

基于检测结果的涡轮叶片精铸型腔反变形优化设计

解晓娜, 汪文虎, 张 艳, 王渊彬

(西北工业大学 机电学院 现代设计与集成制造技术教育部重点实验室, 西安 710072)

摘 要: 针对空心涡轮叶片精铸过程中的试错法和数值仿真法难以敏捷反应铸件的真实变形情况, 提出一种基于检测结果的精铸零件反变形综合补偿方法. 通过对精铸叶片试模样件进行三坐标检测及统计分析, 得到叶身截面收缩、扭转和弯曲变形情况, 并建立其综合补偿反变形模具型腔优化算法, 实现精铸型腔的反变形优化设计. 以精铸叶片试模样件叶尖处截面为例, 其叶身段型面误差、前缘最大误差、后缘最大误差相对于未补偿前分别减少了50%, 68%和31%. 实例验证表明: 其研究成果能有效提高空心涡轮叶片的精铸成型精度, 达到精确控形的目的.

关 键 词: 涡轮叶片; 反变形; 检测结果; 型腔设计; 综合补偿

中图分类号: V260.5

文献标志码: A

Optimization design of reverse deformation based on measuring results for investment cavity of turbine blade

XIE Xiao-na, WANG Wen-hu, ZHANG Yan, WANG Yuan-bin

(Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology,
Ministry of Education, School of Mechanical Engineering,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: As the trial and error method and the numerical simulation method have difficulty in accurately reflecting the deformation of the hollow turbine blade in the process of investment casting, a comprehensive compensation method of the reverse deformation based on the measuring result was prompted. Firstly, through inspection by three coordinates measuring machine (CMM) and statistical analysis of the investment blade sample, three kinds of deformation including shrinkage, torsion and bending of the blade body section were calculated, then a comprehensive compensation algorithm for the design of blade mold cavity based on the reverse deformation was established, in order to achieve optimization design of the investment cavity. Taking the tip section of the investment blade sample for example, the profile error of the blade body, the maximum error of leading edge, the maximum error of trailing edge decreased by 50%, 68%, 31%, compared with the uncompensated method. Finally the experiment results show that the method can effectively improve the forming precision, and precisely controll the shape of the hollow turbine blade.

Key words: turbine blade; reverse deformation; measuring results; cavity design; comprehensive compensation

复杂空心涡轮叶片是高推质比航空发动机的核心部件,被发动机行业誉为“皇冠上的明珠”^[1]. 由于其长期服役在强烈热冲击与复杂循环热应力的工况条件下,主要承受高速旋转离心力、高温交变热载荷、气动力等^[2]. 为了降低叶片材料实际承受的工作温度,叶型表面及内部冷却通道结构非常复杂、气动外形和尺寸精度要求较高,因此空心涡轮叶片结构设计与其制造技术成为高推质比航空发动机的核心技术. 然而在实际生产工艺中,精铸叶片的型面精度低、壁厚尺寸偏移大、质量不稳定、废品率很高,成为制约我国新型航空发动机研制的瓶颈之一.

为了保证精铸叶片成形的尺寸精度和形位精度,模具型腔的设计必须考虑对铸件变形的补偿. 而铸件的变形规律又与蜡模、合金、模壳等因素密切相关. 传统的空心涡轮叶片精铸模具型腔设计通常采用综合收缩率计算型面,需要反复修模,无法在较短周期内实现精确控形. 为此, Sabau 等^[3-4] 论述了与熔模铸造工艺相关的合金收缩率的试验测量和数值预测. Okhuysen 等^[5-8] 针对蜡模、合金收缩率的变形、预测和计算进行了研究; 商用仿真软件 ProCAST 提供了高度可视化的仿真模拟,但其铸造过程中的热物理参数获取较困难,导致数值模拟结果不能完全反应铸件的真实变形情况. 在模具型面反变形设计方面, ZHANG 等^[9-16] 对模具型面反变形设计进行了深入研究. 目前,如何有效地对精铸涡轮叶片进行变形补偿仍然是一个挑战.

因此,本文将影响涡轮叶片精铸毛坯试模成型精度的前期所有因素“黑箱”化,提出基于浇铸样件检测结果的精铸型腔优化方法. 通过对初始试模后精铸叶片的测量分析,建立综合补偿模型,对型腔模型进行反变形优化设计,并通过实例验证,应用优化后精铸模具型腔,可有效提高模具型腔的可靠性及叶片成形精度.

1 涡轮叶片型面样件检测与数据处理

1.1 数据采集

通过数字化检测手段对精铸涡轮叶片进行测量,获取实际型面数据,为后续的数据分析提供数据支持. 首先通过测量坐标系建立测量基准,然后在叶片 CAD 模型上进行测量规划,生成测量程序并进行检测.

1.1.1 测量坐标系的建立

测量坐标系的确定是涡轮叶片测量过程中关键步骤. 本文通过迭代法对铸件叶片毛坯中的 6 点位置迭代调整,最终获取与设计模型一致的检测坐标系.

1.1.2 测量路径的规划

建立测量路径的目的是为了有序、高效地探测分布在铸造叶片曲面上各个点的坐标值. 本文采用等高法^[17]进行测量,如图 1 所示. 根据叶片的检测要求,规划叶片沿叶高方向 z 的测量截面,截面个数选取原则:截面线数 $n = \text{int}(H/h_0) + 1$, 其中 H 为叶片总高度, h_0 为相邻截面之间的距离. 然后测头沿着曲面在等 z 截面内采点测量. 在用三坐标测量机(three coordinates measuring machine, CMM)进行测量时,检测点数目及分布的确定不但与加工过程的工艺能力、要求达到的检测精度等因素有关,而且还与被测曲面的实际形状有关. 采样原则:测点分布的疏密随曲面曲率变化而变化,曲率越大,测点越密;反之则越疏,从而实现测点的自适应分布^[18]. 规划得到的截面测量点数据如图 2 所示.

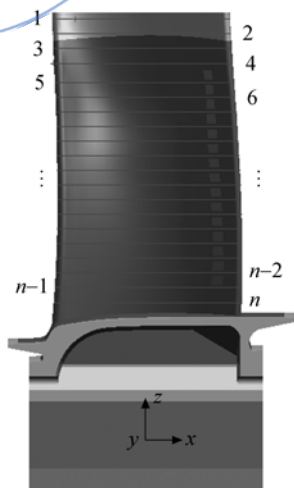


图 1 测量路径规划示意图

Fig. 1 Diagram of measurement path planning

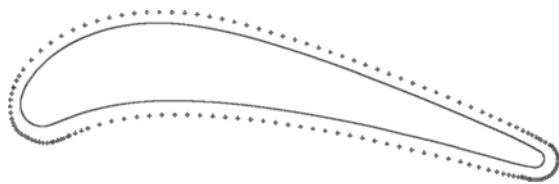


图 2 叶片截面测量点示意图

Fig. 2 Diagram of measurement points on blade section

1.2 数据处理

利用三坐标测量机进行精铸涡轮叶片曲面测量时,为避免测头补偿方法对曲面测量精度的影响,本文选取不补偿方式进行测量,最终得到的实测值为测头球心坐标.因此,需要对测头半径补偿,并通过求交、融合、拟合、拼接、光顺、插补等步骤,最终获得检测叶片的统计曲面建模结果.其流程如图 3 所示.

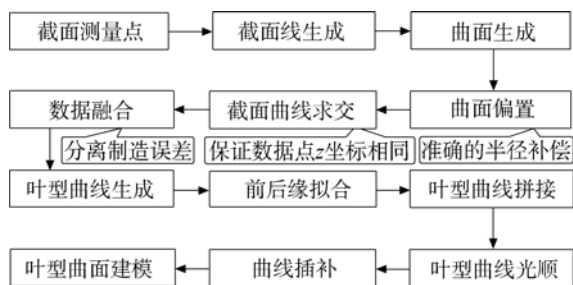


图 3 测量数据处理流程

Fig. 3 Flow of the measurement data processing

2 精铸涡轮叶片的变形分析

通过对检测结果进行变形分析,可以量化精铸过程中的弯曲、扭转和收缩变形量,为模具型腔优化过程中综合补偿模型的建立提供理论支持.通常在涡轮叶片的设计中,为了提高其气动性能,叶身一般为自由曲面及大扭转角,叶型壁厚不均且悬殊大,叶型排气边极薄,导致叶片变形中不仅存在收缩变形,同时还存在弯扭变形.

任意一个铸件点与叶片 CAD 模型上对应点的位移矢量,可以看成由收缩误差变形矢量、弯曲变形矢量、扭转变形矢量及随机误差分量合成.对于测量数据中的随机误差可以通过对同一批次的同组数据可通过数据融合加以消除.

以 CAD 截面作为标准截面,把铸件建模截面相对于 CAD 截面的平移作为弯曲变形量,测量建模截面相对于 CAD 模型截面的扭转角度作为扭转变形量,收缩变形量是通过计算弯扭补偿后的铸件建模截面与 CAD 截面上对应点之间的位移矢量得到的,具体计算方法如下:

点 P_c 表示铸件建模截面的形心,点 M_c 表示设计截面的形心, P_i 表示 CAD 模型截面上的点, Q_i 表示叶片铸件模型上与 P_i 对应的点. $P_c M_c$ 即表示平移量,为了直观,用 T_c 来表示 $P_c M_c$. T_c 可以表示为形心点在 x, y 方向的位移, $T_c = (T_{cx} \ T_{cy} \ 0)^T$, T_{cx} 为形心点在 x 方向的位移,

T_{cy} 为形心点在 y 方向的位移.同一截面上点的位移变形均与该截面形心位移矢量相同,即为 T_c ,其定义如图 4 所示.

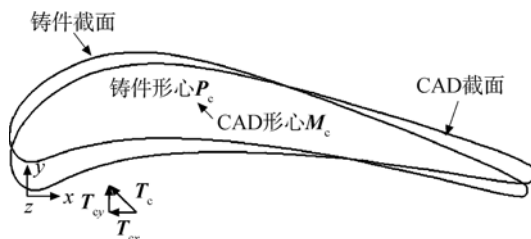


图 4 平移变形示意图

Fig. 4 Diagram of translation deformation

涡轮叶片的扭转变形以叶片铸件截面相对于设计截面的角位移来表示.角位移的定义如图 5 所示,点 A 为铸件截面的前缘点,点 B 为设计截面上的前缘点, BM_c 与 AM_c 的夹角 θ 即为角位移.

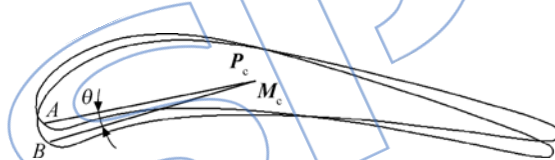


图 5 角位移示意图

Fig. 5 Diagram of angular displacement

收缩变形是通过模型配准,获得铸件模型与 CAD 模型的最佳匹配状态,然后计算铸件截面与 CAD 截面上对应点对之间的位移矢量得到,其定义如图 6 所示, n_i 为设计截面曲线上的点 P_i 对应的单位法矢,铸件截面上对应点的收缩变形量 D_i 可表示为 $D_i = |Q_i - P_i| \cdot n_i$.

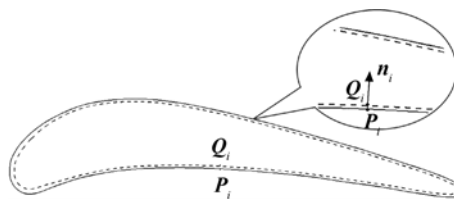


图 6 收缩变形示意图

Fig. 6 Diagram of shrinkage deformation

根据以上方法分别计算出铸件的弯曲变形矢量、扭转变形矢量、收缩变形矢量为综合补偿模型的建立提供依据.

3 基于弯扭变形的精铸型腔设计方法

传统的模具型腔设计方法受到试验手段限

制,通常采用综合收缩率计算型面,即认为铸件各点收缩变形具有同样的收缩率.目前的研究主要是针对位移场进行补偿,其中将位移场中的角位移认为是扭转变形量,线位移认为是收缩变形量,而实际上位移场是叶片铸件的收缩变形、弯曲变形以及扭转变形等多种变形耦合在一起的综合反映.因此,本文提出了基于弯扭变形的综合补偿模型.

3.1 目前的反变形优化模型

反变形技术就是在原设计模型上设计一定的反变形量形成具有反变形形状模型,再按照反变形后的模型进行工艺设计,使得最终铸件与理论模型有更好的吻合度,达到减少尺寸超差的目的.

模具型腔反变形优化原理如下:首先,基于叶片 CAD 模型构造初始型腔模型,并通过有限元方法仿真浇注过程,获得初始精铸叶片,然后与设计模型对比分析其收缩变形量;若在公差要求范围内,则停止仿真计算;否则,依据收缩变形量对型腔模型进行反变形补偿,并继续进行浇注仿真,得到的叶片与设计模型再次进行对比分析,不断迭代,逐渐缩小浇注过程中的收缩变形量,直到达到型面设计要求.

假设优化后目标为型腔模型 $\mathbf{P}$,反变形的基本数学模型可以描述为

$$\mathbf{p}_i = -\Delta \mathbf{d}_{i-1} + \mathbf{p}_{i-1} \quad (1)$$

式中 $\Delta \mathbf{d}_{i-1}$ 为 $i-1$ 次反变形补偿并浇铸仿真后的铸件模型与目标形状的误差.

$$\Delta \mathbf{d}_{i-1} = \mathbf{Q}_{i-1} - \mathbf{d} \quad (2)$$

式中 $\mathbf{d}$ 为设计截面线, $\mathbf{Q}$ 为铸造仿真后得到的截面线.

优化终止条件为:反变形补偿后的型腔模型经过浇铸后,其铸件模型与目标形状的误差 $\Delta \mathbf{d}$ 满足叶片设计误差要求,即

$$\Delta \mathbf{d}_i = \mathbf{Q}_i - \mathbf{d} \leq \Delta \mathbf{d} \quad (3)$$

3.2 基于弯扭变形的综合补偿模型

根据上文的方法求解得到收缩变形、弯曲变形、扭转变形,并在反变形的基础上分别进行叠加

补偿,建立型腔优化的综合补偿模型.

获得弯曲变形矢量后,即可对各叶片铸件模型的弯曲变形进行补偿,补偿后的型腔模型点 $\mathbf{P}_{bi}$ 可表示为

$$\mathbf{P}_{bi} = \mathbf{P} + \mathbf{T}_c \quad (4)$$

获取扭转变形矢量后即可对点 $\mathbf{P}_i$ 施加旋转变换以对铸件模型进行扭转变形的补偿.旋转矩阵 $\mathbf{R}$ 为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

则扭转补偿后的 CAD 模型点 $\mathbf{P}_{ti}$ 可表示为

$$\mathbf{P}_{ti} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{P}_i \quad (6)$$

综合前面介绍的弯曲变形进行统一反变形补偿,补偿后的模型点可表示为

$$\mathbf{P}'_i = \mathbf{R} \cdot (\mathbf{P}_i + \mathbf{T}_c) \quad (7)$$

根据计算所得收缩变形量对弯扭补偿后的铸件建模截面叠加补偿,可表示为

$$\mathbf{P}_{si} = \mathbf{P}_i - \mathbf{K} \cdot \mathbf{D}_i \quad (8)$$

式中 $\mathbf{P}_{si}$ 为型腔体反变形优化后的位置; $\mathbf{D}_i$ 表示对理论型腔体位置进行弯扭变形补偿后的收缩变形量; $\mathbf{K}$ 为铸件不同方向收缩率矩阵,即

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_x & 0 & 0 \\ 0 & K_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中

$$\begin{cases} K_x = \frac{\Delta_{\max}(x)}{L_x} \\ K_y = \frac{\Delta_{\max}(y)}{L_y} \end{cases} \quad (10)$$

式中 K_x , K_y 为叶宽、叶厚方向的收缩率; $\Delta_{\max}(x)$, $\Delta_{\max}(y)$ 为叶宽、叶厚的最大收缩量; L_x , L_y 为叶宽、叶厚的长度.

结合以上变形量的补偿方法,对模具型腔先进行收缩变形补偿,再进行弯扭变形补偿,最终建立变形量综合补偿的反变形数学模型为

$$\mathbf{P}''_i = \mathbf{R} \cdot \mathbf{P}_{si} + \mathbf{T}_c \quad (11)$$

式中 $\mathbf{P}''_i$ 为最终优化后型腔上的点.模型简化如下:

$$\mathbf{P}''_i = \mathbf{R} \cdot \mathbf{P}_{si} + \mathbf{T}_c = \mathbf{R} \cdot (\mathbf{P}_i - \mathbf{K} \cdot \mathbf{D}_i) + \mathbf{T}_c = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} K_x & 0 & 0 \\ 0 & K_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} D_{xi} \\ D_{yi} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{T}_{cx} \\ \mathbf{T}_{cy} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

4 型腔反变形优化设计验证实例

本文通过对某型号产品的 6 组同批次浇注的精铸涡轮叶片进行测量建模,通过模型配准计算各截面扭转量、弯曲量、收缩量;然后根据综合补偿模型对变形量进行反变形优化,得到新的模具型腔;最后通过对新的型腔模型压制出的蜡模进行浇注测量建模,计算误差值,并与未优化的叶片误差进行比对。

首先,根据叶片的弯扭程度和测量规划原则,选取测量截面数目为 20,根据曲面的曲率变化及检测精度,选取的测量点数为 200 个,依次进行测量,测量数据如图 7 所示。然后,对测量数据进行曲面拟合,并对曲面进行截面求交得到 20 条曲线,然后对 6 组曲线数据进行数据融合,得到一组光滑的曲线。最后通过该组曲线重构测量模型,并在 Geomagic qualify 软件中对测量数据和叶片设计模型进行配准计算,获取收缩变形量、扭转变形量、弯曲变形量。

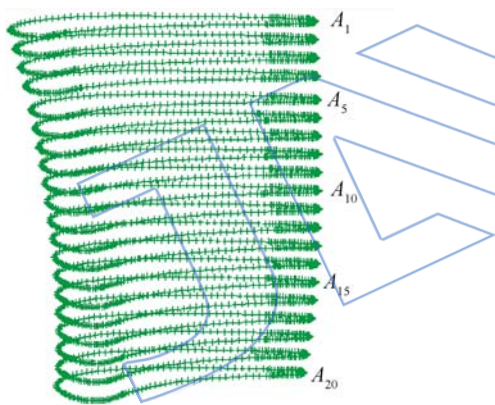


图 7 精铸涡轮叶片的测量点

Fig. 7 Measurement points of the investment turbine blade

在测量模型上取截面 A_1 , A_5 , A_{10} , A_{15} , A_{20} , 每个截面的采点方向为叶盆—前缘—叶背—后缘,其中点 1~点 92 之间的区域为叶盆,点 92~点 115 之间的区域为前缘,点 115~点 186 之间的区域为叶盆,点 186~点 200 之间的区域为后缘,分别计算得到各截面的弯曲和扭转变形,如表 1 所示。

从表 1 可知, A_{10} 截面扭转变形最小, A_5 截面平移变形最小,且变形量都是沿着中间截面向两端逐渐增大。由于叶尖、叶根部受到型腔体的约束不对称,变形较大;中间截面同时受到叶根、叶尖和型腔体的限制,约束相对均匀,故变形较小。

表 1 不同截面的弯曲和扭转变形量

Table 1 Bending and torsion deformation of different sections

截面	扭转角/(°)	平行变形量/mm
A_1	10	(0.08, 0.12)
A_5	5	(0.05, 0.06)
A_{10}	3	(0.04, 0.07)
A_{15}	6	(0.02, 0.09)
A_{20}	8	(0.07, 0.11)

计算得到的收缩变形量如图 8 所示。从收缩变形结果分布状况可以看出,叶片前后缘曲率变化较大,测量点相对较少,且受铸造型腔的约束较复杂,导致收缩变形不规律;叶盆、叶背曲线较平缓,偏差值变化比较稳定,且厚度均匀变化,使得变形较稳定。

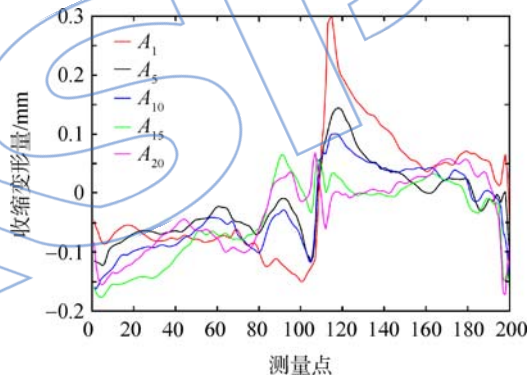


图 8 未优化前不同截面的收缩变形量

Fig. 8 Shrinkage deformation of different sections before optimization

依据本文的综合补偿方法,对以上计算所得的 3 项变形量分别进行反变形补偿,从而得到优化后的曲线,并重构新的型腔模型,在此基础上重新浇注。由于精铸叶片在浇注过程中,叶尖部位变形最大,因此选取叶尖处 A_1 截面进行误差比对分析。从浇注结果分析可知,优化前的精铸叶片 A_1 叶身段型面误差在 ± 0.1 mm 以内,优化后 A_1 叶身段型面误差为 ± 0.05 mm;优化前精铸叶片 A_1 截面前缘型面的最大误差为 0.32 mm,后缘型面的最大误差为 0.085 mm,优化后精铸叶片 A_1 截面前缘型面的最大误差为 0.10 mm,后缘型面的最大误差为 0.058 mm,如图 9 所示。即涡轮叶片精铸模具型腔在进行综合补偿优化后可以保证浇注后的叶片叶身段型面误差控制在更加合理的容差范围内,而同时可以减小叶片前后缘型面误

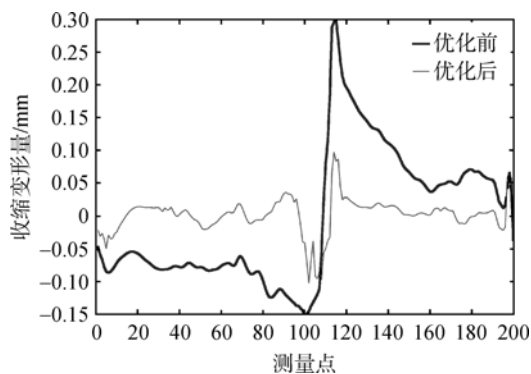


图9 优化前后 A_1 截面误差对比

Fig. 9 Error comparison of the section A_1 before and after optimization

差,使铸件毛坯的精铸型面成形精度更加接近设计要求。

通过本文提出的综合补偿优化方法与未补偿的方法进行对比,可知型腔反变形优化后的涡轮叶片成型精度得到了提高,因此,验证了综合补偿方法进行型腔优化的有效性。

5 结 论

本文通过对精铸涡轮叶片叶身的变形进行分析,研究了叶片精铸模型的收缩变形和弯扭变形规律,运用反变形设计的原理,提出了带弯扭变形的综合补偿算法。通过实例验证,表明该算法可有效地减少精铸过程中弯扭、收缩对精铸叶片型面精度的影响,为模具型腔的优化设计提供了理论支持。

参考文献:

- [1] 蒋睿嵩,张定华,汪文虎,等. 航空发动机涡轮叶片精铸模具集成设计系统[J]. 铸造,2008,57(4):363-366.
JIANG Ruisong,ZHANG Dinghua,WANG Wenhui,et al. Integration system for investment casting mould design of aero-engine turbine blade[J]. Foundry,2008,57(4):363-366. (in Chinese)
- [2] 吴立强,尹泽勇,蔡显新. 航空发动机涡轮叶片的多学科设计优化[J]. 航空动力学报,2005,20(5):795-801.
WU Liqiang,YIN Zeyong,CAI Xianxin. MDO technology applied to the aeroengine turbine blade design[J]. Journal of Aerospace Power,2005,20(5):795-801. (in Chinese)
- [3] Sabau A S. Alloy shrinkage factors for the investment casting process[J]. Metallurgical and Materials Transactions; B,2006,37(1):131-140.
- [4] Sabau A S,Porter W D. Alloy shrinkage factors for the investment casting of 17-4PH stainless steel parts[J]. Metallurgical and Materials Transactions; B,2008,39(2):317-330.
- [5] Okhuysen V F, Padmanabhan K, Voigt R C. Tooling allowance practices in the investment casting industry[R]. Orlando, FL: 46th Annual Technical Meeting & Equipment Exhibition,1998.
- [6] Sabau A S,Viswanathan S. Material properties for predicting wax pattern dimensions in investment casting[J]. Materials Science and Engineering: A,2003,362(1/2):125-134.
- [7] Bonilla W, Masood S H, Lovenitti P. An investigation of wax patterns for accuracy improvement in investment cast parts[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2001,18(5):348-356.
- [8] 卜昆,李永毅,董一巍,等. 精铸涡轮叶片非线性收缩率计算方法的研究[J]. 西北工业大学学报,2009,27(2):214-218.
BU Kun,LI Yongyi,DONG Yiwei,et al. Exploring calculation method of nonlinear shrinkage rate for investment casting turbine blade[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University,2009,27(2):214-218. (in Chinese)
- [9] ZHANG Dinghua,JIANG Ruisong,LI Jianling,et al. Cavity optimization for investment casting die of turbine blade based on reverse engineering[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2010,48(9/10/11/12):839-846.
- [10] 张丹,张卫红,万敏,等. 基于位移场仿真与特征参数提取的精铸模具型面逆向设计方法[J]. 航空学报,2006,27(3):509-514.
ZHANG Dan,ZHANG Weihong,WAN Min,et al. Reversing design methodology of the die profile in investment casting based on the simulation of displacement field and identification of featured parameters[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2006,27(3):509-514. (in Chinese)
- [11] Huang Y M,Lan H Y. Compensation of distortion in the bottom exposure of stereolithography process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2006,27(11/12):1101-1112.
- [12] Cheng H S,Cao J,Xia Z C. An accelerated springback compensation method[J]. International Journal of Mechanical Sciences,2007,49(3):267-279.
- [13] 卜昆,王虹,周桐,等. 精铸空心涡轮叶片模具虚拟修模方法[J]. 航空学报,2011,32(3):538-545.
BU Kun,WANG Hong,ZHOU Tong,et al. Method of virtual mold-repair for hollow turbine blades[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2011,32(3):538-545. (in Chinese)
- [14] Jones S,Yuan C. Advances in shell moulding for investment casting[J]. Journal of Materials Processing Technology,2003,135(223):258-265.
- [15] Ito M,Yamagishi T,Oshida Y. Effect of selected physical properties of waxes on investments and casting shrinkage[J]. The Journal of Prosthetic Dentistry,1996,75(2):211-216.
- [16] DONG Yiwei,BU Kun,DOU Yangqing. 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.
- [17] 蔺小军, 单晨伟, 王增强, 等. 航空发动机叶片型面三坐标测量机测量技术[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(1): 125-131.
- LIN Xiaojun, SHAN Chenwei, WANG Zengqiang, et al. Measurement techniques of coordinate measuring machine for blade surface of aero-engine[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(1): 125-131. (in Chinese)
- [18] 蔺小军, 李宜明, 李政辉, 等. 整体叶盘叶片型面 CMM 测量路径规划技术[J]. 航空制造技术, 2012(11): 50-52.
- LIN Xiaojun, LI Yiming, LI Zhenghui, et al. CMM measurement path planning technology for blade surface of blisk[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012 (11): 50-52. (in Chinese)

JALSP