

卧式离心铸管充型过程中夹杂物运动规律数值模拟研究及应用

寻梦华^{1,2}, 骆合力^{1,2}, 韩少丽², 李尚平², 张继^{1,2}

(1. 钢铁研究总院 高温材料研究所, 北京 100081)

(2. 北京钢研高纳科技股份有限公司, 北京 100081)

摘要: 对卧式离心铸造充型过程中流体质点受力进行分析, 根据夹杂物运动规律推断出不同种类夹杂物沉淀分离时间及最佳浇注温度。基于 Procast 软件建立了卧式离心铸造充型过程夹杂物运动模型, 对离心铸管在不同转速条件下夹杂物运动轨迹及最终停留位置进行了数值模拟及工艺优化。结果表明, 夹杂物密度越小、粒子尺寸越大, 分离时间越短。5 μm 的 SiO_2 夹杂最容易在离心力的作用下从金属液中甩出, 并最终停留在铸管内表面。适合 L605 离心铸管最佳浇注温度为 1580 $^\circ\text{C}$, 离心转速为 2800 r/min。在此工艺参数条件下, 对离心铸管进行了实际浇铸实验, 利用光学显微镜 (OM)、扫描电镜 (SEM 及 EDS) 获得其夹杂物分布和成分信息。实际铸件夹杂微观分析结果与数值模拟的一致, 验证了预测及模拟结果的有效性。

关键词: 离心铸管; 夹杂物; 数值模拟; 运动规律; 工艺优化

中图分类号: TG249.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2023)07-2559-06

真空卧式离心铸造属于特种铸造技术, 其特点在于液态金属注入绕水平轴旋转的铸型型腔中, 使其充型和凝固, 待其冷却凝固后获得特定形状的毛坯或零件。在动态真空密封环境下, 可有效减少夹杂物在铸造过程中的二次生成, 其离心力可以提高金属熔体的流动性, 改善薄壁件疏松缺陷, 提高离心管性能^[1-3]。但是, 在离心管铸造过程中, 因金属熔炼混入的夹杂物颗粒以及金属液与铸型型壁作用产生的夹杂会不可避免地混入离心管中成为夹杂缺陷, 影响管坯的力学性能^[4-6]。尤其是对于壁厚 0.05~0.3 mm 的细径薄壁管而言, 大尺寸夹杂会产生穿透性缺陷。而夹杂物往往来源于所采用的母合金管坯, 且贯穿于产品制备生命周期始终, 严重恶化最终产品的使用性能。因此, 通过研究夹杂在离心铸造过程中的运动轨迹及规律从而有效控制夹杂最后停留的位置, 对离心铸造参数优化并有效减少离心管坯中的夹杂具有重要意义。

对于铸件中夹杂缺陷的研究一般是通过工业 CT、超声波检测以及金相观察等手段来分析铸件样本中夹杂物的类型、分布位置及尺寸。但这种方式只能在铸件成形后对夹杂缺陷进行观察, 不适用于在铸件成形前对夹杂进行预测分析。因此, 大量研究人员采用数值模拟的方

法对离心铸造夹杂物的运动规律进行研究。郗喜望等^[7]利用夹杂物运动规律模拟结果对离心铸造转速参数进行了优化, 得到了枝板支架的最佳离心转速为 150 r/min。隋艳伟^[8]利用物理模拟的方法得到了立式离心铸造夹杂物运动规律, 并推导出其运动方程。研究表明, 无论是竖直方向还是水平方向, 夹杂物的运动阻力根据雷诺数的不同均可分为 3 种情况: 粘性阻力区、过渡区、压力阻力区。贾丽敏^[9]通过数值模拟的方法对 TC4 合金立式离心铸造过程进行模拟, 结果表明: 重力系数及充型路径的变化会影响夹杂物的含量。Mohapatra 等^[10]通过模拟优化工艺参数从而达到控制夹杂物分布梯度的目的。然而, 这些研究主要集中在支架与缸套的立式离心铸造, 对卧式离心铸管夹杂物的运动规律研究尚少。

本工作对离心铸管在卧式离心铸造充型过程中质点受力过程进行分析, 推断出不同种类夹杂沉淀分离时间, 利用 Procast 软件通过连续性方程和完全的 Navier-Stokes 流动方程对流体流动及传热进行耦合计算, 根据粒子轨迹模型跟踪夹杂物的运动轨迹及最终位置, 通过对离心铸管的试制以获得其夹杂物的分布信息, 进一步验证数值模拟的有效性, 并将其应用于离心铸管的工艺参数优化。

收稿日期: 2022-07-05

基金项目: 国家重点研发计划 (2020YFC1107201)

作者简介: 寻梦华, 男, 1994 年生, 博士生, 钢铁研究总院高温材料研究所, 北京 100081, 电话: 010-62182557, E-mail: Xunmh1130@163.com

1 模拟方法及模型

1.1 卧式离心铸造充型过程中夹杂物的受力分析

卧式离心铸造是在高速旋转离心力场下的水平铸型中进行高温金属液体的充型与凝固，可视为具有自由表面的粘性不可压缩流体的三维非稳态流动^[8,11]。因此描述流体运动状态的连续性方程和动量守恒方程仍然起作用。充填过程的连续方程及 Navier-Stokes 方程分别如式 (1) ~ (2) 所示^[11-13]：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla(\rho\mathbf{v}\phi) = \nabla(\mu\nabla\phi) + S_u - \nabla P \quad (2)$$

式 (1) 中， u 、 v 、 w 分别表示流体在 x 、 y 、 z 方向的速度；式 (2) 中， ρ 为流动场中的流体密度， t 为时间， ϕ 为速度分量， \mathbf{v} 为速度矢量， μ 为动态粘度， S_u 为动量源， P 为压力， ∇ 为拉普拉斯算符。

与传统重力铸造相比，卧式离心铸造过程中，液态金属不仅受到重力的作用，更重要的是金属液体会在旋转离心力的作用下，向着铸型型腔壁运动。熔融金属液在与旋转铸型接触后，在铸型带动下作近似圆周运动^[14]。此时还会受到向心力、铸型对它的摩擦力以及旋转运动所特有的柯氏力的作用，如图 1 所示。 F_N 、 F_G 、 F_C 和 F_f 分别为卧式离心铸造过程中液体某质点所受到的向心力、重力、柯氏力和摩擦力， θ 为液体某质点与旋转中心连线和 Y 轴之间的夹角。夹杂在铸造过程中的变化十分复杂、包括卷入、聚合、碰撞、上浮或下沉，为研究夹杂物在铸造过程的运动轨迹，基于如下假设将其简化为微粒在熔体流动过程中的运动：忽略夹杂物的聚合、碰撞、长大行为，将其简化为尺寸、密度不变的单个粒

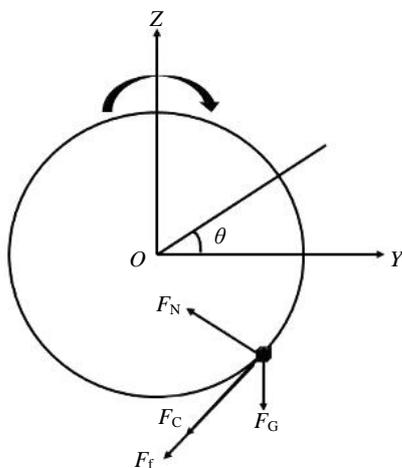


图 1 卧式离心铸造过程中金属液体中某一质点受力分析

Fig.1 Stress analysis of a particle in liquid metal during horizontal centrifugal casting

子。利用 Procast 软件充分考虑质点在离心流动过程中所受到的向心力、柯氏力、重力和摩擦力，并将质点流动作为离心流动进行模拟。

1.2 离心力场下夹杂物的运动规律分析

在高速旋转的离心力场条件下，夹杂物所受的离心力远大于重力，两者之比称为重力系数 K_c ，也称为离心分离因素 RFC，其大小取决于离心时旋转半径和转速，计算公式如式 (3) 所示：

$$RFC = \frac{\omega^2 r}{g} = \frac{(2\pi n / 60)^2 r}{g} = 1.119 \times 10^{-5} n^2 r \quad (3)$$

式中， ω 表示角速度， n 表示转速， r 表示旋转半径。因此，离心力场中各种夹杂物所受到的等效重力，均增加为在重力场中所受重力的 K_c 倍。

在离心铸造粒子运动过程中，粒子的沉降速度与粒子半径的平方、粒子的密度和金属液密度之差成正比。随着离心力场的增大，粒子的沉降速度也增加，则沉降系数 S 可表示为式 (4)，在离心力的作用下金属液中颗粒分离沉淀时间 t 用式 (5) 表示：

$$S = \frac{dx/dt}{\omega^2 r} = \frac{d^2(\rho_1 - \rho_2)}{18\mu} \quad (4)$$

$$t = \frac{\ln(R_{max}/R_{min})}{S\omega^2} = \frac{27.4\mu \cdot \ln(R_{max}/R_{min})}{n^2 d^2(\rho_1 - \rho_2)} \quad (5)$$

式中， ρ_1 为粒子密度， ρ_2 为金属液密度， μ 为金属液粘度， n 为转速， d 为粒子半径， R_{max} 为离心金属液的底面至轴心的距离， R_{min} 为离心金属液的液面至轴心的距离^[15-16]。

夹杂物密度不同会造成密度小于流体的夹杂物示踪粒子随流体出现明显的贴壁流动，且随着浇注速度的降低与离心转速的提高，贴壁流动的现象越明显，在向心力、铸型对它的摩擦力作用下，密度低的粒子会更倾向于停留在离心铸管的内壁。并且离心转速越大，RCF 值越大，离心力作用下颗粒分离效果越好。但是为了保证离心管的平稳顺序充型，离心转速不宜过大，否则会产生紊流现象，造成离心管的壁厚不均匀，过大的离心力还会导致铸件内外壁间产生成分偏析^[17-18]。因此选取模拟及试制过程中效果较好的离心转速 2800 r/min 来推断不同种类夹杂分离沉淀时间，此时 RCF 值为 658，通过计算得到了不同种类夹杂物分离时间，如表 1 所示。2 μm 的 Al_2O_3 分离沉淀时间为 18.6 s，同一粒子尺寸的 CaO 和 SiO_2 分别为 18.1 和 15.1 s。而 5 μm 的 Al_2O_3 分离沉淀时间为 3.0 s，同粒子尺寸的 CaO 和 SiO_2 分别为 2.9 和 2.4 s。从夹杂物运动规律的计算结果可以看出，夹杂物密度越小、粒子尺寸越大，分离时间越短。不同大小的粒子因沉降速度的不同而有效分离，因此 5 μm 的密度最小的 SiO_2 类夹杂最容易在离心力的作用下从金属液中甩出，并最终停留在铸管内表面，起到了进一步净

表 1 不同种类夹杂物分离沉淀时间

Table 1 Separation and precipitation time of different kinds of inclusions

RCF	Size/ μm	Precipitation time, t/s		
		Al_2O_3	CaO	SiO_2
658	2	18.6	18.1	15.1
	3	8.3	8.0	6.7
	4	4.6	4.5	3.8
	5	3.0	2.9	2.4

化合金钢液的效果。

1.3 夹杂物运动轨迹模拟参数

离心转速是增大离心力、控制夹杂物运动轨迹的最主要因素。旋转速度越大，夹杂运动动力越大，移动距离增加，夹杂越易于富集在离心管内表面。为了获取卧式离心铸造充型过程的夹杂物运动数据，在 Procast 软件上模拟 L605 离心铸管在不同离心转速条件下充型过程中夹杂物运动轨迹。首先采用三维建模软件对离心铸管及其工艺系统进行三维建模，然后在 Procast 软件中进行离心铸造模型网格划分，如图 2 所示：网格为四面体网格，设定网格的尺寸大小为 $5\ \mu\text{m}$ ，网格总数为 535 576 个。在考虑减少夹杂缺陷为主要目的的情况下，根据夹杂物运动规律设计其初始工艺为：浇注温度为 $1580\ ^\circ\text{C}$ ，环境温度为 $25\ ^\circ\text{C}$ ，铸型温度为 $500\ ^\circ\text{C}$ ；选取 2400、2600、2800 和 3000 r/min 共 4 组离心转速；以外径 50 mm、内径 10 mm、长度 500 mm 的离心铸管为研究对象，铸型采用规格为外径 150 mm、内径 50 mm、长度 520 mm 的 H13 钢，模壳厚度为 50 mm。铸型内表面涂覆有高温抗烧蚀、耐磨损涂料，浇口直径为 16 mm。离心铸管与铸型之间的换热系数为 $500\ \text{W}\ \text{m}^{-2}\ \text{K}^{-1}$ ，铸型与外界环境换热系数为 $25\ \text{W}\ \text{m}^{-2}\ \text{K}^{-1}$ 。金属液自入口处直径为 16 mm 的浇口进行浇注，在铸型高速旋转的带动作用成型，铸管最终成品规格通过金属液用量进行控制。每次模拟实验均控制以上参数不变，只改变离心转速。采用上述参数通过数值模拟重现离心铸造夹杂物粒子运动过程，从而确定最佳离心转速。

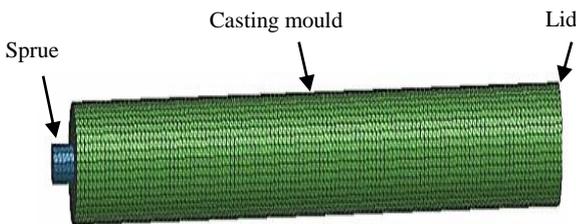


图 2 卧式离心铸造浇注系统三维示意图

Fig.2 Three dimensional schematic diagram of horizontal centrifugal casting gating system

2 结果与分析

2.1 离心铸管工艺参数优化

L605 离心铸管主要应用于规格为 $\Phi 1\sim 2(\pm 0.012)\ \text{mm}$ 、壁厚为 0.05~0.3 mm 细径薄壁管材的制备，而非金属夹杂物的存在是影响细径薄壁管性能以及安全稳定服役的重要因素，有时甚至是决定性因素。应用试制经验对离心管铸造工艺改进费时费力，不利于实际生产中快速有效地生产出满足要求的离心铸管。因此需要根据夹杂物运动规律及数值模拟结果为离心铸管铸造过程提供工艺优化指导。由卧式离心铸造质点受力及夹杂运动规律分析可知，为了去除和减少离心力场的夹杂，可以通过提高浇注温度、加大离心力等手段。

温度对夹杂运动的影响主要体现在流体粘度的变化。合金液的粘度对夹杂物运动起着至关重要的作用，粘度的变化必然会导致夹杂物在合金液中终端速度的变化。温度的降低会导致合金熔体粘度的增大，如图 3 所示，当 L605 金属液温度为 $1600\ ^\circ\text{C}$ 时，粘度为 $5.19\ \text{mPa}\ \text{s}$ ， $1300\ ^\circ\text{C}$ 时粘度就增加到 $9.07\ \text{mPa}\ \text{s}$ 。浇注温度越低时，合金凝固时间减少，合金液粘度增大，阻力也会随着温度的降低而增大，夹杂达到临界速度后将会做减速运动。这会导致夹杂富集效果减弱，铸件中夹杂物整体分布梯度平缓，直到运动到合金熔体表面或由于合金熔体凝固滞留在离心管中。浇注温度越高时，夹杂则富集，夹杂富集区将变得更窄，当夹杂遇到阻碍时将改变其运动趋势，在离心力作用下更倾向于停留在离心管内表面。但考虑到温度过高会加剧对铸型的冲蚀反而会增加夹杂物含量，另外还可能使液态金属的液态收缩量增加，引起缩松缩孔等其他缺陷^[8,19-20]，因此选取浇注温度为 $1580\ ^\circ\text{C}$ ，此时粘度为 $5.37\ \text{mPa}\ \text{s}$ 。

图 4a~4d 分别为转速在 2400、2600、2800 和 3000 r/min 时离心铸管中夹杂物示踪粒子运动轨迹。可以看出，旋转条件下夹杂物示踪粒子运动尾迹出现典型的湍流旋涡，且随着转速的增加，湍流旋涡平均直径明显减小，加速

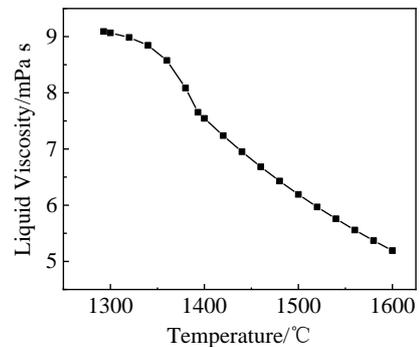


图 3 L605 金属液粘度随温度的变化关系

Fig.3 Variation of viscosity of L605 molten metal with temperature

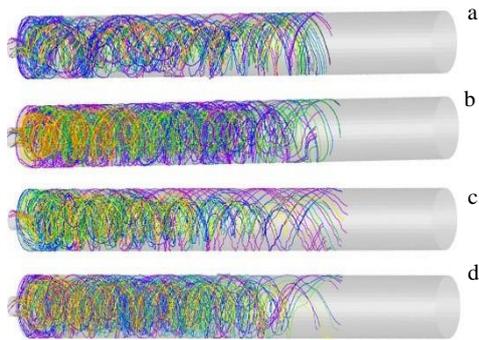


图 4 不同转速下夹杂物示踪粒子运动轨迹

Fig.4 Trajectories of inclusions tracing particles at different rotating speeds: (a) 2400 r/min, (b) 2600 r/min, (c) 2800 r/min, and (d) 3000 r/min

度整体呈现先增加后减小最后趋于 0 的状态。金属液流体前沿形成曲率中心指向铸型内侧的曲面，充型初期大部分夹杂物示踪粒子会做不规则的圆周运动，充型后期粒子运动为圆弧轨迹。当转速为 2400 r/min 时离心作用力较小，由于型壁的摩擦力作用，粒子易沿着铸型边缘运动，倾向于停留在较近处的型壁及铸管中心附近。2600 r/min 时有所改善，部分粒子开始向心运动。随着铸型转速的增加，夹杂物示踪粒子所受向心力峰值线性增加，且受力峰值出现的位置向铸型内部移动，湍流漩涡平均曲率半径先增大后减小。转速为 2800 r/min 时流体充型速度显著增加，夹杂物在铸型中间位置仍有一定的驱动力，大量夹杂物示踪粒子沿着型腔向中间流动。铸型转速增大至 3000 r/min 时，夹杂物示踪粒子以显著的较快速度通过铸型型壁到达铸型内部，但是由于离心力过大，金属液无规律飞溅，过高的转速还会导致熔体充填量的降低^[21-22]，流体在铸型末端发生涡流，并不能顺序稳定充型，夹杂物示踪粒子并不能在离心铸管中均匀分布。因此选取的最佳离心转速为 2800 r/min。

2.2 离心铸管夹杂物模拟

基于上述离心铸造工艺参数的优化研究，对浇注温

度 1580 ℃、转速 2800 r/min 条件下离心铸造充型过程中 2 种密度相差较大的夹杂物 Al_2O_3 和 SiO_2 的最终停留位置进行模拟预测。图 5 为充型凝固后离心铸管同一位置横截面 Al_2O_3 和 SiO_2 夹杂物粒子分布位置图。可以看出夹杂散乱分布在离心铸管各处， Al_2O_3 粒子主要分布在管壁中间和内壁处，外壁聚集了少数夹杂物（图 5a），而密度较轻的 SiO_2 夹杂物粒子分布较为集中，虽然有一些分布在外壁和管壁中间位置，但在内壁分布明显增多，并且分布较为均匀（图 5b）。

2.3 离心铸管试制

依据上述工艺，对 L605 离心铸管进行实际生产试制。生产完成后对铸管在磨抛不侵蚀的状态下进行夹杂物的金相观察，获得离心铸管横截面内部的夹杂缺陷分布，如图 6 所示。结果发现，夹杂物平均尺寸在 2 μm 左右，极少数夹杂物大于 4 μm 。对比实际铸件与模拟离心管内外壁的缺陷信息，可见与数值模拟结果基本相同。夹杂物数量从外壁至内壁逐渐增多，大多夹杂散乱分布在离心管内壁处。进一步对含有较多夹杂的内壁处进行 SEM+EDS 表征分析，如图 7，结果发现大部分夹杂为硅酸盐类夹杂，在 0.5 mm^2 的视场下硅酸盐类夹杂占总夹杂数量的 60% 左右，进一步验证了实验试制的结果与夹杂物运动规律和模拟结果的一致性。

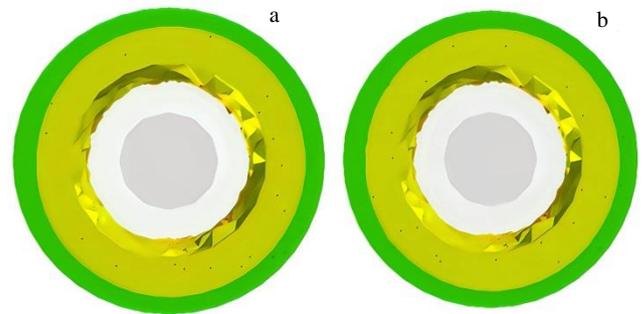


图 5 离心铸管横截面夹杂物分布

Fig.5 Inclusions distributions in the same cross section of centrifugal casting pipe: (a) Al_2O_3 particles and (b) SiO_2 particles



图 6 试制的离心铸管横截面不同位置夹杂物形貌及分布

Fig.6 Morphologies and distributions of inclusions in different areas of cross-section of centrifugal cast pipe: (a) outer wall, (b) 1/2 radius, and (c) inner wall

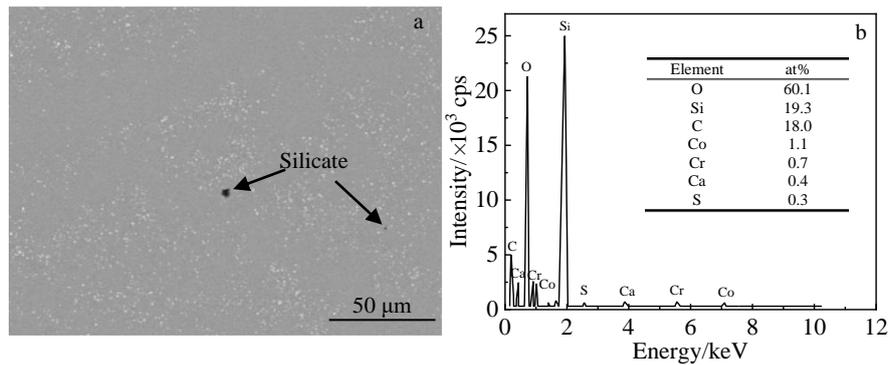


图7 离心铸管内壁夹杂物及EDS成分分析

Fig.7 SEM image (a) and EDS spectrum (b) of inclusions in the inner wall of centrifugal cast pipe

3 结 语

1) 对离心铸管在卧式离心铸造充型过程中质点受力过程进行分析,根据夹杂物运动规律推断出不同种类夹杂沉淀分离时间。夹杂物密度越小、粒子尺寸越大,分离时间越短。 $5\ \mu\text{m}$ 的 SiO_2 类夹杂最容易在离心力的作用下从金属液中甩出,并最终停留在铸管内表面。

2) 采用数值模拟对离心铸管在不同转速条件下夹杂物运动轨迹进行了预测,适合L605离心铸管最佳浇注温度为 $1580\ ^\circ\text{C}$,离心转速为 $2800\ \text{r/min}$ 。

3) 依据优化的工艺参数对离心铸管进行了实际浇铸实验,发现大部分夹杂为硅酸盐类夹杂,在 $0.5\ \text{mm}^2$ 的视场下占总夹杂数量的60%左右。实际铸件夹杂分布和尺寸与数值模拟的一致,进一步验证了模拟结果的有效性。

参考文献 References

- [1] Liang Zenghui(梁增辉), Shen Yong(申勇), He Qishu(何齐书) et al. *China Plant Engineering*(中国设备工程)[J], 2020, 21(11): 232
- [2] Sun Ji(孙季), Xie Changfa(谢长发), Sun Lijun(孙立军). *Foundry Equipment and Technology*(铸造设备与工艺)[J], 2018, 40(1): 25
- [3] Teng Haitao(滕海涛), Zhang Xiaoli(张小立), Qi Kai(齐凯) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2010, 39(8): 1465
- [4] Chan K S. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2020, 51(3): 1148
- [5] Zheng L, Zhang G Q, Gorley M J et al. *Materials and Design*[J], 2021, 207(9): 109 861
- [6] Shi A, Wang Z, Shi C B et al. *ISIJ International*[J], 2020, 60(2): 205
- [7] Ying Xiwang(鄢喜望), Xiao Gen(肖良), Yin Yajun(殷亚军) et al. *Foundry Technology*(铸造技术)[J], 2020, 41(12): 5
- [8] Sui Yanwei(隋艳伟). *Formation and Evolution of Defect During the Vertical Centrifugal Casting of Titanium Alloy*(钛合金立式离心铸造缺陷形成与演化规律)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009
- [9] Jia Limin(贾丽敏). *Behaviors of Mold-Filling and Solidification for Vertical Centrifugally Cast TC4 Alloys*(TC4合金立式离心充型凝固行为研究)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010
- [10] Mohapatra S, Sarangi H, Mohanty U K et al. *Annales de Chimie Science des Matériaux*[J], 2019, 43(3): 173
- [11] Wang J Q, Fu P X, Liu H W et al. *Materials and Design*[J], 2012, 35(3): 446
- [12] McBride D, Humphreys N J, Croft T N et al. *Computers & Fluids*[J], 2013, 82(8): 63
- [13] Lu Suling(鲁素玲). *Numerical Simulation Studies on Casting Process and Effects of Process Parameters for Horizontal Centrifugal Compound Casting Rolls*(卧式离心复合铸造轧辊铸造过程及工艺影响的数值模拟)[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2016
- [14] Zeng Xingwang(曾兴旺), Chen Liliang(陈立亮), Liu Ruixiang(刘瑞祥). *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2004, 32(5): 26
- [15] Zhang Boming(张伯明). *Centrifugal Casting*(离心铸造)[M]. Beijing: China Machine Press, 2004: 3
- [16] Bai C Z, Park H, Wang L G. *Separation and Purification Technology*[J], 2021, 263: 118 408
- [17] Song Nannan(宋男男), Wu Shiping(吴士平), Luan Yikun(栾义坤) et al. *Acta Physica Sinica*(物理学报)[J], 2009, 58(S1): 112
- [18] Bohacek J, Kharicha A, Ludwig A et al. *ISIJ International*[J], 2014, 54(2): 266

- [19] Sui Yanwei(隋艳伟), Li Bangsheng(李邦盛), Liu Aihui(刘爱辉) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(9): 1537
- [20] Song X P, Cheng S S, Cheng Z J. *ISIJ International*[J], 2012, 52(10): 1824
- [21] Xiao Gen(肖 良). *Research on the Movement Law of Inclusion Particles in Vertical Centrifugal Casting*(钛合金立式离心铸造过程夹杂物运动规律研究)[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020
- [22] Li Changyun(历长云), Wang Kuangfei(王狂飞), Xu Lei(许 磊) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(S2): 417

Numerical Simulation and Application of Inclusion Movement in Horizontal Centrifugal Casting Pipe Filling Process

Xun Menghua^{1,2}, Luo Heli^{1,2}, Han Shaoli², Li Shangping², Zhang Ji^{1,2}

(1. High Temperature Materials Institute, Central Iron & Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

(2. Gaona Aero Material Co., Ltd, Beijing 100081, China)

Abstract: The applied force of fluid particles in the filling process of horizontal centrifugal casting was analyzed, and the precipitation separation time of different kinds of inclusions and optimal pouring temperature were deduced according to the movement law of inclusions. The movement trajectory of inclusions in the filling process of horizontal centrifugal casting was established using ProCAST software, and the numerical simulation and process optimization of the movement trajectory and final residence position of inclusions in centrifugal casting pipes under different rotating speeds were carried out. The results show that the smaller the density of inclusions is and the larger the particle size is, the shorter the separation time is. It is found that 5 μm SiO₂ inclusions are most likely to be thrown out of the liquid metal under the action of centrifugal force and finally stay on the inner surface of the cast pipe. The optimal pouring temperature for L605 centrifugal casting pipe is 1580 °C, and the optimal centrifugal speed is 2800 r/min. Under the condition of these optimal process parameters, the actual casting experiment of centrifugal cast pipe was carried out, and the inclusion distribution information was obtained by optical microscope (OM) and scanning electron microscope (SEM-EDS). The microscopic analysis result of inclusions in actual castings is consistent with the simulation result, which verifies the effectiveness of the prediction and simulation results.

Key words: centrifugal casting; inclusions; numerical simulation; movement law; process optimization

Corresponding author: Luo Heli, Ph. D., Professor, High Temperature Materials Institute, Central Iron & Steel Research Institute, Beijing 100081, P. R. China, Tel: 0086-10-62182557, E-mail: luohl@cisri.com.cn