

连铸结晶器内非金属夹杂物运动行为模拟

雷洪, 朱苗勇, 赫冀成

(东北大学材料与冶金学院, 辽宁 沈阳 110006)

摘要: 通过联立求解 Navier-Stokes 方程和颗粒运动轨迹方程来确定非金属夹杂物在钢液中的上浮速度, 对板坯结晶器内夹杂物的运动规律进行了模拟, 并用个别实验结果进行了验证. 结果表明: 夹杂物颗粒粒径越大, 浮力作用越明显, 其下潜深度越小, 停留时间缩短, 夹杂物上浮的可能性越大. 为保证夹杂物顺利上浮至渣层被去除, 在本计算条件下, 连铸机垂直段长度应大于 2.5 m.

关键词: 连铸; 结晶器; 非金属夹杂物; 数值模拟

中图分类号: TF777 文献标识码: A 文章编号: 1009-606X(2001)02-0138-04

1 前言

钢中非金属夹杂的形态、数量和分布作为衡量钢产品质量的一项重要指标而日益受到重视. 以往的研究工作大都通过取样分析确定夹杂物的来源, 以便采取措施控制大包渣、中间包渣和结晶器保护渣的卷入, 减少耐火材料的侵蚀和剥落^[1-5]. 由于难以找到密度约为水的一半的细小颗粒模拟夹杂物作实验研究, 大多数研究者^[6-10]主要采用数值模拟方法研究夹杂物的运动行为. 本文在计算结晶器内钢液流场的基础上, 联立求解三维夹杂物运动轨迹方程来研究夹杂物的运动规律, 并利用水模型对计算结果进行了个别验证.

2 数学模型

2.1 基本方程

连续方程:
$$\nabla(\rho_f \vec{U}_f) = 0, \tag{1}$$

动量方程:
$$\nabla(\rho_f \vec{U}_f \vec{U}_f) = -\nabla p + \nabla(\mu_{\text{eff}} \nabla \vec{U}_f) + \rho_f \vec{g} + \vec{J} \times \vec{B}, \tag{2}$$

式中 μ_{eff} 由 Launder 和 Spalding 提出的 $k-\varepsilon$ 双方程确定^[11].

夹杂物运动轨迹方程:
$$\frac{d\vec{X}}{dt} = \vec{U}_p, \tag{3-a}$$

$$\frac{1}{6} \pi d_p^3 \rho_p \frac{d\vec{U}_p}{dt} = \frac{1}{8} \pi d_p^2 C_D \rho_f |\vec{U}_f - \vec{U}_p| (\vec{U}_f - \vec{U}_p) - \frac{1}{12} \pi d_p^3 \rho_f \frac{d\vec{U}_p}{dt} + \frac{1}{6} \pi d_p^3 \rho_f \vec{g} - \frac{1}{6} \pi d_p^3 \rho_p \vec{g}, \tag{3-b}$$

式(3-b)中右边第 1 项表示由于夹杂物颗粒和钢液之间的速度差而产生的流体粘性阻力, 第 2 项代表由于颗粒与钢液之间的加速度差而产生的虚拟质量力, 最后两项分别是颗粒自身的重力及其所受的浮力; 式中的阻力系数 C_D 是颗粒 Reynold 数的函数^[10], 计算条件如表 1 所示.

表 1 计算条件

Table 1 Calculation conditions

	Water model	Actual system
Mould (mm)	500×77×1800	1500×230×3500
Density of inclusion (kg/m ³)	700	3960
Density of liquid (kg/m ³)	1000	7100
Laminar viscosity of liquid (Pa·s)	0.001	0.0061

收稿日期: 1999-11-29, 修回日期: 2000-04-29

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(编号: 59734080); 国家重点基础研究发展规划资助项目(编号: G1998061510)

作者简介: 雷洪(1973-), 男, 湖北省汉川市人, 博士研究生, 钢铁冶金专业.

2.2 基本假设和边界条件

假设结晶器内钢液的流动为稳态不可压缩流动, 不考虑自然对流、弯月面和保护渣对钢液流动的影响; 非金属夹杂物视为球形, 且其密度和直径在运动过程中保持不变. 流场的边界条件见文献[12-14]. 夹杂物的初速度等于水口出口处钢液流速, 当其到达液面或水口壁面处时, 即被保护渣层或水口壁所吸附而被去除, 当其到达结晶器壁处即被凝固层俘获.

3 计算方法

流场采用半隐式压力校正方法求解, 收敛判断标志为压力修正方程中的源项 $b < 10^{-7}$ 和进出口流量差与进口流量之比小于 1%; 夹杂物运动轨迹方程采用变步长的 Gill 方法求解, 初始时间步长 h 取 5×10^{-5} s, 收敛判断标志为

$$\max_{1 \leq i \leq 3} \left| U_{pi} \left(\frac{h}{2^k} \right) - U_{pi} \left(\frac{h}{2^{k-1}} \right) \right| < 5 \times 10^{-4},$$

否则时间步长自动减半. 所有程序均采用 FORTRAN 语言编制, 每次跟踪 35 个粒子. 利用 PC586 微机运算, 每个方案占用 CPU 时间约为 20 h.

4 结果与讨论

4.1 夹杂物的上浮

图 1 表示夹杂物颗粒在钢液中的上浮速度与夹杂物颗粒直径、密度之间的关系. 夹杂物的上浮速度随其密度增加而减小, 随其粒径增大而增大, 其中粒径是决定因素. 对于 Al_2O_3 夹杂(密度为 3960 kg/m^3), 当拉坯速度达到 1.2 m/min 时, 上浮的临界直径约为 $250 \mu\text{m}$, 拉速为 1.6 m/min 时, 临界直径约为 $350 \mu\text{m}$, 拉速为 2.0 m/min 时, 临界直径约为 $450 \mu\text{m}$, 即随着拉速的提高, 夹杂物上浮条件恶化, 越来越多的夹杂物滞留在钢中.

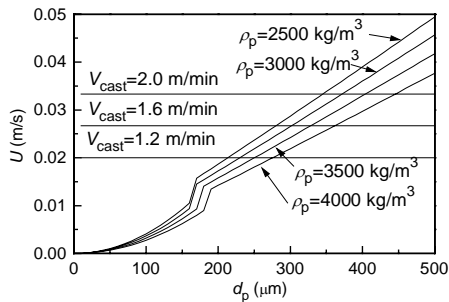


图 1 夹杂物在钢液中的上浮速度与颗粒直径、密度之间关系的模拟结果

Fig.1 Relation between rising velocity of inclusion and d_p and density

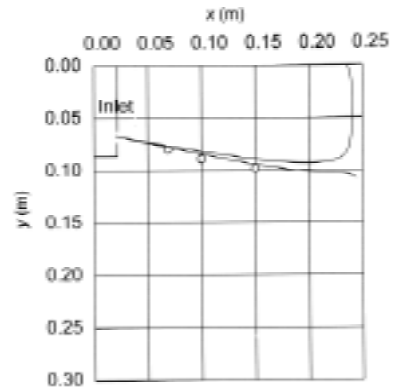


图 2 夹杂物颗粒的运动轨迹实测值与计算轨迹的比较

Fig.2 Comparison between the calculated and measured trajectory

4.2 夹杂物的运动轨迹

利用空心 Al_2O_3 颗粒($\rho_p = 7 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^3$, $d_p = 0.18 \sim 0.35 \text{ mm}$)模拟钢中夹杂物进行水模型实验. 夹杂物从水口中心加入后, 被水口出口流夹带到结晶器内, 由于是连续加入, 因此能形成稳定的夹杂物轨迹曲线. 图 2 表明计算结果与实测值基本一致.

图 3 是由数学模型计算的粒径为 100 μm 的夹杂物在有、无电磁制动条件下的运动轨迹. 从图 3(a)可以看出, 夹杂物首先在结晶器上下两个回流区^[12]内运动, 部分夹杂物逐渐脱离回旋区上浮至渣层而被去除, 另一些则被凝固壳俘获或随钢液进入液相穴深处成为钢中夹杂. 应用电磁制动后, 液态钢水在从水口流向铸坯窄面过程中速度逐渐减小^[13], 因此仅有少数夹杂物能到达凝固前沿而被捕获[图 3(b)].

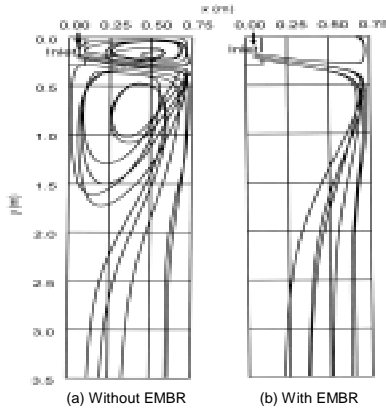


图 3 结晶器内 100 μm 夹杂物运动轨迹模拟结果
Fig.3 Trajectories of inclusions with diameter 100 μm in the mould by numerical simulation

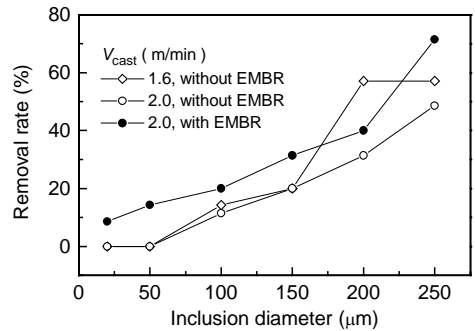


图 4 夹杂物去除率与粒径之间关系的模拟结果
Fig.4 Relation between the inclusion removal rate and its diameter by numerical simulation

图 4~6 是计算的夹杂物去除率、下潜深度、停留时间与颗粒粒径间的关系, 其定义分别如下:
夹杂物去除率=进入保护渣层的夹杂物个数/由中间包进入结晶器的夹杂物个数;
平均下潜深度=夹杂物在连铸机垂直段内所能达到最大深度的总和/夹杂物个数;
平均停留时间=夹杂物在连铸机垂直段内运动时间的总和/夹杂物个数.

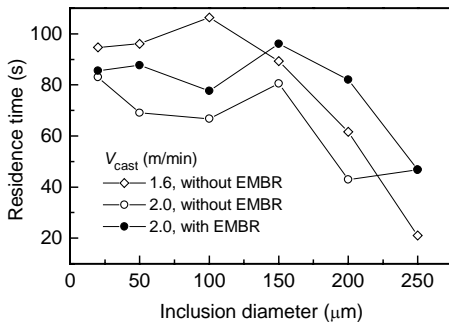


图 5 夹杂物停留时间与粒径关系的模拟结果
Fig.5 Relation between residence time of inclusion and its diameter by numerical simulation

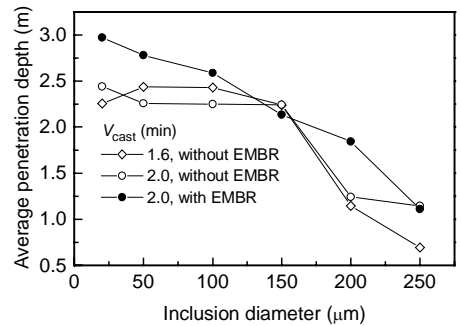


图 6 夹杂物下潜深度与粒径关系的模拟结果
Fig.6 Relation between average penetration depth of inclusion and its diameter by numerical simulation

随着颗粒粒径的增加, 上浮速度加快, 其下潜深度、停留时间也相应减小, 夹杂物易被去除; 随着拉坯速度的增加, 被钢液夹带的夹杂物冲击凝固坯壳的速度也增大, 夹杂物也更易被凝固壳俘获; 传统的结晶器无法去除直径小于 50 μm 的夹杂物(图 4), 150 μm 以下的夹杂物在结晶器内的平均停留时间较长, 约为 80 s(图 5). 为保证夹杂物顺利上浮至渣层而去除, 连铸机垂直段的长度应大于 2.5 m(图 6).

5 结 论

在本计算条件下,数值模拟结果表明:

- (1) 结晶器内非金属夹杂物的上浮速度与夹杂物的密度和粒径有关,粒径是决定性因素。
- (2) 夹杂物颗粒越大,浮力作用越明显,在结晶器内的下潜深度越小,停留时间也随之缩短,夹杂物去除率也越大。
- (3) 当拉坯速度达到 1.6 m/min 时, Al_2O_3 夹杂的临界上浮直径约为 350 μm 。
- (4) 为了保证夹杂物能顺利上浮至渣层而去除,连铸机垂直段的长度应大于 2.5 m。

符号表:

B 磁感应强度(T)	C_D 阻力系数	d 直径(m)	g 重力加速度 (m/s^2)
h 时间步长	J 感生电流密度 (A/m^2)	k 湍动能 (m^2/s^2)	p 压力 (N/m^2)
t 时间 (s)	U 速度 (m/s)	V_{cast} 拉速 (m/min)	X 位移 (m)
湍动能耗散率 (m^2/s^3)	μ_{eff} 有效粘度系数 (Pa·s)	密度 (kg/m^3)	
上下标			
f 流体	i 坐标系方向	K 迭代次数	p 夹杂颗粒

参考文献:

- [1] 熊井浩, 应本健, 松永久, 等. 连铸 Al-Si キルド钢の大型非金属介在物に関する研究[J]. 铁と钢, 1974, 60(7): 926-942.
- [2] 植田嗣治, 九川雄净, 丰田守. 湾曲形スラブ用连铸机における内部介在物について [J]. 铁と钢, 1974, 60(7): 943-952.
- [3] Byrne M, Fenicle T W, Cramb A W. The Sources of Exogenous Inclusions in Continuous Cast, Aluminum-killed Steels [J]. Iron and Steel Maker, 1988, 15(6): 41-50.
- [4] Byrne M, Cramb A W. Operating Experience with Large Tundishes [J]. Iron and Steel Maker, 1988, 15(10): 45-53.
- [5] 王岩春, 陈宏豫, 倪爱云. 板坯连铸过程中非金属夹杂物形态研究 [J]. 钢铁, 1997, 32(4): 24-26.
- [6] 谷口尚司, 菊池淳. 溶钢の流わ場における非金属介在物の動的挙動 [J]. CAMP-ISIJ, 1996, 9: 594-595.
- [7] Joo S, Han J W, Guthrie R I L. Inclusion Behavior and Heat-transfer Phenomena in Steelmaking Tundish Operations: Part II Mathematical Model for Liquid Steel in Tundish [J]. Metallurgical Transactions, 1993, 24B(10): 767-777.
- [8] Nakajim K, Okamura K. Inclusion Transfer Behavior Across Molten Steel-Slag Interface [A]. ISIJ. 4th International Conference on Molten Slags and Fluxes, [C]. Sendai: Sendai International Center, 1992. 505-515.
- [9] Santis M D, Ferretti A. Thermo-fluid-dynamics Modeling of the Solidification Process and Behaviour of Nonmetallic Inclusions in the Continuous Casting Slabs [J]. ISIJ International, 1996, 36(6): 673-680.
- [10] Tozawa H, Kitaoka H, Sorimachi K, et al. Flow Control of Molten Steel in Continuous Casting Mold by Electromagnetic Brake [A]. ISIJ. Proceedings of the Sixth International Iron and Steel Congress [C]. Nagoya: Nagoya Congress Center, 1990. 438-445.
- [11] Launder B E, Spalding D B. The Numerical Computation of Turbulent Flow [J]. Computer Method in Applied Mechanics and Engineering, 1974, 15(3): 269-282.
- [12] 朱苗勇, 刘家奇, 肖泽强. 板坯连铸结晶器内钢液流动过程的模拟仿真[J]. 钢铁, 1996, 31(8): 23-27.
- [13] 朱苗勇, 肖泽强. 钢的精炼过程数学物理模拟[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1998. 99-100.
- [14] 雷洪, 朱苗勇, 王文忠. 板坯结晶器内电磁制动过程流场的数值模拟 [J]. 化工冶金, 1999, 20(2): 193-198.

Simulation of Nonmetallic Inclusion Behavior in the Continuous Casting Mould

LEI Hong, ZHU Miao-yong, HE Ji-cheng

(School of Materials & Metallurgy, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110006, China)

Abstract: In the present study, by solving turbulent flow of molten metal and inclusion trajectory, the rising velocity of inclusion in molten steel was calculated, and the behavior of moving inclusion in the slab continuous casting mould was studied numerically. The predicted result was validated experimentally. The numerical results show that the larger the diameter of the inclusion, the greater the effect of the buoyancy, the shorter the penetration depth, the less the residence time in the mould, and the higher removal rate of the inclusion. The vertical depth of the continuous casting machine should be more than 2.5 m in order to help the inclusion to float up to the molten flux layer.

Key words: continuous casting; mould; nonmetallic inclusion; numerical simulation