DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.12.016

立式离心铸造中夹杂物运动规律数值模拟研究与应用

郄喜望[1,2,3],肖　艮[4],殷亚军[4],张美娟[2,3],南　海[1,2,3],周建新[4]

(1. 中国航发北京航空材料研究院,北京 100095;2. 北京百慕航材高科技股份有限公司,北京 100094;3. 北京市先进钛合金精密成型工程技术研究中心, 北京 100095;4. 华中科技大学 材料科学与工程学院 材料成形与模具技术国家重点实验室,湖北 武汉 430074)

摘　要:对立式离心铸造充型过程流体质点受力进行分析,依据流动控制方程和夹杂物运动控制方程,基于华铸CAE系统开发了立式离心铸造充型过程夹杂物运动追踪程序。对钛合金支板铸件采用CT扫描获得其夹杂物分布信息,结果表明其夹杂物分布与数值模拟预测的夹杂物分布位置一致,验证了数值模拟程序的有效性。最终利用上述模拟程序对该支板零件的离心铸造转速参数进行了优化,得到适合该支板铸件的最佳离心转速为150 r/min。

关键词:立式离心铸造;夹杂物;数值模拟;工艺优化

中图分类号:TG249　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)12-1165-05

Numerical Simulation and Application of Inclusion Movement in Vertical Centrifugal Casting

QIE Xiwang[1,2,3], XIAO Gen[4], YIN Yajun[4], ZHANG Meijuan[2,3], NAN Hai[1,2,3], ZHOU Jianxin[4]

(1. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2. Baimtec Material Co. Ltd., Beijing 100094, China; 3.Beijing Engineering Research Center of Advanced Titanium Alloy Precision Forming Technology, Beijing 100095, China; 4. State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mould Technology, School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The force of the fluid particles in the filling process of vertical centrifugal casting is analyzed. Based on the flow control equation and the motion control equation of inclusions, and based on the Huazhu CAE system, the motion tracking program of inclusions in the vertical centrifugal casting filling process is developed. A CT scan of a titanium alloy support plate casting was used to obtain the distribution information of its inclusions. The results showed that the distribution of inclusions was consistent with the distribution of the inclusions predicted by the numerical simulation, which verified the effectiveness of the numerical simulation program in this paper. Finally, the above-mentioned simulation program was used to optimize the centrifugal speed parameters of the centrifugal casting of the support plate parts, and the best centrifugal speed suitable for the support plate casting was 150 r/min.

Key words: vertical centrifugal casting; inclusions; numerical simulation; process optimization

立式离心铸造是精密铸造中重要的技术之一。离心铸造中离心力可以提高金属熔体的流动性,改善薄壁铸件浇不足缺陷,提高铸件性能[1,2]。但是,在离心铸造制造零件时,因金属熔炼混入的夹杂物颗粒,或者金属液与铸型型壁作用产生的夹杂物颗粒,会混入零件中成为夹杂缺陷,影响铸件的机械性能[3-5]。因此,通过研究夹杂在离心铸造过程中的运动规律从而有效控制夹杂最后停留的位置,再有效去除铸件中的夹杂具有重要意义。

目前对于铸件中夹杂缺陷的研究主要有两种方法:①采用实际铸造试验制备铸件样本,通过工业CT、超声波检测等手段分析铸件样本中的夹杂缺陷的位置和形态来研究铸件中的夹杂缺陷[6,7];②采用数值模拟方法,通过在数值模拟软件中分析夹杂物颗粒的运动来确定夹杂缺陷的最终位置。采用工业CT等检测手段只能在铸件成形后对构件缺陷进行分析,无法在铸造成形前进行预测分析,不适用于钛合金构件夹杂物的运动规律分析研究。因此,大量

收稿日期:2020-10-23

基金项目:中航工业北京航空材料研究院-华中科技大学先进航空轻质合金材料精密铸造联合实验室、中央引导地方科技发展专项(2020);中国有色集团科技计划项目(2018KJJH05)等资助

作者简介:郄喜望(1982-),河北保定人,硕士,工程师.主要从事航空发动机用钛合金大型复杂构件方面的工作.
电话:13520553912,E-mail:qiexiwang@163.com

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分析。袁芳[8]通过数值模拟方法对离心力场下钛合金充型流动及铸造缺陷进行计算，结果表明：密度大于液态金属的夹杂物，将弥散分布在流体中形成两相流，沿径向向外运动。马清泉[9]通过实验与理论计算方法对轧辊钢夹杂物进行研究，结果表明：轧辊钢冶炼过程中，夹杂物以氧化物、硫化物及其复合夹杂为主，成品件中各种夹杂物的平均尺寸小于 3 μm，仅有极少数夹杂物大于 10 μm；软吹工艺有利于夹杂物的上浮和排除。贾丽敏[10]通过数值模拟方法对 TC4 合金的离心铸造过程进行研究，结果表明：随着重力系数的增加，铸件中夹杂含量增加；且充型路径较长的工艺中，铸件中更容易卷入夹杂与气孔等缺陷。Song 等[11]通过数值模拟计算了 CSP 薄板坯结晶器内钢液的稳态流动，并利用统计方法研究了夹杂与采样表面之间的碰撞事件对夹杂运动和分布的影响。结果表明，随着铸造速度的提高，夹杂物浮至自由表面的比例减小，夹杂物浮至自由表面的时间缩短。直径较大的包裹体更容易在表皮较浅的凝固壳中冻结。然而，这些研究主要集中在对既成夹杂物的分布与尺寸及其对铸件性能的影响等方面，对夹杂物的形成与运动规律的理论研究尚少。

本文作者对立式离心铸造充型过程流体质点受力进行分析，依据流动控制方程和夹杂物在流动场中运动方程，对其进行离散求解，开发了立式离心铸造充型过程夹杂物运动追踪程序，并将其应用于某钛合金铸件的离心铸造转速优化。

1　夹杂物运动过程数值模拟的数学模型

1.1　立式离心铸造流体质点受力分析

立式离心铸造充型过程中，流体微团主要受到重力、离心力及柯氏力的影响。离心铸造的工艺特点决定了建立立式离心铸造数学的模型的特殊性。与普通铸造相较而言，立式离心铸造的流体运动质点在浇注过程中除了受到自身重力和浇注压力的作用，还会受到高速旋转的铸型的作用。图 1 为流体质点在离心铸造充型过程中的受力示意图[12,13]。

流体质点在高速旋转的铸型中受到的离心力，柯氏力与重力表达式分别如公式(1)-(3)所示：

$$F_{ce}=m\times\vec{\omega}^{2}\times r \tag{1}$$

$$F_{co}=2\times m\times\vec{\omega}\times\vec{V} \tag{2}$$

$$G=mg \tag{3}$$

式中，F_{ce} 为离心力，m 为流体质点质量，F_{co} 为柯氏力，ω 为角速度，r 为离圆心的距离，V 为流体相对与

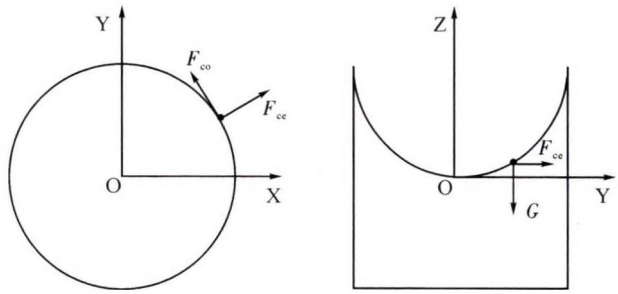


图 1 充型流体微元受力分析图

Fig.1 Force analysis diagram of filling fluid micro-element

高速旋转的转台的速度，G 为重力，g 为重力加速度。

在普通铸造过程中，液体质点相对于铸型，也就是固定坐标系运动。在立式离心铸造过程中，相对于高速旋转的铸型，也就是旋转坐标系来说，液体质点不仅运动速度发生变化，其在各个时刻的速度方向也在发生变化。假设在旋转坐标系中，能够改变液体质点速度方向的力为科里奥利力。流体质点在旋转坐标系中速度如图 2 所示。

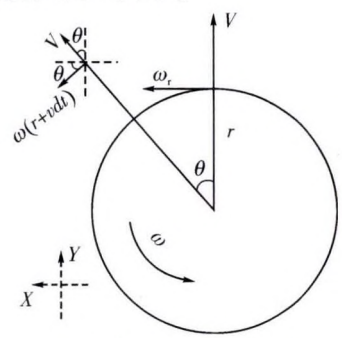


图 2 旋转坐标系速度图

Fig.2 Velocity chart of rotating coordinate system

假设在距离圆心为 r 的位置有一个液体质点，液体质点径向速度为$\overrightarrow{V_{yo}}$，方向沿 Y 轴正向，切向速度为$\overrightarrow{V_{xo}}$，方向沿 X 轴正向。此时：

$$\overrightarrow{V_{xo}}=\vec{\omega}\times\vec{r} \tag{4}$$

$$\overrightarrow{V_{yo}}=\vec{V} \tag{5}$$

浇注过程经历短暂时间 dt 后，转盘转动角度为 $\theta=\vec{\omega}\times t$；此时：

$$\overrightarrow{V'_{xo}}=\vec{V}\times\sin(\vec{\omega}\times dt)+\vec{\omega}\times(\vec{r}+\vec{V}\times dt)\times\cos(\vec{\omega}\times dt) \tag{6}$$

$$\overrightarrow{V'_{yo}}=\vec{V}\times\cos(\vec{\omega}\times dt)+\vec{\omega}\times(\vec{r}+\vec{V}\times dt)\times\sin(\vec{\omega}\times dt) \tag{7}$$

因 dt 相较于式中的其他变量是极小量，故：

$$\sin(\vec{\omega}\times dt)=\vec{\omega}\times dt \tag{8}$$

$$\cos(\vec{\omega}\times dt)=1 \tag{9}$$

因此，上述$\overrightarrow{V'_{xo}}$和$\overrightarrow{V'_{yo}}$可以简化为：

$$\overrightarrow{V'_{xo}}=\vec{V}\times(\vec{\omega}\times dt)+\vec{\omega}\times\left(\vec{r}+\vec{V}\times dt\right) \tag{10}$$

$$\overrightarrow{V'_{yo}}=\vec{V}+\vec{\omega}\times\left(\vec{r}+\vec{V}\times dt\right)\times\vec{\omega}\times dt \tag{11}$$

故有 X 轴加速度为：

$$a_x=\frac{\overrightarrow{V'_{xo}}-\overrightarrow{V'_{xo}}}{dt}=\frac{\vec{V}\times(\vec{\omega}\times dt)+\vec{\omega}\times\left(\vec{r}+\vec{V}\times dt\right)-\vec{\omega}\times\vec{r}}{dt}$$

$$=2\vec{\omega}\times\frac{d\vec{r}}{dt} \tag{12}$$

Y 轴加速度为：

$$a_y=\frac{\overrightarrow{V'_{yo}}-\overrightarrow{V'_{yo}}}{dt}=\frac{\vec{V}+\vec{\omega}\times\left(\vec{r}+\vec{V}\times dt\right)\times\vec{\omega}\times dt-\vec{V}}{dt}$$

$$=\vec{\omega}^2\times\vec{r}+0\times(dt) \tag{13}$$

切向加速度 a_x 即为柯氏加速度，柯氏力参考式(2)。

当转向角速度矢量$\vec{\omega}$与质点线速度不垂直时，应将速度 v 往垂直于$\vec{\omega}$的方向做投影，设夹角$\left(\vec{\omega}+\vec{V}\right)=\theta$，此时柯氏力为 $F_{切}$：

$$F_{切}=2\times m\times\vec{\omega}\times\sin\theta=2\times m\times\vec{\omega}\times\vec{V} \tag{14}$$

此时仍有径向向心加速度为 a_y：

$$a_y=\vec{\omega}^2 r \tag{15}$$

1.2　夹杂物运动方程

夹杂在铸造过程中的变化十分复杂、包括夹杂的卷入、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。

(1)忽略夹杂物的聚合、碰撞、长大行为，将其简化为尺寸、密度不变的单个粒子。

(2)简化夹杂物在充型流场中的受力模型，仅仅考虑对其影响较大的重力、阻力和浮力。获得下式所示夹杂物运动方程[14,15]。

$$\begin{aligned}\frac{du_p}{dt}=&g_i\left(1+\omega^2 r-\frac{\rho_f}{\rho_p}\right)+C_d\frac{3\rho_f}{4\rho_p d_p}|\mu_f-\mu_p|(\mu_f-\mu_p)\\&+\frac{1}{2}C_M\frac{\rho_f}{\rho_p}\frac{d(\mu_f-\mu_p)}{dt}\\&+C_B\frac{9}{\rho_p d_p}\sqrt{\frac{\rho_f\mu}{\pi}}\left(\int_0^t\frac{d(\mu_f-\mu_p)}{dt}\frac{1}{\sqrt{t-\tau}}d\tau\right)\\&+\frac{\rho_f}{\rho_p}\frac{du_f}{dt}\end{aligned} \tag{16}$$

式中，μ_p 为粒子的速度，t 为粒子运动的时间。右边的第 1 项代表重力、离心力和浮力，第 2 项代表斯托克斯力，第 3 项代表虚拟质量力，第 4 项表示贝塞力，最后 1 项代表压力梯度力。

1.3　初始工艺模拟

基于上述数学模型，在华铸 CAE 基础上完成了钛合金立式离心铸造过程夹杂物运动轨迹程序的开发。下面对 1 钛合金支板铸件进行离心铸造充型形貌及过程流体夹杂物运动轨迹预测。

ZTC4 钛合金支板铸件，其三视图及尺寸如下图 3 所示，轴测图如图 4 所示。采用三维建模软件对钛合金支板及其工艺系统进行三维建模，如图 5 所示。紫色为其浇注系统，绿色部分为支板。支板采用经验方法设计其初始工艺为：离心转速 180 r/min；壳温：室温；壳厚 12 mm。

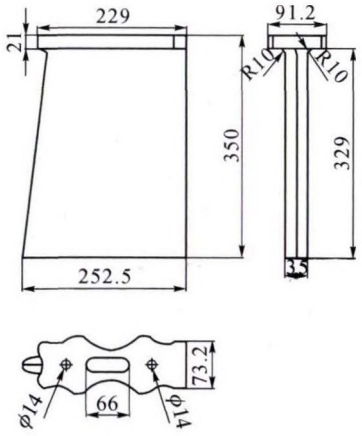


图 3　支板三视图 /mm

Fig.3　Three views of support plate

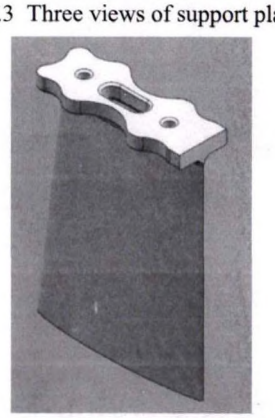


图 4　支板轴测图

Fig.4　Axonometric drawing of support plate

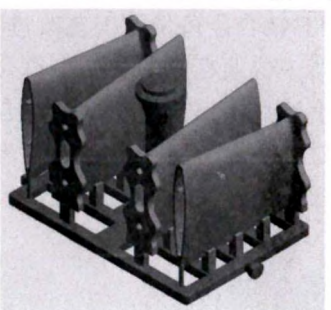
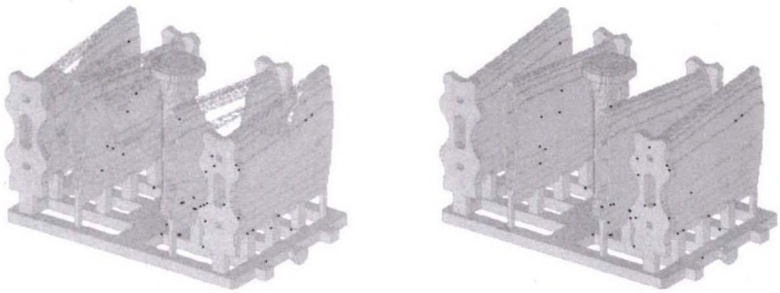


图 5　浇注系统三维图

Fig.5　3D diagram of gating system

对其离心铸造充型夹杂物运动轨迹进行数值计算。结果如下：

对金属液充型过程中夹杂物的运动进行追踪计算，结果如图 6 所示。图 6(a)为充型中后期粒子分布位置图，图 6(b)为充型结束时夹杂物分布位



(a)t=1.80 s　(b)t=2.01 s

图 6 不同时刻夹杂物分布图

Fig.6 Distribution of inclusions at different times

置图。

依据上述工艺，对钛合金叶片铸件进行实际生产试制。生产完成后对铸件进行全面的工业 CT 扫描检测，获得铸件内部的夹杂缺陷分布信息，如图 7 所示。对比实际铸造铸件与模拟铸件中关键部位的缺陷信息，可见，与数值模拟结果相同，夹杂散乱分布在支板各处。因此，需要进一步对其铸造工艺进行优化。

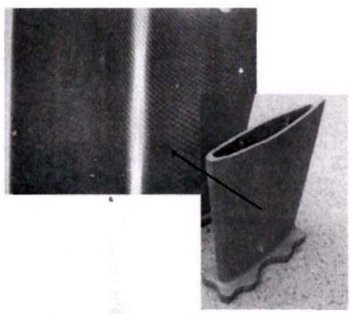


图 7 试制铸件及夹杂扫描结果

Fig.7 Scanning results of trial castings and inclusions

2 钛合金支板零件离心转速工艺优化

钛合金支板铸件中的夹杂缺陷严重影响铸件性能，应用经验对钛合金铸件的工艺改进费时费力，不利于实际生产中快速有效的生产出符合质量要求的铸件。采用上述数值模拟程序重现钛合金支板铸件铸造的充型过程，通过对铸造过程中流动场的科学分析，寻找夹杂运动规律，为钛合金支板铸件铸造过程提供科学的工艺优化方法。

首先依据经验确定钛合金离心铸造转速为 100~250 r/min，选取 120、150、210、240 r/min 4 组铸型转速。模拟结果如下：图 8~ 图 11 分别为 120、150、210 及 240 r/min 转速下充型结束时刻铸件中夹杂物的分布图。可以看出，120 r/min 转速下，夹杂物主要分布在直浇道右侧内外支板中，夹杂在右侧支板中各处较为均匀广泛分布。右侧横浇道中聚集了少数夹杂物。150 r/min 转速下，夹杂物在直浇道左右两侧内外支板均有分布，非常分散。但横浇道中也停留了较多的夹杂物。210 r/min 转速下，夹杂物少量集中分布在直浇道左侧外支板高处中部，有一些集中分布在直浇道右侧内支板前端及中间处，较多的分布在直浇道右侧外支板中。但右侧外支板中的夹杂物在支板各处均有停留，分布较为散乱。横浇道中有少量夹杂物停留。通过对不同转速条件下钛合金支板铸件充型过程中金属液填夹杂物运动轨迹预测可知，150 r/min 转速下夹杂物分布较为集中，120、210 及 240 r/min 转速下夹杂物在充型结束时刻在铸件中分布散乱。最终选取适合本算例的离心转速为 150 r/min。

3 结论

(1)对 ZTC4 钛合金支板进行了实际浇注试验，实际铸件 CT 探伤扫描夹杂结果与数值模拟一致，验证了本文设计的程序的有效性。

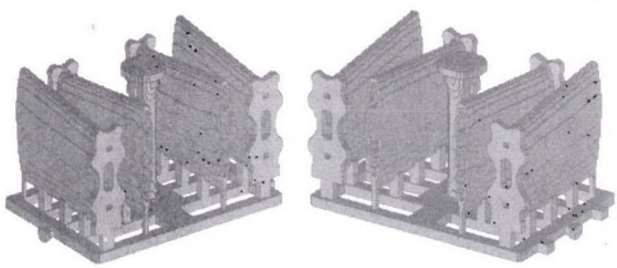


图 8 充型结束时刻粒子分布图(n=120 r/min)

Fig.8 Particle distribution at the end of filling process at n= 120 r/min

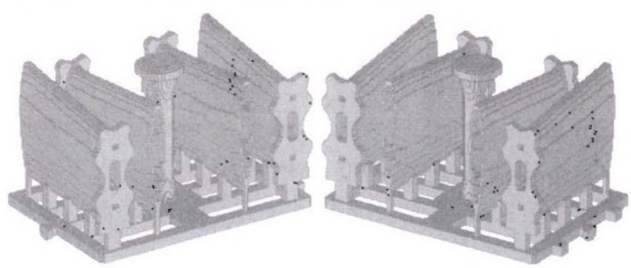


图 9 充型结束时刻粒子分布图(n=150 r/min)

Fig.9 Particle distribution at the end of filling process at n=150 r/min

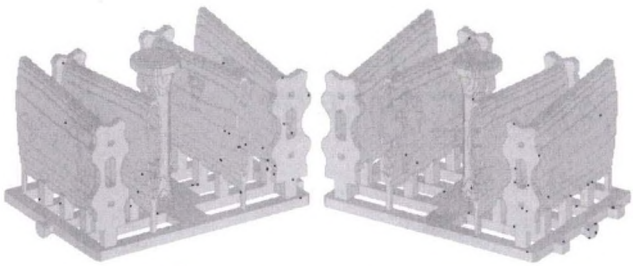


图 10 充型结束时刻粒子分布图(n=210 r/min)
Fig.10 Particle distribution at the end of filling process at n=210 r/min

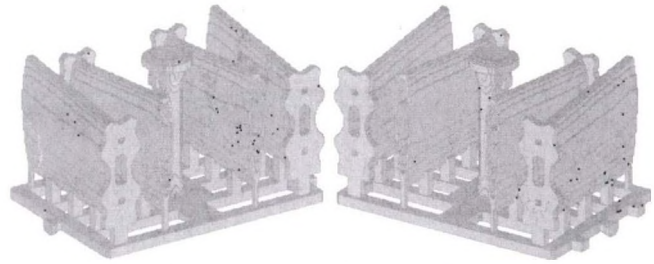


图 11 充型结束时刻粒子分布图(n=240 r/min)
Fig.11 Particle distribution at the end of filling process at n=240 r/min

(2)利用该数值模拟程序对一钛合金支板在不同转速条件下的充型顺序与夹杂物运动轨迹进行了预测，结果适合该钛合金支板离心铸造的最佳离心转速为 150 r/min。

参考文献：

[1] 王艳光，彭晓东，赵辉. 离心铸造镁合金的研究现状及展望[J]. 热加工工艺, 2011(23): 30-32.

[2] Saleh B, Ma J J. Effect of Main Parameters on the Mechanical and Wear Behaviour of Functionally Graded Materials by Centrifugal Casting: A Review[J]. Metals and Materials International, 2019, 25 (6): 1395-1409.

[3] Xiaofeng Cai, Bao Y, Lin L. Effect of Al Content on the Evolution of Non-metallic Inclusions in Si-Mn Deoxidized Steel[J]. Steel Research International, 2016, 87(9):1168-1178.

[4] Bochao Lin, Renci Liu, Qing Jia. Effect of yttria inclusion on room temperature tensile properties of investment cast TiAl[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 712: 73-79.

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

[6] Zhixian Peng J L F H. Comparative study of non-metallic inclusions on the critical size for HIC initiation and its influence on hydrogen trapping [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(22): 12616-12628.

[7] 唐立超，翟彦博. 电磁离心铸造 Al-15Si-6Ni 外层颗粒增强梯度材料成形机制[J]. 铸造, 2019, 68(03): 269-276.

[8] 袁芳. 离心力场下钛合金充型流动及铸造缺陷的研究 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学, 2006.

[9] 马清泉. 轧辊钢脱氧及夹杂物控制技术研究 [D]. 沈阳：东北大学, 2008.

[10] 贾丽敏. TC4 合金立式离心充型凝固行为研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学, 2010.

[11] Song X, Cheng S, Cheng Z. Numerical Computation for Metallurgical Behavior of Primary Inclusion in Compact Strip Production Mold [J]. Isij International, 2012, 52(10): 1824-1831.

[12] 凌云，王红红，周建新，等. 钛合金离心铸造数值模拟技术及应用[J]. 铸造设备与工艺, 2015(1): 31-34.

[13] Nannan Song, Yikun Luan, Yunlong Bai, et al. Numerical simulation of solidification of work roll in centrifugal casting process [J]. 材料科学技术(英文版), 2012, 028(2): 147-154.

[14] Yuan Y L, Tang S Q, Yuan Y. Motion of traver particals in a centrifugal pump and its tracking characteristics [J]. Journal of Hydrodynamics, 2012(5): 155-163.

[15] Zhou J X, Wang M, J Y Y. Numerical simulation and tracing to the motion of inclusion particles in casting process [J]. Materials Research Innovations, 2015, 19(5): S5-S654.

技术资料邮购

《铸件均衡凝固技术及应用实例》

本书由西安理工大学魏兵教授编著。共8章：1、铸铁件均衡凝固与有限补缩；2、铸铁件冒口补缩设计及应用；3、压边浇冒口系统；4、浇注系统大孔出流理论与设计；5、铸件均衡凝固工艺；6、铸钢、白口铸铁、铝、铜合金铸件的均衡凝固工艺；7、浇注系统当冒口补缩设计方法；8、铸件填充与补缩工艺定量设计实例。全书320页。

特快专递邮购价：280元。

邮购咨询：李巧凤　　电话/传真：029-83222071　　技术咨询：13609155628