

# 感应加热中间包夹杂物的运动及去除

王 强<sup>1</sup>, 石月明<sup>2</sup>, 李一明<sup>1</sup>, 李宝宽<sup>1</sup>

(1. 东北大学 材料与冶金学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 沈阳鼓风机集团股份有限公司, 辽宁 沈阳 110869)

**摘 要:** 针对某钢厂双通道式感应加热中间包,建立了三维非稳态数学模型来研究感应加热中间包内夹杂物的运动行为和去除率.从力平衡原理出发,采用欧拉-拉格朗日方法分析了感应加热中间包内夹杂物的运动行为.建立了感应加热情况下夹杂物碰撞长大的数学模型,考察了夹杂物碰撞长大对其去除率的影响.结果表明,钢液流过通道受到紧箍作用,夹杂物会受电磁压力作用而向通道壁面运动,有利于夹杂物的去除;碰撞长大能够显著提高小粒径夹杂物的去除率;感应加热有助于夹杂物的去除,尤其是小粒径夹杂物.

**关 键 词:** 感应加热;中间包;夹杂物;碰撞长大;电磁压力

中图分类号: TF 777

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2014)10-1442-05

## Inclusions Behavior and Removal in Tundish with Induction Heating

WANG Qiang<sup>1</sup>, SHI Yue-ming<sup>2</sup>, LI Yi-ming<sup>1</sup>, LI Bao-kuan<sup>1</sup>

(1. School of Materials & Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Shenyang Blower Works Group Co., Ltd., Shenyang 110869, China. Corresponding author: LI Bao-kuan, E-mail: libk@smm.neu.edu.cn)

**Abstract:** A three-dimensional transient mathematical model was developed to investigate the inclusions movement and removal in the continuous casting tundish with channel-type induction heating. According to the force balance, the inclusion movement behavior was investigated by Euler-Lagrange approach. A mathematical model was established for the collision and coalescence of inclusions in tundish with different induction heating powers, and the effect of collision and coalescence of inclusions on the removal ratio was investigated. The results showed that the inclusions will be subjected to an electromagnetic pressure force when molten steel flows pass the channel and move to the channel wall, which is beneficial to the removal of inclusions. Collision and coalescence improve remarkably the removal ratio of small inclusions. The induction heating is beneficial to the inclusion removal, especially for the small inclusions.

**Key words:** induction heating; tundish; inclusion; collision and coalescence; electromagnetic pressure force

在连铸过程中,钢液在中间包内停留时间长,将产生较大温降.为了减小温降,近年来中间包感应加热技术越来越受到重视.感应加热中间包能够有效地弥补钢液热损失,保证钢液出流温度恒定.另外,由于钢液温度升高,钢液在中间包内停留时间得以延长,夹杂物上浮去除率增加,另外,夹杂物还受到电磁力的作用,其运动行为变得复杂<sup>[1-3]</sup>.

Ilegbusi 等<sup>[4]</sup>研究了在中间包施加一个稳恒磁场后钢液流动、传热及夹杂物运动情况.研究发现,当加上稳恒磁场后,钢液流动形态得到改善,死区体积分数减小,钢液出口温度波动减小. Takahashi 等<sup>[5]</sup>采用实验和数值计算研究感应加热坩埚中夹杂物去除情况.研究发现,电磁感应会产生大的电磁压力,能够迅速地分离夹杂物.电流为 50, 100 和 150 A 时,夹杂物去除率分别是

8.6% ,62.2% 和 82.9% .Zhang 等<sup>[6]</sup>采用数值模拟方法研究了中间包内夹杂物的碰撞长大.碰撞长大方式分别为布朗碰撞、湍流碰撞和斯托克斯碰撞.研究发现,当在中间包内砌筑堰坝等控流装置后,夹杂物总去除率提高至 79% ,小粒径夹杂物主要是通过碰撞长大方式去除.Miki 等<sup>[7]</sup>采用欧拉-拉格朗日模型计算夹杂物运动轨迹,考虑了温度对夹杂物运动的影响.研究发现,温度分布对钢液流动影响较大,在中间包内会产生自然对流,能够促进夹杂物的上浮,尤其是对于小粒径夹杂物.夹杂物粒径对去除率的影响也很大.

本文建立了一种三维非稳态数学模型,考察了电磁力和热泳力对夹杂物运动的影响,以及在不同感应加热功率下,夹杂物在中间包内不同区

域碰撞长大的情况及去除率的变化.

1 数学模型

1.1 几何模型

根据实际尺寸建立感应加热中间包物理模型,如图 1 所示.模型是一个双通道单流连铸感应加热中间包,最大长度为 2 202.5 mm,最大宽度为 537.9 mm,最大高度为 1 425 mm.中间包分为注流腔和连铸腔.两腔由两个 4°倾角通道连在一起.感应加热装置安装在两个通道之间,由线圈和铁芯组成.当钢液流过通道时,被感应加热装置加热.钢液通过长水口从钢包进入注流腔,再经过通道流入连铸腔,最后通过浸入式水口到达结晶器内.

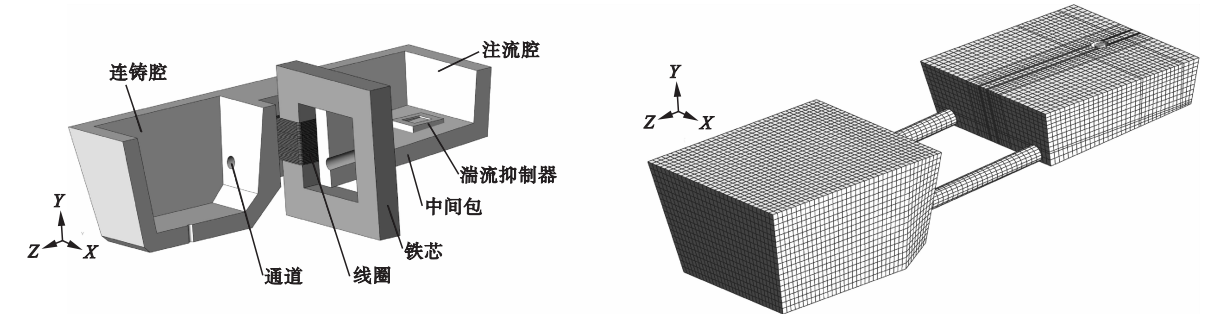


图 1 感应加热中间包几何模型及网格  
Fig. 1 Physical model and mesh of tundish with induction heating

1.2 控制方程

夹杂物在感应加热中间包内运动时,会受到重力、浮力、曳力和 Saffman 升力的作用.因为本文考

虑了夹杂物布朗碰撞长大,所以方程中也考虑了布朗力.由于感应加热的存在,电磁压力和热泳力对夹杂物的运动将产生较大影响<sup>[8-9]</sup>,如图 2 所示.

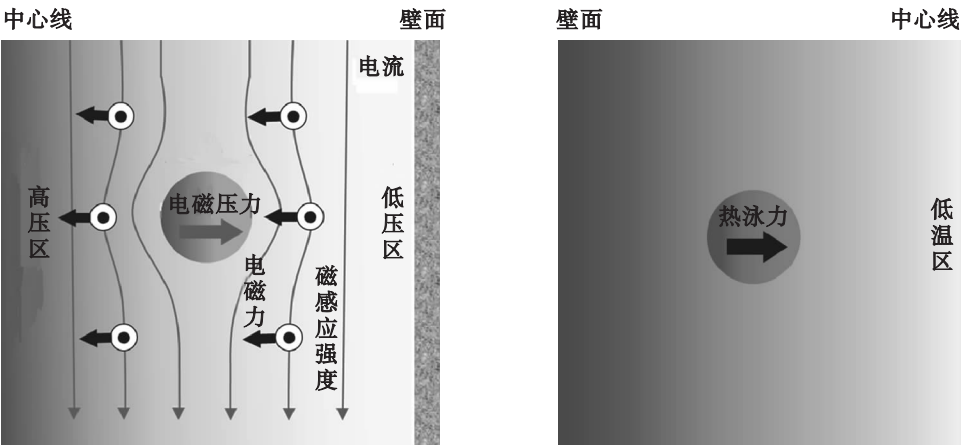


图 2 电磁压力和热泳力示意图  
Fig. 2 Schematic of electromagnetic force and thermophoretic force

综上,根据牛顿第二定律,夹杂物运动方程为

$$\rho_p \frac{\pi}{6} d_p^3 \frac{dv_p}{dt} = F_g + F_f + F_d + F_l + F_p + F_t + F_b. \quad (1)$$

式中: $\rho_p, d_p, v_p$  分别为夹杂物密度、粒径和速度; $F_g$  为夹杂物受到的重力; $F_f$  为夹杂物受到的浮力; $F_d$  为曳力; $F_l$  为 Saffman 升力; $F_p$  为压力; $F_t$

为热泳力; $F_b$  为布朗力<sup>[10-11]</sup>.

假设夹杂物  $r_i$  在钢液中静止不动,其他的夹杂物  $r_j$  以相对速度与它发生碰撞,在此过程中,夹杂物不断长大.夹杂物有 3 种碰撞机制:布朗碰撞、湍流碰撞和斯托克斯碰撞.夹杂物的主要驱动力是钢液的平均速度,但钢液的脉动速度也会影响夹杂物的扩散.本文采用随机游走模型计算钢液脉动速度.

1.3 边界条件

在中间包内运动时,不同夹杂物会发生碰撞长大,一部分夹杂物上浮到钢液表面然后被保护渣吸附,一部分夹杂物则被耐火材料壁面吸附.在注流腔和通道内,钢液运动比较剧烈,即使夹杂物被表面保护渣或耐火材料吸附,也可能再次卷入钢液中.所以,本文认为夹杂物速度小于某一速度阈值时,才会被表面保护渣或耐火材料壁面吸附,否则反弹回钢液中,且存在一定的动量损失,取为 40%<sup>[6-7,10]</sup>.在连铸腔内,钢液运动比较缓慢,夹杂物只要碰到表面保护渣或耐火材料表面就会被吸附.计算中,在中间包入口处均匀释放夹杂物,释放数量与进口网格数有关,本文中为 3 680 个夹杂物,且夹杂物入口速度和方向与钢液的保持一致.

2 结果与讨论

2.1 模型验证

许多学者都进行了电磁分离夹杂物的实验研究.本文采用文献[5]的实验结果验证数学模型.图 3 为计算得到的夹杂物去除率与实验值的对比.可以看到,计算值与实验值在变化趋势上吻合得很好.计算值要大于实验值,误差在 15% 以内,

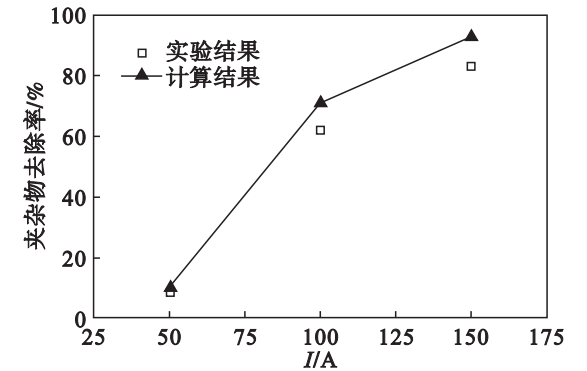


图 3 夹杂物去除率的计算值与实验值对比  
Fig. 3 Comparison of removal ratio between experiment and computation

主要是计算时没有考虑凝固,而在实验中是存在凝固的.

2.2 不考虑碰撞长大时夹杂物的运动行为

在文献[12]基础上,重点研究夹杂物的运动与碰撞长大.本文在中间包入口释放 1,2,5,10,20,30 和 50  $\mu\text{m}$  等 7 种粒径的夹杂物.图 4 为感应加热功率为 800 kW 时,夹杂物在中间包中的运动轨迹.可以看到夹杂物的运动轨迹与钢液的近似.因为使用了随机游走模型,夹杂物运动迹线不再平滑,而是锯齿状,反应出湍流对夹杂物运动的影响.

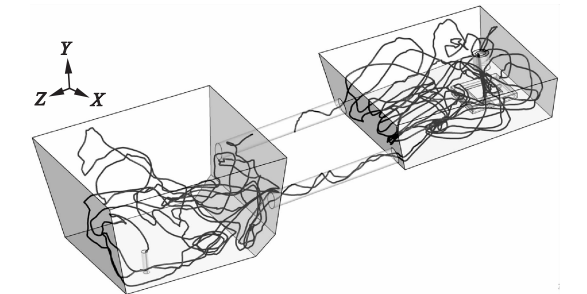


图 4 无碰撞长大时夹杂物在中间包中的运动轨迹  
Fig. 4 Inclusion trajectories in tundish without collision and coalescence

图 5 为不考虑碰撞长大时夹杂物在整个中间包内的去除率.其中,直径为 50  $\mu\text{m}$  的夹杂物,在无感应加热时,去除率为 67.07%,通道去除率占总体的 39.31%;在感应加热功率为 800 kW 时,去除率增大到 88.51%,通道去除率占总体的 52.23%.对于 7 种粒径的夹杂物,有感应加热时的去除率均大于无感应加热,说明感应加热能够显著提高夹杂物的去除率.

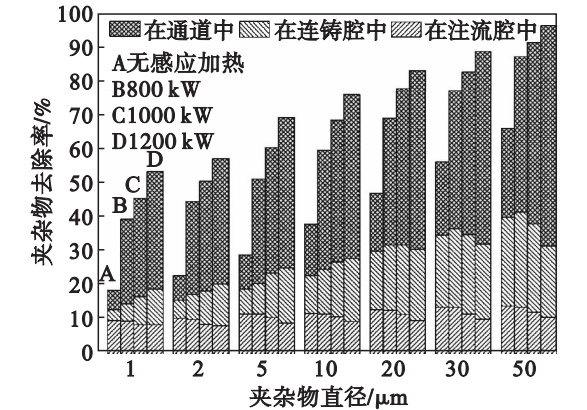


图 5 无碰撞长大时夹杂物在中间包内的去除率  
Fig. 5 Removal ratio of inclusions in tundish without collision and coalescence

2.3 考虑碰撞长大时夹杂物的运动行为

图 6 为不同感应加热功率下,所有粒径的夹

杂物在中间包内的去除率,包括考虑碰撞长大和不考虑碰撞长大两种情况.

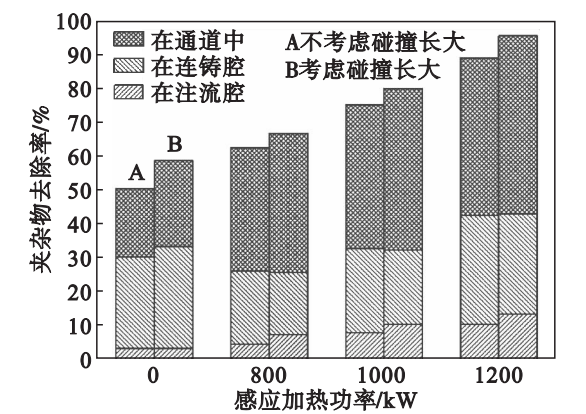


图 6 所有粒径夹杂物在中间包内的去除率  
Fig. 6 Removal ratio of all size inclusions in tundish

可以发现,考虑碰撞长大得到的夹杂物去除率要大于不考虑碰撞长大的情况.随着功率的增加,夹杂物在注流腔内的去除率逐渐增大.因为此时考虑了碰撞长大,随着功率的增加,夹杂物在注流腔内碰撞几率越来越大,夹杂物粒径增加,动量减少,因而容易上浮去除.同时也可以看到,去除夹杂物所占比重最大的是通道,其次是连铸腔.

图 7 为感应加热功率 800 kW 时,不同粒径夹杂物在中间包内碰撞率常数等值线.对比发现,布朗碰撞和斯托克斯碰撞的碰撞率常数和仅计算通道时的结果相差不多,说明布朗碰撞和斯托克斯碰撞在整个中间包内发生的几率差不多.3 个区域湍流碰撞的碰撞率常数差别较大,同一情况下,通道中的碰撞率常数最大,其次是注流腔,最小的为连铸腔.因为湍流碰撞的碰撞率常数与钢液搅拌能相关,通道中钢液搅拌能最大,其次是注流腔,连铸腔的最小.随着功率增大,布朗碰撞发生几率增大,斯托克斯碰撞发生几率减小,湍流碰撞发生几率也增大.

图 8 为不同感应加热功率下,中间包出口夹杂物粒径分布.无感应加热时,小粒径夹杂物占的比重较大,主要集中在 5 ~ 10 μm.随着加热功率的增加,小粒径夹杂物比重逐渐减小,稍大粒径夹杂物比重逐渐增加.800 kW 时,出口夹杂物粒径集中在 5 ~ 10 μm 和 10 ~ 15 μm.1 000 kW 时,出口夹杂物粒径集中在 10 ~ 15 μm 和 15 ~ 20 μm.1 200 kW 时,出口夹杂物粒径集中在 15 ~ 20 μm.

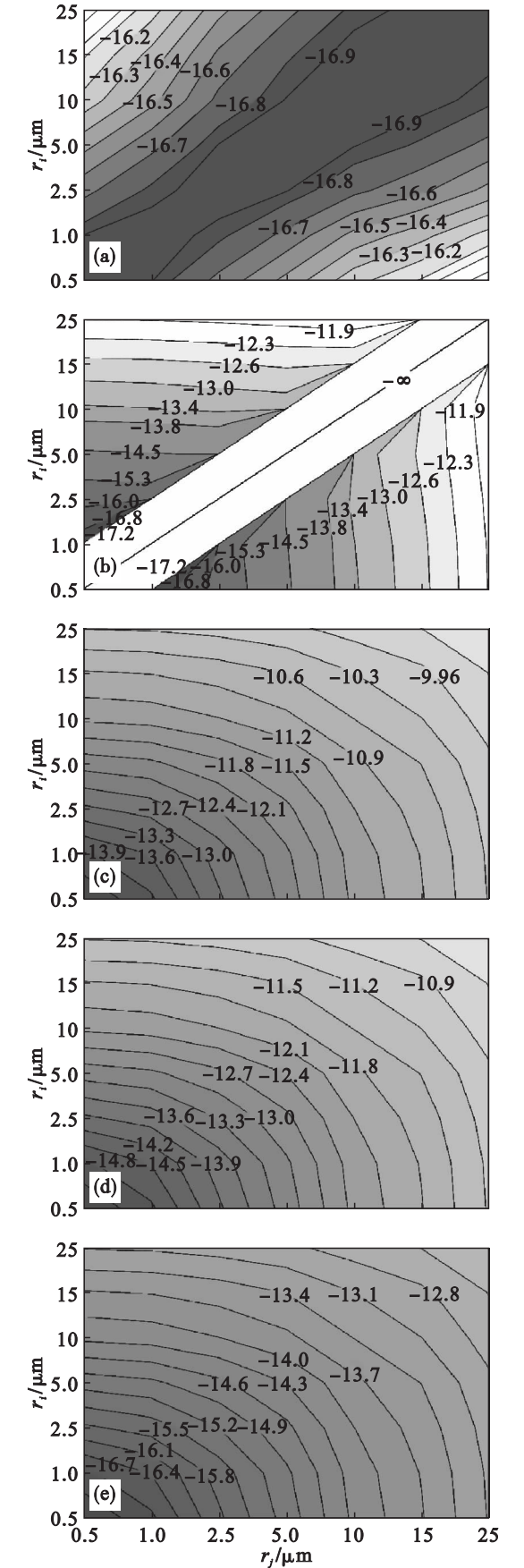


图 7 中间包内不同粒径夹杂物的碰撞率常数(对数形式)  
Fig. 7 Collision rate constant (log  $\beta$ ) between different diameter inclusions in tundish  
(a)—布朗碰撞;(b)—一斯托克斯碰撞;(c)—通道中湍流碰撞;  
(d)—注流腔中湍流碰撞;(e)—连铸腔中湍流碰撞.



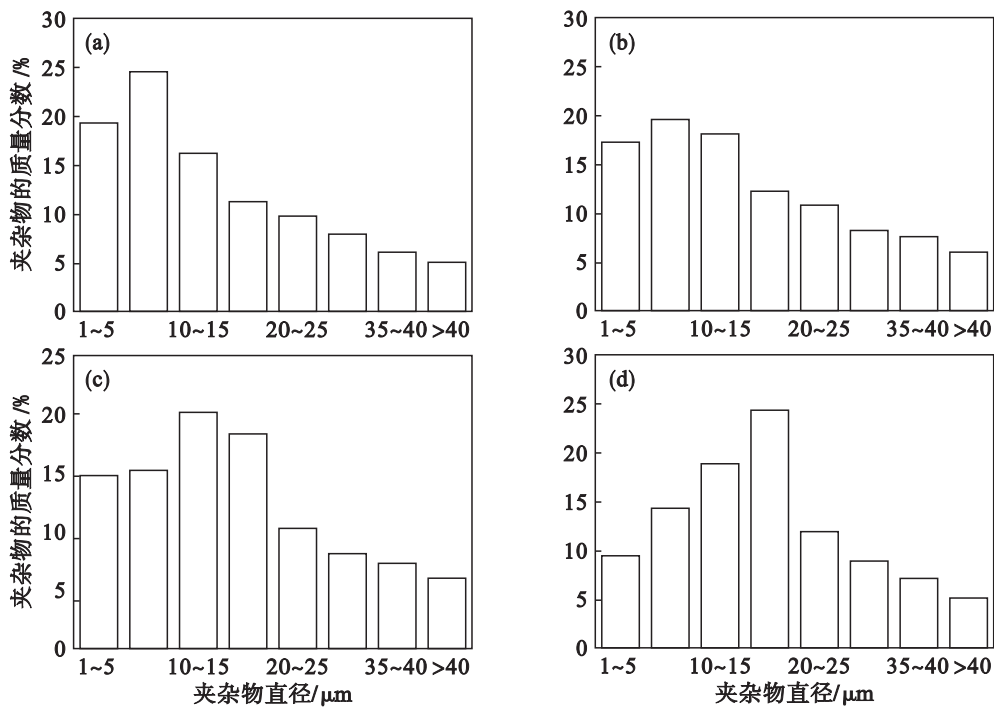


图 8 不同感应加热功率时中间包出口夹杂物的粒径分布  
Fig. 8 Diameter distribution of inclusions at outlet of tundish with different induction heating powers  
(a) —无感应加热; (b) —800 kW; (c) —1 000 kW; (d) —1 200 kW.

3 结 论

- 1) 钢液在通道中,受到电磁压力作用而向通道壁面运动,且电磁压力的大小与夹杂物粒径成正比关系. 因此,感应加热有助于夹杂物的去除,尤其是较大粒径的夹杂物.
- 2) 碰撞发生后,夹杂物粒径变大,动量减少,容易上浮,此外,受到的电磁压力也变大. 因此,碰撞长大能够提高夹杂物的去除率.
- 3) 3 种碰撞方式中,湍流碰撞的概率最大,是其余两种碰撞方式概率的  $10^2 \sim 10^4$  倍左右. 由于通道中钢液流动最为剧烈,因此通道中发生湍流碰撞的可能性最大.
- 4) 感应加热能够促进夹杂物的碰撞长大,随着加热功率的增加,中间包出口小粒径夹杂物的质量分数减小,大粒径夹杂物的质量分数增加.

参考文献:

[ 1 ] Tripathi A, Ajmani S K. Numerical investigation of fluid flow phenomenon in a curved shape tundish of billet caster [ J ]. *ISIJ International*, 2005, 45 ( 11 ) : 1616 – 1625.

[ 2 ] Umbrashko A, Baake E, Nacke B, et al. Modeling of the turbulent flow in induction furnaces [ J ]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2006, 37 : 831 – 838.

[ 3 ] Yang S F, Zhang L f, Li J S, et al. Structure optimization of horizontal continuous casting tundishes using mathematical modeling and water modeling [ J ]. *ISIJ International*, 2009,

49 ( 10 ) : 1551 – 1560.

[ 4 ] Ilegbusi O J, Szekely J. Effect of magnetic field on flow, temperature and inclusion removal in shallow tundishes [ J ]. *ISIJ International*, 1989, 29 ( 12 ) : 1031 – 1039.

[ 5 ] Takahashi K, Taniguchi S. Electromagnetic separation of nonmetallic inclusion from liquid metal by imposition of high frequency magnetic field [ J ]. *ISIJ International*, 2003, 43 ( 6 ) : 820 – 827.

[ 6 ] Zhang L F, Taniguchi S, Cai K K. Fluid flow and inclusion removal in continuous casting tundish [ J ]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2000, 31 : 253 – 266.

[ 7 ] Miki Y J, Thomas B G. Modeling of inclusion removal in a tundish [ J ]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1999, 30 : 639 – 654.

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

[ 9 ] Sahai Y, Emi T. Criteria for water modeling of melt flow and inclusion removal in continuous casting tundishes [ J ]. *ISIJ International*, 1996, 36 ( 9 ) : 1166 – 1173.

[ 10 ] Chattopadhyay K, Isac M, Guthrie R I L. Physical and mathematical modeling of steelmaking tundish operations; a review of the last decade ( 1999 – 2009 ) [ J ]. *ISIJ International*, 2010, 50 ( 3 ) : 331 – 348.

[ 11 ] Li B K, Okane T, Umeda T. Modeling of molten metal flow in continuous casting process considering the effects of argon gas injection and static magnetic field application [ J ]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2000, 31 : 1491 – 1503.

[ 12 ] Wang Q, Li B K, Tsukihashi F. Modeling of a thermo-electromagnet-hydrodynamic problem in continuous casting tundish with channel type induction heating [ J ]. *ISIJ International*, 2014, 54 ( 2 ) : 311 – 320.