

镁合金离心铸造工艺数值模拟研究

康建明<sup>1</sup> 梁海成<sup>1</sup> 赵大志<sup>2</sup> 乐启炽<sup>2</sup>

(1.沈阳理工大学材料科学与工程学院; 2.东北大学材料科学与工程学院)

**摘 要** 为研究镁合金在卧式离心铸造条件下的流动性,以 AZ31B 镁合金为对象,采用有限元数值模拟,探究了不同初始条件下离心铸造的温度场和压力场的分布,分析了从浇注到凝固过程中的流动和温度变化情况。结果表明,受流动、旋转和回流等影响,温度场存在小范围波动,总体趋势是浇注后温度短时间内上升,然后逐渐下降直至凝固。分析了铸型内壁压力场分布,发现随着浇注过程进行,内表面压力由负压逐渐增大至平稳值,且随温度变化不大,随离心转速的增大而增大。

**关键词** 镁合金;AZ31B 镁合金;离心铸造;数值模拟

**中图分类号** TG146.22;TG249.4;TP311

**文献标志码** A

**DOI**:10.15980/j.tzzz.2023.04.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Numerical Simulation of Centrifugal Casting Process for Magnesium Alloy

Kang Jianming<sup>1</sup>, Liang Haicheng<sup>1</sup>, Zhao Dazhi<sup>2</sup>, Le Qichi<sup>2</sup>

(1.School of Materials Science and Engineering, Shenyang Ligong University;

2.School of Materials Science and Engineering, Northeastern University)

**Abstract:** In order to understand the macroscopic flow of magnesium alloy in horizontal centrifugal casting, AZ31B magnesium alloy was simulated by means of finite element method to explore the distribution of temperature field and pressure field of centrifugal casting under different initial conditions. The flow and temperature changes from pouring to solidification were analyzed. It is found that the temperature field is fluctuated in a small range under the influence of flow, rotation and backflow. The general trend is that the temperature is increased in a short time after pouring, and then gradually decreased until solidification. The pressure field distribution of inner wall of centrifugal cylinder was analyzed. It is found that the inner surface pressure is increased gradually from negative pressure to stable value with pouring, and its change can be neglected with the temperature, while increased with the increase of centrifugal speed.

**Key Words:** Magnesium Alloy, AZ31B Magnesium Alloy, Centrifugal Casting, Numerical Simulation

随着高速列车、汽车、宇航、电子、电器等行业的不断发展,对高性能镁合金的需求量越来越大,传统的材料制备方法已难以满足其需求<sup>[1]</sup>,有研究者采用离心铸造制备镁合金铸件<sup>[2]</sup>。

有限元数值模拟技术的快速发展,使其在离心铸造领域应用越来越多,实现了离心铸造的可视化和可分析化。从宏观的充型模拟<sup>[3-4]</sup>、凝固模拟<sup>[5]</sup>到微观的凝固组织模拟<sup>[6]</sup>和缺陷模拟<sup>[7-8]</sup>,有限元数值模拟技术在离心铸造领域发挥着越来越重要的作用<sup>[9-10]</sup>。AKHIL S K 等<sup>[11]</sup>采用垂直离心铸造工艺制备了功能梯度 A390 合金空心圆筒和含镁锆 A390 合金空心圆筒。利用

Flow-3D 软件,在立式离心铸造机中获得优化空心圆筒的最佳转速。YIN Y J 等<sup>[12]</sup>对复杂钛合金铸件立式离心铸造充型过程进行了物理模拟研究。结合成熟的粒子跟踪技术(PTV),获得了不同转速下 VCC(垂直离心铸造)填充过程的高速摄影图像。通过对定量试验数据的分析和建模,研究了不同结晶器速度下钛合金熔体在型腔中的流动行为特征和运动规律。

本研究以 AZ31B 镁合金为对象,针对离心铸造过程进行宏观数值模拟分析,探究了不同参数对离心铸造过程中温度场及压力场的影响,为离心铸造镁合金提供参考。

收稿日期:2022-06-12;修改稿收到日期:2022-07-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(2021LYF9012);辽宁省教育厅科学研究经费资助项目(LG202010)

第一作者简介:康建明,男,1997 年出生,硕士研究生,沈阳(110159),E-mail:982769962@qq.com

通信作者:梁海成,男,1976 年出生,副教授,沈阳(110159),E-mail:hcliang1976@sylu.edu.cn

引用格式:康建明,梁海成,赵大志,等. 镁合金离心铸造工艺数值模拟研究[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(4):452-456.

KANG J M, LIANG H C, ZHAO D Z, et al. Numerical simulation of centrifugal casting process for magnesium alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(4):452-456.

1 模型的建立

为简化计算,作如下假设:①假设合金为同一连续介质;②流体为不可压缩流体;③壁面处无滑移;④离心滚筒为刚性材料,无塑性变形。

数学模型的基本方程包括:质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律。物理模型见图 1,模型的中间为流体区域,外围为铸型的固体区域。

采用混合式网格划分,对流体域和固体域分别采用六面体网格划分,流体域和固体域接触面部分采用 Interface 来命名,然后再进行混合,混合后网格质量在 0.7 以上,网格的歪斜度在 0.6 以上,质量良好,网格图片见图 2。经过网格无关性验证,本次划分网格 276 388 个单元,最小网格无负体积出现。根据  $y+$  值估算边界层第 1 层网格厚度,综合不同的模拟,第 1 层网格厚度设为 0.125 mm,增长率设置为 1.2。



图 1 离心铸造物理模型  
Fig.1 Centrifugal casting  
physical model

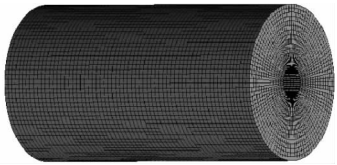


图 2 网格模型  
Fig.2 Mesh model

2 数值模拟的设定

2.1 模型的选择

在模拟中,分别使用了湍流模型、能量方程模型、多相流 VOF 模型以及凝固熔化模型<sup>[13-20]</sup>。

在凝固过程中,金属液所具有的热焓  $H$  为:

$$H = h_{\text{ref}} + \int_{T_{\text{ref}}}^T C_p dT + \beta L \tag{1}$$

式中,  $h_{\text{ref}}$  是参考显热焓, J;  $C_p$  为定压比热容, J/(kg · K);  $L$  是潜热, J/mol;  $T_{\text{ref}}$  为参考温度, K;  $\beta$  为液相体积分数。

使用焓孔隙率法不跟踪精准的液-固前沿,而是将液-固糊状区视为多孔区。使用液相分数  $\beta$  来描述糊状区,当材料处于液态时,液相分数为 100%,当完全凝固后,液相分数为 0。

考虑到糊状区在液相变为固相时的动量损失,通过在动量方程后添加汇项来表达损失:

$$S = \frac{(1-\beta)^2}{(\beta^3 + \epsilon)} A_{\text{mush}} (\vec{v} - \vec{v}_p) \tag{2}$$

式中,  $\epsilon$  为防止分母为 0 的极小值 0.001;  $A_{\text{mush}}$  为糊状区

常数;  $\vec{v}$  为该时刻该网络的速度矢量;  $\vec{v}_p$  为拉出速度, m/s。

2.2 边界条件设定

首先把 Interface 对应起来,选择 Coupled Wall 进行流体域和固体域之间的传热耦合,同时保证流体不会流过耦合面。

入口处选用速度型入口边界条件,入口速度设置为 0.4 m/s,根据定量浇注原则,有:

$$\pi r_{\lambda}^2 v_{\lambda} t = \pi (R_1^2 - R_2^2) h \tag{3}$$

式中,  $r_{\lambda}$  为浇注入口半径, m;  $v_{\lambda}$  为浇注速度, m/s;  $t$  为浇注时间, s;  $R_1$  为铸件外径, m;  $R_2$  为铸件内径, m;  $h$  为铸件长度, m。

选择浇注厚度为 15 mm 的铸管,入口浇注速度选择 0.4 m/s,浇注时间为 4.22 s。

由于圆管内、外侧的表面积不相等,所以对内侧和对外侧的传热系数不同,传热过程计算公式为<sup>[21]</sup>:

$$\phi = \frac{\pi l (t_{fi} - t_{fo})}{\frac{1}{h_i d_i} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{1}{h_o d_o}} \tag{4}$$

$$\phi = k A_o (t_{fi} - t_{fo}) = k \pi d_o l (t_{fi} - t_{fo}) \tag{5}$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{h_i} \frac{d_o}{d_i} + \frac{d_o}{2\lambda} \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{1}{h_o}} \tag{6}$$

式中,  $l$  为圆管长度, m;  $h_i$  和  $h_o$  为管子内外侧复合表面传热系数 W/(m<sup>2</sup> · K);  $d_i$  和  $d_o$  分别为圆管内外直径, m;  $\lambda$  为管壁材料的导热系数, W/(m · K);  $\phi$  为热流量, W;  $t_{fi}$  和  $t_{fo}$  为管子内外流体温度, K。

采用对流传热,传热系数为 2 169.8 W/(m<sup>2</sup> · K),来流温度设为环境温度 298.15 K。

虽然实际过程中铸型旋转,但是在模拟计算中,固体域只进行散热计算,为了简化计算,将固体域设为固定,将壁面设置为旋转壁面即可。

选择的材质为 AZ31B 镁合金,其化学成分见表 1,合金的热导率、传热系数等参数采用随温度变化的函数的方式进行计算。铸型材质为 304 不锈钢,其变量采用随时间变化的曲线进行计算。

表 1 AZ31B 镁合金的化学成分

| Tab.1 Chemical composition of AZ31B magnesium alloy % |      |      |      |    |
|-------------------------------------------------------|------|------|------|----|
| $w_B$                                                 |      |      |      |    |
| Al                                                    | Mn   | Si   | Zn   | Mg |
| 3.0                                                   | 0.25 | 0.08 | 1.05 | 余量 |

采用标准初始化,对入口表面压力、入口速度分量、入口湍流动能、入口湍流耗散率和入口温度不做修改,镁合金初始体积分数设为 0,并将流体域内部温度初始化为 298.15 K,将铸型温度预热初始化为 523.15 K。

采用同一入口速度,3 个不同转速和 3 个不同的初始浇注温度为模拟变量,采用正交试验进行研究,数值模拟工艺参数见表 2。

表 2 AZ31B 镁合金离心铸造数值模拟工艺参数

Tab.2 Numerical simulation process parameters of centrifugal casting AZ31B magnesium alloy

| 序号 | 初始浇注温度/K | 旋转速度/(r·min <sup>-1</sup> ) |
|----|----------|-----------------------------|
| 1  | 923.15   | 1 800                       |
| 2  | 923.15   | 2 000                       |
| 3  | 923.15   | 2 200                       |
| 4  | 963.15   | 1 800                       |
| 5  | 963.15   | 2 000                       |
| 6  | 963.15   | 2 200                       |
| 7  | 1 003.15 | 1 800                       |
| 8  | 1 003.15 | 2 000                       |
| 9  | 1 003.15 | 2 200                       |

2.3 求解器的设定

采用 Coupled 耦合求解方式进行求解,湍动能和湍流耗散率迎风格式选择二阶精度,雷诺应力和动量选择一阶格式,能量采用 QUICK 格式。Coupled 算法<sup>[13]</sup>会同时求解连续方程、动量方程和能量方程。在上述流场控制方程被求解后,再求解湍流和辐射等方程。计算过程也需要经过迭代才能收敛得出最终的解。

为更好达到收敛,将亚松弛因子调小,将动量和能量的亚松弛因子调整为 0.5,其余变量的亚松弛因子保持不变;库朗数来调节计算的稳定性与收敛性,库朗数设定为 10。

瞬态计算必须要保证每一步计算结果都在设定的残差值之下,才能保证计算精准。因此时间步长选择 0.001,每个时间步内设置计算 80 步,步数设置为 30 000 步,一共计算 30 s。

3 模拟计算结果及分析

3.1 离心铸造过程温度场分析

图 3 为方案 5 AZ31B 镁合金离心铸造充型过程中温度云图,图 4 为其特征点选取图和特征点温度随时间变化曲线图。传统的凝固过程数值模拟是建立在“瞬时充满”的假设基础上,铸件各部分初始温度均为浇注温度。对于厚大的铸件而言,这种假设比较合理,但对于薄壁铸件,这种假设则会带来较大的计算误差<sup>[22]</sup>。

采用了考虑充型过程同时进行传热的耦合计算方法。从图 3a 可见,金属液接触到铸型型壁时,立即通过综合对流传热进行降温,部分位置甚至温度降低至固相线温度以下,出现凝固现象。可见金属液的流动是以层流形式进行充型的。从图 3b 可知,在  $t=0.8$  s 时,金属液基本铺满第 1 层,由于金属液的流动受到出口侧铸型

的阻碍而产生回流,液态高温金属在铸型出口侧产生叠加,因此铸型出口侧的温度并不是最低的,且铸型出口处的金属液厚度会略微增大,图 4b 中点 1 和点 2 温度随时间变化曲线符合实际浇注规律。金属液在 4.22 s 时浇注完成,但是其在铸型底部会有滞留,滞留的金属液会在 7.8 s 左右基本完成充形,同时,因为出口侧附近的金属液同时在出口处铸型与铸型外壁的散热条件下,温度降低会更快,见图 3c。 $t=9.0$  s 时开始出现温度低于固相线的情况。凝固位置为靠近出口侧的金属液,入口落点处因为持续的浇注,故落点附近温度在整个离心铸造时间都是最高的,因此入口落点附近是最后凝固的位置,见图 3d。图 3e 为  $t=13.8$  s 时的温度图,由于铸件厚度很薄、散热较快,所以并没有出现文献<sup>[23]</sup>所述

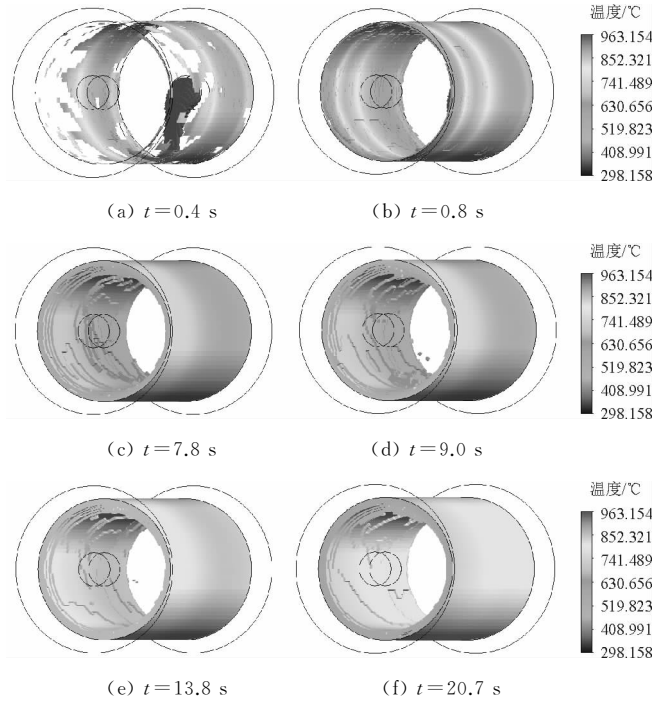


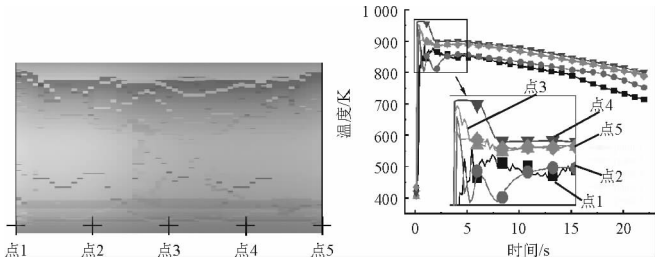
图 3 浇注温度为 963.15 K、转速为 2 000 r/min 时

AZ31B 镁合金离心铸造不同时刻温度云图

Fig.3 Casting temperature cloud diagram of AZ31B

magnesium alloy at different casting time with casting

temperature of 963.15 K and rotating speed of 2 000 r/min



(a) 5 号试验的特征点选取

(b) 特征点温度随时间变化曲线

图 4 5 号试验的特征点及温度变化曲线

Fig.4 Characteristic points and temperature

curves of experiment No.5

的有模具内壁和金属液内表面同时向中间部位凝固的现象发生。 $t=20.7\text{ s}$ 时铸件整体温度均低于固相线温度且铸件前后还有一定的温度差。另外,从浇注基本成形到凝固之后,铸型内表面是不平整的,符合实际,见图3f。

由图4可知,点1位置为出口侧位置,此处由于距离入口处最远,所以在第1层金属液铺层时温度最低,但是由于金属液受到铸型的阻碍产生回流,会使点1位置的温度略有升高,在 $0.8\text{ s}$ 左右温度会高于点2处温度。随后,点1位置在出口侧壁面和外侧壁面的共同散热下,温度降低最快,因此在短暂升温后,该位置的温度始终最低。点2位置温度在浇注升高后就开始降低,然后受到回流和正常流动的金属液的冲击,使得点2位置温度变化出现波动,并随着铸型的散热而逐渐降低。点3与点5距离入口浇注落点的距离大致相同,因此温度曲线接近。点4位置为浇注落点位置,此处的温度最高,且该位置最后凝固。

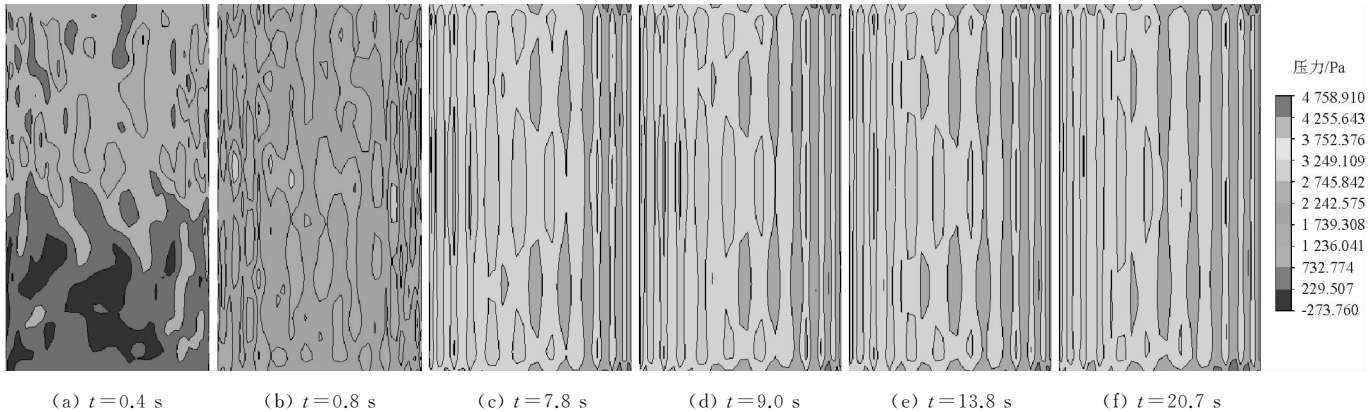


图5 浇注温度为 $963.15\text{ K}$ 、转速为 $2\,000\text{ r/min}$ 时AZ31B镁合金离心铸造不同时刻压力云图

Fig.5 Casting pressure cloud diagram of AZ31B magnesium alloy at different casting time with casting temperature of  $963.15\text{ K}$  and rotating speed of  $2\,000\text{ r/min}$

大位置有利于铸型材料的选取。

图6为压力分析过程特殊点选取以及压力随着不同的初始浇注温度以及铸型转速的变化。可以看出,特殊点位置随着金属液的浇注,压力均呈现先增大,再逐

3.2 离心铸造过程压力场分析

图5是浇注温度为 $963.15\text{ K}$ ,转速为 $2\,000\text{ r/min}$ 情况下不同时刻金属液对铸型内壁的压力分布。由图5a可见,在金属液没有浇入铸型时,铸型内壁总体的压力为 $-273.76\text{ Pa}$ ,随着金属液的浇注,铸型壁面的压力逐渐变化为正压,在 $t=0.4\text{ s}$ 时,铸型内壁面最大压力约为 $2\,743.5\text{ Pa}$ 。图5b为第1层金属液铺满铸型内壁的时刻,此时铸型中心部位的压力略大于入口和出口两侧的压力值,这是因为金属液在浇注进铸型的时候,有一个沿轴向的速度,在掉落到铸型内壁面之后,依然存在,因此金属液逐渐减少,对铸型内壁的压力也逐渐减少,出口侧的压力逐渐减少,而靠近入口侧因为与入口方向速度相反,因此压力也减小。由图5c~图5f可见,从 $7.8\text{ s}$ 基本成形到 $20.7\text{ s}$ 完全凝固的过程金属液对铸型内壁的压力变化不大。而在重力作用下,金属液对铸型下壁面的压力数值大于对铸型上壁面的压力,同一位置铸型下壁面和上壁面相差约 $838.167\text{ Pa}$ ,分析压力最

渐平稳的总体趋势。由图6b可知,铸型内壁的压力随着入口浇注温度变化不大,进入平稳阶段后,压力维持在 $4\,449.421\text{ Pa}$ 左右。图6c为不同的离心转速条件下特殊点位置的压力变化。当转速为 $1800\text{ r/min}$ 时,平

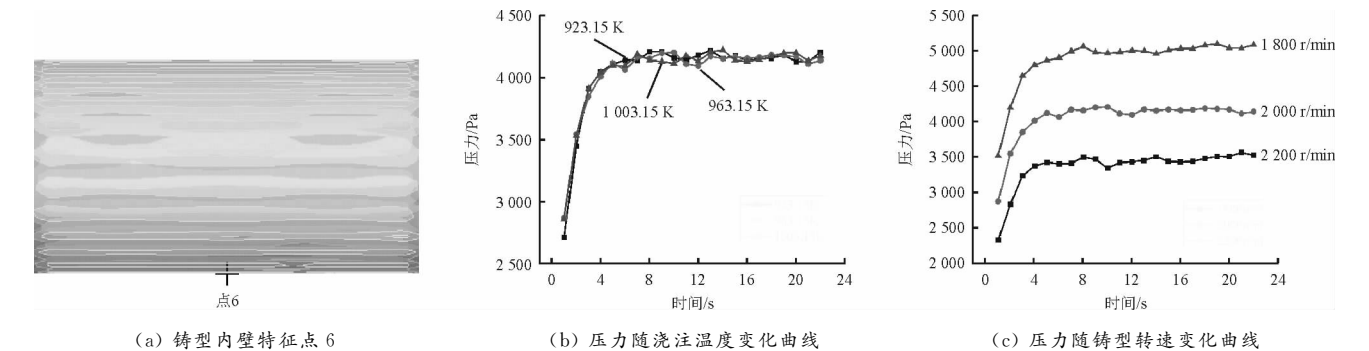


图6 铸型特征点及压力变化曲线

Fig.6 Characteristic points of centrifugal cylinder and pressure change curves

稳后压力维持在3 459.792 Pa左右;转速为2 000 r/min时,平稳后压力维持在4 152.793 Pa左右;转速为2 200 r/min时,平稳后压力维持在5 018.042 Pa左右。可以明显看出,铸型内壁的压力随着转速的增大而明显增大。转速对成形过程影响很大,转速过低,会引起雨淋现象发生,导致铸件浇注不成形的问题,转速过大会导致铸型内表面承受过大压力,同时会浪费更多能源。

## 4 结 论

(1) 离心铸造 AZ31B 镁合金过程中,金属液会逐渐以铺层的方式,在0.8 s左右铺满铸型内壁,逐渐增加厚度,在4.22 s浇注结束,在7.8 s离心铸件基本完成充型,在9 s时开始出现凝固,在13.8 s凝固50%,在20.7 s完全凝固。铸件内表面因为所承受的离心力较小,因此表面并不平整。

(2) 离心铸造 AZ31B 镁合金过程中,金属液的流动、旋转和回流等一系列流动过程会使得温度场在金属液浇注短时间内出现波动,在4.22 s金属液浇注完成后,温度场整体的趋势为逐渐下降,镁合金铸管的凝固是从出口侧向入口侧缓慢凝固。

(3) 对离心铸造 AZ31B 镁合金过程中铸型内壁面进行压力分析,从开始浇注时内壁面的表压为-273.76 Pa,逐渐增大,随着浇注过程进行,铸型内表面的压力逐渐增大。当浇注结束后到完全凝固的过程,铸型内壁承受的压力基本保持不变。由于重力作用,下表面所承受的压力大于上表面。铸型内表面的压力随着初始浇注温度不同变化不大,随着转速的增大而逐渐增大,转速为1 800 r/min时,压力为3 459.792 Pa左右;转速为2 000 r/min时,压力为4 152.793 Pa左右;转速为2 200 r/min时,压力为5 018.042 Pa左右。

## 参 考 文 献

- [1] 陈振华,严红革,陈吉华,等. 镁合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [2] 张伯明. 离心铸造[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [3] SEN S, REDDY S, MURALIDHARA B K, et al. Study of flow behaviour in vertical centrifugal casting[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 24: 1 392-1 399.
- [4] ŠABÍK V, FUTÁŠ P, PRIBULOVÁ A. Failure analysis of a clutch wheel for wind turbines with the use of casting process simulation [J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 135: 106 159.
- [5] CISTERNAS FERNÁNDEZ M, ZALOŽNIK M, COMBEAU H, et al. Thermosolutal convection and macrosegregation during directional solidification of TiAl alloys in centrifugal casting[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 154: 119 698.
- [6] WANG Z H, ZHANG L T, SU B, et al. Simulation on microstructure evolution of Al-Si alloy under effect of natural convection dur-

- ing solidification[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2022, 32(1): 79-90.
- [7] 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.
- [8] 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(14): 7 633-7 643.
- [9] 陈方桃. 基于 ProCAST 的排气机匣熔模铸造数值模拟与优化[J]. 铸造, 2022, 71(1): 99-102.
- [10] KEERTHIPRASAD K S, MURALI M S, MUKUNDA P G, et al. Numerical simulation and cold modeling experiments on centrifugal casting[J]. Metallurgical and Materials transactions, 2011: B42 (1): 144-155.
- [11] KARUN A S, J. KUMAR J, JEYALAKSHMI T S, et al. Investigations on the melt flow behavior and microstructure of A390 alloy during vertical centrifugal casting process: CFD simulation and experiments[J]. Trans. Indian Inst. Met., 2020, 73(9): 2 321-2 331.
- [12] YIN Y J, PENG X, XIAO G, et al. Experiment on fluid regime under different rotate velocity in physical simulation of titanium vertical centrifugal casting[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 120: 583-597.
- [13] 李鹏飞,徐敏义,王飞飞. 精通 CFD 工程仿真与案例实战: FLUENT GAMBIT ICEM CFD Tecplot[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011.
- [14] 黄依,黄坤荣,章征服,等. 基于 VOF 的 U 形重力热管的数值模拟 [J]. 机械工程师, 2022(2): 86-89.
- [15] KARIMI-SIBAKI E, KHARICHA A, VAKHRUSHEVA, et al. A volume of fluid (VOF) method to model shape change during electrodeposition [J]. Electrochemistry Communications, 2020, 112: 106 675.
- [16] WANG J H, LUO J, HUANG S X, et al. Numerical simulation of single aluminum droplet evaporation based on VOF method[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2020, 34: 102 008.
- [17] 李东辉,高云宝,辛启斌,等. 铸件凝固潜热的处理方法与应用研究 [J]. 铸造, 2004, 53(12): 1 005-1 007.
- [18] 张博,王建梅,黄玉琴,等. 轴承衬套离心铸造凝固过程的数值模拟 [J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34(2): 183-187.
- [19] 郑鹏. 基于 VOF 的双辊薄带熔池凝固模拟研究[J]. 一重技术, 2019(6): 5-9.
- [20] ZHANG L F, WANG Y G, MARTINEZ E, et al. Fluid flow, solidification and inclusion entrapment during steel centrifugal casting process[J]. CFD Modeling & Simulation in Materials Processing, 2012, 53(12): 1-16.
- [21] 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- [22] 熊守美,许庆彦,康进武. 铸造过程模拟仿真技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [23] 于宝义,王操,郑黎,等. 离心铸造对 AZ91 镁合金组织及力学性能的影响[J]. 沈阳工业大学学报, 2018, 40(4): 380-384.

(编辑:张正贺)