

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2019.09.004

连铸薄板坯结晶器内夹杂物运动的模拟研究

张琦, 李欢, 吴滢帮, 尹相恺

(青岛理工大学机械与汽车工程学院, 山东 青岛 266520)

摘要: 采用水模拟和数值模拟相结合的方法分析了连铸薄板坯结晶器内夹杂物的运动状况。通过 Proanalyst 软件分析高速显微摄像仪拍摄的夹杂物运动图, 获得了夹杂物在结晶器内的运动路径; 同时, 采用拉格朗日法计算获得了结晶器内夹杂物的运动路径, 将二者相互对比, 分析了拉速和浸入式水口深度对夹杂物运动轨迹的影响。结果表明: 夹杂物在结晶器的运动轨迹复杂; 拉速越小, 浸入水口的深度越浅, 夹杂物越容易在上回流区盘旋; 拉速越大, 浸入水口的深度越深, 夹杂物容易在下回流区盘旋; 增大夹杂物在结晶器内的停留时间有利于防止夹杂物进入铸坯内形成缺陷。

关键词: 连铸薄板坯; 结晶器; 夹杂物; 运动轨迹

中图分类号: TF777

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2019)09-0899-05

Simulation Study of Inclusions Motion in Thin Slab Mould for Continuous Casting

ZHANG Qi, LI Huan, WU Yanbang, YIN Xiangkai

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

Abstract: The motion of inclusions in thin slab mould was analyzed by water simulation and numerical simulation. By analyzing the motion diagram of inclusions captured by high-speed micro-camera, Proanalyst software, the motion path of inclusions in the crystallizer was obtained. At the same time, the motion path of inclusions in the mould is calculated by Lagrange method, and the influence of drawing speed and submerged nozzle depth on the motion path of inclusions are analyzed. The results show that the motion path of inclusions in the crystallizer is complex. The drawing speed is lower, the depth of dipping into the nozzle is shallower, and it is for the inclusion to circle in the upper backflow area is easier. The drawing speed is greater, the depth of the submerged nozzle is deeper, and the inclusion is easy to circle in the lower backflow area. Increasing the residence time of the inclusions in the mould can prevent the inclusions from entering into the billets and forming defects.

Key words: continuous casting thin slab; crystallizer; inclusions; trajectory

随着工业的发展,对钢的洁净度要求越来越高。影响钢的洁净度的因素主要是钢中的夹杂物,其主要以非金属化合物形式存在,如氧化物、硫化物、氮化物等。非金属夹杂物对钢的强度、塑性、韧性等性能有很大影响,如钢中的氧化物和硅酸盐等非金属夹杂物破坏了钢基体的连续性并导致了应力集中,从而降低了钢的塑性、韧性和抗疲劳性能^[1]。连铸过程在钢中夹杂物控制方面起着关键作用。作为钢液凝固前的最后一道工序,连铸过程一方面可以进一步去除夹杂物,提升钢的洁净度;另一方面可能发生二次氧化和炉渣卷入,造成钢洁净度恶化。因此,连铸过程的夹杂物控制显得尤为重要。研究发现^[2],连铸过程中钢包处理使夹杂物减少 65%~75%,中间

包可去除 20%~25%,结晶器去除 5%~10%。虽然结晶器去除夹杂物的数量较少,但是连铸结晶器是最后一步精炼环节;在此处,夹杂物要么被安全除去进入保护渣层,要么被捕进入凝固坯壳形成产品永久缺陷,因此连铸结晶器是夹杂物去除的关键环节。

对于结晶器数值模拟的研究, Yamada 等^[3]采用结晶器内电磁搅拌技术,研究了钢液在结晶器内流动对凝固壳中非金属夹杂物捕获率的影响,表明在铸坯浅层中,壳层前水平流动可以有效抑制夹杂物的聚集,减少夹杂物的数量。X. Huang 等^[4]研究了钢液在连铸结晶器中的流动行为,建立了 230 mm×1 600 mm 的三维实体模型,分析了浇注速度、喷嘴角和浸入深度对钢液流动行为的影响,结果表明在一定的浇注速度下,合适的喷嘴角和浸水深度可以为连铸生产的高效进行和工艺优化提供理论支持。王翠娜等^[5]模拟研究了板坯连铸结晶器内夹杂物的运动行为,分析了不同颗粒直径、密度、数量和不同加入位置对夹杂物上浮的影响。Lifeng Zhang 等^[6]计

收稿日期: 2019-04-10

基金项目: 青岛市应用基础研究计划资助项目(14-2-4-109-jch)

作者简介: 张琦(1979-),女,山西永济人,博士,副教授。研究

方向: 连铸工艺优化研究。电话: 0532-80698139,

E-mail: zhangqidlut@126.com

算了典型连铸结晶器内的湍流流动、气泡运动轨迹及其在结晶器内的路径长度,得到了每个气泡上夹杂物附着的概率和气泡的路径长度以及通过气泡运输去除夹杂物而引起的夹杂物分布的变化。对于结晶器水模拟实验的研究,吴哲等^[7]制作了结晶器和浸入式水口模型,对结晶器流场进行了水模拟试验,研究了不同工艺参数对结晶器流场的影响。倪冰等^[8]通过结晶器水模拟实验对3种粒径的夹杂物在不同水流量、气流量和透气方式下的去除进行了研究,结果表明在临界水流量之前,夹杂物的去除率迅速下降;随着水流量继续增加,去除率缓慢增加;吹入气体后,夹杂物的去除率比不吹气时有小幅提高。马天飞等^[9]采用水模拟实验,研究了宽板坯用浸入式水口的出口面积和出口倾角对结晶器内流场和表面波动的影响,结果表明水口出口面积比为1.8,出口倾角为0°时,液面较活跃,且下涡心位置较高,有利于钢液中夹杂物上浮及凝固壳的生长。

综上所述,前人研究了结晶器内夹杂物上浮去除的各种影响因素,如夹杂物的密度、粒径、数量和加入位置等;也研究了浸入式水口的深度、水口的出口面积和出口倾角对结晶器内流场和表面波动的影响,并利用水模拟实验进行验证。然而,对于连铸结晶器内夹杂物运动轨迹的研究不多,故本文采用水模拟和数值模拟相结合的方法分析连铸薄板坯结晶器内夹杂物的运动状况。采用 Proanalyst 软件分析高速显微摄像机拍摄的夹杂物运动图,获得夹杂物在结晶器内的运动路径;同时,采用拉格朗日法计算获得了结晶器内夹杂物的运动,将二者相互对比,分析拉速和浸入式水口深度对夹杂物运动轨迹的影响。

1 数值模型

薄板坯连铸结晶器的断面尺寸为 140 mm×35 mm,高度为 330 mm,水口的浸入深度为 100 mm,结晶器物理模型如图 1 所示。仅对流场进行分析,且不考虑温度的影响。在进行数值计算时,不考虑结晶器振动等因素对流场的影响,并假设:
①结晶器内钢液流动为粘性不可压缩的稳态流动;
②忽略结晶器弯月面的表面波动及保护渣对流动的影响;
③忽略结晶器内凝固壳的存在;
④夹杂物颗粒是很小的球体,其密度和直径在运动过程中保持不变,它随钢液流动而运动,但不影响钢液流动;
⑤不考虑夹杂物的聚合、长大和破碎,夹杂物浮到钢液液面即被清除。入口的边界条件定义在浸入式水口,设为速度入口,其速度由拉坯速度、结晶器的

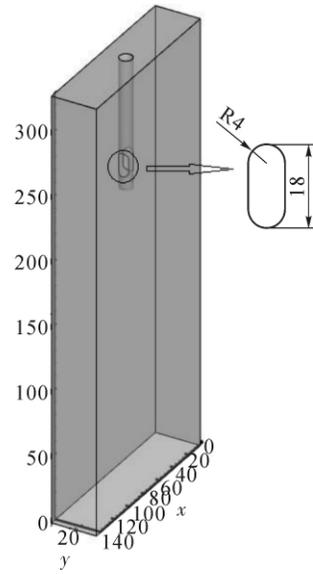


图 1 结晶器物理模型
Fig.1 Physical model of crystallizer

断面和水口的直径共同决定,同时假定入口截面上速度分布相同。出口边界定义在结晶器计算区域底部,设为压力出口,出口边界的静压设为 0。结晶器液面设为自由液面,壁面采用无滑移边界。

结晶器内钢液流动的基本方程是连续方程和动量方程。根据作用在颗粒上的力平衡,可得夹杂物的运动轨迹方程^[10]:

$$\begin{aligned} \frac{1}{6} \pi d_p^3 \rho_p \frac{du_p}{dt} = & \frac{1}{8} \pi d_p^2 C_D \rho |u - u_p| (u - u_p) \\ & - \frac{1}{12} \pi d_p^3 \rho \frac{du_p}{dt} + \frac{1}{6} \pi d_p^3 \rho g \\ & - \frac{1}{6} \pi d_p^3 \rho_p g \end{aligned} \quad (1)$$

式中,等号右边第 1 项表示流体粘性阻力,第 2 项表示虚拟质量力,第 3 项表示颗粒自身的重力,最后一项表示颗粒所受的浮力; u 为钢液的速度, m/s; u_p 为颗粒的速度, m/s; ρ, ρ_p 分别是钢液和颗粒的密度, kg/m³; d_p 为颗粒的直径, m; 阻力系数 C_D 是颗粒 Reynold 数的函数。

通过离散相与连续相的双向耦合,直到二者相互收敛。夹杂物颗粒采用面射流源,定义在浸入式水口面。为了和实验拟合,对颗粒的直径分布采用了 Rosin-Rammler 分布方法,设定最小颗粒直径、最大颗粒直径、平均颗粒直径、分布指数和颗粒直径组数目,颗粒的总数目等于尺寸分布中规定的颗粒直径组数目乘以网格面总数。数值模拟参数^[11]如表 1 所示。

2 水模拟实验

根据相似原理用水来模拟钢液在结晶器内的流动^[12-19]。在模型设计时,考虑到结晶器内流体流动是

表1 数值模拟参数
Tab.1 Numerical simulation parameter

结晶器			夹杂物		钢液	
尺寸/mm	拉速/m·min ⁻¹	浸入深度/mm	密度/kg·m ⁻³	直径范围/mm	密度/kg·m ⁻³	粘度/kg/(m·s)
140×35×330	1.0,1.2,1.4	100,140	3960	0.1~2.0	7100	0.0061

以惯性力和重力占主导地位,因此仅考虑佛鲁德准数相等即可。即: $Fr=Fr'$ 。根据 $(Fr)_m=(Fr)_p$,得出:

$$\frac{u_p^2}{gl_p} = \frac{u_m^2}{gl_m} \quad (2)$$

式中, u_p 为钢液的流速,m/s; u_m 为水的流速,m/s; l_p 为实际结晶器的长度,m; l_m 为模型结晶器的长度,m; g 为重力加速度,m/s²。

令 $\frac{l_m}{l_p} = \lambda_1$, 则

$$l_m = l_p \cdot \lambda_1, u_m = \lambda_1^{1/2} \cdot u_p \quad (3)$$

根据几何相似条件,选择模型与实物的比例为1:1,即 $\lambda_1=1$,从而可得:

$$l_m = l_p, u_m = u_p, Q_m = Q_p \quad (4)$$

本实验根据断面为140 mm×35 mm薄板坯连铸结晶器和浸入式水口的相关参数,采用1:1的比例制作结晶器和浸入式水口模型。基于相似原理,确定不同工艺状态下的试验模拟参数,如表2所示。

实验装置中,在水口的上方加上一个颗粒加入管,导管通向和水口连接的小长方体盒,可以将颗粒直接加入小长方体盒内,颗粒就会随溶液一起流入结晶器。小长方体盒的进口用布满圆孔的有机玻璃板与中间包分隔开,防止颗粒上浮到中间包影响实验。用水来模拟钢液,用氧化铝空心球模拟非金属颗粒。对于氧化铝空心球的选取,先用烧杯装入半杯水,将少许氧化铝空心球放入水中,然后进行筛选,选取一些悬浮在水中的颗粒,使模拟实验更加严谨、准确。中间包内设置缓流挡板,使中间包内溶液流动稳定;用阀门控制流速,利用水泵实现装置内溶液的循环。用Hispec4型高速显微摄像机拍摄夹杂物颗粒的运动轨迹,并用Proanalyst软件分析夹杂物的运动轨迹获得夹杂物的运动速度等信息。实验装置示意图如图2所示。

3 实验结果分析

3.1 拉速对夹杂物的影响

在不同拉速的情况下,结晶器内夹杂物的运动

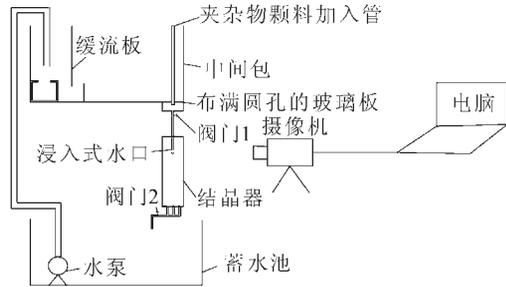
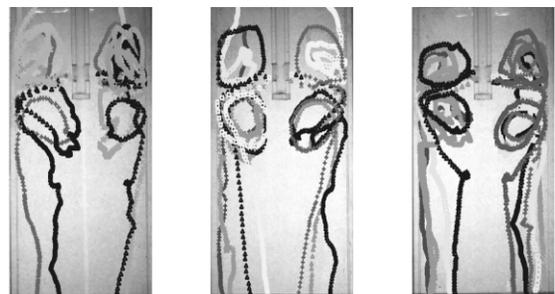


图2 水模拟实验装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of water simulation experiment device

路径分为三种情况:一部分夹杂物流入下回流区,在下回流区盘旋;一部分流入上回流区,在上回流区盘旋;一部分则直接从结晶器的出口流出。当拉速较小时,夹杂物流入上回流区的数量增多,容易在上回流区盘旋,增大了夹杂物的上浮去除率。当拉速增大时,流入上回流区的夹杂物数量减少,流入下回流区的数量增多,使夹杂物在下回流区盘旋的数量增多,盘旋的时间变长;使夹杂物直接从结晶器出口流出的数量增多,从而导致夹杂物的上浮率减小,影响夹杂物的上浮去除。另外,进入下回流区的颗粒很难上浮到上回流区,也会使夹杂物的上浮率减小。水模拟和数值模拟不同拉速下夹杂物在结晶器内的运动轨迹如图3和图4所示。



(a)拉速1 m/min (b)拉速1.2 m/min (c)拉速1.4 m/min

图3 水模拟结果

Fig.3 Water simulation results

通过提取夹杂物运动速度的数据并进行分析可知,夹杂物的运动速度在浸入水口流出的速度最大,随着在结晶器内运动时间的增加流出速度逐渐变

表2 水模拟参数
Tab.2 Water simulation parameter

结晶器			夹杂物		水	
尺寸/mm	拉速/m·min ⁻¹	浸入深度/mm	密度/kg·m ⁻³	直径范围/mm	密度/kg·m ⁻³	粘度/kg/(m·s)
140×35×330	1.0,1.2,1.4	100,140	700	0.1~2.0	1000	0.001

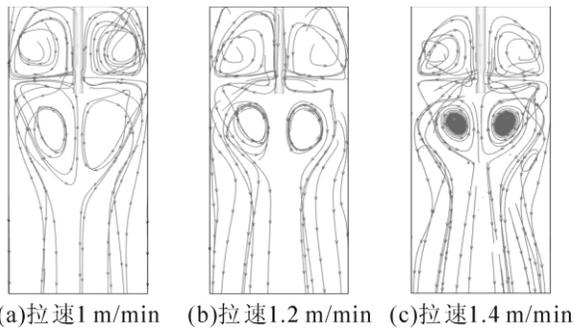


图4 数值模拟结果
Fig.4 Numerical simulation results

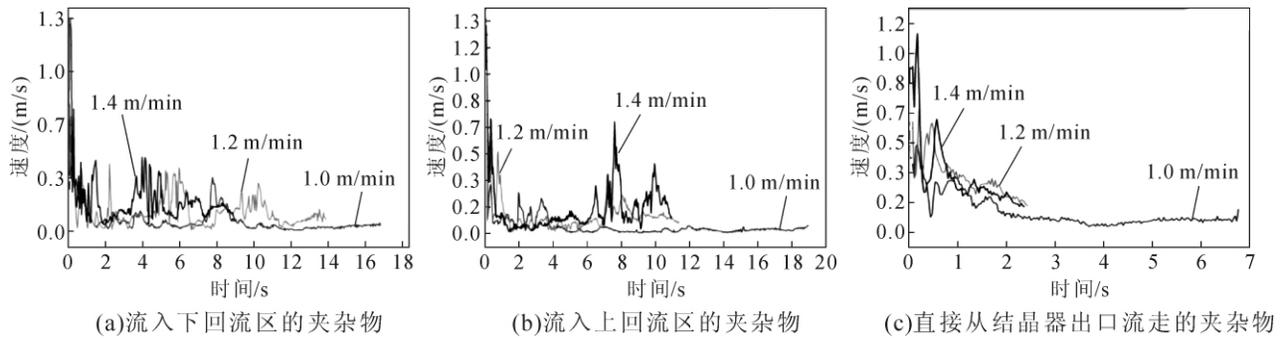
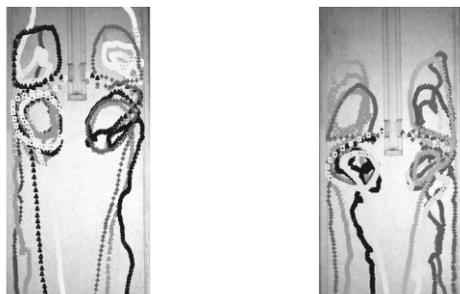


图5 不同拉速下夹杂物的速度变化图
Fig.5 Velocity variation diagram of inclusions at different drawing speeds

3.2 水口的浸入深度对夹杂物的影响

在不同浸入水口深度的情况下，夹杂物在结晶器内的运动轨迹与上述不同拉速情况下的运动路径一样，同样分为三种路径。当水口浸入深度越浅时，夹杂物在上回流区盘旋的中心越靠近自由液面，下回流区的中心越远离结晶器的出口，越有利于夹杂物上浮去除。当水口浸入深度增加时，夹杂物在上下回流区盘旋的中心逐渐下降，使在上回流区盘旋的夹杂物上浮率减小，影响其上浮去除；使在下回流区盘旋的夹杂物越容易从结晶器出口流出；使从结晶器出口直接流走的夹杂物数量增多。夹杂物的数量流出增多后，影响了钢液的洁净度，造成铸坯的永久缺陷。水模拟和数值模拟不同水口浸入深度下夹杂物运动轨迹如图6和图7所示。



(a)水口浸入深度为100 mm (b)水口浸入深度为140 mm
图6 水模拟结果
Fig.6 Water simulation results

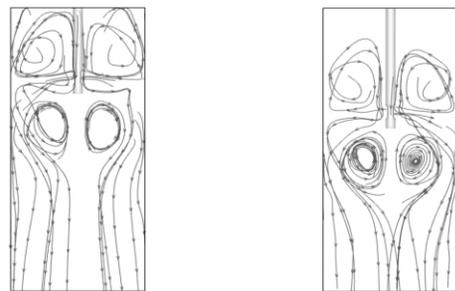


图7 数值模拟结果
Fig.7 Numerical simulation results

通过提取水口浸入深度为 100 mm 和 140 mm 情况下的夹杂物运动速度分析得到：夹杂物的运动速度在浸入水口流出的速度最大；随着在结晶器内运动时间的增加，速度逐渐变小。对于流入下回流区的夹杂物，随着水口浸入深度的增加，对运动速度和变化幅度影响减小，使夹杂物在结晶器盘旋停留的时间变短。对于流入上回流区的夹杂物，随着浸入深度的增加，夹杂物的运动速度和变化幅度影响比较大。对于直接从结晶器出口流走的夹杂物，随着浸入水口深度的增加，减小了夹杂物在结晶器内的运动时间，使夹杂物更容易从出口流走。不同浸入深度下夹杂物运动速度变化如图8所示。

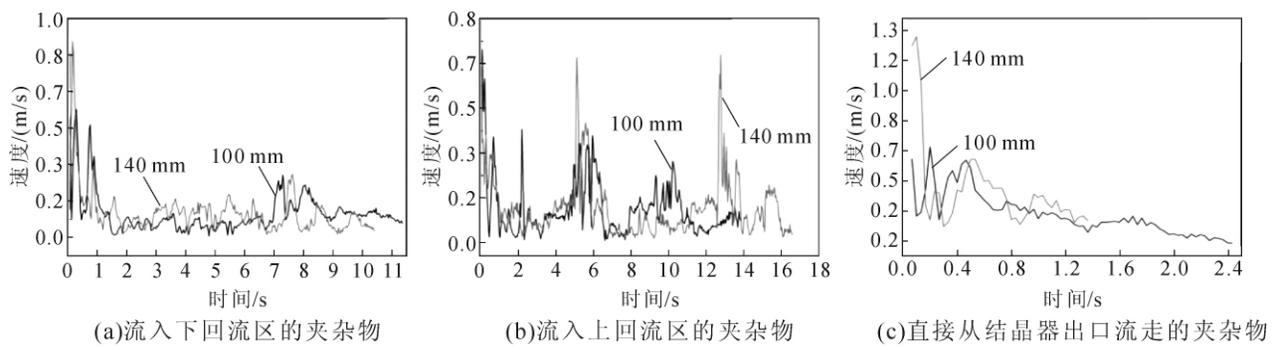


图8 不同水口浸入深度下夹杂物的运动速度变化图

Fig.8 Diagram of velocity variation of inclusion under different water inlet immersion depths

4 结论

(1) 结晶器内夹杂物的运动路径分为3种情况:一部分夹杂物流入下回流区,在下回流区盘旋;一部分流入上回流区,在上回流区盘旋;一部分则直接从结晶器的出口流出。

(2) 拉速越小,夹杂物越容易在上回流区盘旋,有利于提高上浮去除率;拉速越大,夹杂物越容易在下回流区盘旋,增大了夹杂物的流出率,影响了钢液的洁净度。

(3) 水口浸入深度越浅,夹杂物在上回流区盘旋的中心离自由液面越近,下回流区的中心离结晶器出口越远,越有利于增大夹杂物的上浮去除率,减小夹杂物的流出率;水口浸入深度越深,夹杂物在上下回流区盘旋的中心越低,使其的去除率减小,流出率增大,从而影响钢液的洁净度。

(4) 夹杂物的运动速度在浸入水口流出的速度最大;随着在结晶器内运动时间的增加,速度逐渐变小。随着拉速的增加,夹杂物的运动速度增加,变化幅度增大,不利于夹杂物的去除;随着水口浸入深度的增加,夹杂物在结晶器内的盘旋停留时间变短,增大了夹杂物的流出率,造成铸坯的永久缺陷。

参考文献:

[1] 张立峰,王新华. 连铸钢中的夹杂物[J]. 山东冶金, 2005, 27(2): 1-5.

[2] Yanbin Yin, Jiongming Zhang, Shaowu Lei, et al. Numerical Study on the Capture of Large Inclusion in Slab Continuous Casting with the Effect of In-mold Electromagnetic Stirring[J]. ISIJ International, 2017(347):1-10.

[3] Yamada, Kiyose, Fukuda, et al. Simulation of coagulation of non-metallic inclusions in tundish and their trapping into solidified shell in continuous casting mould[J]. Iron Making & Steel Making, 2003, 30(2):151-157.

[4] X Huang, L H Feng, W D Diao. Simulation research on molten steel flowing behavior in wide slab continuous casting mold [J]. Metallurgical, 2019, 58(1-2):43-46.

[5] 王翠娜,温良英,陈登福,等. 板坯连铸结晶器内夹杂物运动行为的数值模拟[J]. 过程工程学报, 2010, 10(s1):201-205.

[6] Lifeng Zhang, Jun Aoki, Brian G. Thomas. Inclusion removal by bubble flotation in a continuous casting mold[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2006, 37(3):361-379.

[7] 吴哲,张彩军,刘毅,等. 板坯连铸结晶器内钢液流场的水模拟研究[J]. 铸造技术, 2017, 38(8):145-149.

[8] 倪冰,罗志国,狄瞻霞,等. 板坯连铸结晶器内夹杂物去除的水模实验研究[J]. 连铸, 2009(1):1-5.

[9] 马天飞,刘国齐,王新福. 宽板坯连铸结晶器流场的水模拟研究[J]. 耐火材料, 2008, 42(5):341-344.

[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] 雷洪,朱苗勇,赫冀成. 连铸结晶器内非金属夹杂物运动行为模拟[J]. 过程工程学报, 2001, 1(2):0-0.

[12] 程亮,于学斌,王羽,等. 宽板坯连铸结晶器流场优化的水模拟研究[J]. 连铸, 2007(4):1-3.

[13] Leenov D, Kolin A. Theory of Electromagnetophoresis. I. Magneto-hydrodynamic Forces Experienced by Spherical and Symmetrically Oriented Cylindrical Particles[J]. J. Chem. Phys, 1954, 22(4): 683-688.

[14] 禄向阳,李红霞,杨文刚,等. 水模拟研究浸入式水口位置对薄板坯连铸结晶器流场的影响[J]. 耐火材料, 2009, 43(5):339-342.

[15] 熊椰,成泽伟,陈伟庆,等. 板坯连铸结晶器工艺参数优化的水模拟研究[J]. 钢铁钒钛, 2014, 35(3):78-82.

[16] 王治国,张小伟,王寅,等. 板坯连铸结晶器内非对称涡流的水模拟研究[J]. 钢铁研究学报, 2010, 22(7):10-14.

[17] 韩春鹏,张捷宇,王波. 板坯连铸结晶器内夹杂物运动轨迹的数学模拟 // 2008年全国冶金物理化学学术会议专辑(上册)[C]. 贵阳, 2008: 221-225.

[18] 狄瞻霞,倪冰,韩立浩,等. 板坯连铸结晶器水模型内吹气流动和夹杂物粒子去除模拟 [J]. 过程工程学报, 2009, 9(1): 329-332.

[19] 罗衍昭,张利君,李海波,等. 连铸结晶器水口不同浸入深度的数值模拟[J]. 中国冶金, 2016, 26(11):34-40.