

基于 ProCAST 的筒形件卧式离心铸造充型流动模拟

鲁素玲¹, 曹磊¹, 郭志红¹, 张秀照², 张荣华³, 李含运²

(1. 河北科技大学材料科学与工程学院, 河北材料近净成型重点实验室, 河北石家庄 050054;
2. 邢台正锑机械轧辊有限公司, 河北邢台 055450; 3. 华北理工大学冶金与能源学院, 河北唐山 063210)

摘要: 在分析卧式离心铸造金属流动的特点和ProCAST软件原理的基础上, 提出筒形件卧式离心铸造分阶段建模的方法。将卧式离心铸造分为流道部分的重力流动和接触模型后的离心流动两部分, 利用已有水力学试验结果对模拟结果进行了验证, 结果符合良好。分析了摩擦条件、初始速度对不同转速离心流动行为的影响。该方法验证了基于ProCAST筒形件卧式离心铸造过程金属流动和温度场模拟的可行性。

关键词: 卧式离心铸造; 筒形件; 分阶段建模; 水力学试验

卧式离心铸造是一种实现双层或多层复合铸件的简便方法, 具有装备简单、工艺稳定、效率高、组织致密和加工量少等优点, 已广泛应用于复合轧辊、复合钢管、缸套等筒形件的铸造。传统的卧式离心铸造的生产依靠生产经验, 严重影响了该技术的进步和发展。相对其他铸造方法, 离心铸造过程尤其是离心充型过程的数值模拟开展较晚。Hwang等^[1]于1990年在瑞士达沃斯举行的铸造、焊接和先进凝固过程建模第5次会议上, 对立式离心铸造金属液流动与传热数学模型的研究发表了报告。1992年Inoue等^[2]对离心铸造过程的粘塑性应力状态进行了数值模拟研究, 并开发了相应的计算模型。Humphreys等^[3-5]在2009-2013年利用内部程序对离心铸造过程和离心铸造过程中的复杂自由液面进行了研究。Kharicha等^[6-7]将改进的浅水方程应用在轧辊水平离心铸造模拟中, 提高了充型模拟的精度, 并利用有限差分法研究了双层流动的自由液面数学模型。国内曾兴旺等对卧式离心铸造轧辊开展了数值模拟的研究, 并模拟了筒形件充型流动^[8]。吴士平和徐达鸣等^[9-11]对立式/卧式离心铸造充型和凝固行为进行了数值模拟, 并采用水力学模拟的方法验证了模拟的准确性。宋男男等^[12]对轧辊卧式离心铸造过程的流动和凝固建立了数学模型, 并运用程序进行了模拟。徐耀增^[13]和张勃等^[14]则分别利用Fluent与Flow-3D对卧式离心铸造过程流场与温度场进行了研究。这些模拟研究为卧式离心铸造的技术优化和生产控制提供了有效途径, 但一般需要独立编制程序, 在工程实践中的推广应用受到很大限制。本研究针对用途广泛的筒形件卧式离心铸造过程, 采用分段建模方法利用ProCAST软件对其流体流动进行系统的研究。

1 基于ProCAST软件筒形件卧式离心铸造分段建模

筒形件卧式离心铸造装置如图1所示。选取浇注过程中熔体内任意质点进行析, 设定熔体质点质量为 m , 铸型内径为 r , 铸型的旋转角速度为 ω , 铸型绕 z 轴方向旋转。根据质点流动特点, 可将其流动行为分为两个阶段: ①未接触到铸型之前, 质点在流道内流动时, 仅受重力作用和流道壁之间的摩擦阻力, 在流出流道后为自由流动仅受重力作用, 称为重力流动阶段; ②当金属接触铸型并随铸型旋转运动

作者简介:

鲁素玲(1973-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为离心铸造数值模拟。
E-mail: lusuling0102@163.com

通讯作者:

曹磊, 男, 副教授。E-mail: 306310565@qq.com

中图分类号: TG244+.1
文献标识码: A
文章编号: 1001-4977(2019)09-1036-06

基金项目:

河北省重点研发计划自筹项目(18211040)。

收稿日期:

2019-01-31 收到初稿,
2019-04-11 收到修订稿。

时,称为离心流动阶段。

基于ProCAST离心铸造模拟时,铸件需设置为离心状态,在立式离心铸造的模拟中已成功应用^[15]。卧式离心铸造流体接触铸型前不受离心力,接触铸型后受离心力作用开始离心流动,运用ProCAST软件模拟卧式离心铸造时铸件部分仅能包含筒型件,流道内熔体的流动无法模拟。近年来,利用ProCAST软件在卧式离心铸造方面的模拟研究,均采用不考虑流道流动的简化方法^[16-17]。这些方法中浇口的位置、面积、速度等参数设计缺乏理论依据,同时流动模拟准确性也有待验证。

本研究在气缸套零件充型和凝固模拟研究的基础上^[18-19],采用分段建模的方式,对筒型件卧式离心铸造流动过程进行模拟。依据水力学试验装置^[20],对筒型件卧式离心铸造过程的重力流动阶段和离心流动阶段分别进行建模,并研究其流动规律。

1.1 浇道内重力流动阶段建模

重力流动阶段的建模和模拟结果如图2。数值模拟筒状件的几何尺寸为 $\Phi 180\text{ mm} \times 430\text{ mm}$,流体的运动粘度设定为 $1.109\text{ N} \cdot \text{s}/\text{mm}^2$ 。从模拟结果可以看出,流道内流体的流动与实际情况相符,流出流道后的流动仅受重力影响。流体接触铸型瞬时的速度 V 分为 V_x 和 V_z ,如

图2b所示。测量流体接触铸型时的面积 F 及熔体接触铸型的位置 S_0 ,作为离心流动阶段浇口的初始边界条件。

1.2 型腔内离心流动阶段建模

根据重力流动阶段流体接触铸型瞬时流体面积 F 及流体接触铸型的位置 S_0 建立离心阶段几何模型,如图3a所示。将重力流动阶段流体接触铸型瞬时的速度 V 作为离心流动阶段浇口的初始边界条件,赋予浇口参数Velocity。设定转速为440 rpm,模拟结果如图3b所示。由图3b可知,离心流动阶段流体流动模拟结果筒型件卧式离心流动一般规律为螺旋流动。

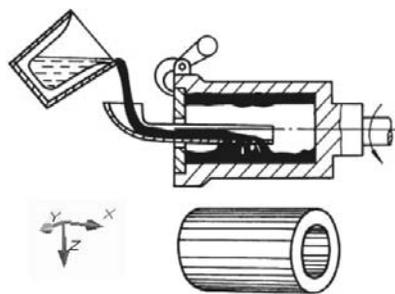


图1 筒形件卧式离心铸造装置

Fig. 1 Schematic diagram of horizontal centrifugal casting machine for cylindrical parts

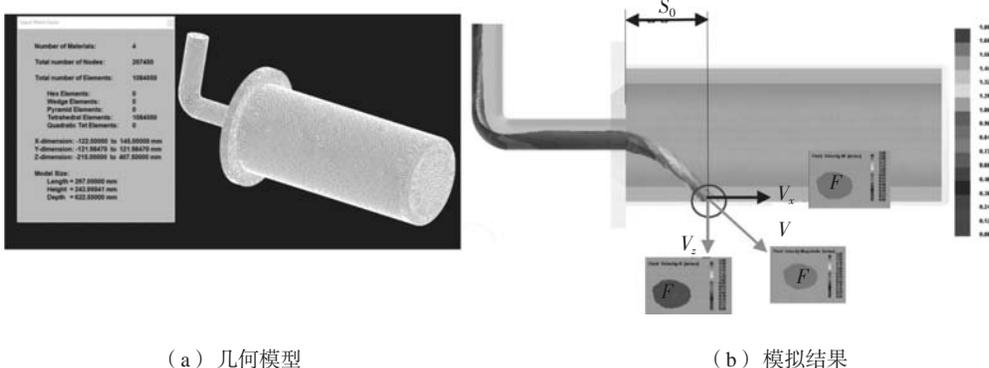
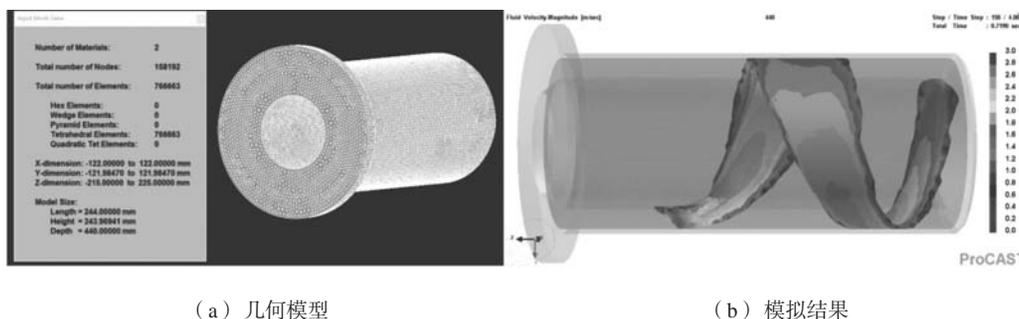


图2 重力流动阶段模拟

Fig. 2 Model and simulation results of gravity flow stage



(a) 几何模型

(b) 模拟结果

图3 离心阶段几何模型与模拟结果

Fig. 3 Geometric model and simulation results of centrifugal flow stage

2 卧式离心铸造转速对螺距的影响

为了验证基于ProCAST软件筒型件卧式离心分段模型正确性,进一步模拟了不同转速时流体的螺距。铸型转速分别设定为305 rpm、390 rpm、495 rpm和600 rpm,摩擦系数为0.9。利用PRO/E三维建模,用ProCAST模拟,并测量流体螺旋带的螺距,结果如图4所示。

分析图4中流体的速度可以看出,流体的速度在铸型底部最高,向铸型顶部转动时不断减小,到达顶部时最低,随后又逐渐增大,流体速度这种分布规律能充分反映卧式离心铸造中重力对流体速度的影响。对比不同转速的流体速度也可看出,随着转速的增加,流体的平均速度增加,螺距减小,这一规律也符合实际生产中的经验规律。转速为305 rpm时,流体达到铸型顶部时,流体速度较低,流体宽度增加明显。初步分析原因应是分段离心建模采用的高速流动模型模拟该情况时存在一定误差。

图5为模拟整圈螺距、半圈螺距与转速的关系曲线,图中水力学试验数据来自文献[20]。从图中可以看出,模拟半圈螺距随转速的增加逐渐减小。主要是由于流体与旋转的铸型接触后,很快达到铸型的旋转速度,与铸型一同旋转,铸型转速越快,流体完成半个螺距的时间越短。其他条件不变时,流体开始离心流

动时的初速度不变(即 V_x 不变),因此在较短时间内流体水平流动的距离较小,即螺距较小。同时半圈螺距的模拟数据均小于水力学试验数据。分析流动过程可知,模拟中设定铸件的转速为定值,因此流体进入铸件后,迅速达到设定转速,但试验中流体的转速是在接触铸型后逐渐增加到铸型转速后才保持定值旋转,因此试验中半圈螺距偏大。另外,从模拟结果可以看出,整圈螺距并不是半圈螺距的2倍,这主要是由于流体在螺旋流动过程中,需要克服铸型内壁的摩擦阻力,同时第一个半圈时存在浇口影响区域,流体转速不能达到铸型转速所造成。

3 卧式离心铸造流动规律

3.1 边界条件对螺旋带形成时间的影响

利用上述建模方法对不同网格尺寸的模型形成第一圈螺旋带所需时间(T_1)进行了对比研究,结果如图6所示。由图可以看出,转速接近305 rpm时,随转速增加 T_1 迅速下降;当转速高于345 rpm后,随转速增加 T_1 呈近似线性下降。把文献[11]水力学试验数据和本试验模拟结果对比,可以看出:转速为345~600 rpm时,形成第一圈螺旋带时间与试验结果符合较好,但转速为305 rpm时,存在较大误差。结合速度模拟结果,转速为305 rpm时,流体到达铸型顶端时速度较低,模拟

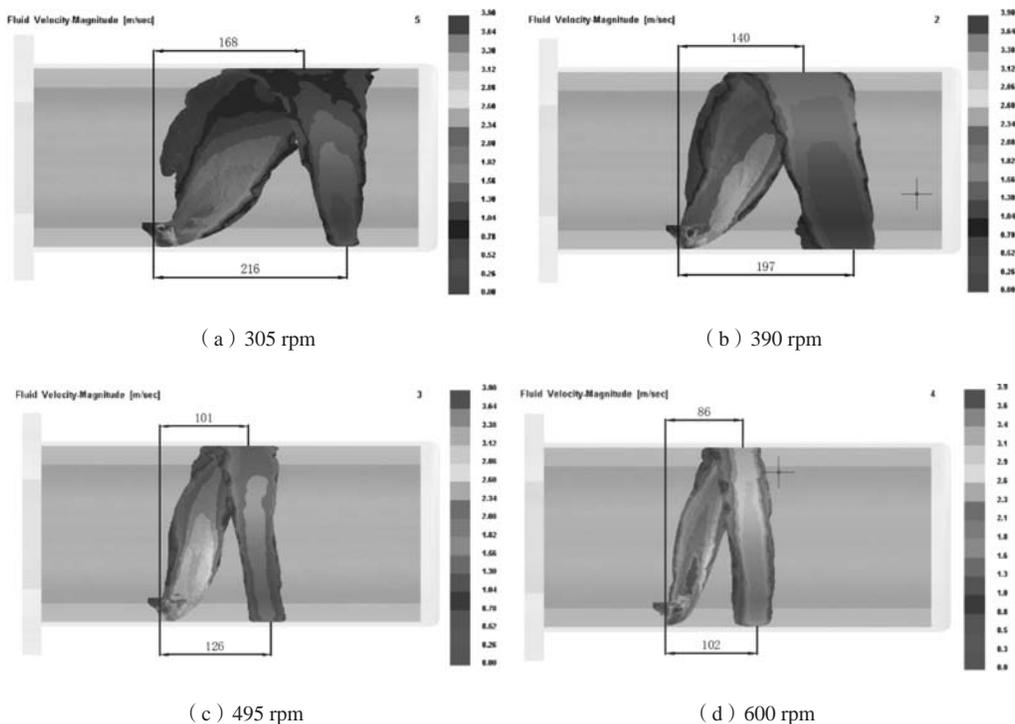


图4 不同转速条件下螺距模拟结果

Fig. 4 Simulation results of thread interval at different rotation speeds

结果显示流体较多沿轴向流动而展宽，而圆周流动减少，最终需要较大 T_1 完成一圈的螺旋流动。实际筒型件离心铸造过程中，为避免“雨淋”现象，转速远高于极限转速，流体经过铸型顶部的速度也较大，因此分段建模能较可靠地模拟实际离心流动过程。从图中还可看出，采用细化和优化的网格后形成第一圈螺旋带所需时间与水力学试验的一致性更高，这主要是由于充型自由表面以动量守恒的作用大于质量守恒作用的 $FREESFOPT=2$ 的算法模型，但该模型对网格质量很敏感，因此在离心流动模拟中需要采用尺寸较小且质量较高的网格。

3.2 边界条件对螺旋带螺距、宽度和厚度的影响

实际生产中，不连续的螺旋流动可能造成铸件凝固组织存在缺陷，因此螺旋流动螺距与料流宽度也是值得注意的问题。由筒型件卧式离心铸造的受力分析

可知，影响离心过程流体螺旋带螺距的主要因素有流体接触铸型时沿轴向的速度 V_x 、壁面摩擦条件、转速、流体运动粘度、铸型半径等。本研究中选定摩擦条件、初始 V_x 对不同转速流体螺旋带半圈螺距的影响，结果如图7所示。由图可以看出，所有螺距随转速增加而减小； V_x 对所有转速条件下的螺距均有影响，且 V_x 越小螺距越小；而 $WALLF$ （PROCAST软件中用于计算铸型壁面处自由表面速度的运行参数。0.9说明壁面光滑，0.8说明壁面粗糙）对螺距的影响随转速增加而减小。实际生产中，由流道部分影响的 V_x 较铸型内表面的摩擦条件更容易控制螺旋带螺距的大小。因此，普遍采用侧浇口的流道，可有效减少熔体接触铸型时的轴向速度及螺距。

图8所示为转速、摩擦条件对螺旋带宽度和厚度的影响。模拟结果表明，在 $WALLF$ 为0.8时，随着转速的增加，流体螺旋带的宽度减小，同时流体的厚度也有

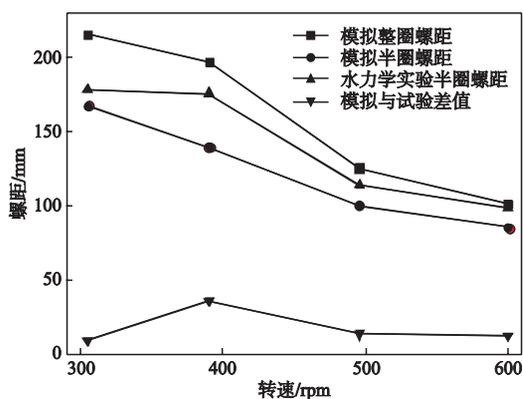


图5 螺距与转速的关系

Fig. 5 Relationship between thread interval and rotation speed

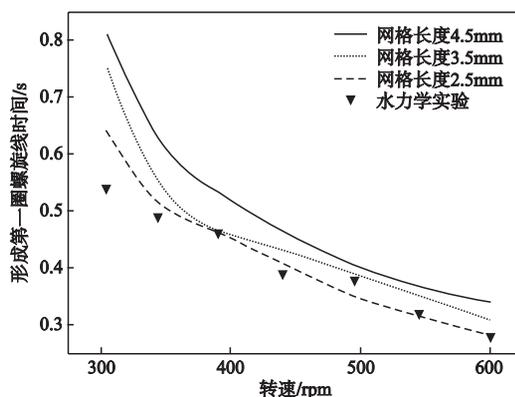


图6 形成第一圈螺旋带时间

Fig. 6 Formation time of the first spiral band

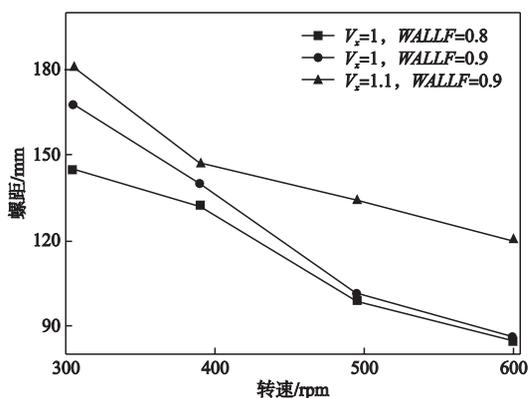


图7 摩擦与初始 V_x 对螺距的影响

Fig. 7 Influence of friction parameter and initial speed V_x on thread interval

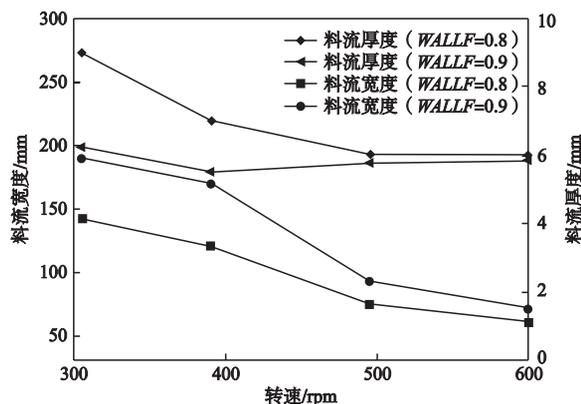


图8 转速对金属流宽度和厚度的影响

Fig. 8 Influence of rotation speed on width and thickness of metal flow

所减小；在WALLF为0.9时，随着转速的增加，流体螺旋带在宽度减小的同时，流体厚度变化很小。这主要是由于转速增加，螺旋带的形成时间（ T_1 ）减小， T_1 时间内浇注进入铸型的流体总量减少，因此转速增加，螺旋带宽度减小。当铸型壁面较粗糙时，流体克服摩擦阻力在铸型内壁扩展流动的阻力较大，转速低时流体不易展宽造成螺旋带厚度较大，随转速增加，离心力增大能有效增加展宽流动，而减小料流厚度；铸型壁面较光滑时，流体能在较低离心力作用下迅速扩展形成较薄螺旋带，但因粘度和网格等因素的限制，铸型转速再增加时，流体带的厚度变化较小。为准确模拟料流宽度和厚度，可进一步减小和优化网格，但网格细化的同时会增加模拟计算时间，因此可根据模拟精度要求设置网格。实际生产中，增加铸型内壁光滑程度，提高转速可有效减小料流厚度，同时增加单位时间浇注进入铸型的流体总量，可有效防止流体不连续造成的凝固缺陷。

4 结论

(1) 利用分段建模的方法模拟了已有水力学试验的流体流动，模拟结果显示：在其他条件不变时，流体螺旋带的螺距随铸型转速的增加而减小，符合实际情况；但由于软件限制，流体接触旋转铸型时的浇口影响区域模拟结果与实际流动尚有一定误差。

(2) 不同网格尺寸、不同转速的模拟结果表明：模型对网格质量很敏感，应根据模拟精度要求采用尺寸较小且质量较高的网格；分段离心建模的高速流动模型适合转速较高的离心铸造充型过程模拟。

(3) 综合分析模拟结果确定，转速增加可有效减小螺旋带的螺距、厚度和宽度；初始轴向速度 V_z 减小可有效减小螺旋带的螺距；铸型内壁越粗糙，螺旋带的螺距和宽度越小，但螺旋带厚度越大。

致谢：感谢中国科学院金属研究所在软件方面的帮助。

参考文献：

- [1] HWANG J D, LIN H J, SU K C. Mathematical modeling of fluid flow and heat transfer during vertical centrifugal casting [C]// The Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes V. Davos: The Minerals, Metals and Materials Society, 1990: 23-25.
- [2] INOUE T, JU D Y. Analysis of solidification and viscoplastic stresses incorporating a moving boundary an application to simulation of the centrifugal casting process [J]. Journal of Thermal Stresses. 1992, 15 (1) : 109-128.
- [3] SHEVCHENKO D M, MCBRIDE D, HUMPHREYS N J, et al. Centrifugal casting of complex geometris: computational modelling and validation experiments [C]// 12th International Conference on Modeling of Casting, Welding, and Advanced Solidification Processes. Vancouver: The Minerals, Metals and Materials Society. 2009: 77-84.
- [4] HUMPHREYS N J, MCBRIDE D, SHEVCHENKO D M, et al. Modelling and validation: casting of Al and TiAl alloys in gravity and centrifugal casting processes [J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37: 7633-7643.
- [5] MCBRIDE D, HUMPHREYS N J, CROFT T N, et al. Complex free surface flows in centrifugal casting: computational modelling and validation experiments [J]. Computers & Fluids, 2013, 82: 63-72.
- [6] KHARICHA A, BOHACEK J, LUDWIG A, et al. Modified shallow water equations with application for horizontal centrifugal casting of rolls [J]. Journal of Fluids Engineering, 2015, 137 (11) : 1115.
- [7] BOHACEK J, KHARICHA A, LUDWIG A, et al. A (non-) hydrostatic free-surface numerical model for two-layer flows [J]. Applied Mathematics and Computation, 2018, 39: 301-317.
- [8] 曾兴旺, 陈立亮, 刘瑞祥. 离心铸造数值模拟技术的研究与开发 [J]. 铸造, 2004, 53 (4) : 310-313.
- [9] XU D M, YU Q M, LI X, et al. Mold filling behavior of melts with different viscosity under centrifugal force field [J]. Journal of Materials Sciences & Technology, 2002, 18: 149-151.
- [10] WU S P, LI C Y, GOU J J, et al. Numerical simulation and experimental investigation of two filling methods in vertical centrifugal casting [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition), 2006, 16 (5) : 1035-1040.
- [11] 孙喆. 复合轧辊离心铸造充型及凝固过程数值模拟 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.

- [12] XU Z A, SONG N N, TOL R V, et al. Modelling of horizontal centrifugal casting of work roll [J]. *Materials Science and Engineering*, 2012, 33: 1-9.
- [13] 徐耀增, 杜振拴, 宋绪丁. 离心铸造凝固过程的流场和温度场数值模拟 [J]. *热加工工艺*, 2012, 41 (21): 41-43, 46.
- [14] 张勃, 杜学铭, 顾剑峰. 基于Flow-3D的卧式离心铸造管数值模拟 [J]. *热加工工艺*, 2018, 47 (23): 81-85.
- [15] 胡海涛, 张熹雯, 朱春雷, 等. 工艺参数对离心铸造TiAl合金杆形件缩孔缺陷影响的数值模拟 [J]. *铸造*, 2018, 67 (9): 799-804, 809.
- [16] 邓传杰, 汪选国, 杜学铭. 离心铸造复合管外层充型与凝固数值模拟 [J]. *铸造技术*, 2016, 37 (6): 1197-1201.
- [17] 高浩, 吴龙, 艾子健. 汽车缸套离心铸造凝固数值模拟研究 [J]. *汽车零部件*, 2014 (2): 22-25.
- [18] LU S L, XIAO F R, ZHANG S J, et al. Simulation study on the centrifugal casting wet-type cylinder liner based on ProCAST [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 73 (1): 512-521.
- [19] 鲁素玲. 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]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.
- [20] 宋男男, 吴士平, 栾义坤, 等. 卧式离心铸造过程数值模拟与水力学试验研究 [J]. *物理学报*, 2009 (6): 112-117.

Simulation on Filling Flow of Horizontal Centrifugal Casting of Cylindrical Parts Based on ProCAST

LU Su-ling¹, CAO Lei¹, GUO Zhi-hong¹, ZHANG Xiu-zhao², ZHANG Rong-hua³, LI Han-yun²

(1. Hebei Key Laboratory of Material Near-Net Forming Technology and College of Material Science and Engineering of Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050054, Hebei, China; 2. Xingtai ZhengKun Machinery & Mill Roll Co., Ltd., Xingtai 055450, Hebei, China; 3. College of Metallurgy and Energy of North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei, China)

Abstract:

Through analyzing the characteristics of metal flow in horizontal centrifugal casting and understanding deeply the principle of ProCAST software, a method of staged modeling for horizontal centrifugal casting of cylindrical parts was proposed. In the staged modeling, the horizontal centrifugal casting process was divided into two parts: gravity flow in the flow passage and centrifugal flow after contacting cooling mold. The simulated results were in good agreement with the previous the results of hydraulic test study. In addition, the influences of friction conditions and initial velocity on centrifugal flow behavior at different rotating speeds were analyzed. Results show that this method based on ProCAST is feasible for simulating metal flow and temperature field in horizontal centrifugal casting process of cylindrical parts.

Key words:

horizontal centrifugal casting; cylindrical parts; staged modeling; hydraulic experiment
