

大尺寸燃气轮机叶片蜡模注射成型与尺寸精度控制

周乐尧^{1, 4}, 汪东红^{2, 4}, 刘淑梅¹, 帅三三³, 赵代银⁴, 疏 达^{2, 4}

- (1. 上海工程技术大学 材料科学与工程学院, 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. 上海大学 材料科学与工程学院, 省部共建高品质特殊钢冶金与制备国家重点实验室, 上海 200444;
4. 东方电气集团东方汽轮机有限公司清洁高效透平动力装备全国重点实验室, 四川德阳 618000)

摘要: 应用蜡模注射成型数值模拟方法, 分析了单晶涡轮叶片蜡模充填过程、体积收缩率与翘曲变形和熔接痕; 建立了注蜡工艺参数与翘曲变形的响应面模型, 并使用多岛遗传算法获得全局最优的工艺参数。工艺参数对翘曲变形的影响最大的是保压压力, 其次是注射温度和保压时间, 叶片蜡模的最优注蜡工艺参数为保压压力13.66 bar, 注射温度 69.96 °C, 保压时间 155.73 s, 经试验验证, 叶片蜡模尺寸精度达到CT4级别。

关键词: 熔模铸造; 涡轮叶片; 蜡模; 数值模拟; 尺寸精度

作者简介:

周乐尧(1998-), 女, 硕士生, 研究方向为智能铸造。电话: 18954536310, E-mail: M050120327@sues.edu.cn.

通讯作者:

汪东红, 男, 副研究员。电话: 021-54748678, E-mail: wangdh2009@sjtu.edu.cn

中图分类号: TG241

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)06-0641-07

基金项目:

国家科技重大专项(J2019-VI-0004-0117); 国家重点研发计划(2020YFB1710100, 2022YFB3706800); 国家自然科学基金(51821001, 52074183, 52090042); 浙江省重点研发计划(2020C01056, 2021C01157, 2022C01147); 材料成形与模具技术国家重点实验室开放基金(P2021-006); 长寿命高温材料国家重点实验室开放基金(DECSKL202109)。

收稿日期:

2022-05-05 收到初稿,
2022-07-19 收到修订稿。

涡轮叶片作为燃气轮机核心的热端部件, 工作环境恶劣, 承受着高温高压和高速旋转的巨大离心力^[1]。燃机高温合金叶片通常采用传统的精密铸造成形, 燃机涡轮叶片的尺寸精度直接由精密铸造过程决定^[2]。蜡模的尺寸波动在铸件尺寸波动中占10%~70%^[3], 可见, 蜡模制备过程尺寸精度控制对燃气轮机涡轮叶片尺寸具有重要作用。

应用材料基因工程技术可研发合格的镍基单晶高温合金铸造叶片^[4-5]。在蜡模实际生产中, 充型蜡料、注蜡工艺参数、蜡模的结构尺寸等都会对蜡模的质量产生影响^[6]。传统经验寻优和循环试错法指导模具设计和蜡模成型, 尺寸精度差, 科学性差, 偶然性高^[7]。蒋睿高建立一种新的涡轮叶片蜡模变形补偿模型, 蜡模变形量降低了80%~90%, 进一步提升了涡轮叶片蜡模的尺寸精度^[8]。董一巍提出了基于有限元的位移迭代补偿方法, 计算了不同位置的铸件收缩量, 建立优化的蜡模模具轮廓, 经过四次迭代, 总体尺寸误差由0.515 815 mm降低到0.001 978 mm^[9]。Rezavand对燃气轮机的叶片蜡模尺寸稳定性进行了系统研究, 结果表明叶片的曲率和不均匀厚度对蜡模尺寸精度有影响, 在注蜡工艺参数中保温时间影响大于注射温度^[10]。赵代银基于模拟发现采用冷蜡芯工艺和胎具定形工艺有助于最终铸件尺寸的保证^[11]。韩伟提出采用冷蜡块二次成形蜡模并分析各工艺参数对蜡模的影响, 改善了蜡模表面缺陷, 提高了蜡模尺寸稳定性^[12]。虽然已经出现了很多熔模铸造控形技术^[13-14], 但是优化注蜡工艺参数与设计合理的收缩率也可以控制蜡模尺寸精度。

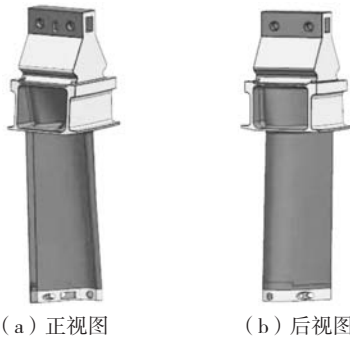
针对涡轮叶片蜡模尺寸精度控制问题, 应用注蜡成型数值模拟软件Moldflow预测蜡模的变形尺寸, 建立注蜡工艺参数与翘曲变形的响应面模型, 使用优化算法得到最优工艺参数, 可提高涡轮叶片尺寸精度。

1 试验材料及方法

1.1 涡轮叶片蜡模结构特征

涡轮叶片三维结构模型如图1所示, 叶片总长426.78 mm, 叶片弦长102.69 mm,

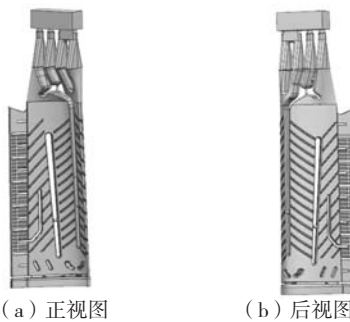
叶片厚度为15.62 mm, 叶片榫头高为176.52 mm, 其中最重要的结构为叶身, 叶身为250.26 mm。叶片部分的空间曲面复杂且薄厚不均匀, 最厚处为15.62 mm, 最薄处为0.17 mm, 内部设计为中空结构, 含有陶瓷型芯。陶瓷型芯三维结构如图2所示, 整片式叶身结构上设计了气孔和连接孔, 可以减少叶片厚度, 加快散热。



(a) 正视图 (b) 后视图

图1 涡轮叶片三维结构图

Fig. 1 Three-dimensional structure of the turbine blade



(a) 正视图 (b) 后视图

图2 陶瓷型芯三维结构图

Fig. 2 Three-dimensional structure of the ceramic core

1.2 材料选择及工艺设置

原材料为英国Blayson公司生产的A7-FR80T叶片专用中温填充蜡, 该蜡料具有适度的软化点和低收缩率的优点, 且尺寸稳定性优异。研究影响蜡料流动的热物性参数如流变性能、可压缩PVT特性、热性能, 提高模拟结果的准确性。图3为蜡料的流变性能曲线, 图4为测试的蜡料熔体可压缩性能PVT (Pressure-Volume-Temperature) 曲线, 图5为蜡料热性能曲线。依据实际注蜡条件, 在MoldFlow软件设置工艺参数, 注蜡机最大注射速率设置为 $300 \text{ cm}^3/\text{s}$, 最大注射压力设置为7 MPa, 最大锁模力为50 t。模具材料为7075铝合金, 模具温度为 $23 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

2 仿真方法与数值模拟

2.1 涡轮叶片蜡模充填分析

涡轮叶片具有复杂的曲面结构, 内部为空腔结构, 充型过程直接决定蜡模的表面质量和尺寸精度^[15]。

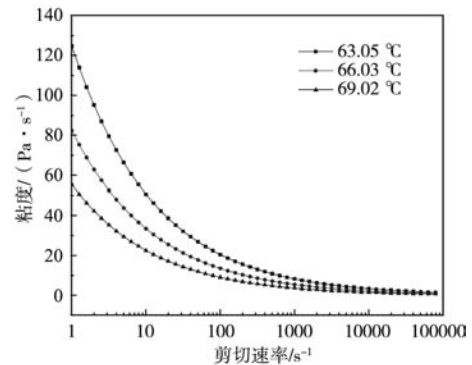


图3 蜡料流变性能曲线

Fig. 3 Rheological performance curves of the wax

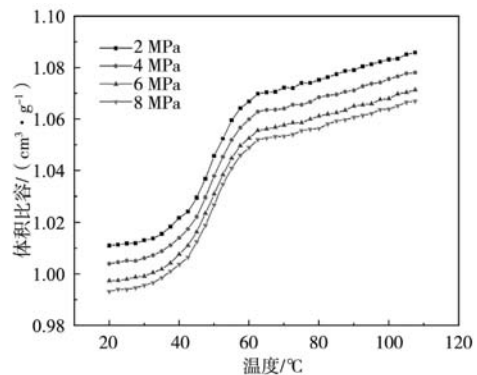


图4 蜡料PVT曲线

Fig. 4 PVT curves of the wax

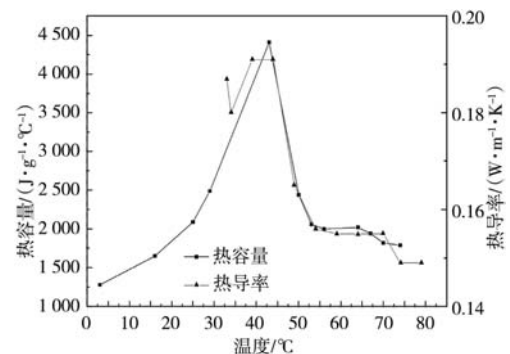


图5 蜡料热性能曲线

Fig. 5 Thermal performance curves of the wax

图6为叶片蜡模充填过程, 反映蜡料在型腔内的充填状态。整个填充过程需要4.005 s, 蜡料先充满叶片榫头部分, 然后再从榫头往叶身推进直至完全充满, 填充速度均匀, 进料顺利, 无短射滞留现象。

2.2 涡轮叶片蜡模缺陷分析

涡轮叶片在注射成型中若注射温度、保压压力、保压时间设置不合理会造成蜡模不同部位冷却速率不同, 产生不均匀收缩, 导致叶片蜡模变形^[16]。由于蜡料是热的不良导体, 壁厚越大, 蜡模收缩越严重。从

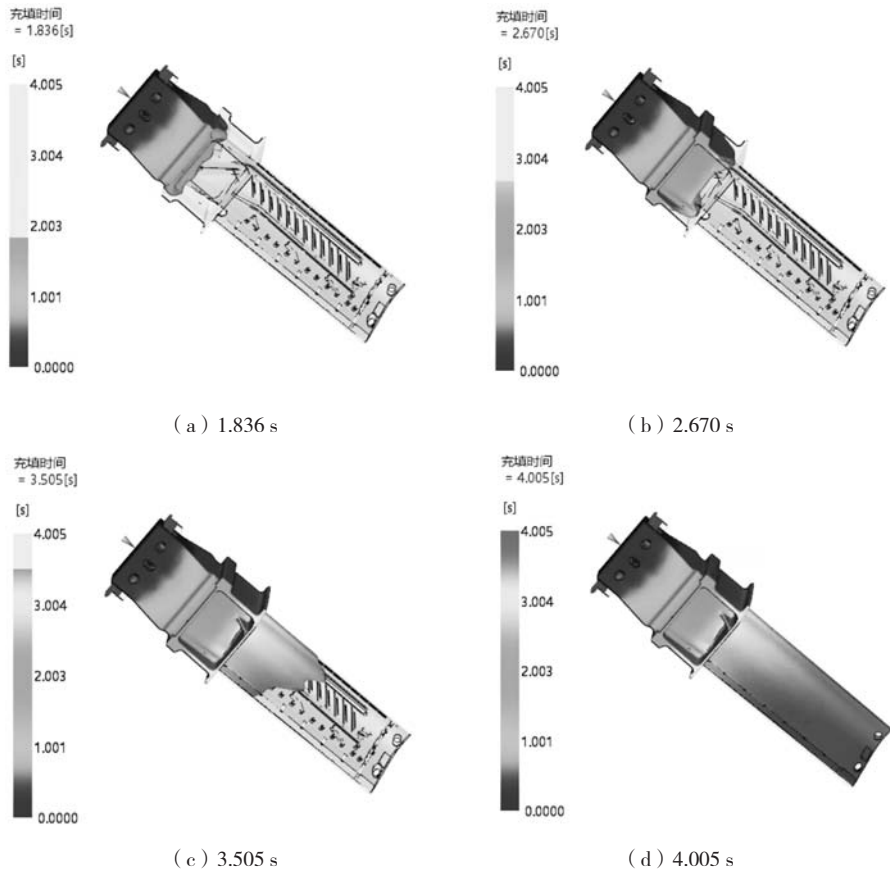


图6 涡轮叶片充型过程
Fig. 6 Filling process of turbine blade

图7可以看出，叶片榫头和叶尾的翘曲变形量大，最大处达到了4.794 mm，榫头的平均体积收缩率达到了5.416%；叶身中下段由于距离榫头较远，翘曲变形量达到了3.603 mm。所以翘曲变形是影响涡轮叶片蜡模尺寸精度的重要因素，需要优化工艺参数来减少尺寸超差。

熔接痕是指两股流动的熔体相接触而形成的形

态结构和力学性能都完全不同于其他部分的三维区域^[17]。如果蜡料分流汇合性能较差，就容易产生熔接痕，影响蜡模质量并在表面产生缺陷。涡轮叶片蜡模最主要的是保持表面尺寸完整性，图8中熔接线角度大于135°的主要在叶片内部和型芯的凹槽处，不影响叶片表面质量和整体强度。

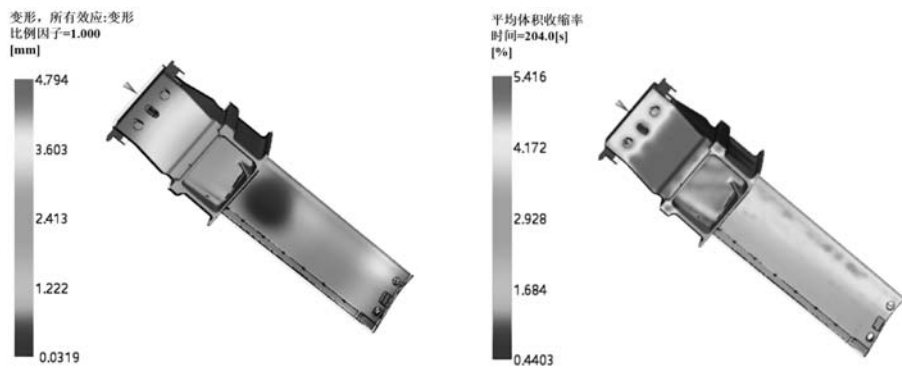


图7 叶片蜡模翘曲变形和平均体积收缩率
Fig. 7 Warpage deformation and average volume shrinkage of wax pattern of turbine blade

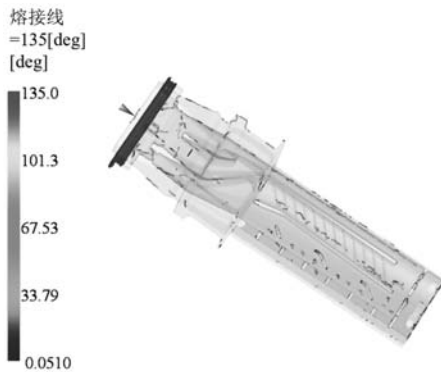


图8 涡轮叶片蜡模熔接痕

Fig. 8 Weld lines of wax pattern of turbine blade

3 试验结果及分析

3.1 基于响应面模型的试验设计

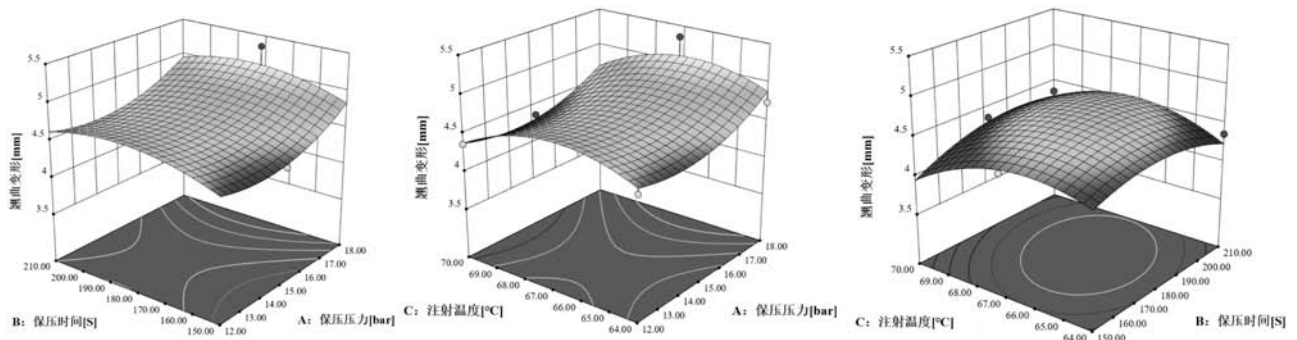
试验设计选择Box-Behnken的响应面模型,利用多项式拟合设计空间,在局部范围内获得精确的逼近函数关系式,通过回归模型的选择拟合复杂的响应关系,具有良好的鲁棒性^[18-19]。试验选取保压压力、保压时间、注射温度三个注蜡工艺参数作为试验因子,翘曲变形作为响应结果,分析因素与水平如表1所示,保压压力12~18 bar,保压时间150~210 s,注射温度64~70 °C,并在Moldflow软件中根据试验设计设置参数得出试验结果。

方差分析中模型的 P 值为0.031 3,小于0.05,说明函数关系式拟合较好,模型显著可以进行有效预测。

表1 响应面分析因素与水平

Table 1 Factors and levels of the response surface analysis

水平	因素		
	A保压压力/bar	B保压时间/s	C注射温度/°C
-1	12	150	64
0	15	180	67
1	18	210	70



(a) 保压压力与保压时间的交互作用

(b) 保压压力与注射温度的交互作用

(c) 保压时间与注射温度的交互作用

图9 显著交互作用响应面

Fig. 9 Significant interaction response surface

用不同的实验因素进行组合试验,获得翘曲变形的响应值。根据实验因子的 P 值可以得出以下结论,注蜡工艺参数对翘曲变形的影响顺序为:保压压力(A)>注射温度(C)>保压时间(B)。在不同因子和翘曲变形的响应面关系上,选取较为显著的 AB 、 AC 、 BC 三个响应面。图9所示为三组工艺参数交互作用关系图,保压压力的变化对翘曲变形量有显著影响,选择合适的保压压力和延长保压时间可以使型腔内制品压实,减少翘曲变形量;注蜡温度过低时,蜡模收缩导致翘曲变形量增大,适当地提高注射温度可以使蜡料的粘度降低,提升蜡料的流动性和填充性,使整个模具的压力分布更均匀,从而降低翘曲变形量。

3.2 最优注蜡工艺参数计算

多岛遗传算法(Multi-Island Genetic Algorithm)是一种对并行遗传算法的改进模型,相较于一般遗传算法,具有更好的计算效率和全局优化能力^[20]。多岛遗传算法将子种群分隔为多个岛,子种群之间的遗传进化互不干扰,再由岛间迁移增加种群的多样性,能有效抑制早熟现象的发生。模型设置子群体数量为10,岛数为10,进化代数 $T=10$,交叉概率 $PC=1$,变异概率 $PM=0.01$,岛间迁移率0.01。遗传算法优化过程如图10所示,试验的较优数据随着迭代次数的增加不断上浮聚集,最上方为翘曲变形量最小的数据,在注射温度为69~70 °C较为集中。

多岛遗传算法因变量设置为3个,其注射成型工艺参数范围为:保压压力12~18 bar、注射温度64~70 °C、保压时间150~210 s。采用多岛遗传算法可以最大程度地优化目标函数值,同时也可以避免过早收敛无法得到全局最优解。如图11所示,算法迭代1 000次后,求解出全局最优注射成型工艺参数,保压压力13.66 bar,注射温度69.96 °C,保压时间155.73 s。最优参数代入模拟过程,此时 X 方向、 Y 方向最大变形量分别是0.881 0 mm和0.932 0 mm, Z 方向最大变形量是3.707 mm。 X 方向

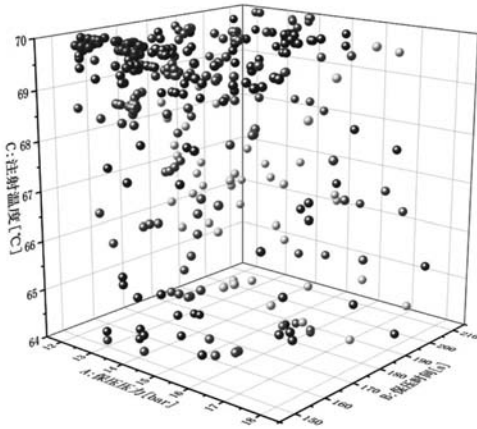


图10 多岛遗传算法优化过程

Fig. 10 Optimization process of the multi-island genetic algorithm

和Y方向是厚度方向收缩，Z方向是流动方向收缩，模拟存在一定误差，考虑流向系数需要进一步研究，而叶片榫头留有加工余量，最大翘曲变形量为3.92 mm，降低了18.06%。

4 涡轮叶片蜡模尺寸精度控制

注蜡工艺参数对蜡模尺寸精度有决定性影响。采

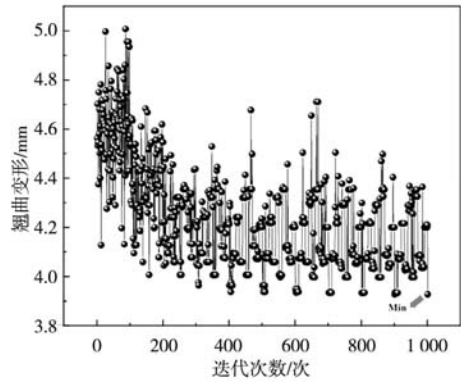
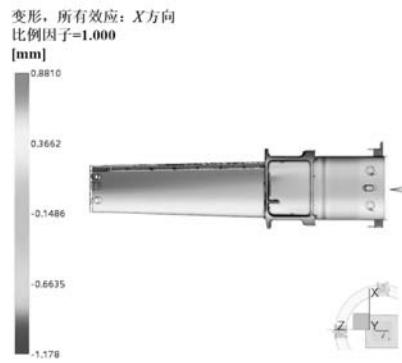


图11 多岛遗传算法迭代全过程

Fig. 11 Full iterative process of multi-island genetic algorithm

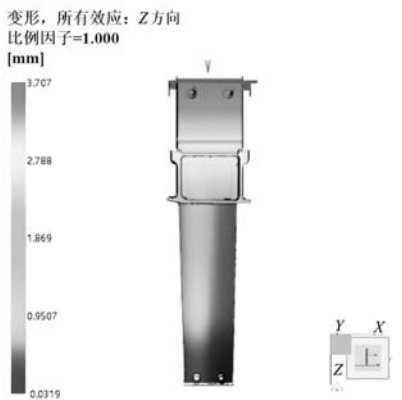
用模拟结果最优的注蜡工艺参数进行蜡模实际生产。首先将蜡料加入到注射机进料桶中，设定注射温度进行蜡料预热。在模具内表面喷涂一层脱模剂并对模具内腔进行预热。预热结束，将上下模合模并移至压力机下方，施加适宜压力将浇注口对准出料口保证进料流畅，通过出料口压射到模具内，待保温结束进行脱蜡处理，得到的涡轮叶片蜡模实物如图13所示。由于涡轮叶片蜡模具有复杂空间曲面和薄壁结构，传统接



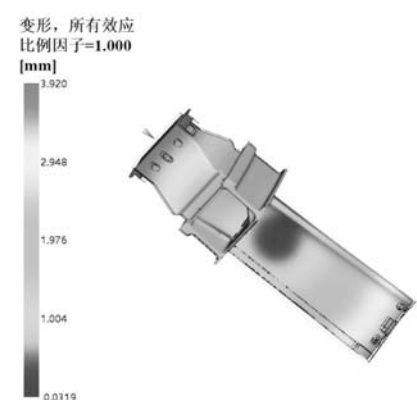
(a) X方向



(b) Y方向



(c) Z方向



(d) 所有效应

图12 叶片最优参数蜡模翘曲变形

Fig. 12 Optimal parameters of warpage and deformation of the wax pattern of the blade



图13 涡轮叶片蜡模实物

Fig. 13 Real wax pattern of turbine blade

触测量结果误差较大,使用蓝光扫描仪采集涡轮叶片点云数据^[21]。为验证涡轮叶片蜡模外表面尺寸精度级别,在Geomagic Control软件中对涡轮叶片点云和原模型进行高精度拟合后进行3D比较对比结果如图14所示。由图14可以看出,涡轮叶片叶身较厚处变形量大于叶身较薄处,整体叶身的变形量在 ± 0.1 mm内,工艺参数优化过后的尺寸精度符合要求,尺寸偏差在 $-0.245 3\sim 0.154 0$ mm之间。

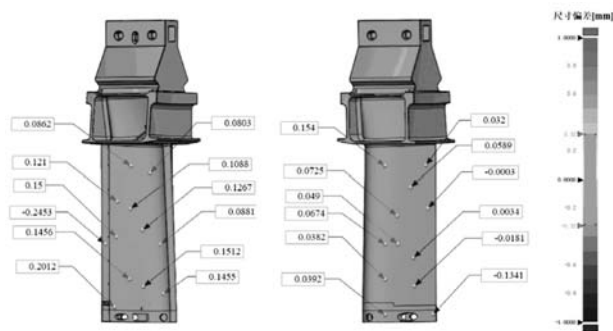


图14 涡轮叶片蜡模变形对比标注结果

Fig. 14 Comparison and annotation results of wax pattern of turbine blade

涡轮叶片不仅具有复杂的空间曲面,其内部结构还是空心的。为了进一步研究空心涡轮叶片的尺寸精度,将叶身等分成四段,选取有代表性的三个截面进行尺寸分析,所选取的截面位置如图14所示。利用Geomagic Control软件比较叶片CAD模型测量值与三个截面测量后尺寸偏差的最大值与最小值,看叶片的尺寸偏差范围是否满足CT4要求。由表2可知,基于厚度方向的截面A1、A2和A3尺寸偏差范围满足CT4要求。

参考文献:

- [1] 崔慧然,冯相如,任建伟.燃气轮机涡轮叶片制造工艺现状及发展方向[J].铸造,2022,71(2):8.
- [2] 赵代银,杨照宏,杨功显,等.某型重型燃机实心动叶片的精密铸造过程尺寸控制[J].特种铸造及有色合金,2020,40(11):1265-1268.
- [3] 陈冰.熔模铸件的尺寸稳定性和精度[J].特种铸造及有色合金,2003(1):53-56.
- [4] 汪东红,孙锋,疏达,等.数据驱动镍基铸造高温合金设计及复杂铸件精确成形[J].金属学报,2022,58(1):14.
- [5] 陈晶阳,吴文津,李青,等.采用低温度梯度HRS工艺制备的镍基单晶高温合金雀斑组织[J].中国有色金属学报,2018,28(12):2494-2498.
- [6] 樊振中.熔模精密铸造在航空航天领域的应用现状与发展趋势[J].航空制造技术,2019,62(9):38-52.

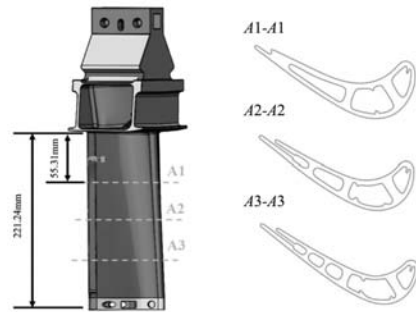


图15 涡轮叶片选取截面位置示意图

Fig. 15 Position of the selected section of turbine blade

表2 涡轮叶片蜡模截面尺寸偏差统计表
Table 2 Statistic table of dimensional deviation of the section of the wax pattern of the turbine blade

截面	最大 偏差值/mm	最小 偏差值/mm	偏差 范围/mm	是否满 足CT4
A1-A1	0.272 9	-0.168 7	± 0.32	是
A2-A2	0.250 2	-0.245 3	± 0.32	是
A3-A3	0.267 5	-0.065 2	± 0.32	是

5 结论

(1) 研究了A7-FR80T蜡料流变性能、PVT和热性能,开展了单晶涡轮叶片蜡模注射成型数值模拟仿真研究,得到涡轮叶片蜡模充填时间为4.005 s,最大尺寸翘曲变形可达4.794 mm。

(2) 建立了注蜡工艺参数与翘曲变形的响应面模型,工艺参数对翘曲变形的影响最大的是保压压力,其次是注射温度和保压时间。叶片蜡模的最优注蜡工艺参数为保压压力13.66 bar,注射温度69.96 $^{\circ}\text{C}$,保压时间155.73 s,此时X方向、Y方向最大变形量分别是0.881 0 mm和0.932 0 mm,Z方向最大变形量是3.707 mm,最大翘曲变形量降低了18.06%。

(3) 采用模拟结果最优的注蜡工艺参数进行实际生产,经过3D扫描对比,基于厚度方向的截面A1、A2和A3尺寸偏差范围满足CT4要求。可见,注蜡成形数值模拟与工艺参数优化对涡轮叶片蜡模尺寸精度控制有重要的指导意义。

- [7] 阚精诚. 熔模铸造蜡模充型工艺研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- [8] JIANG R, ZHANG D, BU K, et al. A deformation compensation method for wax pattern die of turbine blade [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88 (9): 3195–3203.
- [9] DONG Y W, KUN B, DOU Y Q, et al. Determination of wax pattern die profile for investment casting of turbine blades [J]. Transactions of nonferrous metals society of China, 2011, 21 (2): 378–387.
- [10] REZAVAND S A M, BEHRAVESH A H. An experimental investigation on dimensional stability of injected wax patterns of gas turbine blades [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 182 (1–3): 580–587.
- [11] 赵代银, 杨功显, 曾洪, 等. 注塑成型软件在燃机叶片蜡模成型过程中的应用 [J]. 东方汽轮机, 2016 (4): 46–49, 59.
- [12] 韩伟, 于望生, 孔胜国, 等. 大型涡轮叶片无余量精密铸造尺寸精度控制研究-蜡模尺寸稳定性 [J]. 铸造, 2009, 58 (4): 330–332.
- [13] YANG L, TANG S Y, FAN Z T, et al. Rapid casting technology based on selective laser sintering [J]. China Foundry, 2021, 18 (4): 296–306.
- [14] TIAN J W, BU K, SONG J H, et al. Optimization of investment casting process parameters to reduce warpage of turbine blade platform in DD6 alloy [J]. China Foundry, 2017, 14 (6): 469–477.
- [15] 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.
- [16] 徐赛男. 空心涡轮叶片精铸蜡型的快速模具设计与成型仿真研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [17] 严志云, 丁玉梅, 谢鹏程, 等. 注塑成型熔接痕缺陷研究进展 [J]. 塑料工业, 2009, 37 (4): 1–5, 18.
- [18] 朱书建, 李健, 王荣耀, 等. 基于响应面法的T型三通管内高压成形仿真与优化 [J]. 热加工工艺, 2022 (9): 95–100, 105.
- [19] TAMTA K, KARUNAKAR D B. Development of hybrid pattern material for investment casting process: an experimental investigation on improvement in pattern characteristics [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2021, 36 (6): 744–751.
- [20] 韩军, 段荣鑫, 张磊, 等. 基于多岛遗传算法的薄壁齿圈夹具变形优化研究 [J]. 机电工程, 2020, 37 (6): 682–686, 696.
- [21] 张强, 汪文虎, 解晓娜, 等. 大尺寸涡轮叶片精铸蜡型快速制备技术 [J]. 铸造技术, 2016, 37 (7): 1499–1502.

Injection Molding and Dimensional Accuracy Control of Large Size Gas Turbine Blade Wax Pattern

ZHOU Le-yao^{1,4}, WANG Dong-hong^{2,4}, LIU Shu-mei¹, SHUAI San-san³, ZHAO Dai-ying⁴, SHU Da^{2,4}

(1. School of Materials Science and 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. School of Materials Science and Engineering, State Key Laboratory of Advanced Special Steel, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 4. State Key Laboratory of Clean and Efficient Turbomachinery Power Equipment, Dongfang Electric Dongfang Turbine Co., Ltd., Deyang 618000, Sichuan, China)

Abstract:

A numerical simulation method was used to analyze the filling process, volume shrinkage, warpage deformation and weld lines of the single crystal turbine blade wax pattern. A response surface methodology of the wax injection process parameters and warpage deformation was developed and a multi-island genetic algorithm was used to obtain the global optimum process parameters. The process parameters that had the greatest influence on deformation were holding pressure, followed by injection temperature and holding time. The optimum wax injection parameters for the blade wax pattern were holding pressure 13.66 bar, injection temperature 69.96 °C and holding time 155.73 s. The dimensional accuracy of the wax pattern was verified to achieve CT4 level.

Key words:

investment casting; turbine blade; wax pattern; numerical simulation; dimensional accuracy