

# 涡轮叶片精铸变形分离方法研究

## Research on Investment Casting Deformation Separation Method for Turbine Blade

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 田琨 卜昆 董一巍 黄胜利 蒋睿嵩

**[摘要]** 以叶片叶身段为典型结构对象,分析研究了叶片精铸位移场模型中弯扭变形的分离方法,提出了变形矫正的计算方法,得到了弯扭变形分离后的位移场模型,为后续的叶片薄壁特征精铸收缩率计算与分布规律建模提供数据支持。

**关键词:** 涡轮叶片 位移场 矢量解耦 变形矫正

**[ABSTRACT]** The blade middle section is adopted as the typical part to study the method for separating bending deformation, and a calculation method for deformation rectification is proposed. The displacement field which is separated, can be used as the data support for shrinkage calculation and deformation distribution modeling.

**Keywords:** Turbine blade Displacement field Vector decoupling Deformation rectification

在现代航空发动机制造中,为保证零件成形的尺寸精度、形位精度和表面粗糙度,主要采用熔模精密铸造完成空心涡轮叶片的制造,相应精铸模具设计成为发动机新机研制的“瓶颈”。模具型腔设计必须考虑对铸件收缩变形的补偿,铸件收缩率的精确赋值是提高模具设计精度、减少铸件因尺寸因素造成废品的关键环节之一<sup>[1]</sup>。

在国内传统的精铸模具设计过程中,收缩率一般按照经验收缩率进行线性赋值,即对精铸模具沿  $x$ 、 $y$  和  $z$  方向上给出不同收缩率。但叶片在凝固过程中的收缩变形与其复杂结构有密切关系,故传统意义的线性收缩率赋值的精铸模具不能满足精铸要求<sup>[2]</sup>,需要进行多次修模,这样既增加了模具设计时间,同时也增加了成本。

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误差变形,同时还可能存在弯扭变形,使得铸件上每一点的位置都可能偏离其设计模型上对应的名义点。这种变形可以用位移场的形式来体现。用公式(1)对涡轮叶片的精铸位移场进行形式化描述:

$$D=P-C, \quad (1)$$

其中,  $D$  表示精铸位移场,  $P$  表示叶片铸件上的点集,  $C$

表示叶片 CAD 模型上与  $P$  对应的点集。

精铸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<sup>[2]</sup>。从叶片精铸位移场模型分离出叶片的弯扭变形与收缩变形,是探索并建立结构相关的叶片铸件收缩率模型,进行精铸模具型腔反变形设计的基础。本试验针对叶片叶身部位进行切片化处理并提取外轮廓线数据,配准得到平移和旋转参数,插值得到表征叶片弯扭变形的曲线。在弯扭变形曲线的指导下,对叶片精铸位移场作弯扭变形矫正,认为矫正后的叶片精铸位移场将只包含收缩变形。最后使用仿真的数据对所给出的叶片位移场弯扭变形与收缩变形分离方法进行验证分析。

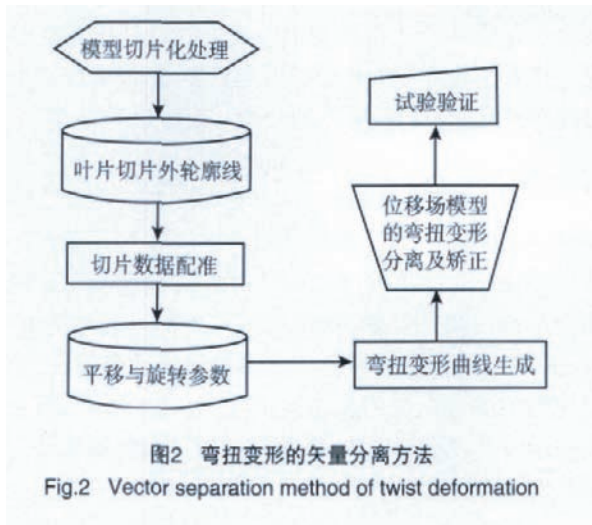
### 1 位移场的弯扭变形矢量分离方法研究

由于航空发动机叶片所要求的气动特性、形状结构复杂<sup>[3]</sup>,本试验将叶身作为主要研究对象进行弯扭变形的矢量分离及变形矫正。涡轮叶片叶身的形状特征具有很大相似性,外表面由自由曲面和圆弧面组成。从叶身截面型线上看,主要由叶盆、叶背、前缘和后缘组成,叶盆、叶背是自由曲线,前缘、后缘是部分圆弧(见图1)。



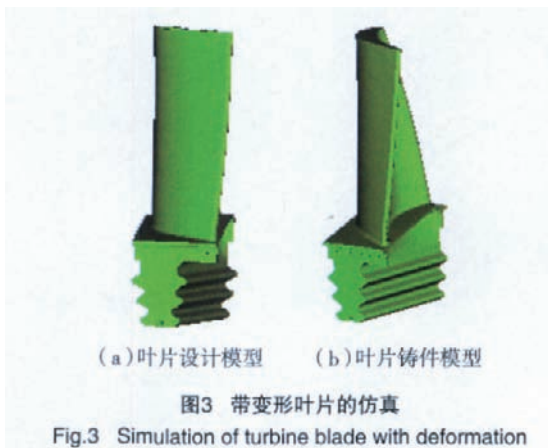
图1 叶身截面  
Fig.1 Section of turbine blade

本试验假定涡轮叶片的二维切片为刚性体,只进行整体的旋转与平移运动。对叶片的弯扭变形进行分析,得到叶片弯扭变形曲线,用以矫正叶片精铸位移场模型,实现弯扭变形与收缩变形的分离。在涡轮叶片检测实践中,叶片弯曲与扭转变形的测量通常通过电感量仪测量与光学放大测量进行,一般以标准截面处的挠度作为弯曲变形的测度,以标准截面的扭转角度,作为叶片扭转的测度。叶片的弯扭可以分解成测量模型切片数据相对于理想 CAD 模型切片数据的扭转与平移。弯扭变形的矢量分离方法具体如图 2 所示。



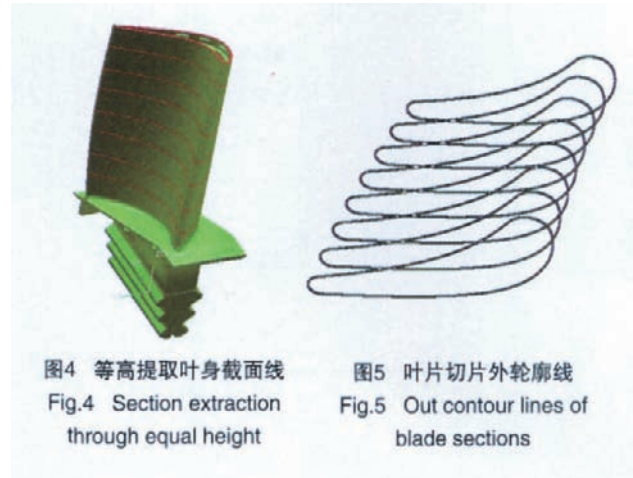
## 2 模型切片化处理

对叶片模型进行切片化处理的主要目标在于获取叶片模型的切片数据。从叶片的 CAD 模型获取切片数据,属于计算机辅助领域平面与曲面求交的基本问题,直接使用叶片 CAD 造型软件提供的接口函数完成。图 3 (a)是一个涡轮叶片的 CAD 模型,设此模型为标准的叶片设计模型。在此标准模型的叶身型面上等距取 8 个截面,对每个截面旋转特定角度,并平移特定距离;再使用 CAD 造型软件的造型技术生成一个新的叶身型面,结合 CAD 模型的榫头部分生成一个新的涡轮叶片模型并作为一个仿真的带弯扭变形的涡轮叶片样件,设此模型为铸件模型,见图 3 (b)。通过自主开发的锥束 CT 扫描与重建仿真软件 ICTFramework V1.0,对带弯扭变形的叶片 CAD 模型进行扫描并重建其 CT 切片图像序列。用高精度的 CT 切片图像边缘提取技术,从带变形的叶片的 CT 图像序列(图像的像素尺寸大小为  $512 \times 512$ )提取边界点云,作为叶片的测量数据。



针对叶片测量数据的切片与处理,将使用文献[4]中介绍的平面与叶片网格模型或点云模型求交以及轮廓数据排序方法。首先,使用三维模型配准定位方法,

以没有弯扭变形的榫头特征为基准,对完成变形后的模型和初始 CAD 模型进行三维配准。然后,在叶片的叶身型面部分使用一组等距的平行于  $X-Y$  坐标平面的剖切平面,对模型进行切片化处理,得到一系列轮廓线段集合,见图 4。提取其中的外轮廓线参与后续的切片数据配准运算<sup>[5]</sup>。叶片切片外轮廓线如图 5 所示。



## 3 切片数据配准及弯扭变形曲线的生成

针对二维切片数据,引入扭转变形函数和弯曲变形函数,基于奇异值分解的 SVD-ICP 算法<sup>[6-7]</sup>作配准运算,完成叶身的变形分析,进而得到每一切片相对应的扭转角度与平移距离,见表 1。

表1 切片数据的平移与旋转参数

序号	切片位置 $z/\text{mm}$	沿 X 轴平移 $/\text{mm}$	沿 Y 轴平移 $/\text{mm}$	旋转角位移 $/ (^{\circ})$
1	30	-0.05091	-0.04406	0.204599
2	35	-0.16202	-0.14735	0.629251
3	40	-0.25536	-0.24618	1.012489
4	45	-0.37025	-0.34832	1.455832
5	50	-0.47421	-0.44111	1.836338
6	55	-0.5904	-0.53925	2.22994
7	60	-0.69066	-0.62939	2.588894
8	65	-0.8075	-0.72660	3.008391

对每组切片数据进行配准运算,得到测量数据每个截面的 2 个平移向量( $T_{cx}$ ,  $T_{cy}$ )和 1 个旋转角位移( $\theta$ )。以切片平面的  $Z$  坐标值为自变量,分别以平移向量的  $X$  方向与  $Y$  方向分量,旋转角位移  $\theta$  为函数值,进行线性插值,生成 3 条变形曲线,如图 6 所示。可以用这 3 条变形曲线来表征叶片样件叶型面的变形情况,并对叶片精铸位移场模型进行弯扭变形矫正。

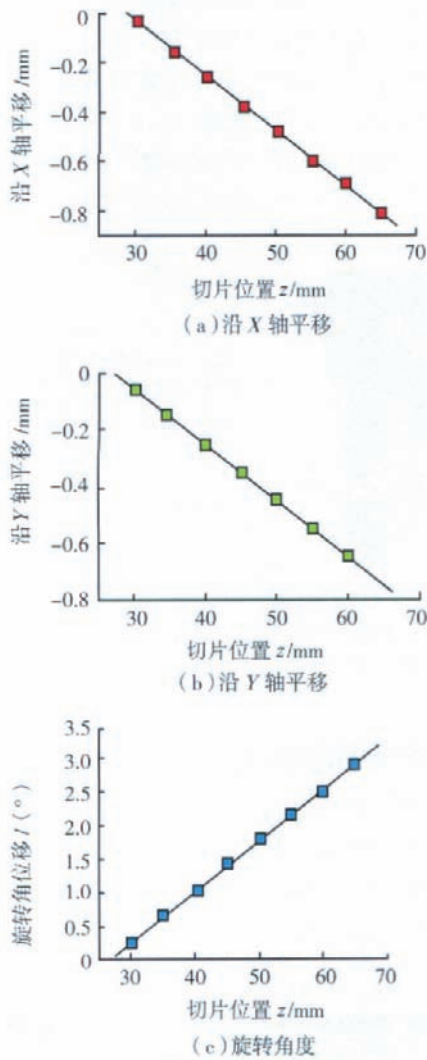


图6 叶片变形曲线  
Fig.6 Deformation curves of turbine blade

#### 4 位移场模型的弯扭变形的分离及矫正

因为测量截面相对于 CAD 截面的空间变换是作为刚体进行变换的,那么铸件截面上任意一点的平移均可以用来表示截面的平移量。若以平移矢量为因变量,高度值为自变量,可得到 X、Y 向表征叶片弯曲变形曲线,如图 7 所示。图 6(a)为铸件叶身在 X 方向的弯曲变形曲线,图 6(b)为在 Y 方向的弯曲变形曲线;图 7 为叶身总弯曲变形曲线,曲线上的值均为标量,不表示变形方向,主要反映总弯曲变形的大小。对铸件模型上的每个点,均可根据其高度值从叶片弯曲变形曲线上获取其弯曲变形矢量  $D_{ii}$ 。获得弯曲变形矢量后,即可对各叶片铸件模型的弯曲变形按式  $P_i' + P_i + D_{ii}$  进行补偿<sup>[8]</sup>。

本试验用叶片铸件模型相对于设计模型的角位移来表示涡轮叶片的扭转变形。基于表征叶片扭转变形曲线如图 6(c),对铸件模型上的每个点  $P_i$ ,均可根据其

高度坐标值从叶片扭转变形曲线上获取其扭转变形矢量。获取扭转变形矢量后即可对点  $P_i'$  施加旋转变换以对铸件模型进行扭转变形的补偿。旋转矩阵为  $R$ ,

$$R = \begin{Bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix},$$

其中,扭转补偿后的点  $P_i'' = P_i' \cdot R$ 。综合前面介绍的弯曲变形进行统一补偿,补偿后的点坐标可表示为  $P_i'' = P_i \cdot R + T$ 。对点集  $P$  中的所有点进行上述变换后,位移场模型中的弯扭变形矢量被消除,如图 8 所示,图中实线表示铸件模型截面线,虚线表示设计模型截面线。局部补偿结果见图 9。

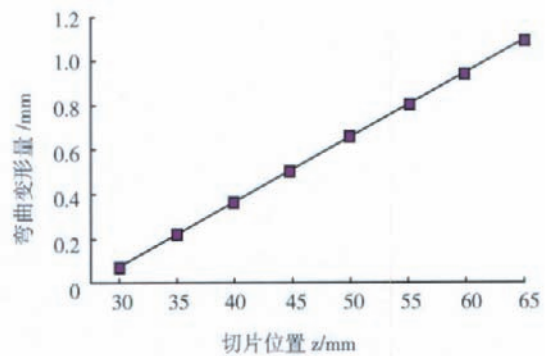


图7 叶身弯曲变形总大小曲线  
Fig.7 Total curves of blade deformation



图8 弯扭变形的补偿  
Fig.8 Compensation of twist deformation

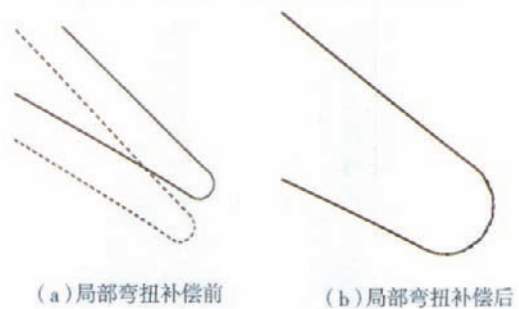
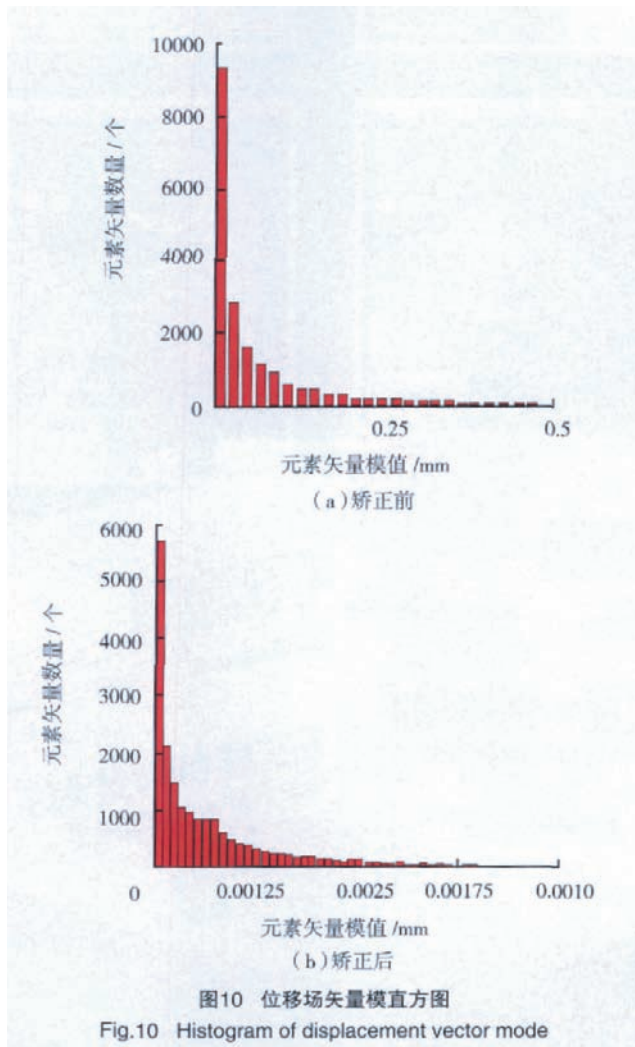


图9 弯扭补偿局部效果  
Fig.9 Local effect of twist deformation

#### 5 试验验证

从配准后的弯扭变形仿真模型的叶型面均匀离散出 20000 个数据点作为测量数据点集,记为  $P$ ,从叶片

准 CAD 模型上搜索与该点集对应的数据点集  $C$ , 建立位移场模型  $D=\{D_i=P_i-C_i|i=1,\dots,2000\}$ 。依据图 7 及图 6(c) 所示的叶片变形曲线对位移场模型  $D$  作弯扭变形矫正, 得到弯扭变形矫正后的位移场模型  $D'$ 。图 10 给出了位移场模型  $D$  与矫正后的位移场模型  $D'$  的位移场矢量模的直方图(即位移场元素矢量的模值分布)。



基于仿真测量数据生成的位移场模型, 其中每一个元素矢量的模(即矢量长度)主要源于叶片的弯扭变形。从图 10(a) 可以看出, 位移场模型的 20000 个元素矢量中, 有 50% 以上的元素矢量模值大于 0.1mm。对位移场模型进行弯扭变形矫正后, 位移场元素矢量的模值均小于 0.0015mm, 见图 10(b)。可以认为此时铸件叶片模型和设计模型相比基本无变形误差, 说明位移场模型的弯扭变形分量被很好地分离。因此, 实际应用中, 弯扭变形分离后的位移场模型仅反映叶片的收缩变形误差。

## 6 结束语

本试验以叶片叶身段为典型结构对象分析研究了

叶片精铸位移场模型中弯扭变形的分离方法, 并提出了变形补偿的计算方法。试验结果表明, 通过对叶片精铸位移场模型分离出叶片的弯扭变形进行矫正, 可消除由于弯扭变形导致的收缩率计算不精确的问题, 有利于更准确地建立起结构相关的叶片精铸收缩率模型, 也为叶片精铸模具的结构反变形设计提供弯扭变形基础数据, 实现模具型腔的优化。

## 参考文献

- [1] 张丹, 张卫红. 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. 航空学报, 2006(3): 1-6.
- [2] 李倩, 王松杰, 申长雨, 等. 模具设计中收缩率的预测. 电加工与模具, 2002(5): 53-54.
- [3] 航空制造工程手册总编委会. 航空制造工程手册. 北京: 航空工业出版社, 1997.
- [4] 田庆. 支持结构设计的叶片 CAD 造型方法研究与系统实现 [D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
- [5] 陈志强. 基于测量数据的叶片截面特征参数提取技术研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
- [6] 张力宁. 散乱点云逆向工程技术研究及其在叶片重建中的应用 [D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
- [7] Besl P J, MaKay N D. A method of registration of 3D shapes. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239-255.
- [8] 刘晶. 叶片数字化检测中的模型配准技术及应用研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2006.

(责编 小城)

(上接第 93 页)

square wave AC arcs. IEE Proceedings A, 1990, 137(4): 193-198.

[5] 从保强, 齐铂金, 周兴国, 等. 5A06 铝合金超快变换极性 VPTIG 焊接工艺. 航空制造技术, 2009(5): 74-77.

[6] 廖希亮. 脉冲电流对金属凝固组织的影响 [D]. 上海: 上海大学, 2007.

[7] 班春燕. 电磁场作用下铝合金凝固理论基础研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2002.

[8] 丁雨田, 徐宏玉, 王纯宏, 等. 方波脉冲电流对 Al-Cu 合金凝固组织的影响. 特种铸造及有色合金, 2007, 27(5): 335-338.

[9] 齐铂金, 从保强. 新型超快变换复合脉冲变极性弧焊电源开拓. 焊接学报, 2008, 29(11): 57-60.

[10] 从保强. 高强铝合金快速变换复合超音脉冲 VPTIG 焊接技术研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2009.

[11] 毛卫民, 朱景川, 酆剑, 等. 金属材料结构与性能. 北京: 清华大学出版社, 2008.

[12] 孙俊生, 武传松. 电磁力及其对 MIG 焊接熔池流场的影响. 物理学报, 2001, 50(2): 209-216.

[13] Dvornak M J, Olson D L, Frost R H. Influence of solidification kinetics on aluminium weld grain refinement. Welding Journal, 1991, 70(10): 271-276.

[14] Kou S, Le Y. Welding parameters and the grain structure of weld metal—a thermodynamic consideration. Metallurgical Transactions A, 1988, 19A: 1075-1082.

(责编 小城)