研启动基金资助项目(20141008); 高等学校学科创新引智计划项目(B07015); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(L1509003).

作者简介: 李 阳(1990-),男,河南新乡人,东北大学博士研究生; 邓安元(1971-),男,重庆合川人,东北大学教授,博士生导师.

的重视^[2]. 通道式感应加热具有热效率高、加热均匀且有利于夹杂物上浮^[3]等优点,得到了广泛研究,但是通道式感应加热对加热区域的耐火材料要求较高,钢液对包壁侵蚀性磨损较大. 目前国内钢铁企业仍以普通中间包为主,而且通道式感应加热要求对普通中间包结构做较大的改动,增加企业成本. 寻找一种适用于普通中间包的感应加热方式具有重要意义. 因此本文提出了一种侧壁式感应加热方式,使用 ANSYS 软件^[4-5]对中间包内流场、温度场及磁场进行耦合分析,研究了线圈结构、分布方式以及加热功率对中间包磁场、流场及温度场的影响规律,为侧壁式感应加热中间包技术提供理论依据,并通过 RTD 曲线评价了该加热方式的冶金效果.

1 数学模型

1.1 控制方程

电磁感应加热中间包存在多个复杂的物理场,为简化计算,作以下假设:将中间包内钢液流动简化为非稳态黏性不可压缩流动,钢液物性参数为常数;忽略钢液流动对电磁场的影响;中间包液面为自由表面,不考虑中间包覆盖剂及渣层对液面波动的影响. 中间包内钢液行为数学模型可由以下方程表示:

1) 连续性方程

$$\nabla \cdot \boldsymbol{u} = 0 ; \tag{1}$$

2) 动量方程

$$\rho \frac{\partial (\boldsymbol{u})}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (\boldsymbol{u} \boldsymbol{u}) = - \nabla p + \rho \boldsymbol{g} + \eta \nabla \cdot [(\nabla \boldsymbol{u} + \nabla \boldsymbol{u}^T)] + \boldsymbol{F}_{\text{mag}} ; \tag{2}$$

3) 能量方程^[6]

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \nabla \cdot (T \boldsymbol{u}) = \lambda \nabla \cdot (\nabla T) + S_T + Q_{\text{Joule}} . \tag{3}$$

式中: ρ 为钢液的密度, kg/m^3 ; \boldsymbol{u} 为钢液的速度,

m/s ; p 为压强, Pa ; \boldsymbol{g} 为重力加速度, m/s^2 ; η 为流体有效黏度系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; $\boldsymbol{F}_{\text{mag}}$ 为电磁力, N/m^3 ; λ 为钢液导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; c_p 为钢液定压比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; S_T 为黏性耗散系数, m^2/s^3 ; Q_{Joule} 为电磁感应产生的焦耳热, W/m^3 . 湍流模型采用 Launder 等提出的 $k - \varepsilon$ 双方程模型^[7].

基于麦克斯韦理论,交变磁场中电磁力和焦耳热^[8]可表示为

$$\boldsymbol{F}_{\text{mag}} = \boldsymbol{J} \times \boldsymbol{B} = \frac{(\boldsymbol{B} \cdot \nabla) \boldsymbol{B}}{\mu} - \frac{\nabla B^2}{2\mu} , \tag{4}$$

$$Q_{\text{Joule}} = \frac{|\boldsymbol{J}|^2}{\sigma} . \tag{5}$$

式中: μ 为磁导率, H/m ; σ 为电导率, S/m ; \boldsymbol{J} 为感应电流密度, A/m^2 .

1.2 几何模型

考虑到中间包的对称性,取 35 t 四流中间包的 1/2 作为研究对象,几何模型如图 1 所示,其中长水口和结晶器内的水口内径分别为 90 mm 和 50 mm;中间包长宽高分别为 5.6、1.2 和 0.9 m. 中间包采用六面体网格划分,网格总数约为 300 000 个. 利用 ANSYS 软件求解中间包内电磁力和焦耳热分布;利用 CFX 软件求解中间包内的流场及温度场分布. 流场计算的边界条件如下:自由表面无剪切力;中间包入口速度均匀,出口为充分发展条件;入口湍动能 $K_{\text{in}} = 0.01 \boldsymbol{u}_{\text{in}}^2$,入口耗散率 $\varepsilon_{\text{in}} = 2 K_{\text{in}}^{3/2} / d_{\text{in}}$, d_{in} 为长水口直径. 材料的物性参数及中间包各面热损参数如表 1 所示.

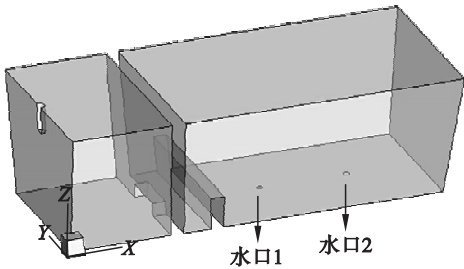


图 1 中间包三维物理模型

Fig. 1 Three dimensional physical model of tundish

表 1 模拟过程中用到的参数及边界条件

Table 1 Parameters and boundary conditions used in the simulation

铁芯的相对磁导率	3 000	钢液的比热容/ $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	750
钢液的电导率/ $(\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$	1.4×10^{-6}	钢液的黏性系数/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	0.006 2
线圈的电导率/ $(\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$	1.7×10^{-8}	上表面热流/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	15 000
线圈、空气、钢液的相对磁导率	1	底面热流/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	1 500
拉坯速度/ $(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	1.0	宽面热流/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	4 000
入口温度/K	1 835	窄面热流/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	3 400
钢液的导热系数/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	42		

2 计算方案

本文设计了 U 形、E 形和对称 U 形三种侧壁式加热线圈,线圈结构如图 2 所示.线圈均安装于两水口中间位置($X=1.4\text{ m}$)处,感应电流频率均为 50 Hz .

3 数值模拟结果与分析

3.1 电磁场特性分析

图 3a 为采用 U 形加热线圈时中间包截面 $Y=1.1\text{ m}$ 处的磁场分布,可见该截面一侧感应强度最大,磁感应强度主要沿 Z 方向,磁场在中间

包内分布不均匀.对于 E 形加热线圈,如图 3b 所示,可见磁场分布较均匀,主要分布在中间位置,但电磁场分布区域较小.由图 3c 可见,采用对称 U 形加热线圈时,中间包整体的磁场分布可知中间包前后两侧磁感应强度最大,主要沿 Z 方向.

图 4 所示为截面 $X=1.4\text{ m}$ 处的电磁力分布.由图可知,单侧 U 形线圈电磁力较为集中,紧箍作用明显;单侧 E 形线圈电磁力分布存在两个峰值,而双侧 U 形线圈电磁力呈单峰双侧分布,相较于单侧 U 形线圈,单侧 E 形线圈和双侧 U 形线圈电磁力分布范围增加,强度减弱;对比这三种线圈,单侧 U 形线圈电磁力分布最为集中,易于驱动钢液形成较大的循环流动区域,有利于实现对钢液的搅拌.

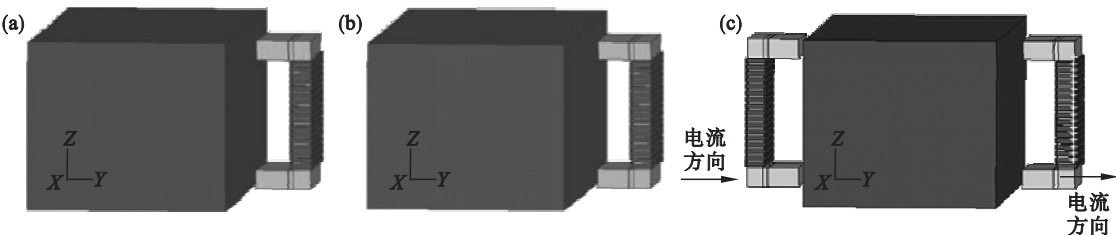


图 2 感应线圈示意图
Fig. 2 Schematic illustration of electromagnetic induction coils
(a)—单侧 U 形线圈; (b)—单侧 E 形线圈; (c)—双侧 U 形线圈.

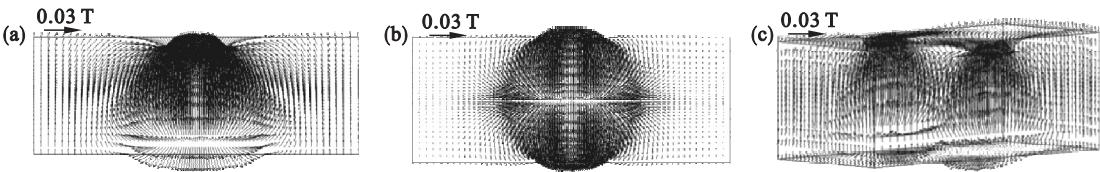


图 3 中间包内的磁场分布
Fig. 3 Electromagnetic field distribution in tundish
(a)—单侧 U 形线圈; (b)—单侧 E 形线圈; (c)—双侧 U 形线圈.

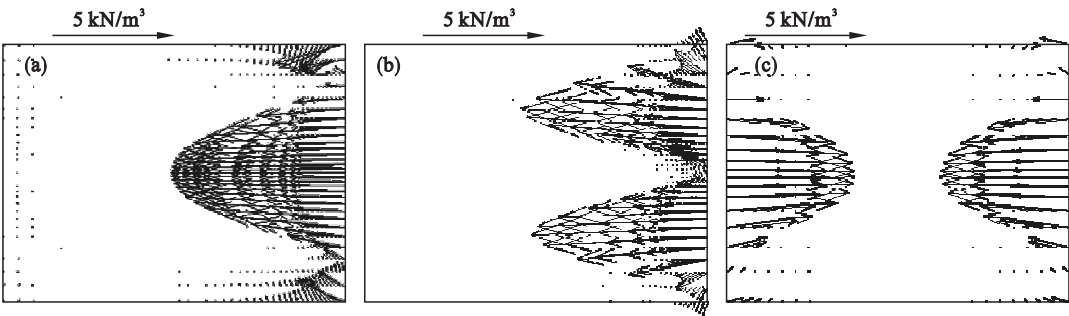


图 4 中间包截面 $X=1.4\text{ m}$ 处的电磁力分布
Fig. 4 Electromagnetic force distribution on section of $X=1.4\text{ m}$ in tundish
(a)—单侧 U 形线圈; (b)—单侧 E 形线圈; (c)—双侧 U 形线圈.

3.2 中间包流场和温度场分析

3.2.1 感应线圈位置对中间包流场和温度场的影响

图 5 所示为截面 $Z=0.45\text{ m}$ 的速度分布,从

图 5a 可知,在近壁处钢液回流速度较大,远壁端钢液速度较小,有利于增加夹杂物碰撞的机会,延长钢液停留时间,减少死区和短路流,但浇注区远端钢液流动不明显.由图 5b 可知,浇注区远端钢

液流动加强,存在方向性较强的流股,有利于促进钢液间能量的交换,减少死区. 这表明线圈适当向端部移动,有利于改善浇注区远端钢液的流动. 由图 5c,图 5d 可知,采用 E 形和双侧 U 形线圈后,

浇注区钢液流速减小,低速流较多,且双侧 U 形线圈在出水口中间区域和浇注区远端出现方向性较弱的低速流,易产生大量死区.

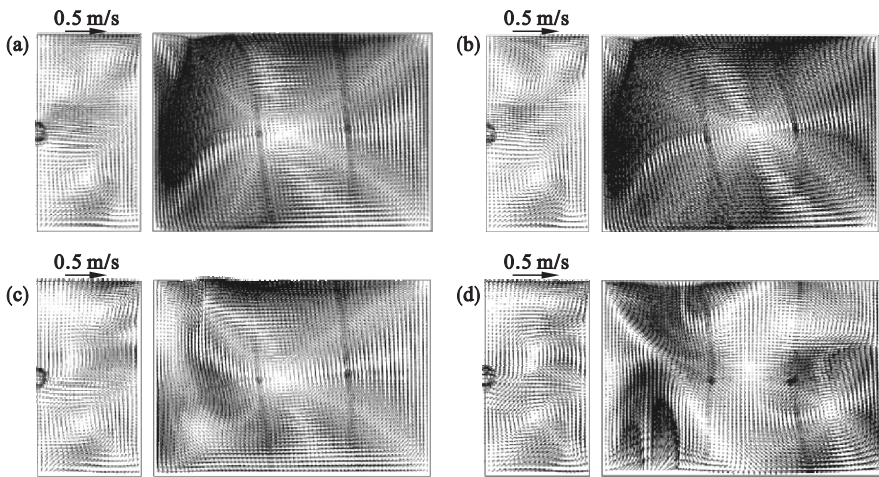


图 5 中间包截面 $Z=0.45\text{ m}$ 的速度矢量图
Fig. 5 Velocity vector on section of $Z=0.45\text{ m}$ in tundish
(a)—单侧 U 形线圈 ($X=1.4\text{ m}$); (b)—单侧 U 形线圈 ($X=2.0\text{ m}$);
(c)—单侧 E 形线圈 ($X=2.0\text{ m}$); (d)—双侧 U 形线圈 ($X=2.0\text{ m}$).

图 6a 中 A,B 为单侧 U 形线圈位于 $X=1.4\text{ m}$ 时水口 1 和水口 2 的温度分布;C,D 为单侧 U 形线圈位于 $X=2.0\text{ m}$ 时水口 1 和水口 2 的钢液温度分布. 可见线圈移至 $X=2.0\text{ m}$ 时,钢液温降小于位于 $X=1.4\text{ m}$ 的温降,两个出水口温度相等,有利于稳定各流间铸坯的质量. 这表明改善浇注区远端的钢液流动形态和温度分布是改善整个中间包内钢液流场、温度场分布的关键. 感应线圈

向端部移动对改善浇注区远端钢液流动和温度分布有重要意义. 图 6b 中 E,F 为对称双侧 U 形线圈位于 $X=2.0\text{ m}$ 时水口 1 和水口 2 的钢液温度分布. 可见对称双侧 U 形线圈温降比单侧 U 形线圈温降小,出钢温度较高,这是因为双侧 U 形线圈产生的焦耳热大,温度补偿效果好,但两水口存在较大温差,不利于稳定各流间的浇注温度,难以保证铸坯质量的一致性.

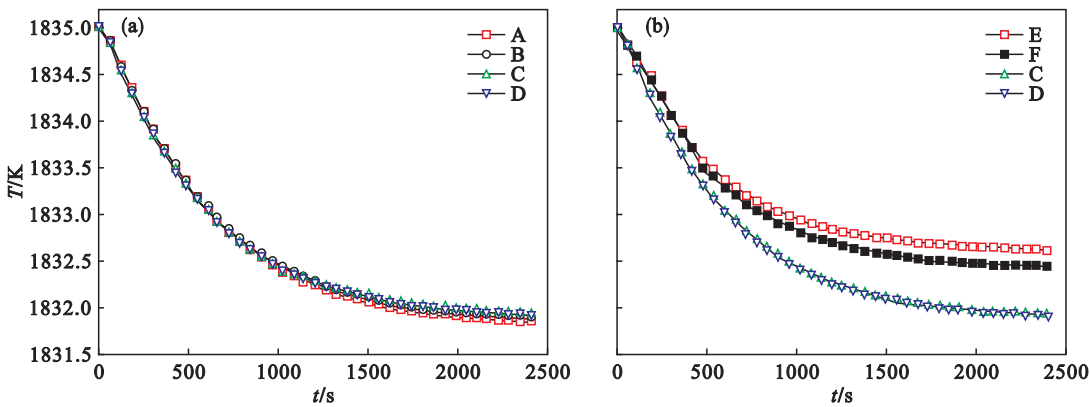


图 6 中间包两个出口钢液温度随时间的变化
Fig. 6 Evolution of steel temperature at two outlets of tundish
(a)—线圈位置对两水口温度的影响; (b)—线圈结构对两水口温度的影响.

由图 7 可见,采用单侧 U 形线圈时中间包钢液温度分布均匀,钢液温降更小. 采用单侧 E 形线圈时中间包钢液温度分层较为严重,不利于稳定各流间铸坯的质量. 由上可知,单侧 U 形线圈

的温度分布优于单侧 E 形线圈.
3. 2. 2 加热功率对中间包流场和温度场的影响
由图 8a 可见,未施加感应磁场时,钢液流动趋于停滞,死区较大. 图 8b 显示施加磁场后,钢液

流动明显增强,浇注区钢液速度增大,流动趋于一致性,低速流和死区明显减小,有利于提高铸坯质量.从图 8c 可以看出,随着加热功率提高,钢液高速流增多,方向一致性增强,整个浇注区钢液流动

趋于一致,形成一个大循环,促进钢液间能量交换,实现了对中间包内钢液的整体搅拌,钢液在水口间的分配更加合理,有利于进一步提高铸坯质量.

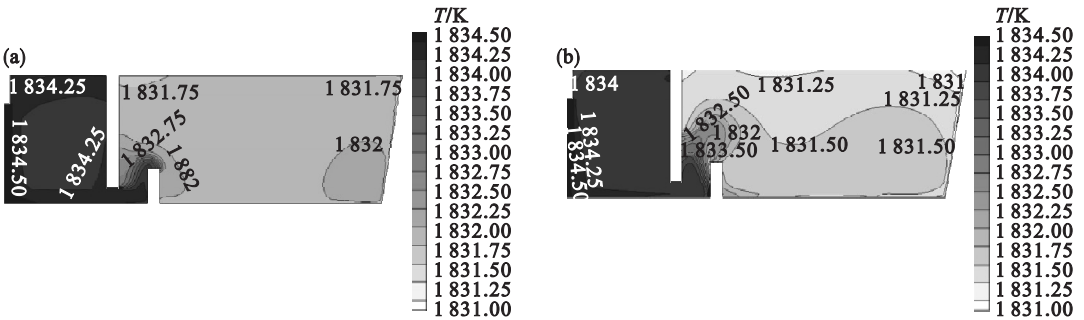


图 7 中间包截面 $Y=0.6\text{ m}$ 处温度分布
Fig. 7 Temperature distribution on section of $Y=0.6\text{ m}$ in tundish
(a)—单侧 U 形线圈; (b)—单侧 E 形线圈.

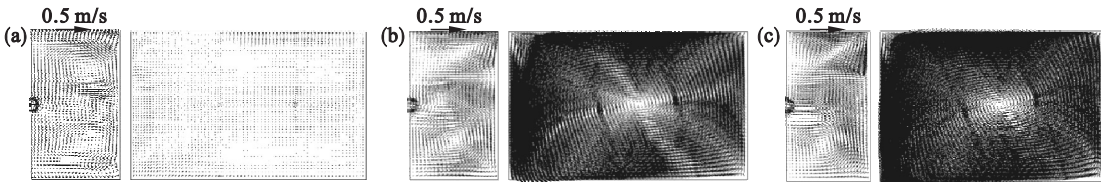


图 8 不同加热功率条件下中间包截面 $Z=0.45\text{ m}$ 处的速度矢量图
Fig. 8 Velocity vector on section of $Z=0.45\text{ m}$ in tundish under different heating power
(a)—0 kW; (b)—400 kW; (c)—800 kW.

由图 9 可知,随着加热功率增大,中间包平均温度明显提高.加热功率为 1 000 kW 时中间包钢液的温降已完全得到补偿,而且出水口温度有所增加,约为 1 836.8 K,由此可见,在 800 ~ 1 000 kW 功率范围内,感应加热能起到中间包补热的效果,保证浇注的稳定性.根据工业试验和在线运行结果,通道式感应加热装置的热效率可高达 80% ~ 90%.经计算,侧壁式感应加热的热效率为 88%,加热效率较高.

3.3 RTD 曲线分析

通常可用 RTD 曲线分析中间包内钢液的平均停留时间,确定合理的流型^[9-10].图 10 为中间包 RTD 曲线.

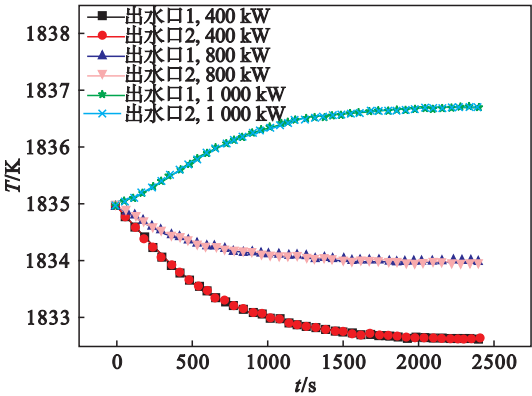


图 9 中间包两出口钢液温度随时间的变化
Fig. 9 Evolution of steel temperature at two outlets of tundish

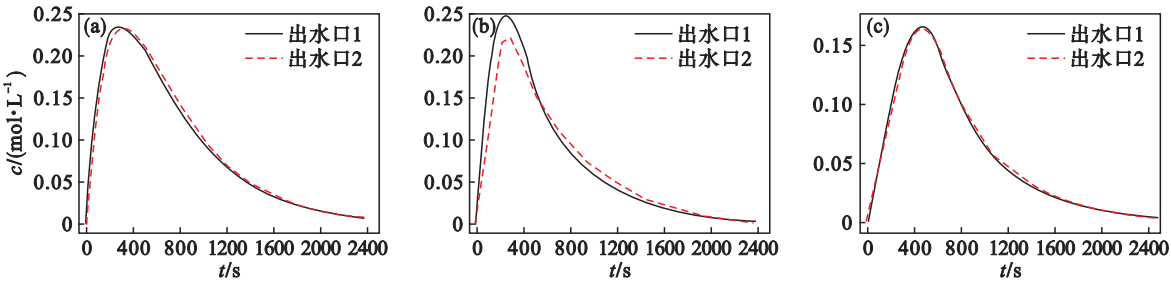


图 10 中间包 RTD 曲线
Fig. 10 RTD curves of the tundish
(a)—单侧 U 形线圈,200 kW; (b)—单侧 E 形线圈,200 kW; (c)—单侧 U 形线圈,400 kW.

由图 10a 可见,近、远水口的响应时间、峰值时间相差不大,两水口 RTD 曲线基本重合,钢液在两水口的分配比较均匀.从图 10b 可看出,两水口处示踪剂浓度随时间变化有明显差异,水口的响应时间、峰值响应时间相差较大,钢液在中间包内运动路径长度相差较大,停留时间不同,相较于 U 形线圈更易产生死区,不利于稳定铸坯质量.由图 10c 可知,两水口 RTD 曲线几乎重合,峰值浓度明显降低,最短停留时间和响应时间延长,整个中间包内钢水流动趋于一致.由此可知,单侧 U 形线圈优于单侧 E 形线圈.此外,提高加热功率可以延长钢液停留时间,提高铸坯质量.

4 结 论

- 1) 侧壁式感应加热中间包具有加热和搅拌钢液作用,U 形线圈对流场和温度场的改善优于 E 形线圈.
- 2) U 形线圈对称式排布时,电磁力分布范围增加,强度减弱,钢液流动较差,温度分层现象严重;单侧感应加热方式比双侧对称加热方式热效率高,冶金效果更好.
- 3) 感应线圈向端部适当移动有利于改善中间包浇注区远端钢液的流动和温度分布.
- 4) 提高加热功率有利于增强钢液流动、延长钢液停留时间、减小死区和提高钢液平均温度.对 35 t 四流中间包,加热功率在 800 ~ 1 000 kW 时,能有效补偿中间包温降,提高铸坯质量.

参考文献:

[1] Moore C. Plasma tundish heating as an integral part[J]. *Steel Times International*,1989,13(5):44-46.

[2] 毛斌,淘金明,蒋桃仙.连铸中间包通道式感应加热技术[J].连铸,2008,5(3):5-8.

(Mao Bin, Tao Jin-ming, Jiang Tao-xian. Tundish channel type induction heating technology for continuous casting[J]. *Continuous Casting*,2008,5(3):5-8.)

[3] 王强,石明月,李一明,等.感应加热中间包夹杂物的运动及去除[J].东北大学学报(自然科学版),2014,35(10):1442-1446.

(Wang Qiang, Shi Ming-yue, Li Yi-ming, et al. Inclusions behavior and removal in tundish with induction heating[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*,2014,35(10):1442-1446.)

[4] Chattopadhyay K, Isac M, Guthrie R I L. Physical and mathematical modelling of inert gas shrouding in a tundish[J]. *ISIJ International*,2011,51(4):573-580.

[5] Cwudziński A. Numerical and physical simulation of liquid steel behaviour in one strand tundish with subflux turbulence controller[J]. *Archives of Metallurgy and Materials*,2015,60(3):1581-1586.

[6] Ghojel J I, Ibrahim R N. Computer simulation of the thermal regime of double-loop channel induction furnaces[J]. *Journal of Material Processing Technology*,2004,155(22):2093-2098.

[7] Launder B E, Spalding D B. The numerical computation of turbulent flows[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*,1974,3(2):269-289.

[8] Spezzapria M, Dughiero F, Forzan M, et al. Multiphysics TEM simulation of contour induction hardening process on aeronautical gears[J]. *Journal of Iron and Steel Research International*,2012,19(S1):95-98.

[9] 雷洪,赵岩,刑国成,等.总体分析法在非对称两流中间包水模型中的应用[J].东北大学学报(自然科学版),2011,32(4):537-540.

(Lei Hong, Zhao Yan, Xing Guo-cheng, et al. Use of a comprehensive analytical approach for water modeling of an asymmetrical two-strand tundish[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*,2011,32(4):537-540.)

[10] Sahai Y, Emi T. Melt flow characterization in continuous casting tundish[J]. *ISIJ International*,1996,36(6):667-672.