

电磁搅拌钢包内气泡聚并破裂行为

勾大钊^{1,2}, 雷洪^{1,2}, 耿佃桥^{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: 结合气液两相流欧拉模型与考虑气泡破碎聚并的颗粒群平衡模型,研究了电磁搅拌下底吹钢包内流场分布及气泡尺寸分布. 结果表明:搅拌器向上搅拌时钢包内形成一个大循环流场,而向下搅拌时钢包内形成了一个大的回流区和一个小的回流区. 钢包内气泡分布为气液两相区中心区域气泡直径最大,气液两相区边界处直径较小,且从气液两相区中心到气液边界气泡直径逐渐减小. 电流越大,气液两相区域在垂直方向上偏转程度越大,而且电流越大,气液两相区中心大气泡分布区域也越大. 电磁搅拌器向下搅拌时气液两相中心区域大气泡直径分布区域小于向上搅拌. 大气泡偏转程度小于小气泡,大气泡偏向钢包中心轴线一侧.

关 键 词: 电磁搅拌; 钢包; 气泡; 聚并破碎; 颗粒群平衡模型

中图分类号: TF 769 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2018)05-0633-05

Bubble Breakup and Coalescence in Electromagnetic Stirring Ladle

GOU Da-zhao^{1,2}, LEI Hong^{1,2}, GENG Dian-qiao^{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: LEI Hong, professor, E-mail: leihong@epm.neu.edu.cn)

Abstract: A mathematical model for the gas-liquid flow field in the ladle with argon blowing and electromagnetic stirring was developed based on the Euler model and population balance model (PBM). The results show that the upward stirring only forms a large circulation flow field in the ladle, while the downward stirring forms a large and a small circulation flow fields. The size of the bubble in the center of gas-liquid region is the largest and is gradually reduced when the bubble is changed from the center to the boundary of the gas-liquid two-phase region. With increasing electromagnetic stirring current, the deflection degree in vertical direction in gas-liquid two-phase region is greater and the distribution of large-sized bubble area in the center of the gas-liquid two-phase region becomes wider. The area of large-sized bubbles in the central region from the downward stirring is smaller than that from the upward stirring. The spatial distribution of large-sized bubbles has less effect on the deflection and bends to the center line of the ladle.

Key words: electromagnetic stirring; ladle; bubble; breakage and coalescence; population balance model

在钢包精炼过程中,底吹氩搅拌和电磁搅拌是两种主要的搅拌方式,吹氩搅拌和电磁搅拌都可以促进钢包内夹杂物去除、温度均匀化、成分均匀化等^[1]. 在钢包吹氩搅拌时,气泡通过透气砖不断地进入钢液,带动钢包内钢液循环. 在气泡上升过程中,由于气泡的碰撞、聚合和破碎行为会导致气泡直径不断发生变化;而气泡直径直接影响钢包内流场及夹杂物去除效果,因此研究钢包精炼过程中气泡直径变化对实际生产具有重要意义. 目前,底吹氩钢包内气泡直径变化已经有了初

收稿日期: 2017-04-17

基金项目: 国家自然科学基金委员会-宝钢集团有限公司钢铁联合研究基金资助项目(U1460108); 国家自然科学基金资助项目(51304038); 中国博士后基金特别资助项目(2015T80261).

作者简介: 勾大钊(1992-),男,湖北宜昌人,东北大学博士研究生; 雷洪(1973-),男,湖北武汉人,东北大学教授,博士生导师.

步研究^[2-3],电磁搅拌下钢包内流场及磁场分布也进行了深入讨论^[4-5],但是电磁搅拌下钢包内气泡分布特点却未见相关报道.因此,本文结合气液两相流欧拉模型与考虑气泡破碎聚并的 PBM 模型,研究了行波电磁搅拌下底吹钢包内流场分布及气泡尺寸分布特征.

1 数学模型

1.1 基本假设

1) 气液两相均视为连续不可压缩介质且相互渗透,共同占有空间区域;

2) 将液相视为牛顿流体,且湍流具有各向同性;忽略气液两相之间的热量、质量传递及化学反应等现象;

3) 钢液和气泡密度不变,钢液中的气泡均视为球形且气泡在上浮过程中不膨胀;

4) 只考虑气泡的二元破碎与聚并,即一个气泡一次只能破碎成两个子气泡,两个气泡才能聚合成一个大气泡;

5) 钢水密度 ρ 、运动黏性系数 ν 、电导率 σ 和磁导率 μ 等物性参数为常数.

1.2 电磁场模型

1.2.1 电磁场

行波电磁搅拌的电磁场满足如下简化的麦克斯韦方程组:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}, \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0. \quad (3)$$

式中: \mathbf{B} 为磁感应强度, T; \mathbf{E} 为电场强度, V/m; \mathbf{H} 为磁场强度, A/m; \mathbf{J} 为传导电流密度, A/m²; t 为时间, s.

1.2.2 电磁力

电磁场在钢液中感生出的电流可表示为

$$\mathbf{J} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B}). \quad (4)$$

作用到流体上的时间平均的电磁力(Lorentz 力)为

$$\mathbf{F}^{jb} = \frac{1}{2} \text{Re}(\mathbf{J} \times \mathbf{B}^*). \quad (5)$$

式中:上标 * 表示复共轭;Re 表示取实部.

1.3 气液两相流数学模型

1) 质量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_i \alpha_i) + \nabla \cdot (\rho_i \alpha_i \mathbf{u}_i) = 0. \quad (6)$$

式中:下角标 $i = 1, g$ 分别表示液相和气相; ρ 为

密度, kg/m³; α 为相分率; \mathbf{u} 为速度, m/s.

2) 动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_1 \alpha_1 \mathbf{u}_1) + \nabla \cdot (\rho_1 \alpha_1 \mathbf{u}_1 \mathbf{u}_1) = -\alpha_1 \nabla p + \nabla \cdot [\alpha_g \mu_{\text{eff}}(\nabla \mathbf{u}_1 + \nabla \mathbf{u}_1^T)] + \mathbf{M}_1 + \rho_1 \alpha_1 \mathbf{g} + \mathbf{F}^{jb}. \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g \alpha_g \mathbf{u}_g) + \nabla \cdot (\rho_g \alpha_g \mathbf{u}_g \mathbf{u}_g) = -\alpha_g \nabla p + \nabla \cdot [\alpha_g \mu_{\text{eff}}(\nabla \mathbf{u}_g + \nabla \mathbf{u}_g^T)] + \mathbf{M}_g + \rho_g \alpha_g \mathbf{g}. \quad (8)$$

式中: \mathbf{g} 为重力加速度, m/s²; μ_{eff} 为有效黏度, 由 RNG $k - \varepsilon$ 双方程模型确定, Pa·s; p 为压强, Pa; \mathbf{M}_1 为液相对气相的动量交换, N/m³; \mathbf{M}_g 为气相对液相的动量交换, N/m³. 文中考虑的气液相互作用力包括曳力、升力、虚拟质量力和湍流扩散力, 曳力采用 Schiller 和 Nauman 模型^[6], 升力采用 Tomiyama 模型^[7], 湍流扩散力采用 Simonin 模型^[8].

1.4 PBM 模型

气体体系的 PBM 模型表达式为^[9]

$$\frac{\partial}{\partial t}[n(V, t)] + \nabla \cdot [\mathbf{u}_1 n(V, t)] + [G_v n(V, t)] = B_{\text{ag}}(V, t) + B_{\text{br}}(V, t) - D_{\text{ag}}(V, t) - D_{\text{br}}(V, t). \quad (9)$$

其中: $n(V, t)$ 为气泡的数量密度; \mathbf{u} 为气泡的速度. 等号右端第 1 项至第 4 项分别为聚并生成项, 聚并消失项, 破碎生成项, 破碎消失项. 本文聚并和破碎模型采用 Luo 模型^[10].

1.5 边界条件及相关参数

钢包顶部出口采用压力出口边界条件, 底部通过透气砖吹入氩气, 采用速度进口, 壁面采用无滑移边界条件, 近壁面液相湍流模拟采用标准壁面函数. 初始时间步长为 0.01 s. 气泡数量守恒方程、动量守恒方程、 $k - \varepsilon$ 湍流方程的对流项都采用二阶迎风离散格式, 体积分率守恒方程采用 QUICK 离散格式. 模型计算参数如下: 钢包底部直径 2 000 mm, 钢包倾斜角 2.34°, 熔池深度 2 150 mm, 透气砖直径 100 mm, 氩气密度 1.623 kg/m³, 氩气黏度 2.13×10^{-5} Pa·s, 钢液密度 7 800 kg/m³, 钢液黏度 0.006 2 Pa·s, 表面张力(钢液/氩气)为 1.5 N/m, 气体流量 420 L/min, 气泡直径 5 ~ 20 mm, 气泡分组为 4, 初始气泡直径 5 mm, 搅拌器的额定功率 250 kW, 工作电压 380 V, 电流频率 2 Hz, 工作电流 800 A 或 1 000 A, 钢液、空气和线圈的相对磁导率为 1, 铁芯的相对磁导率为 1 000, 钢液的电阻率 1.44×10^{-6} Ω·m, 铁芯的电阻率为 1.67×10^{-8} Ω·m.

电磁搅拌器采用集中式绕组, 搅拌器由 4 个

线圈组成,采用正弦交流电,线圈之间相位差为 90° 。电磁搅拌钢包模型示意图如图 1 所示。

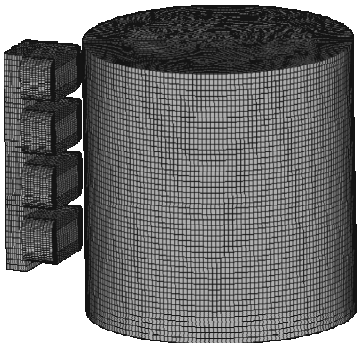


图 1 电磁搅拌钢包模型示意图

Fig. 1 Schematic model of electromagnetic stirring ladle

2 结果分析与讨论

2.1 模型验证

图 2 表明,当电磁搅拌频率为 5 Hz,电流为 500 A 时,结晶器中心线上磁感应强度实测结果和计算结果基本吻合。实验结果和计算结果之间的差异主要来自于在数值模拟中对结晶器的简化,例如没有考虑结晶器内冷却管的结构,将结晶器作为一块铜板考虑。结晶器中心线上磁感应强度呈高斯分布,在结晶器中心线上 0.5 m 处磁场强度最大,约为 30 mT。同时,为了验证 PBM 模型的正确性,将数值结果与肖泽强 60 t 吹氩钢包液面水平流速进行了对比,计算结果与实验结果符合得较好^[11]。

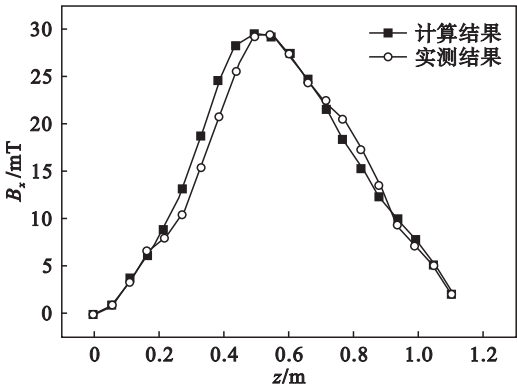


图 2 结晶器中心线上磁感应强度分布

Fig. 2 Distribution of magnetic flux density along the axis of mold

2.2 行波电磁搅拌下钢包内磁场和流场

图 3 是加载电流为 1 000 A、不同搅拌模式下钢包中心纵截面时均磁感应强度分布矢量图。靠近壁面磁感应强度较大,在钢包直径方向上衰减很快。图 3a 和图 3b 还表明,钢包内磁场形成了两

个回路,因为加载了 4 个线圈,相邻两个线圈相位角相差 90° ,第 2 个与第 3 个线圈和第 1 个与第 4 个线圈分别形成了两个磁场回路。

图 4 是加载电流为 1 000 A,频率 $f=2$ Hz 时,不同搅拌模式下钢液中心纵截面电磁力分布。钢包内电磁力的方向总体向上(图 4a)或向下(图 4b),钢液内部的电磁力主要集中在靠近电磁搅拌器一侧,并且电磁力在钢包径向衰减很快,但是正是这部分电磁力驱动靠近这一侧壁面的钢液进行流动,使钢包内产生一个大的回流区。

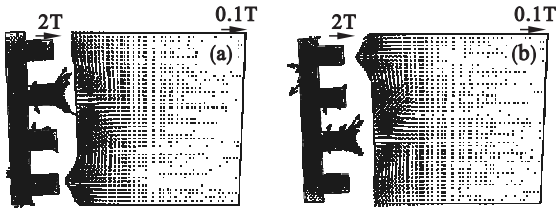


图 3 不同搅拌模式下磁场分布

Fig. 3 Magnetic field distribution in different stirring modes

(a)一向上搅拌;(b)一向下搅拌。

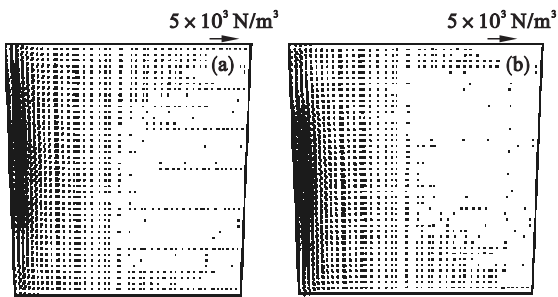


图 4 不同搅拌模式下电磁力分布

Fig. 4 Electromagnetic force distribution in different stirring modes

(a)一向上搅拌;(b)一向下搅拌。

图 5a 为不加电磁搅拌条件下底吹氩钢包内流场分布。在氩气泡的带动下,钢包内形成了两个左右对称的回流区,最大钢液速度位于气液混合区。图 5b 和图 5c 是电流为 1 000 A,电磁搅拌器搅拌方向分别为向上和向下时钢包内中心纵截面钢液速度分布。当采用向上搅拌模式时,电磁力驱动钢液向搅拌器一侧运动,在钢包中心轴线偏向搅拌器区域形成一个大的回流场;当采用向下搅拌模式时,电磁力驱使钢液向远离搅拌器一侧运动,在钢包内形成一个大的回流区,并在远离搅拌器的液面角部诱导出一个小的回流区。

2.3 行波电磁搅拌下钢包气泡特性

2.3.1 电流对气泡尺寸分布的影响

图 6 是电磁搅拌器电流为 800 A 和 1 000 A 时钢包中心截面含气率分布与气泡直径分布。在

水平方向上,气液两相区中心处的含气率较大;随着由中心向气液两相区交界处移动,含气率逐渐减小.电磁搅拌器电流为 1 000 A 的气泡扩散区域大于 800 A 的气泡扩散区域.并且随着钢包高度增加,气泡的扩散行为越明显.在垂直方向上,搅拌电流越大,气液两相区域偏转程度越大.这是因为电流越大,作用在钢液上电磁力越大,导致钢液流速增大,气泡运动路径就相应增加,因而气液两相区域的偏转程度也随之增大.图 6b 和图 6d 表明,气液两相区中心区域气泡直径较大,而气液两相区边界处直径较小.且随着距气液两相区中心距离增大,气泡直径逐渐减小;而且电流越大,气液两相区中心大气泡分布区域也越大,这是因

为相对于 800 A 电流的情况,当电流为 1 000 A 时,钢液速度较大,钢液湍动程度增大,导致钢液气泡碰撞聚合几率增加,所以大气泡分布比电流为 800 A 时的大气泡分布广.

图 6b 和图 6d 还表明,大气泡多靠近钢包中心一侧(气液两相区内弧侧),大部分小气泡多靠近电磁搅拌器一侧(气液两相区外弧侧),并且电流越大,这种现象就越明显.产生这种现象的原因是在电磁场的驱动下,钢液向上运动,导致在气液两相区的右侧形成了一个大的循环流动区域.由于大气泡具有较大的上浮速度,因此其分布就偏向钢包中心轴线;反之,小气泡分布偏向电磁搅拌器一侧的包壁.

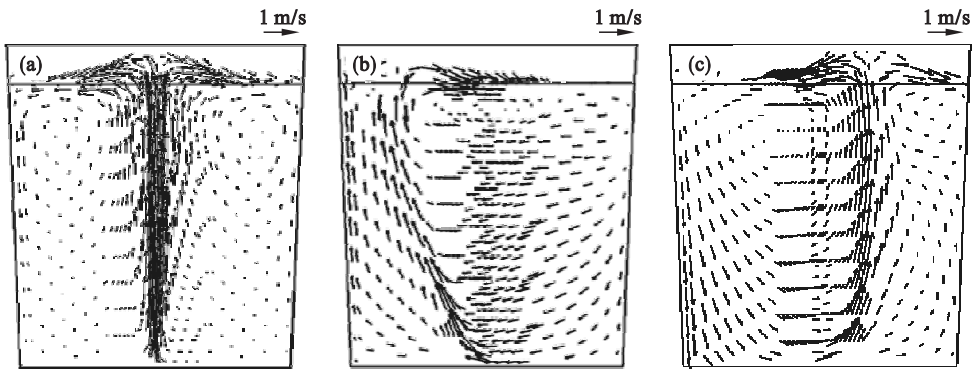


图 5 不同条件下钢包内钢液流场
Fig. 5 Flow field of molten steel in ladle under different conditions
(a) — 无电磁搅拌; (b) — 向上搅拌; (c) — 向下搅拌.

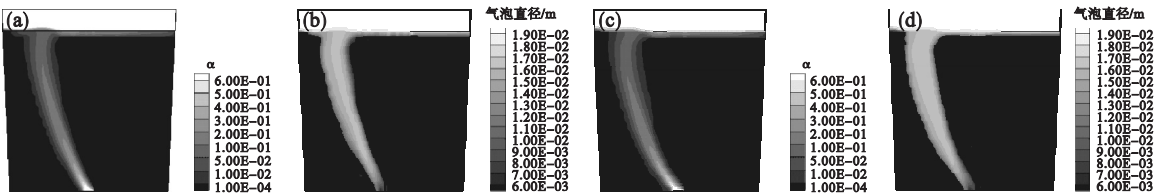


图 6 电流为 800 A 和 1 000 A 时含气率与气泡直径分布
Fig. 6 Distribution of gas volume fraction and bubble Sauter diameter with $I=800$ A and $I=1\,000$ A
(a) — 800 A 时含气率; (b) — 800 A 时直径分布; (c) — 1 000 A 时含气率; (d) — 1 000 A 时直径分布.

图 7 表明,当熔池深度 $H=2.05$ m 时,在 1 000 A 电流时的气泡径向分布范围大于电磁搅拌器电流为 800 A 的气泡径向分布范围.在 800 A 电流时,钢包中气泡最大直径为 16.4 mm,电流为 1 000 A 时,钢包中气泡最大直径为 16.8 mm;这表明电流越大,钢包中最大气泡的直径也越大.但是电流大小对气泡最大直径的影响不明显.这是因为在 PBM 模型中,气泡的聚并及破碎速率仅与湍动能耗散率有关,而电磁力影响区域仅局限于靠近钢包壁的一薄层区域,所以电流大小对气泡的最大直径贡献较小.

2. 3. 2 搅拌方向对气泡尺寸分布的影响

图 8a,图 8b 是电流为 1 000 A 采用向下搅拌模式时钢包内中心截面含气率与直径分布.对比图 6 和图 8 可知,电磁搅拌器向上搅拌和向下搅拌使气泡偏转方向正好相反.当采用向下搅拌时,由于靠近搅拌器一侧的钢液速度比远离搅拌器一侧的钢液速度大,造成搅拌器一侧的气泡聚并速率大于远离搅拌器一侧,故电磁搅拌器向下搅拌时气液两相中心区域大气泡直径分布区域小于向上搅拌时的大气泡直径分布区域.图 6 和图 8 还表明,大气泡偏转程度小于小气泡,大气泡偏向钢

包中心一侧. 这是因为流场对小气泡的影响要大于大气泡,即小气泡的跟随性要优于大气泡,故大部分小气泡偏转程度大,而大气泡偏转程度小.

图 8c 给出熔池高度在 $H=2.05\text{ m}$ 时电磁搅拌器不同搅拌模式下径向气泡直径分布. 当采用向上搅拌模式时,钢包中气泡最大直径为 16.8 mm ;当采用向下搅拌模式时,钢包中气泡最大直径为 16.5 mm . 这是因为钢包向上搅拌时,气泡靠近搅拌器一侧,导致在该侧的气泡聚并速率大于远离搅拌器一侧的气泡聚并速率,故引起气泡最大直径的变化.

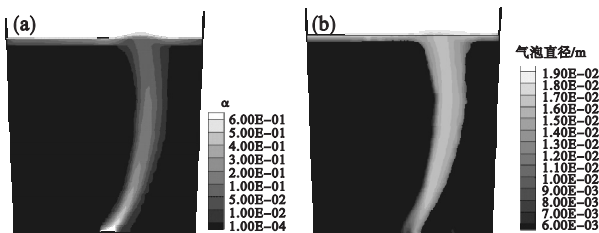


图 8 搅拌器向下搅拌时含气率和气泡直径分布及不同搅拌模式在 $H=2.05\text{ m}$ 时的径向气泡直径分布
Fig. 8 Distribution of gas volume fraction and bubble Sauter diameter with downward stirring and the radial bubble Sauter diameter distributions of upward/downward stirring at $H=2.05\text{ m}$

(a)—含气率; (b)—气泡直径分布; (c)—不同搅拌模式下径向气泡直径分布.

3 结 论

1) 当电磁搅拌采用向上搅拌时,其磁场和电磁力分布与向下搅拌模式的磁场和电磁力分布相反. 搅拌器向上搅拌时,电磁力使钢液向搅拌器一侧运动,并且在钢包内形成一个大回流区;而搅拌器向下搅拌时,驱使钢液向远离搅拌器一侧运动,使钢包内形成了一个大的回流区和一个小的回流区.

2) 钢包内气泡分布为气液两相区中心区域气泡直径最大,气液两相区边界处直径较小,从气液两相区中心到气液边界气泡直径逐渐减小.

3) 电流越大,气液两相区域在垂直方向上偏转程度越大,气液两相区中心大气泡分布区域也越大.

4) 电磁搅拌器向下搅拌时气液两相中心区域大气泡直径分布区域小于向上搅拌. 大气泡偏转程度小于小气泡,大气泡偏向钢包中心一侧.

参考文献:

[1] Chung S L, Shin Y H, Yoon J K. Flow characteristics by induction and gas stirring in ASEA-SKF ladle [J]. *ISIJ International*, 1992, 32(12): 1287–1296.
[2] Alexiadis A, Gardin P, Domgjn J F. Spot turbulence, break-up and coalescence of bubbles released from a porous plug

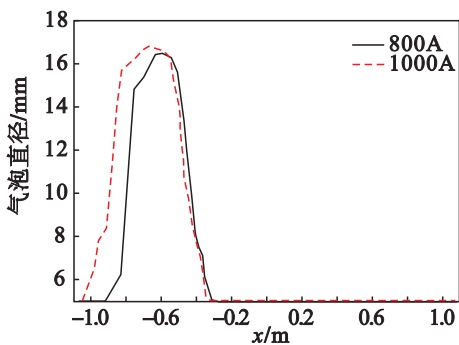
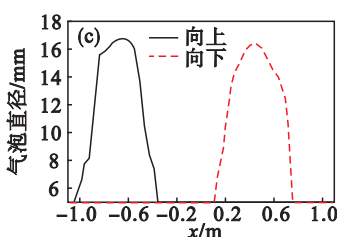


图 7 高度为 $H=2.05\text{ m}$ 时电流 800 A 与 $1\,000\text{ A}$ 下径向气泡直径分布对比

Fig. 7 Comparison of the radial bubble Sauter diameter distributions when $I=800\text{ A}$ and $I=1\,000\text{ A}$ at $H=2.05\text{ m}$



injector into a gas-stirred ladle [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2004, 35(5): 949–956.
[3] Li L M, Liu Z Q, Li B K, et al. Water model and CFD-PBM coupled model of gas-liquid-slag three-phase flow in ladle metallurgy [J]. *ISIJ International*, 2015, 55(7): 1337–1446.
[4] Sand U, Yang H L, Eriksson J E, et al. Numerical and experimental study on fluid dynamic features of combined gas and electromagnetic stirring in ladle furnace [J]. *Steel Research International*, 2009, 80(6): 441–449.
[5] Pal M, Jonsson P. Multiphysics modeling of an induction-stirred ladle in two and three dimensions [J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2012, 70: 1378–1392.
[6] Schiller L, Naumann Z. A drag coefficient correlation [J]. *Z Ver Deutsching*, 1935, 77: 318–320.
[7] Tomiyama A. Struggle with computational bubble dynamics [J]. *Multiphase Science and Technology*, 1998, 10(4): 369–405.
[8] Simonin O, Viollet P L. Predictions of an oxygen droplet pulverization in a compressible subsonic coflowing hydrogen flow [J]. *Numerical Methods for Multiphase Flows*, 1990, 91(2): 65–82.
[9] Fluent Inc. Fluent 14.0 user manual [EB/OL]. [2016–07–16]. <https://zh.scribd.com/doc/140163383/Ansys-fluent-14-0-Users-Guide>.
[10] Luo H. Coalescence, breakup and liquid circulation in bubble column reactors [D]. Trondheim; Norwegian Institute of Technology, 1993.
[11] 勾大钊. 电磁搅拌钢包内钢液混合及气泡聚并破裂行为 [D]. 沈阳: 东北大学, 2016.
(Gou Da-zhao. Mixing characteristics of molten steel and bubble breakup and coalescence in electromagnetic stirring ladle [D]. Shenyang: Northeastern University, 2016.)