

导向器蜡模工艺参数优化与尺寸精度检测

余 童¹, 汪东红^{2, 4}, 吴文云¹, 雷四雄³, 谭诗薪³, 郝 新³, 周建新⁵, 殷亚军⁵, 疏 达²

(1. 上海工程技术大学材料工程学院, 上海 201620;

2. 上海交通大学材料科学与工程学院, 上海市先进高温材料及其精密成形重点实验室, 上海 200240;

3. 中国航发南方工业有限公司, 湖南株洲 412000; 4. 嘉善鑫海精密铸件有限公司, 浙江嘉善 314101;

5. 华中科技大学材料成形与模具技术国家实验室, 湖北武汉 430074)

摘要: 导向器蜡模制备是熔模铸造生产导向器铸件的第一大工序, 通过优化注蜡工艺参数提升导向器蜡模的品质。采用Design expert进行试验设计, 并结合Moldflow模拟注蜡试验, 运用遗传算法对目标函数求解。经分析与验证四个工艺参数对平均体积收缩率的影响顺序为: 注蜡温度>保压时间>保压压力>蜡料流量, 最优注蜡工艺参数为保压压力0.1 MPa, 保压时间13.34 s, 蜡料流量32.23 cm³/s, 注蜡温度62 ℃, 在此条件下, 导向器蜡模尺寸精度达到CT4级别。

关键词: 熔模铸造; 工艺参数; 导向器蜡模; 尺寸精度

作者简介:

余 童(1996-),男,硕士生,研究方向为铸造数值模拟。电话: 13966495339, E-mail: 1814317017@qq.com

通讯作者:

汪东红,男,助理研究员。电话: 021-54748678, E-mail: wangdh2009@sju.edu.cn

中图分类号: TG249.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2021)

11-1329-06

基金项目:

国家重点研发计划(2020YFB1710101, 2020YFB1710102);

国家科技重大专项(2017-VII-0008-0102, J2019-VI-0004-0117);

国家自然科学基金(51821001, 52090042);

浙江省重点研发计划(2020C01056, 2021C01157);

浙江省博士后项目择优资助(zj2019035);

中国博士后科学基金(2020M671787);

先进高温结构材料重点实验室开放课题资助; 材料成形与模具技术国家重点实验室开放基金(P2021-006)。

收稿日期:

2021-05-11 收到初稿,

2021-06-14 收到修订稿。

熔模铸造工艺制得的铸件具有尺寸精度高、表面光滑、少机加工等优点^[1], 蜡模制备是熔模铸造工艺流程中最重要的一环, 制备蜡模的品质直接影响着最终铸件的品质^[2], 导向器是航空发动机重要零部件之一, 由内环、外环、法兰以及叶片组成^[3], 导向器部件工作于高载荷、高温环境下并且对装配尺寸精度要求严格, 通过优化导向器蜡模质量来提升铸件尺寸精度。

在蜡模制备中蜡料的成分、注蜡工艺参数、注蜡浇口位置等都会对蜡模的品质产生影响^[4-6], 在实际生产中通常改变注蜡工艺参数提升蜡模的质量, 大部分企业采用经验+试错法来摸索注蜡工艺参数^[7], 耗费大量的材料与时间, 缺乏科学的方法指导实际生产。

本研究针对导向器蜡模尺寸精度控制问题, 采用Design expert软件中的响应面法设计注蜡工艺参数试验, 并结合Moldflow数值模拟软件记录试验结果, 使用遗传算法对目标函数进行迭代优化, 最终采用蓝光扫描与三维对比分析的方式, 验证导向器蜡模尺寸精度是否达到CT4级别要求。

1 试验材料及方法

1.1 导向器蜡模结构特征

图1为导向器蜡模三维结构, 导向器蜡模整体尺寸: 长为94.8 mm、宽为36.9 mm、高为22.6 mm, 其中最主要的结构为中间较薄的支板结构, 支板的长度为57.6 mm, 宽度为18.5 mm, 厚度最薄处仅为0.8 mm。由56个导向器蜡模拼装后的模型如图2所示, 组装后的导向器由法兰、内环、外环以及叶片构成, 轮廓最大直径为405 mm, 高度为62.5 mm。

1.2 材料选择及工艺设置

注射的蜡料选择KC3898NRR中温蜡料, 适用于尺寸变形的控制与研究。在Moldflow软件中依据实际注蜡条件设定相关参数, 注蜡机参数: 最大注射速率设置

为300 cm³/s、最大注射压力设置为5 MPa、最大锁模力设置为50吨，模具材料选择铝合金，模具温度为23 ℃。输入通过Moldex公司测量的影响蜡料流动充填的热物性参数：热性能参数、可压缩PVT特性参数、流变性能参数，提高模拟结果的准确性。

采用Design expert与Moldflow软件相结合得到注蜡工艺参数试验设计与结果，在Matlab中使用遗传算法工具箱对注蜡工艺参数进行迭代优化，对优化工艺参数生产的导向器蜡模组装焊接，采用德国GOM公司的ATOS Triple Scan高分辨率三维蓝光扫描仪采集点云数据，并结合Geomagic Control三维对比分析软件，对导向器优化并组装后的蜡模的关键部位进行尺寸精度分析。

2 试验结果及分析

2.1 基于响应面法的试验设计

在Design expert软件中选择Box-Behnken的响应面方法进行试验设计，选取保压压力、保压时间、蜡料流量、注蜡温度四个注蜡过程中的工艺参数作为试验因子，将平均体积收缩率作为试验结果，分析因素与水平如表1所示，保压压力范围为1~5 MPa、保压时间范围为5~15 s、蜡料流量范围为30~300 cm³/s、注蜡温度范围为62~70 ℃，并在Moldflow软件中根据试验设计设置参数得出试验结果。

采用响应面法能够建立试验设计中的试验因子与试验结果的关系^[8]，本试验中的保压压力、保压时间、蜡料流量、注蜡温度与平均体积收缩率之间的关系是非线性的，非线性关系常用二次多项式的响应面模型进行拟合，函数形式为：

$$y(x) = \alpha_0 + \sum_{i=1}^k \alpha_i x_i + \sum_{i=1}^k \alpha_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j}^k \alpha_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

式中： $y(x)$ 为试验结果， x_i 为试验因子， α_0 、 α_i 、 α_{ii} 、 α_{ij} 为待定系数。

根据表1中的数据结果，带入式(1)中进行最小二乘法拟合，在Design Expert软件中分析得出导向器注蜡工艺参数：保压压力、保压时间、蜡料流量、注蜡温度与平均体积收缩率间的响应面函数：

$$\begin{aligned} & \text{平均体积收缩率=} \\ & -97.40791 + 0.50939A + 0.21015B + 0.011932C + 2.89214D \\ & - 1.5700E - 003A*B - 1.35185E - 004A*C - 6.87500E - \\ & 003A*D - 1.03704E - 005B*C - 3.5000E - 003B*D - \\ & 1.55556E - 004C*D - 8.31250E - 003A^2 + 2.20000E - \\ & 004B^2 - 2.043704E - 006C^2 - 0.020180D^2 \quad (2) \end{aligned}$$

式中： A 为保压压力、 B 为保压时间、 C 为蜡料流量、 D 为注蜡温度， $E-00n$ 为计算机语言中的科学计数法，意为 10^{-n} 。

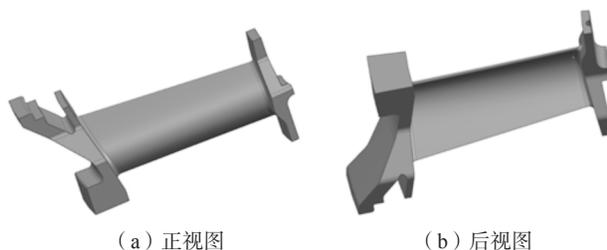


图1 导向器蜡模三维结构

Fig.1 Three-dimensional structure of the guide wax pattern

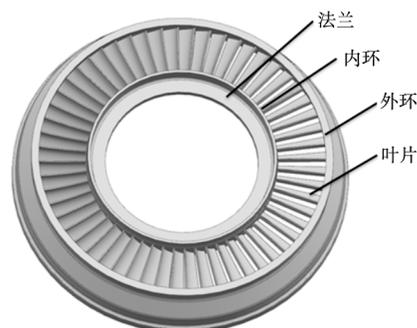


图2 导向器蜡模组装三维模型

Fig.2 Guider wax pattern assembly three-dimensional structure

表1 响应面分析因素与水平

Table 1 Response surface analysis factors and levels

水平	因素			
	A保压压力/℃	B保压时间/s	C蜡料流量/(cm ³ ·s ⁻¹)	D注蜡温度/℃
-1	1	5	30	62
0	3	10	165	66
1	5	15	300	70

在软件诊断分析 (Diagnostics) 中，可以分析拟合的响应面方程是否能有效地预测Moldflow模拟的结果，由图3a可知，平均体积收缩率的残差分布大部分都在直线上，表明试验数据呈正态分布现象，并且由图3b可以看出，实际值和预测值几乎都在45°的直线上，说明拟合的方程效果较优，能有效预测Moldflow模拟的结果。

方差分析结果中，模型的 P 值小于0.000 1，远小于0.05，可见响应面模型函数拟合得较好，可以较准确地在不同试验因素组合下进行预测，得出平均体积收缩率的响应值。并且在建立的模型中根据试验因子的 P 值可以得出注蜡工艺参数对平均体积收缩率的影响顺序：注蜡温度 (D) > 保压时间 (A) > 保压压力 (B) > 蜡料流量 (C)。

根据分析结果，选取较为显著的 AD 、 BD 、 CD 、 AB 之间的交互作用对平均体积收缩率的响应面关系

如图4所示，比较四组交互作用关系图可知，注蜡温度的减小，对平均体积收缩率有显著的影响，虽然一定程度上蜡料的粘度会升高，在型腔内部的填充能力下降，但是充填结束后蜡模温度较低，减短了蜡模的

冷却周期，并且会减少内应力的释放，减少缺陷的产生；适当地减小蜡料流量可以减小注蜡过程中蜡模型腔流场波动，利于蜡模的成形；采用合适的保压时间和保压压力能够有效地减小平均体积收缩率。

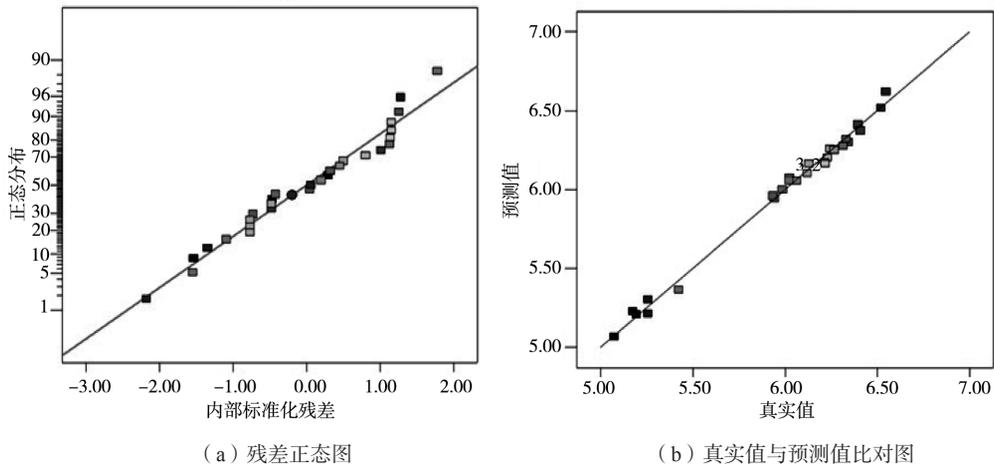


图3 诊断分析结果
Fig. 3 Diagnostic analysis results

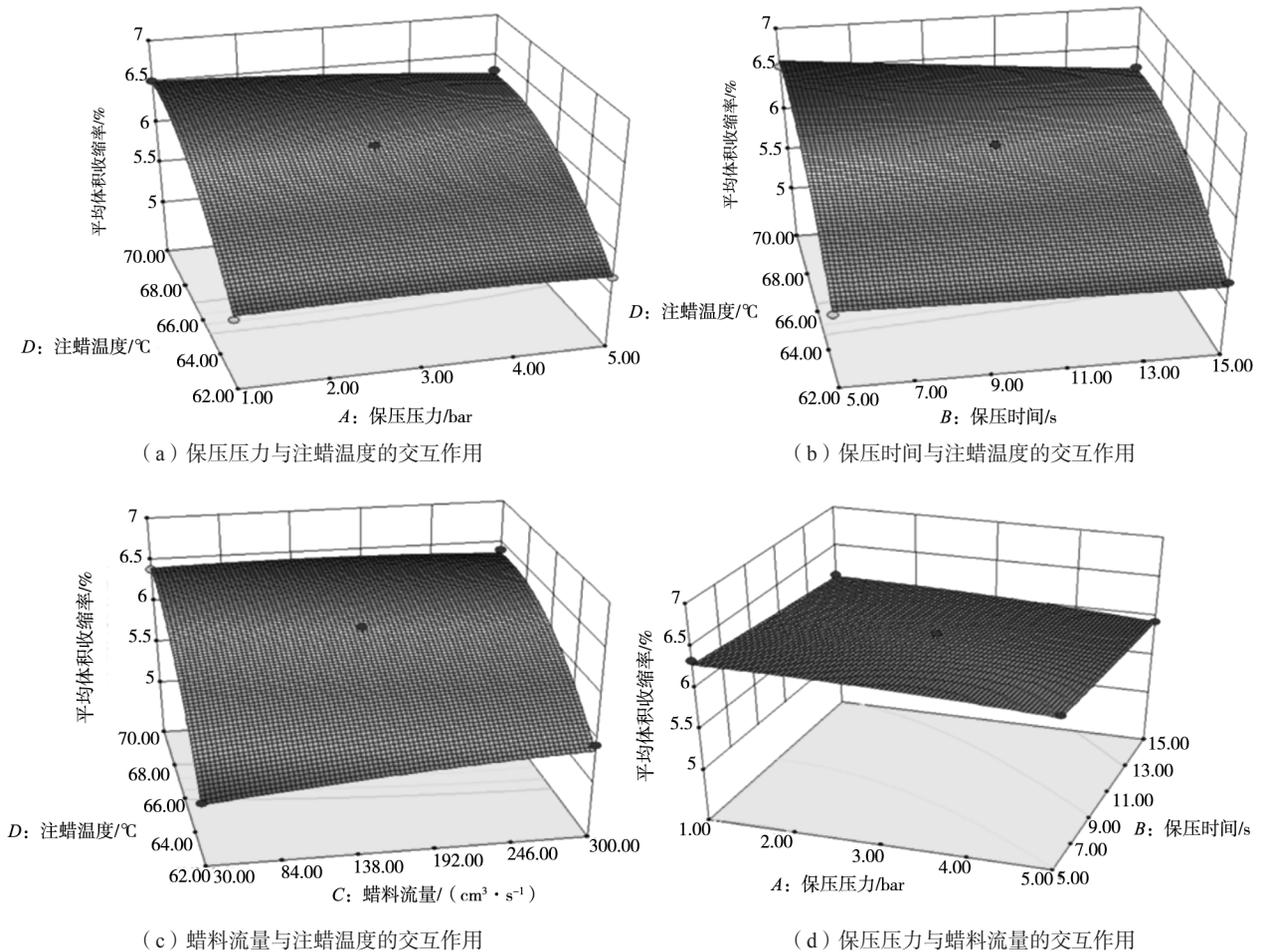


图4 显著交互作用响应面
Fig. 4 Significant interaction response surface

2.2 最优注蜡工艺参数计算

对于多种变量组合优化求解的问题上，常采用算法编程对目标函数进行求解，遗传算法能够较快且较准确地找到目标函数的最小值^[9]，将上述公式（2）中的平均体积收缩率响应面拟合的二次函数在Matlab软件中采用编程语言建立并保存为use fun.m，在任务栏中输入optimtool调出算法工具箱，选择遗传算法（Genetic Algorithm）。

在遗传算法工具箱中目标函数采用句柄形式的@use fun导入，变量数设置为4，注蜡工艺参数的范围设置为：保压压力1~5 MPa、保压时间5~15 s、蜡料流量30~300 cm³/s、注蜡温度62~70 ℃，设置结果如图5所示，进行遗传算法优化。优化后的结果如图6所示，在经历86次迭代优化后，结果达到收敛，平均体积收缩率的最小值为4.674%，然而在Design expert中采用响应面法预测平均体积收缩率的最小值为4.978%，采用遗传算法能够有效对目标函数最小值进行求解，此时导向器蜡模的最佳工艺参数为：保压压力0.1 MPa，保压时间13.34 s，蜡料流量32.23 cm³/s，注蜡温度62 ℃。

2.3 导向器蜡模组装尺寸检测

传统的接触测量方法会对蜡模的尺寸精度产生影响，特别是带有复杂薄壁结构的蜡模，因此采用三维蓝光扫描仪进行蜡模数据的采集，将优化后的注蜡工艺参数生产的导向器蜡模焊接、组装并进行蓝光扫描数据采集，采集到的数据类型将会以点云的形式进行储存，点云数据中直接包含了被测物体的三维结构信息，导向器蜡模扫描的点云模型如图7所示。

采用Geomagic control软件最佳拟合对齐方式中的高精度拟合进行拟合对齐，进行3D比较并对导向器中间的支板进行尺寸标注，比较结果如图8所示，由图可知，蜡模大部分尺寸偏差在0.200 mm左右，关注优化工艺参数后制备蜡模的支板部位，支板部位的标注结果显示差异较小，尺寸差异在0.07~0.17 mm，尺寸精度较高。

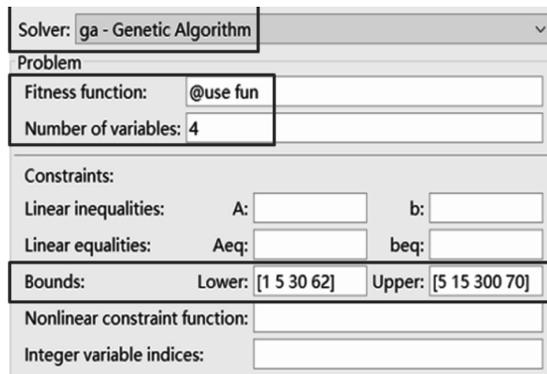


图5 Matlab遗传算法工具箱参数设定

Fig. 5 Matlab genetic algorithm toolbox parameters setting

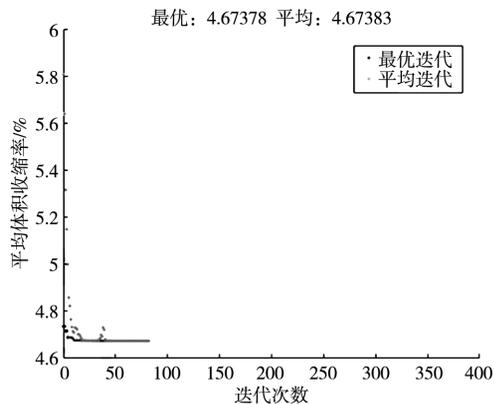


图6 遗传算法优化迭代曲线

Fig. 6 Genetic algorithm optimization analysis results

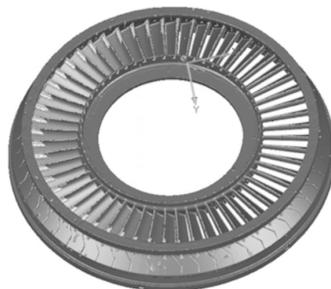


图7 导向器蜡模点云模型

Fig. 7 Guider wax pattern point cloud model

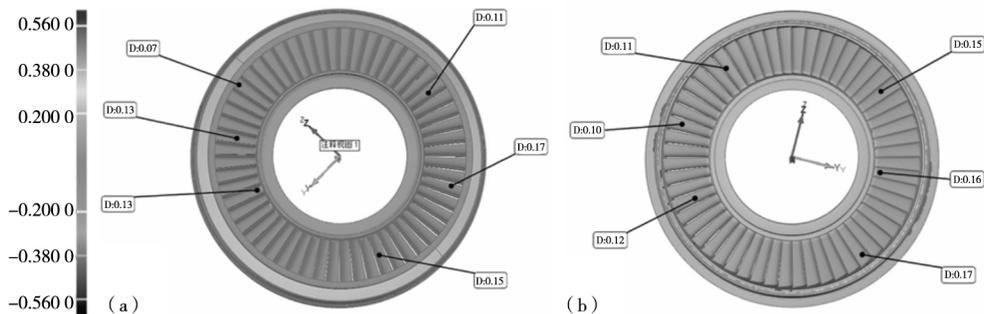


图8 导向器蜡模叶片对比标注结果

Fig. 8 Comparison and annotation results of the guide wax pattern blade

此外导向器铸件法兰的部位需要与其他航天发动机的配件进行装配，且导向器铸件精度等级要达到CT5，考虑熔模铸造过程中的尺寸误差累积，导向器蜡模外环以及内环尺寸精度要达到CT4级别，CT代表铸件尺寸公差后面的数字为尺寸精度的级别，数字越小尺寸精度越高，为验证蜡模尺寸精度级别，在Geomagic control软件中对导向器蜡模内环以及外环的法兰取上、中、下三个部位进行切片截面分析，所取截面的位置如图9所示。

由于导向器蜡模在实际制备中内环以及外环会发生尺寸变形，内环与外环实际测量并不是圆，因此测量外环以及内环直径的最大值与最小值，各个截面的内环内径与外径、外环内径与外径测量尺寸如图10所示，将导向器CAD模型测量的理论值与三个截面测量后尺寸直径的最大值与最小值进行作差比较，看尺寸偏差范围是否满足CT4的尺寸精度要求，由表2截面尺寸偏差统计可知，导向器蜡模的尺寸精度已达到CT4级别要求。

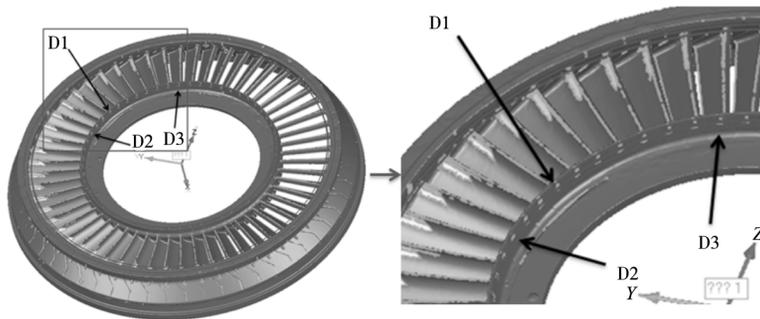
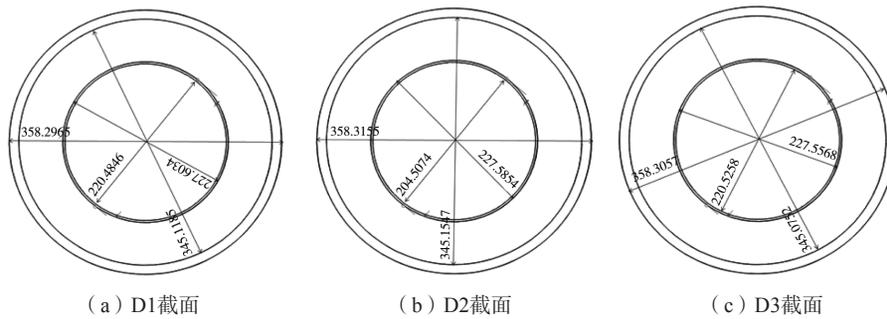


图9 导向器蜡模内外环法兰截面位置

Fig. 9 The position of the flange section of the inner and outer ring of the guide wax pattern



(a) D1截面

(b) D2截面

(c) D3截面

图10 导向器蜡模内外环截面位置尺寸

Fig. 10 The sizes of the cross section of the inner and outer ring of the guide wax pattern

表2 导向器蜡模截面尺寸偏差统计表

Table 2 Statistic table of dimensional deviation of the guide wax pattern model section

截面名称	直径名称	理论值/mm	最大值/mm	最小值/mm	偏差范围/mm	是否满足CT4
D1	内环内径	220.250 6	220.484 6	220.382 5	± 0.25	是
	内环外径	227.375 2	227.603 4	227.538 8	± 0.25	是
	外环内径	344.892 3	345.118 5	345.054 9	± 0.28	是
	外环外径	358.074 6	358.296 5	358.285 5	± 0.28	是
D2	内环内径	220.318 7	220.507 4	220.498 9	± 0.25	是
	内环外径	227.343 1	227.585 4	227.554 7	± 0.25	是
	外环内径	344.951 8	345.198 8	345.154 7	± 0.28	是
	外环外径	358.173 3	358.315 5	358.300 7	± 0.28	是
D3	内环内径	220.325 5	220.525 8	220.468 3	± 0.25	是
	内环外径	227.307 1	227.577 4	227.556 8	± 0.25	是
	外环内径	344.918 2	345.185 1	345.075 2	± 0.28	是
	外环外径	358.103 5	358.335 7	358.305 7	± 0.28	是

3 结论

(1) 采用KC3898NRR蜡料对导向器蜡模进行注蜡试验, 四个工艺参数对平均体积收缩率的影响顺序为: 注蜡温度>保压时间>保压压力>蜡料流量。

(2) 基于响应面法得到的目标函数采用遗传算法能够较准确地得到最优工艺参数, 平均体积收缩率

的最小值为4.673 78%, 在此最小值下的最优注蜡工艺参数为保压压力0.1 MPa, 保压时间13.34 s, 蜡料流量32.23 cm³/s, 注蜡温度62 ℃。

(3) 采用最优注蜡工艺参数生产、组装并焊接的导向器蜡模经过扫描比对验证, 导向器蜡模的尺寸精度达到CT4级别。

参考文献:

- [1] 沈昀, 郑功, 冯辰铭. 熔模精密铸造技术研究进展 [J]. 精密成形工程, 2019, 11 (1): 54-62.
- [2] WANG D H, HE B, LI F, et al. Cavity pressure and dimensional accuracy analysis of wax patterns for investment casting [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2013, 28 (6): 637-642.
- [3] 侯正乾, 胡兵, 郑行, 等. K418B涡轮导向器熔模离心浇注工艺研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39 (5): 533-536.
- [4] 李柏鸿. 新型精密铸造蜡模料的研制及对模料配比的优化 [D]. 湘潭大学, 2016.
- [5] 阚精诚, 刘继广, 杨友文, 等. 熔模铸造柱状蜡模充型工艺参数优化 [J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39 (8): 877-880.
- [6] 陈建华, 杨彬, 李冰, 等. 熔模精密铸造蜡模质量控制 [J]. 铸造技术, 2012, 33 (3): 370-372.
- [7] 阚精诚, 刘继广, 杨友文, 等. 铸造充型过程数值模拟技术的研究现状与展望 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (13): 9-13.
- [8] 罗成, 吴文云, 廖秋慧, 等. 塑封微芯片翘曲优化分析 [J]. 塑料科技, 2020, 48 (9): 90-95.
- [9] 王永鼎, 李宇业. 采用遗传算法的海流能发电机叶片优化与研究 [J]. 机械强度, 2021, 43 (2): 327-332.

Process Parameter Optimization and Dimensional Accuracy Detection of Guide Wax Pattern

YU Tong¹, WANG Dong-hong^{2,4}, WU Wen-yun¹, LEI Si-xiong³, TAN Shi-xin³, HAO Xin³, ZHOU Jian-xin⁵, YIN Ya-jun⁵, SHU Da²

(1. School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai Key Lab of Advanced High-Temperature Materials and Precision Forming, Shanghai 200240, China; 3. China Aircraft Southern Industry Co., Ltd., Zhuzhou 412000, Hunan, China; 4. Jiashan Xinhai Precision Casting Co., Ltd., Jiashan 314101, Zhejiang, China; 5. State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract:

The preparation of the guide wax pattern is the first major process of investment casting to produce guide castings. The quality of the guide wax pattern was improved by optimizing the wax injection process parameters in this paper. Design expert was used to design the experiment, combined with mold flow to simulate the wax injection experiment, and the genetic algorithm was used to solve the objective function. After analysis and verification, the order of the influence of the four process parameters on the average volume shrinkage rate is: wax injection temperature>pressure holding time>pressure holding pressure> wax material flow. The optimal wax injection process parameters are the holding pressure of 0.1 MPa, and the holding time of 13.34 s, wax material flow of 32.23 cm³/s, wax injection temperature of 62 ℃. Under these conditions, the guide wax pattern dimensional accuracy reaches CT4 level.

Key words:

investment casting; process parameters; guide wax pattern; dimensional accuracy