DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.07.026

拉速对小薄板坯连铸结晶器内温度、溶质及夹杂物分布的影响

张　琦,吴滟帮,李　欢,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:采用数值模拟的方法,建立了 140 mm×35 mm 小薄板坯连铸过程的流场-温度场-溶质场-夹杂物的耦合数学模型,分析了拉速对结晶器内温度、溶质以及夹杂物分布的影响规律。结果表明,结晶器内溶质富集在固液两相区,在液相中逐渐降低,随着拉速增大,偏析最严重的区域向结晶器窄面靠近;夹杂物的体积分数、数量密度分布与结晶器内钢液的速度分布基本一致,在钢液流动方向上较高,在液相中不断降低。随着拉速增大,出口处夹杂物体积分数与数量密度变大,距离中心对称面越近,夹杂物体积分数与数量密度变化越显著。

关键词:连铸结晶器;小薄板坯;溶质偏析;夹杂物分布;数值模拟

中图分类号:TF777　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)07-0734-06

Effects of drawing Speed on Temperature, Solute and Inclusion Distribution in the Continuous Casting Mold of Thin Slab

ZHANG Qi, WU Yanbang, LI Huan, YIN Xiangkai
(School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

Abstract: The coupling mathematical model of flow field, temperature field, solute field and inclusion in the continuous casting process of 140 mm×35 mm thin slab was established by means of numerical simulation. The results show that the solute concentration in the crystallizer is in the solid-liquid two-phase region, and it decreases gradually in the liquid phase. With the increase of the drawing speed, the most severe segregation area is close to the narrow surface of the crystallizer. The distribution of volume fraction and quantity density of inclusions is basically consistent with the velocity distribution of molten steel in the crystallizer. With the increase of the drawing speed, the integral number and quantity density of the inclusion at the exit become larger, and the closer to the central symmetry plane, the change of the integral number and quantity density of the inclusion becomes more significant.

Key words: continuous casting mold; thin slab; solute segregation; inclusion distribution; numerical simulation

从 20 世纪 50 年代以来,连续铸造作为先进的铸造技术,已经实现了产量、质量、生产率和成本效率的提高,其中,连铸工艺对钢材生产和质量控制方面起着关键性作用,优化工艺可以有效地改善钢材疏松、成分偏析、夹杂物不合格等缺陷,以铸造出高性能钢材。结晶器作为钢液凝固前的最后一道工序,很大程度上决定着钢材的质量,因此针对连铸过程中结晶器内钢液的流动、凝固、传质与夹杂物分布的综合研究,有利于优化连铸工艺,提高钢材的质量。

数值模拟的研究方法目前已被广大行业采用,关于连铸方面的数值模拟也早已成熟。连铸过程中钢液的流动、换热凝固、能量变化,以及溶质的输运与扩散、夹杂物的分布等涉及到的数学模型与数值计算,国内外研究者已经做了大量的工作。Thomas[1,2]等采用不同的数学模型对连铸过程中钢液流场进行了计算,并与实验结果相对比。雷洪[3-6]等采用数值模拟的方法,对结晶器内的溶质输运、夹杂物的体积分数与数量密度进行了系统全面的研究。张立峰[7-9]等对连铸过程中夹杂物理论与应用做了深入研究,建立了夹杂物形核、长大、碰撞与凝固捕捉的数学模型,并应用于连铸结晶器过程夹杂物的行为预测。方庆[10,11]等建立了连铸过程钢液流动-凝固传热-传质多物理场耦合模型,分析了工艺参数对钢液的流动、传热凝固与溶质输运的影响。

本文在前人研究基础上,以浇注截面为 140 mm×35 mm, 高为 330 mm 的小薄板坯连铸结晶器为研

收稿日期:2019-03-31
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

究对象，建立了流场-温度场-溶质场-夹杂物的耦合数学模型，系统研究了钢液的流动、凝固，溶质输运，夹杂物体积分数与数量密度的分布，分析了不同拉速对其影响规律，并且与实验结果进行了比较，验证了数学模型的可靠性，为后续优化小薄板坯连铸结晶器内溶质与夹杂物的分布奠定了基础。

1　数学模型

1.1　基本假设

(1)结晶器内钢液视为不可压缩的理想牛顿流体，同时不考虑浮力影响；

(2)碳钢的热物性参数为常数，不随温度发生变化；

(3)夹杂物形态为球形固体；

(4)夹杂物尺寸为微米级，因此不考虑夹杂物的聚合、碰撞对钢液流动的影响。

1.2　控制方程

本文建立的流场-温度场-溶质场-夹杂物的耦合控制方程包括流体力学基本方程组，即质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程，除此，还包含标准 k-ε 两方程、溶质守恒方程[12]、夹杂物的体积守恒和数量守恒方程。以上方程可用通式(1)[13]进行表达，各控制方程中具体变量如表 1 所示[14]。

$$\frac{\partial \rho \phi_k}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho u_i \phi_k-\Gamma_k \frac{\partial \phi_k}{\partial x_i}\right)=S\phi_k \quad k=1,\cdots,N \tag{1}$$

1.3　边界条件及计算参数

(1)结晶器液面　结晶器液面设为自由面，夹杂物体积分数的通量 $F_{C*}=0.8(u_{C*,n}C^*-D_{eff}\frac{\partial C^*}{\partial n})$，数量密度的通量 $F_{N*}=0.8(u_{N*,n}N^*-D_{eff}\frac{\partial N^*}{\partial n})$。这里，$u_{C*,n}$，$u_{N*,n}$ 分别为夹杂物在体积分数和数量密度守恒方程中的法向速度 m/s；D_{eff} 为有效扩散系数 m²/s。

(2)入口　钢液入口速度由拉速决定，浇注温度 T=1 825 K，湍动能 k=0.01 U_m^2，湍动能耗散率 $\varepsilon=k^{1.5}/0.05\,D$，溶质浓度 $w_c=w_{c0}$，夹杂物体积分数 $C^*=C^*_0$，数量密度 $N^*=N^*_0$。这里，U_m 为入口速度 m/s，D 为水力直径 m。

(3)壁面　壁面设为无滑移壁面，各变量在壁面处的法向梯度为 0，采用标准 k-ε 模型，强化壁面处理方法，窄面换热的热流量与位置有关，热流量关系式[15]可表达为

$$Q=[2.688-0.335\sqrt{(0.33-y)/\nu_{cast}}]\times10^6(\mathrm{W/m^2}) \tag{2}$$

式中，y 为结晶器高度 m，ν_{cast} 为拉速 m/s。

(4)出口　结晶器出口设为压力出口，静压为 0，夹杂物体积分数的通量 $F_{C*}=u_{C*,n}C^*$，数量密度的通量 $F_{N*}=u_{N*,n}N^*$。

本文针对小薄板坯连铸过程进行了数值模拟，碳钢的热物性参数与夹杂物的参数如表 2 所示。

表2 碳钢的热物性参数

Tab.2 Thermal properties of carbon steel

碳在液态钢中扩散系数 D_c^s/m²·s⁻¹	1.0×10⁻⁸
碳在固态钢中扩散系数 D_c^l/m²·s⁻¹	1.6×10⁻¹¹
钢液密度 ρ/kg·m⁻³	7 100
夹杂物颗粒密度 $\rho_{Al_2O_3}$/kg·m⁻³	3 960
钢液黏度 μ_l/Pa·s	0.006
夹杂物半径 r/μm	5.8
固相线温度 T/k	1 773
液相线温度 T/k	1 805

表 1 各控制方程中具体变量

Tab.1　Specific parameters in each conservation equation

方程	ρ	u_i	ϕ_k	Γ_k	S_{ϕ_k}
质量守恒	ρ	$\vec{v}$	1	0	0
动量守恒	ρ	$\vec{v}$	$\vec{v}$	$\mu+\mu_t$	$-\nabla P+\rho\vec{g}+\vec{F}$
能量守恒	ρ	$\vec{v}$	h	$\frac{k}{c_s}$	$\nabla\left(\frac{k}{c_s}\nabla(h_s-h)\right)-\nabla\left[\rho f_s(h_l-h_s)(\vec{V}-\vec{V}_s)\right]$
k	ρ	$\vec{v}$	k	$\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}$	$G_k-\rho\varepsilon$
ε	ρ	$\vec{v}$	ε	$\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}$	$C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}G_k-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}$
溶质守恒	ρ	$\vec{u}_C$	ω_c	$\frac{\mu_l}{Sc_l}+\frac{\mu_t}{Sc_t}$	$\nabla\cdot\left[f_s\rho D_c^s\nabla\cdot(\omega_{c,s}-\omega_c)\right]+\nabla\cdot\left[f_l(\rho D_c^l+\frac{\mu_t}{Sc_t})\nabla\cdot(\omega_{c,j}-\omega_c)\right]+\nabla\cdot\left[\rho(\omega_{c,j}-\omega_c)(\vec{V}-\vec{V}_s)\right]$
体积分数	ρ	$\vec{u}_C$·	C^*	$f_l\left(\rho D_l+\frac{\mu_t}{Sc_t}\right)$	0
数量密度	ρ	$\vec{u}_N$·	N^*	$f_l\left(\rho D_l+\frac{\mu_t}{Sc_t}\right)$	$-2.6\alpha\left(\frac{\pi\varepsilon}{\nu}\right)^{\frac{1}{2}}N^{*2}r^{*3}-\frac{10}{9\sqrt[3]{6}}\frac{\pi\Delta\rho g}{\mu_t}N^{*2}r^{*4}$

2 数值计算

本文为实现流场-温度场-溶质场-夹杂物的耦合数学模型，采用 C++ 语言编写溶质守恒方程、夹杂物体积分数与数量密度守恒方程的计算程序，作为 User Defined Function(UDF)进行编译运算；采用有限体积法中的二阶迎风格式将结晶器计算区域离散成许多小的体积单元，在每个体积单元上对离散后的控制方程组进行求解，采用压力耦合方程的半隐式算法(SIMPLE)进行求解压力与速度的耦合，先联立求解质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程，再求解 k-ε 两方程、溶质守恒方程、夹杂物体积分数和数量密度守恒方程，直到当前时间步上的计算达到收敛，再计算下一时间步的变量。当能量方程的残差小于 10^{-6}，其余各方程的残差小于 10^{-5}，则认为迭代收敛。

3 计算结果分析

3.1 拉速对结晶器内流场的影响

研究小薄板坯的连铸过程，最应关注的部分之一是结晶器内钢液的流动，因为流动的钢液是溶质与夹杂物的载体，钢液的流动决定着溶质与夹杂物的分布。图 1 为结晶器内钢液的流场分布与流迹线，钢液由入口处进入结晶器，射向结晶器窄面，分成上、下两个流股，分别形成上、下回流区，向上流动的钢液到达自由液面，影响液面波动和卷渣情况，向下流动的钢液在重力和拉速的作用下逐渐变为平推运动。同时，根据流迹线可以看出，由于结晶器顶角的形状，使钢液的流动受到限制，导致在顶角处形成两个微小角部涡。

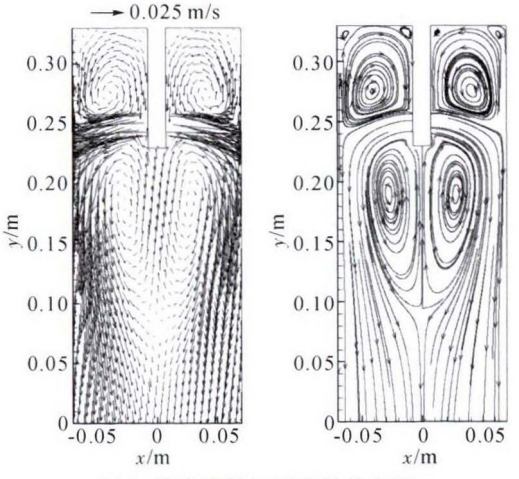


图 1 钢液流场与流迹线分布图

Fig.1 Average velocity vector and streamline in the mold midplane

结晶器内湍流强度分布如图 2 所示，钢液在入口中心处的湍流强度较低，在入口边缘处强度较高，进入结晶器后冲击窄面，此处湍流强度最高，下回流区的湍流强度也较为明显，而越靠近结晶器出口，钢液变为平推运动，湍流强度逐渐减弱，两侧壁面由于冷却作用，钢液凝固导致湍流强度最低。图 3 为拉速分别是 1.0、1.25、1.5 m/min 时，结晶器内自由液面处湍流强度变化曲线，湍流强度在上回流区顶部处最高，越靠近壁面，强度逐渐降低。三种拉速下钢液流场的特征基本一致，自由液面处湍流强度差异最大的地方也出现在上回流区的顶部，靠近壁面处无明显变化，拉速越大，钢液在自由液面处的湍流强度越高。拉速增大显著增强了上回流区钢液的流动，使得液面波动加剧，容易导致卷渣增加。

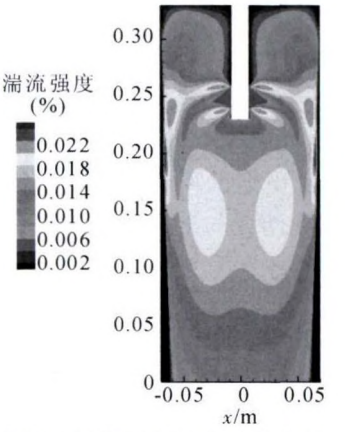


图 2 结晶器内湍流强度分布图

Fig.2 Turbulent intensity contour in the mold midplane

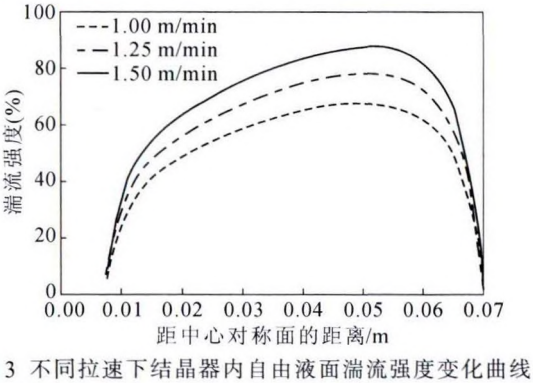


图 3 不同拉速下结晶器内自由液面湍流强度变化曲线

Fig.3 The turbulence intensity curve of free liquid surface in the crystallizer under different drawing speeds

3.2 拉速对结晶器内温度场的影响

结晶器内温度场的范畴包括温度分布、固相率分布、凝固坯壳的生成等重要内容，结晶器内的温度场如图 4 所示，从图中可以看出，温度场的分布很大程度上受到流场的影响，心部位置的钢液温度最高，是由于钢液流动在此处形成回流区，热量难以被带走，而在窄壁的冷却效果下，靠近窄壁的钢液最先冷却，因而窄壁处的温度最低，逐渐形成凝固坯壳。

图 5 为三种拉速下铸坯窄面的温度变化曲线，

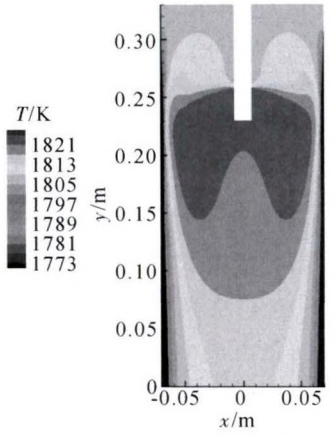


图 4 结晶器内温度场分布图

Fig.4 Temperature field contour in the mold midplane

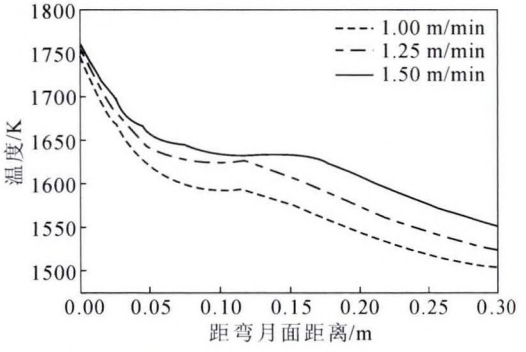


图 5 不同拉速下铸坯窄面温度分布曲线

Fig.5 Temperature distribution curve of narrow surface of billet under different drawing speeds

距弯月面距离越远，钢液在结晶器内流动的时间越长，热量得以逐渐散失，因此温度越低；随着拉速的提高，钢液在结晶器段的流动时间减少，整体的换热量减少，从而导致在较高拉速下，结晶器出口的温度更高。同时结晶器各段的冷却速率各不相同，钢液流入结晶器冲击窄面，一部分向上流动，而大部分向下流动，由于向上流动的钢液流量较小，并且由壁面换热关系式可以看出，越靠近弯月面，热通量越大，从而越靠近弯月面冷却速率越快。而入口段的钢液由于在结晶器内的行程短，并且高温钢液源源不断地从入口处补充，热量难以快速散失，造成入口段的冷却速率最小，基本呈水平状。

三种拉速下凝固坯壳厚度变化如图 6 所示，距弯月面距离越远，凝固坯壳厚度越大，随着拉速增大，钢液在结晶器段的停留时间减少，因而换热量减少，导致凝固坯壳的厚度减小，坯壳太薄容易出现拉漏的现象。同时在结晶器入口段出现坯壳零增长的现象，是因为高温钢液从入口处流入结晶器，一直冲刷窄面的坯壳，对窄面的冲刷使得凝固的坯壳重新熔化，壁面的换热凝固与钢液的冲刷熔化达到平衡。

3.3　拉速对结晶器内溶质场的影响

结晶器内钢液凝固过程中会形成固相区、液相区和糊状区，溶质 C 在固相中完全扩散，在液相中充分混合，在溶质再分配的作用下，造成结晶器内溶质的分布不均。结晶器内溶质 C 的浓度分布采用偏析率(w_c/w_{c0})来表达，如图 7 所示，溶质 C 元素的偏析达 1.19，富集在固液两相区，而在液相中逐渐降低，结晶器入口处的偏析率最低，同时由上回流区可以发现，随着钢液的流动和溶质的再分配，固液两相区内富集的溶质会进入到上部液相穴内，造成液相穴涡心的溶质浓度更高。

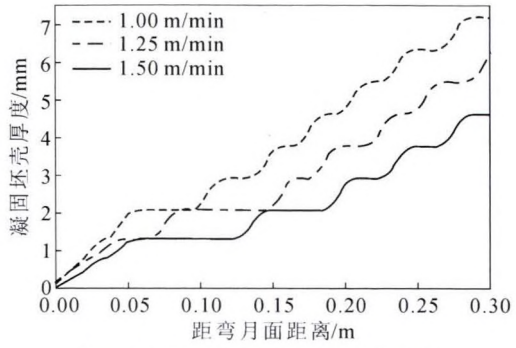


图 6 不同拉速下坯壳厚度变化曲线

Fig.6 Variation curve of shell thickness at different drawing speeds

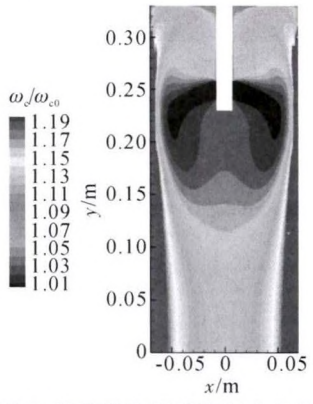


图 7 结晶器内溶质浓度分布图

Fig.7 Solute concentration distribution in mold

不同拉速下结晶器出口处溶质偏析的分布曲线如图 8 所示，三种拉速下溶质偏析率变化基本一致，最大偏析率均为 1.19，出现在固液两相区，并且固液

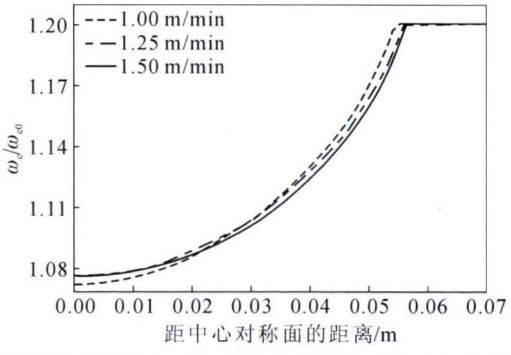


图 8 不同拉速下结晶器出口溶质偏析的分布曲线

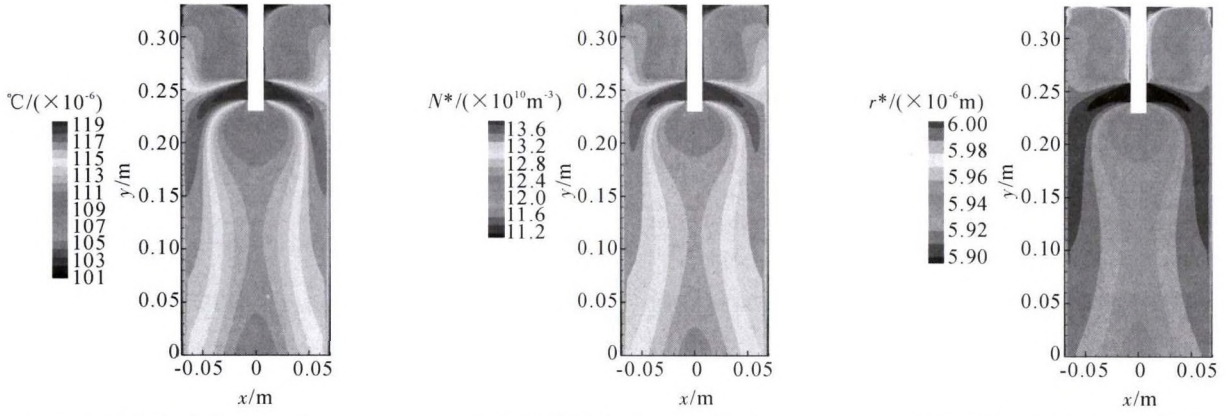
Fig.8 The distribution curve of solute segregation at the crystallizer outlet at different drawing speed

两相区溶质偏析率保持不变。距离中心对称面距离越远，溶质偏析率越高，由于拉速增大固相区和固液两相区减少，凝固坯壳厚度减小，从而偏析最严重的区域向结晶器窄面靠近；拉速增大同时使得钢液流动加快，溶质分布更均匀，但对小薄板坯连铸过程影响不大；在出口中心区域，拉速增大会增加液相穴深度，促进凝固桥的形成，造成铸坯产生缩孔和偏析，从而加剧溶质偏析的程度[16]。

3.4 拉速对结晶器内夹杂物分布的影响

结晶器内夹杂物的分布对钢材质量起着决定性影响，夹杂物分布不均严重影响到钢材的力学性能。本文采用欧拉法研究夹杂物在结晶器内的分布，夹杂物的体积分数、数量密度与特征半径分布如图 9 所示，体积分数与数量密度两者的特征基本一致，并且与结晶器内钢液的速度变化一致[17]，钢液冲击窄面后形成上、下两个流股，沿着钢液流动方向温度逐渐降低，液相率降低，使得夹杂物扩散系数降低，在坯壳的捕获作用下，导致钢液流动方向上体积分数和数量密度较高，而液相中夹杂物体积分数和数量密度不断降低。自由液面覆盖着保护渣作为去除夹杂物的主要途径，可以吸附 80%的夹杂物，使得自由液面处夹杂物的体积分数和数量密度减小。计算夹杂物数量密度时本文考虑了湍流碰撞与斯托克斯碰撞，通过夹杂物特征半径分布图可以看出，特征半径变化值很小，在小薄板坯的连铸过程中，湍流碰撞与斯托克斯碰撞对夹杂物聚合长大的影响不大。

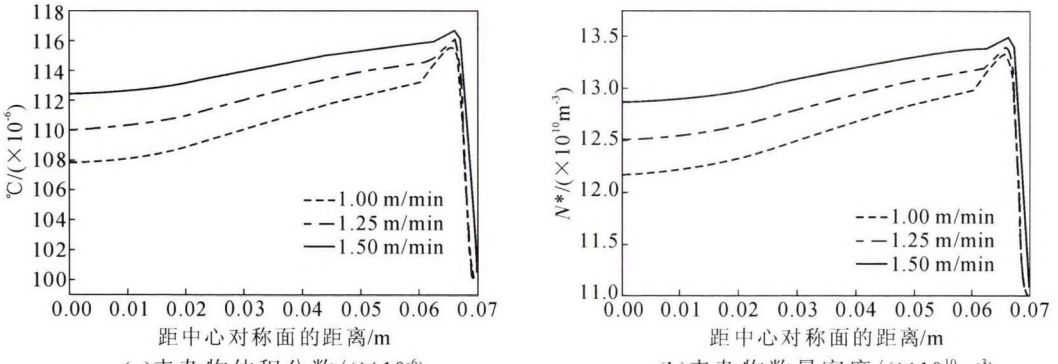
不同拉速下，结晶器出口夹杂物体积分数与数量密度的分布曲线如图 10 所示，由于靠近结晶器窄面的钢液最先流入，钢液比较新鲜，夹杂物的体积分数与数量密度最低，在凝固坯壳的捕获作用下，夹杂物的体积分数与数量密度在固液两相区最高，在液相区逐渐降低。随着拉速的增大，钢液的湍流加剧，出口处夹杂物体积分数与数量密度也变大，并且距离中心对称面越近，拉速增大带来的这种影响越明显，越不利于夹杂物的去除[18]。



(a)夹杂物体积分数/(×10⁻⁶)　(b)夹杂物数量密度/(×10¹⁰m⁻³)　(c)夹杂物特征半径/(×10¹⁰m⁻³)

图 9 结晶器内夹杂物体积分数、数量密度与特征半径分布图

Fig.9 The distribution diagram of integral number, quantity density and characteristic radius of inclusions in crystallizer



(a)夹杂物体积分数/(×10⁻⁶)　(b)夹杂物数量密度/(×10¹⁰m⁻³)

图 10 不同拉速下出口夹杂物体积分数与数量密度的分布曲线

Fig.10 Distribution curves of integral number and quantity density of the exit inclusions at different drawing speeds

4 结论

本文采用数值模拟的方法，对小薄板坯连铸结晶器内流场、温度场、溶质场和夹杂物的分布进行了数值计算，并分析了拉速对温度、溶质以及夹杂物分

布的影响规律，得出如下结论：

(1)不同拉速下，结晶器内钢液流场的特征基本一致。拉速越大的情况下，结晶器内钢液湍流越剧烈，温度变化幅度越小，铸坯凝固坯壳越薄。

(2)结晶器内溶质富集在固液两相区，而在液相中逐渐降低，液相穴涡心的溶质浓度比外围高，入口处的偏析率最低，固液两相区的偏析率最高。随着拉速增大，偏析最严重的区域向结晶器窄面靠近，出口中心区域偏析率略微增大。

(3)夹杂物的体积分数分布与数量密度分布一致，并且与结晶器内钢液的速度分布基本一致，夹杂物体积分数和数量密度在钢液流动方向上较高，而在液相中不断降低，在自由液面处最低。随着拉速增大，出口处夹杂物体积分数与数量密度变大，并且距离中心对称面越近，夹杂物体积分数与数量密度变化越显著。

参考文献：

[1] Chaudhary R, Ji C, Thomas B G, et al. Transient turbulent flow in a liquid-metal model of continuous casting, including comparison of six different methods [J]. Metallurgical & Materials Transactions B, 2011, 42(5):987-1007.

[2] Quan YUAN, Sivaraj Sivaramakrishnan, Brian G. Thomas. Comparison of four methods to evaluate fluid velocities in a continuous slab casting mold [J]. ISIJ International, 2001, 41(10):1262-1271.

[3] Lei Hong, Wang Lianze, Wu Ziniu, et al. Collision and coalescence of alumina particles in the vertical [J]. ISIJ International, 2002, 42 (7): 717-725.

[4] 雷洪，张红伟，陈芝会，等. 连铸结晶器内钢液流动、凝固和夹杂物的分布[J]. 钢铁，2010，45(5): 24-29.

[5] Geng Dianqiao, Lei Hong, He Jicheng, et al. Numerical simulation for collision and growth of inclusions in ladles stirred with different porous plug configurations [J]. ISIJ International, 2010, 50 (11): 1597-1605.

[6] Hong LEI, Yan ZHAO, Dianqiao GENG. Mathematical model for cluster-inclusion's collision-growth in inclusion cloud at continuous casting mold [J]. ISIJ International, 2014, 54(7): 1629-1637.

[7] Zhang L, Taniguchi S, Cai K. Fluid flow and inclusion removal in continuous casting tundish [J]. Metallurgical & Materials Transactions B, 2000, 31(2): 253-266.

[8] Ren Y, Wang Y, Li S, et al. Detection of non-metallic inclusions in steel continuous casting billets [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2014, 45(4): 1291-1303.

[9] Ling H, Zhang L. Numerical simulation of the growth and removal of inclusions in the molten steel of a two-strand tundish [J]. JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society, 2013, 65 (9): 1155-1163.

[10] 方庆. 大方坯连铸过程流动、传热、传质行为及凝固组织的模拟研究[D]. 武汉：武汉科技大学，2018.

[11] Qing F, Hongwei N, Bao W, et al. Effects of EMS induced flow on solidification and solute transport in bloom mold [J]. Metals, 2017, 7(3): 72.

[12] Bennon W D, Incropera F P. A continuum model for momentum, heat and species transport in binary solid-liquid phase change systems—I. Model formulation [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1987, 30(10): 2161-2170.

[13] 唐家鹏. ANAYS FLUENT 16.0 超级学习手册[M]. 北京：人民邮电出版社，2016.

[14] Lei H, Geng D Q, He J C. A continuum model of solidification and inclusion collision-growth in the slab continuous casting caster [J]. Transactions of the Iron & Steel Institute of Japan, 2009, 49(10): 1575-1582.

[15] 张红伟，王恩刚，赫冀成. 方坯连铸过程中钢液流动、凝固及溶质分布的耦合数值模拟[J]. 金属学报，2002(1):99-104.

[16] 董鹏莉，尚海霞，王华. 铸坯及板卷典型质量缺陷成因与控制技术[J]. 中国冶金，2017，27(6): 7-13.

[17] 张琦，吴滟帮，李欢. 内置式搅拌磁场对连铸空心铸坯内夹杂物分布影响[J]. 铸造技术，2018，39(1): 111-115，119.

[18] 王月，艾新港，李胜利，等. 拉速对板坯结晶器钢液流动及夹杂物运动影响的数学模拟 [J]. 辽宁科技大学学报，2015，38(6): 412-417.

(上接第 728 页)

的问题，并应用技术冲突理论对浇铸装置进行了创新设计，将浇口设计在内壁带有 SiO_2 砂层的芯管中，高温下金属液从底部反向填充间隙并排除空气；设计了炉底带有液压升降装置的气氛井式炉，能够起到预热保温作用，方便产品进出。该浇铸装置不仅能够解决工艺中金属液无法充分填充间隙和残留气孔的问题，而且能够做到连续式生产，提高了生产效率。

参考文献：

[1] 郭在在，曹剑武，牟晓明，等. 一种镶嵌铸铁管的石墨内衬板制造方法[J]. 铸造技术，2018，39(12)：2732-2734.

[2] 翟晨晨，苏恒渤，郭嘉，等. Cr/C 比对中铬铸铁复合抗磨辊圈组织和耐磨性的影响[J]. 铸造技术，2019，40(2)：139-142.

[3] 章顺法. 具有耐磨合金层的双螺杆挤出机用筒体：中国，201620012547.8[P]. 2016-01-05.

[4] 王新贵. 一种具有复合合金层的内衬套及其制备方法：中国，201710031039.3[P]. 2017-01-17.

[5] 范洪国. 一种基于 TRIZ 的注塑机注射机构：中国，201611045643.3[P]. 2016-11-24.

[6] 张换高. 创新设计 TRIZ 系统化创新教程[M]. 北京：机械工业出版社，2017.

[7] 成思源，周金平，郭钟宁. 技术创新方法-TRIZ 理论及应用[M]. 北京：清华大学出版社，2014.