

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2024.3021

熔模铸造 ZL114A 铝合金凝固过程界面 换热系数研究

冀晓磊, 孟晓东, 张荣强, 邢昌勇, 王 琳, 刘鑫霞, 刘晓杰, 郑宇航

(河北钢研德凯科技有限公司, 河北 保定 072750)

摘 要: 为获得 ZL114A 铝合金在凝固过程中温度场的分布规律, 根据实际工况设计了测温实验方案, 利用热电偶和热成像仪得到了金属及其型壳在凝固过程中温度场的变化曲线, 并根据实际测得的温度曲线借助 ProCAST 模拟软件中的反算模块对铸件与型壳间的界面换热系数进行了反求, 得到了更加符合实际的界面换热系数。随后对其进行验证, 用该界面换热系数所模拟求得的金属液温度曲线与实测值最大温差为 10 °C, 型壳温度曲线与实测值最大温差为 15 °C, 该方法及结果为铝合金熔模精铸模拟界面换热系数的设置提供了参考依据。

关键词: 熔模铸造; 数值模拟; 界面换热系数; 铝合金

中图分类号: TG249.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2024)04-0395-06

Study on the Interface Heat Transfer Coefficient During Solidification of an Investment Casting ZL114A Aluminum Alloy

Ji Xiaolei, MENG Xiaodong, ZHANG Rongqiang, XING Changyong, WANG Lin,

LIU Xinxia, LIU Xiaojie, ZHENG Yuhang

(Hebei Gangyan Dekai Technology Co., Ltd., Baoding 072750, China)

Abstract: To determine the distribution pattern of the temperature field during the solidification process of a ZL114A aluminum alloy, a temperature measurement experimental scheme was designed based on actual working conditions. The temperature field variation curves of the metal and its shell during the solidification process were obtained using thermocouples and thermal imaging instruments. Based on the actual measured temperature curves, the interface heat transfer coefficient between the casting and the shell was calculated using the reverse calculation module in the ProCAST simulation software, and a more practical interface heat transfer coefficient was obtained. The maximum temperature difference between the simulated metal liquid temperature curve and the measured value using the interface heat transfer coefficient is 10 °C, and the maximum temperature difference between the simulated shell temperature curve and the measured value is 15 °C. The results provide a reference basis for setting the interface heat transfer coefficient in aluminum alloy investment casting simulations.

Key words: investment casting; numerical simulation; interfacial heat transfer coefficient; aluminum alloy

熔模铸造作为近净成型工艺技术, 多用于复杂或特殊形状零件的铸造。传统熔模铸造浇注系统设计和浇注工艺参数的设置都是根据经验来确定, 然后根据浇注铸件的冶金质量对铸造工艺进行反复的修改, 以获得合格的铸件, 该试错方法会导致较长的开发周期、较高的铸造成本, 难以获得高质量的合格铸件^[1-4]。为了降低熔模铸造铸件的成本, 缩

短研发周期, 采用计算机数值模拟技术对浇注工艺及参数是否可行进行预测, ProCAST 软件作为铸造模拟中经常使用的一种模拟软件, 可以模拟铸造过程中金属液凝固及流动过程, 准确预测铸件的疏松、缩孔等缺陷。虽然 ProCAST 软件在铸造行业已经广泛应用, 但如何提高铸造模拟的计算精度是工程师亟需解决的一大难题^[5-7]。

收稿日期: 2023-02-01

作者简介: 冀晓磊, 1988 年生, 工程师, 主要从事轻质合金精密铸造工艺设计等方面工作。Email: 1203052021@qq.com

通讯作者: 孟晓东, 1990 年生, 工程师, 主要从事轻质合金精密铸造工艺设计等方面工作。Email: zrq19910813@163.com

引用格式: 冀晓磊, 孟晓东, 张荣强, 等. 熔模铸造 ZL114A 铝合金凝固过程界面换热系数研究[J]. 铸造技术, 2024, 45(4): 395-400.

Ji X L, MENG X D, ZHANG R Q, et al. Study on the interface heat transfer coefficient during solidification of an investment casting ZL114A aluminum alloy[J]. Foundry Technology, 2024, 45(4): 395-400.

目前铸造工程师在采用数值模拟仿真分析时,大多数均采用软件自带的数据库来进行模拟。由于铸造过程是不尽相同的,所以采用软件自带的数据库参数来进行模拟分析,所获得的模拟结果与实际生产会存在较大的偏差。而界面传热系数是影响铸件凝固过程温度场的一个重要参数,它能否准确设定直接影响着模拟结果的可靠性^[8-10],目前部分学者对铸件与型壳之间的界面换热系数进行了深入研究,邵珩等^[11-13]对纯铝金属的熔模精密铸造界面换热系数测量进行了研究,结果表明,在凝固前期,界面换热系数随铸件与型壳之间温差减小而增大,凝固中期,界面换热系数随着整体固相分数增加而线性下降;凝固后期,界面换热系数下降变得十分缓慢。张立强^[14]研究了A356铝合金与铜模间的界面换热系数,结果表明界面热流和换热系数是随铸件凝固时间变化的,且变化范围在 $1\,200\text{ W}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}^{-1}$ 和 $6\,200\text{ W}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}^{-1}$ 之间。竹励萍^[15]、解锦婷^[16]研究了铸件厚度以及不同方向的界面间隙对界面换热系数的影响,研究结果表明铸型厚度越厚,界面换热系数越小。现有界面换热系数的研究中铸型多为金属型或砂型铸造,对于铝合金熔模铸造条件下界面换热系数的研究较少且不完善,随着熔模铸造技术的发展,对熔模铸造数值模拟需求也在不断增加,因此有必要对熔模铸造条件下的界面换热系数进行研究。

本文利用热电偶和热成像仪对熔模浇注过程中ZL114A铝合金的温度进行测量,得到金属液与型壳在整个浇注过程中温度场的变化曲线,并根据实际测量的温度曲线运用ProCAST软件对铸件与型壳之间的界面换热系数进行模拟反算,从而获得铸件与型壳之间的界面换热系数。

1 数学模型

1.1 熔模铸造凝固传热模型

熔模铸造的凝固过程是从高温的液态金属传出热量开始,高温液态金属浇入温度相对较低的型壳时,金属液所含的热量通过金属,金属与型壳界面和型壳传出,这个过程属于非稳态传热,在铸件、铸型的几何条件和热物性参数给定的条件下,铸件凝固过程的数学模型包括:传热的控制方向、初始条件、边界条件^[17]。

铸造传热过程的控制方程为傅里叶导热微分方程:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \rho L \frac{\partial f_s}{\partial t} \quad (1)$$

式中, ρ 为材料的密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; c_p 为材料定压比热容, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; λ 为材料导热率, $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; t 为时间, s ; T 为热力学温度, K ; $\rho L \frac{\partial f_s}{\partial t}$ 为金属的结晶潜热项,其中 L 为结晶潜热, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$; f_s 为固相率,该项只用于计算铸件的温度场。

初始条件:

$$T|_{t=t_0} = T_0(x, y, z) \quad (2)$$

式中, t_0 为初始时刻, s 。

铸件/铸型界面处传热的边界条件:

$$-\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial n} = h_c (T_c - T_m) \quad (3)$$

式中, λ_1 为铸件材料的导热率, $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; $\frac{\partial T}{\partial n}$ 为沿界面外法线方向导数; T_c 为界面处铸件温度, K ; T_m 为界面处铸型的温度, K ; h_c 为铸件/铸型界面传热系数, $\text{W}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}^{-1}$ 。

$$-\lambda_2 \frac{\partial T}{\partial n} = h_m (T_w - T_c) \quad (4)$$

式中, λ_2 为铸型材料的导热率, $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; $\frac{\partial T}{\partial n}$ 为沿界面外法线方向导数; T_w 为铸型的表面温度, K ; T_c 为空气介质的温度, K ; h_m 为铸型与空气传热系数,取 $10\text{ W}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}^{-1}$ 。

1.2 界面换热系数反求数学模型

界面换热系数计算采用Beck等^[18]提出的非线性估算法,其基本原理是:假设从 M 时刻起的 N 个时间步长 $N \times \Delta t$ 内,界面换热系数 h 保持不变,计算铸件与铸型的温度场,以计算温度与实测温度的平方差之和最小为目标,求出该时刻的 h ,即

$$h_M = h_{M+1} = h_{M+2} = \dots = h_{M+N} \quad (5)$$

定义 $f(h_M)$ 为:

$$f(h_M) = \sum_{j=1}^J \sum_{i=0}^N C_j \left(T_{j,M+i}^m - T_{j,M+i}^c \right)^2 \quad (6)$$

计算以极小化 $f(h_M)$ 为目标,求取 h_M 式中 $T_{j,M+i}^m$, $M+i$ 指 $M+i$ 时刻测温点 j 测得的温度; $T_{j,M+i}^c$, $M+i$ 指 $M+i$ 时刻测温点 j 根据初始条件和 $0 \sim M$ 时刻 h_i 求得的温度, C_j 为不同位置的测温点的权重系数, N 和 J 分别是参与计算时间的步长数和测温点数量。

2 测温实验

2.1 实验材料与工艺

实验采用合金材料为ZL114A铝合金,铸型为熔模铸造型壳,型壳材料面层为锆英粉,过渡层为莫来石,背层为高岭土,最后对其进行封浆,型壳厚度为 6 mm 。浇注方式为重力浇注,浇注温度为 $710\text{ }^\circ\text{C}$,

型壳预热温度为200 ℃, 浇注时间为5 s,ZL114A和型壳的热物性参数见表1所示, 其中金属的热物性参数通过查文献获得^[19-20],型壳的热物性参数采用软件自带,因热物性参数随温度变化,该表格热物性参数选取区间温度为20~800 ℃。

表1 ZL114A和型壳的热物性参数
Tab.1 Thermophysical parameters of the ZL114A and shell

Thermophysical parameters	ZL114A	Shell
Liquidus temperature/K	886	-
Solid temperature/K	830	-
Latent heat/(J·kg ⁻¹)	431 000	-
Thermal conductivity/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	80~175	4~7
Specific heat/(kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.90~1.05	0.7~1.0
Density/(kg·m ⁻³)	2 400~2 700	2 200~2 300

2.2 测温方案

铸件与型壳之间的界面换热系数与它们本身的材料属性、铸造工艺设计以及凝固过程中的冷却环境等因素都有关系^[21],利用设备无法直接测量得到,但可以用铝合金铸件凝固实验测得铸件内部和型壳外部各个不同位置的温度,实验中的初始条件、材料热物性参数等可人工设定也可查找文献得出,然后通过求解傅里叶导热偏微分方程,从而得到与实际条件相符合的界面换热系数,因此,铸件和型壳中相关点的温度数据是反求换热系数不可缺少的已知条件。

为了保证所测得的温度数据真实可靠,本次所采用的试样为铝合金棒材,其尺寸为φ60 mm×380 mm,采用1组2件的组合方式,组合工艺如图1中,利用热电偶采集铸件凝固过程中的温度,利用热成像仪采集凝固过程中型壳的温度变化,将热电偶分别置于距离底浇道80、180和280 mm的铸件中心处,如图1所示,采用型号为KR3141-SOT巡检仪设备测量和记录铸件不同位置的中心温度变化,采用型号SK-BX1640热成像仪测量并记录型壳随温度

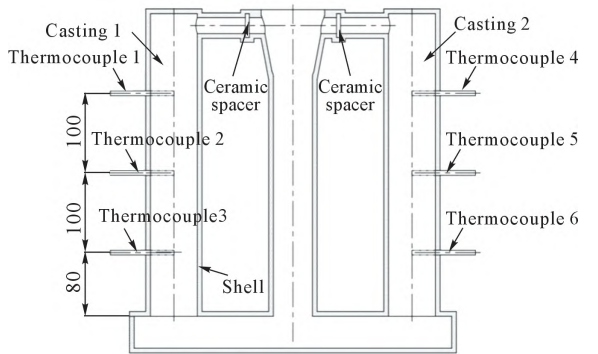


图1 组合工艺及热电偶分布图
Fig.1 Sketch of the combination process and thermocouple distribution

的变化,实际热电偶的布置情况如图2所示,图3为热成像仪的显示图像。



图2 实物模型
Fig.2 Physical model

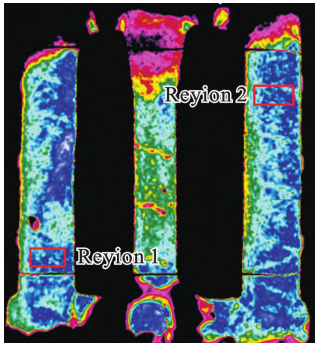


图3 型壳测温区域
Fig.3 Temperature measurement area of the shell

3 实验结果及讨论

3.1 测温实验结果

从图4上可以看出6条温度曲线随时间的变化趋势基本一致,在浇注完成后铸件的温度开始下降,该6条曲线在时间为350~850 s时,铸件温度下降开始变得缓慢,并呈现抛物线的趋势,分析该现象可能是液体凝固释放出结晶潜热造成的,在850 s后,温度与时间基本呈线性关系;从图5上可以看出,型壳的温度曲线随时间的变化趋势基本一致,但是区域1的温度明显高于区域2的温度,这是因为区域1金属液先到达,在金属液到达型壳区域2时金属液的温度会有降温,所以会出现区域1测点的温度会高于区域2,且随着时间的推移,两者之间的温度差会较少,这是

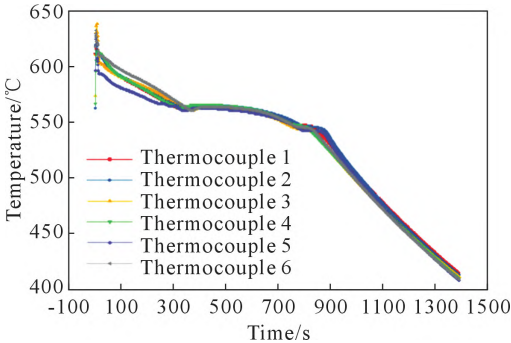


图4 铸件中不同测温点的温度曲线
Fig.4 Temperature curves of different temperature measuring points in castings

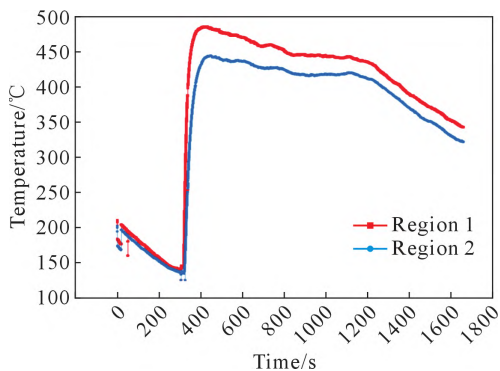


图5 型壳不同测温点的温度曲线

Fig.5 Temperature curves at the different temperature measuring points on the shell

由于浇注完成后温度热传导的结果。

3.2 反算得到的界面换热系数

根据实际铸件尺寸采用三维软件UG进行建模, 三维模型如图6所示, 然后将数模导入ProCAST模拟软件中进行有限元网格划分, 设置面网格大小为3 mm, 型壳厚度为6 mm, 共生成111152个面单元, 1070310体单元^[22], 有限元网格模型如图7所示; 然后将铸件凝固过程中的温度曲线导入作为自变量反求界面换热系数, 求解得到的结果如图8所示。

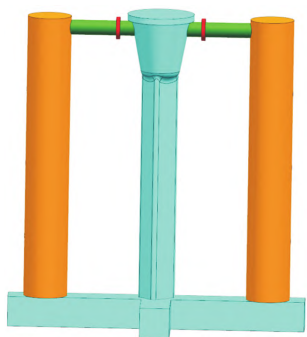


图6 三维模型

Fig.6 Three-dimensional model



图7 有限元网格模型

Fig.7 Finite element mesh model

从图8可以看出, 界面换热系数在不同温度下是有变化的, 大体可以分为3个阶段: 第一阶段是温度在液相线以上界面, 换热系数恒定在一个比较稳定的范围内; 第二阶段是温度在固液相线之间, 界

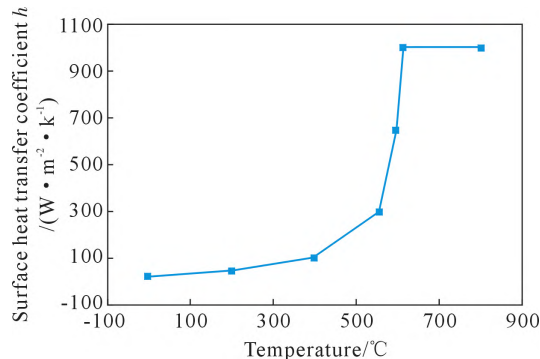


图8 随温度变化的界面换热系数

Fig.8 Interfacial heat transfer coefficient as a function of temperature

面换热系数急剧下降, 第三阶段是温度在固相线以下, 界面换热系数呈缓慢下降的趋势。导致上述结果的原因可能是温度在液相线以上时, 金属液与型壳之间紧密贴合, 使界面换热系数保持在一个恒定的范围内; 随着温度的下降, 当达到液相线以下金属开始凝固, 此时因金属液的收缩导致金属液与型壳之间形成间隙, 故在固液相温度之间界面换热系数急剧下降, 且温度越低收缩越大, 界面换热系数就越小; 当金属液温度冷却到固相线以下时, 此时液态收缩已基本完成, 但固体收缩仍在继续, 故界面换热系数随温度降低缓慢下降直至收缩结束。

4 验证反算得到的界面换热系数

将反算得到的界面换热系数加载到ProCAST数据库中, 利用反算求得到的界面换热系数对实验铸件数模进行模拟求解, 铸件的有限元模型如图9所示, 实际铸件的热电偶布置情况如图10所示, 模壳测温如图11所示, 将实际测得的型壳和铸件的温度曲线, 与模拟测得的型壳温度曲线和铸件凝固的温度曲线进行对比, 图12为模拟与实测得到的温度曲线对比结果。

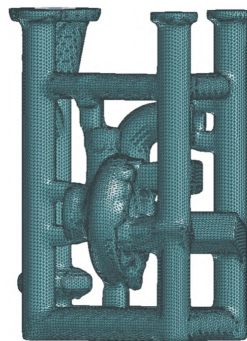


图9 铸件有限元模型

Fig.9 Finite element model of casting

从图12a可以看出, 模拟所得到的温度曲线与实测温度曲线吻合良好, 金属液内最大温差为10 °C; 从



图 10 热电偶布置情况

Fig.10 Thermocouple arrangement

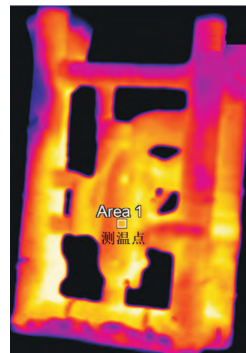


图 11 型壳测温点

Fig.11 Temperature measurement points on the shell

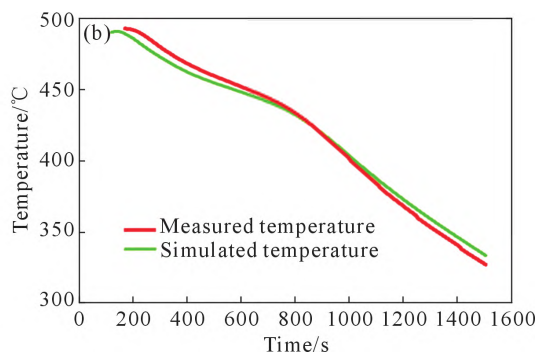
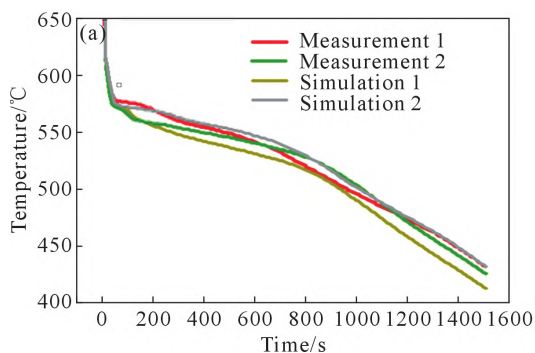


图 12 模拟与实测温度对比结果:(a) 金属液模拟与实测温度与时间曲线;(b) 型壳模拟与实测温度与时间曲线

Fig.12 Comparison of simulated and measured temperatures: (a) simulated and measured temperature and time curves of molten metal; (b) simulated and measured temperature and time curves of the model shell

图12b可以看出,型壳模拟与实际测得的温度曲线基本一致,且完好吻合,型壳最大温差为15℃。结果表明,以实测得到的凝固温度曲线为已知条件,利用ProCAST数值模拟中的反算模块反求得到铸件与型壳间的换热系数是准确有效的。

5 结论

(1) 通过试验测得铸件凝固时的温度曲线,利用ProCAST软件中反分析法求得铸件与型壳之间的界面换热系数,并进行了验证,结果表明,利用反分析法求得的界面换热系数有效准确。

(2) 求解得到的ZL114A合金与型壳的界面交换系数,为数值模拟提供了精确的热物性参数,使模拟结果更加符合实际。

参考文献:

- [1] 贾志宏,符浩,张义刚,等. 车用增压器涡轮熔模铸造过程数值模拟优化[J]. 铸造, 2022, 71(6): 760-765.
JIA Z H, FU H, ZHANG Y G, et al. Numerical simulation and optimization of investment casting process of auto turbocharger turbine[J]. Foundry, 2022, 71(6): 760-765.
- [2] 张令. 砂型铸造过程中型芯与铸件界面换热系数的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
ZHANG L. Study on Interfacial heat transfer coefficients between casting and sand mold or core in the sand casting process[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2019.
- [3] YAO S, GONG X N, DAI L X, et al. The mathematical model of solidification latent heat under high cooling rate[J]. Heat Transfer-Asian Research, 2006, 35(2): 115-121.
- [4] ZHANG L Q, TAN W F, HAO H. Determination of the heat transfer coefficient at the metal-sand mold interface of lost foam casting process [J]. Heat and Mass Transfer, 2016, 52(6): 1131-1138.
- [5] WU S P, LI C Y, GUO J J. Numerical simulation and experimental investigation of two filling methods in vertical centrifugal casting [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16 (5): 1035-1040.
- [6] 徐戎,李落星,王震虎. 基于反热传导法的铝合金喷水冷却界面换热系数求解[J]. 金属热处理, 2018, 43(11): 202-207.
XU R, LI L X, WANG Z H. Calculation of interfacial heat transfer coefficient of aluminum alloy spraying cooled based on inverse heat conduction method [J]. Heat Treatment of Metals, 2018, 43 (11): 202-207.
- [7] 刘晋,彭必友,包有宇,等. 铸造模拟关键热参数的反求优化及应用研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48(5): 131-135, 140.
LIU J, PENG B Y, BAO Y Y, et al. Research on inverse optimization and application of key thermal parameters in casting simulation[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(5): 131-135, 140.
- [8] 邱克强,张令,孙治国,等. 典型环形铸件凝固过程的界面换热系数分析[J]. 沈阳工业大学学报, 2021, 43(2): 156-162.
QIU K Q, ZHANG L, SUN Z G, et al. Analysis of interfacial heat transfer coefficient of typical annular casting during solidification process[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2021, 43(2): 156-162.
- [9] 王鹏. 铸模-铸锭界面气隙对综合界面换热系数的影响[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2020.

- WANG P. Effect of air gap at the interface of mould-ingot on the comprehensive interfacial heat transfer coefficient[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2020.
- [10] QI L H, LIU J, GUAN J T, et al. Damage prediction for magnesium matrix composites formed by liquid-solid extrusion process based on finite element simulation[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(9): 1737-1742.
- [11] 邵珩. 大型复杂薄壁Ti-6Al-4V合金铸件离心熔模铸造过程数值模拟[D]. 北京: 清华大学, 2017.
- SHAO H. Numerical simulation of centrifugal investment casting of large thin-wall complex Ti-6Al-4V castings [D]. Beijing: Tsinghua University, 2017.
- [12] 邵珩, 李岩, 南海, 等. 熔模铸造条件下Ti6Al4V合金铸件与陶瓷型壳间界面换热系数研究[J]. 金属学报, 2015, 51(8): 976-984.
- SHAO H, LI Y, NAN H, et al. Research on the interfacial heat transfer coefficient between casting and ceramic shell in investment casting process of Ti6Al4V alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2015, 51(8): 976-984.
- [13] 邵珩, 罗志辉, 李岩, 等. 铝合金熔模精密铸造界面换热系数测量[J]. 铸造, 2014, 63(10): 1010-1013, 1018.
- SHAO H, LUO Z H, LI Y, et al. Determination of interfacial heat transfer coefficient during the investment casting of aluminum alloy[J]. Foundry, 2014, 63(10): 1010-1013, 1018.
- [14] 张立强. 凝固界面换热系数反求及铝合金薄壁件压铸工艺优化[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
- ZHANG L Q. Inverse calculation of interfacial heat transfer coefficient during casting solidification and the LPDC process optimization for thin-walled casting of aluminum alloy[D]. Changsha: Hunan University, 2011.
- [15] 竹励萍. 金属型铸造凝固过程铸件/铸型界面换热系数的研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2009.
- ZHU L P. Study on heat transfer coefficients at metal/mold interface during solidification in metal castings [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2009.
- [16] 解锦婷. 金属铸造凝固过程的界面传热系数的研究与应用[D]. 天津: 天津理工大学, 2007.
- XIE J T. Research and application of interfacial heat-transfer coefficients in metal-mold castings[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2007.
- [17] 汪壮显, 洪润洲, 熊艳才, 等. 铝合金砂型低压铸造界面传热系数的测定[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(12): 1323-1327.
- WANG Z X, HONG R Z, XIONG Y C, et al. Determination of interfacial heat transfer coefficient during the low pressure sand casting process of aluminum alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2018, 38(12): 1323-1327.
- [18] 张立强, 李落星, 谭文芳, 等. 铸造凝固界面换热系数求解的反热传导模型[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(1): 82-90.
- ZHANG L Q, LI L X, TAN W F, et al. Inverse heat conduction model for determining interfacial heat transfer coefficient during casting solidification[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(1): 82-90.
- [19] 竹励萍, 陈玲. 金属铸造过程界面传热系数的测定[J]. 天津理工大学学报, 2009, 25(1): 63-66.
- ZHU L P, CHEN L. Determination of the interfacial heat transfer coefficient in metal mould castings[J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2009, 25(1): 63-66.
- [20] 孟晓东, 张荣强, 冀晓磊, 等. 熔模铸造ZM5合金界面换热系数研究[J]. 铸造, 2022, 71(9): 1154-1157.
- MENG X D, ZHANG R Q, JI X L, et al. Research on interface heat transfer coefficient of ZM5 alloy under the condition of investment casting[J]. Foundry, 2022, 71(9): 1154-1157.
- [21] 高云鹏, 董晟全. ProCast在铝合金熔模铸造中的应用[J]. 铸造技术, 2019, 40(7): 712-714.
- GAO Y P, DONG S Q. Application of ProCast in investment casting of aluminum alloy[J]. Foundry Technology, 2019, 40(7): 712-714.
- [22] 郑行, 郝新, 闫彬, 等. 熔模精铸型壳预热转移过程温度场及换热规律研究[J]. 精密成形工程, 2022, 14(1): 141-146.
- ZHENG H, HAO X, YAN B, et al. Temperature field and heat transfer regularity of investment casting mold shell during preheating and transfer [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(1): 141-146.