

# 压气机树脂叶片注塑成型翘曲变形控制参数设计

## Warpage Parameter Control Design of Compressor Resin Blade Injection Molding

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 骆金虎 汪文虎 冯 炜 王孝忠

**[摘要]** 针对航空发动机压气机低速试验台所用树脂叶片注塑成型翘曲变形问题,提出了基于正交试验的注塑参数优化方法,通过建立注塑翘曲的数学模型,数值注塑模拟仿真、正交试验优化注塑参数及仿真试验验证,可有效减小压气机用树脂试验叶片的翘曲变形量,达到控形的目地。

**关键词:** 树脂叶片 翘曲变形 正交试验 参数优化

**[ABSTRACT]** Focused on the warping deformation of resin blade in injection molding of aeroengine's low-speed compressor table, a parameter optimization method based on the orthogonal experiment is proposed in this paper. Through establishing the mathematical warpage model, numerical simulation, injection parameters optimized by orthogonal tests and simulation experiment verification, the results show that the method can effectively reduce the warping deformation in resin compressor blade and further control the deformation.

**Keywords:** Resin blade Warpage Rthogonal test Parameter optimization

航空发动机压气机的设计质量直接影响航空发动机性能。为研究压气机的工作过程,国外在 30 多年前设计了低转速研究用压气机试验台(LSRC),该试验台将真实的小尺寸高转速压气机按相似定律做成放大的模型在较低的转速下进行试验,在低转速下离心力小,便可用树脂叶片代替金属叶片进行试验,通过试验,可以改进压气机的整体性能;同时这些大比例的模型是在低速的环境下测试的,故成本、制造复杂度和风险都优于高速试验台<sup>[1-2]</sup>。国外在这方面的研究已较成熟,而国内在此方面还是处于起步阶段。因此,开展低转速研究用压气机试验台所用树脂叶片的注塑成型研究对我国航空发动机的研发具有重要的意义。

由于注塑工艺及材料自身的一些特性,注塑叶片成型过程会发生不均匀收缩、内应力等一些缺陷,导致树脂叶片不可避免的产生翘曲变形,针对此,本文通过正交参数试验设计,优化叶片注塑工艺参数,以减小其翘曲变形量,从而得到误差精度更高的树脂试验叶片。

## 1 注塑翘曲的变形理论

### 1.1 注塑翘曲变形产生原因

注塑件的翘曲变形是由不均匀收缩所产生的残余内应力引起的。对翘曲分析而言,收缩本身不重要,重要的是收缩上的差异。注塑过程中,一般收缩只引起注塑件体积上的变化,只有塑件局部不均匀的收缩才会产生翘曲。而导致收缩不均匀的因素主要有压力、结晶度、体积收缩、流动取向、应力松弛等<sup>[3]</sup>。

### 1.2 注塑翘曲的数学模型<sup>[4-5]</sup>

从力学研究角度讲,就是根据初应力、初应变、边界条件、工作载荷等求解静态(准静态)平衡方程,得到位移的结构分析过程。

在注塑成型过程中产生的应变可完整地表示为如下的形式:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_i^p + \varepsilon_i^T + \varepsilon_i^c + \varepsilon_i^R + \dots \quad (1)$$

式中,  $\varepsilon_i$  为与应力相对应的真实的应变分量;  $\varepsilon_i^p$  为静水压力产生的应变;  $\varepsilon_i^T$  为因温度不均匀产生的应变,与热膨胀系数有关;  $\varepsilon_i^c$  为结晶收缩产生的应变;  $\varepsilon_i^R$  为化学反应产生的应变。

为了便于研究,所考虑的各种应变常常被看成是时间或压力的函数,即:

$$\varepsilon_i^j = f(P) \text{ 或 } \varepsilon_i^j = f(T) \quad (2)$$

式中,  $j$  表示前面所述的各种应变。

在各向同性的条件下,各种应变的表达式为:

$$\begin{aligned} \varepsilon_i^p &= - \int_0^P \beta dP, \quad \varepsilon_i^T = \int_{T_0}^T \alpha dT, \\ \varepsilon_i^c &= \int_{\lambda_0}^{\lambda} c_r dC, \quad \varepsilon_i^R = \int_{\xi_0}^{\xi} c_R dP \end{aligned} \quad (3)$$

式中,  $P$ 、 $T$  分别表示压力和温度,  $\zeta$ 、 $\lambda$  分别表示结晶度和化学反应式的一种转换系数且二者都是随时间变化的温度函数,  $\beta$ 、 $\alpha$ 、 $C_r$ 、 $C_R$ 、 $s$  分别表示可压缩性、热膨胀系数、与材料结晶相关的常数、与化学反应相关的常数和固化时间。

初应力,即注塑制品的残余应力,主要包括流动/保压过程的流动残余应力及温度不均匀引起的热残余应力,其应力-应变本构方程为:

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} + \{\varepsilon'\} + \{\sigma_1\} + \{\sigma_2\} + \{\sigma_0\} \quad (4)$$

式中,  $\{\sigma\}$  为应力向量;  $[D]$  为弹性矩阵;  $\{\varepsilon\}$  为应变向量;  $\{\varepsilon'\}$  为出模后产生的热应变;  $\{\sigma_1\}$  为流动过程中产生的流动残余应力;  $\{\sigma_t\}$  为模具内不均匀冷却过程产生的残余应力;  $\{\sigma_0\}$  为模具排气或制品被顶出时可能产生的应力。

初应力、初应变确定后,可用有限元数值方法完成翘曲变形分析。注塑制品翘曲变形 CAE 一般是:先求出制品出模时的残余应力,然后利用热弹性小变形理论有限元模型,计算脱模后的变形值。翘曲变形数值模拟公式为:

$$\sum_e [K_e] \{\delta^e\} = \{R_T\} - \{R_0\} \quad (5)$$

式中,右端第 1 项为温度等效温度载荷,第 2 项为初始应力(残余应力)、初始应变的等效载荷。

## 2 基于田口方法的叶片注塑仿真实验

### 2.1 正交试验设计

正交试验设计(Orthogonal Experimental Design)是研究多因素多水平的一种试验设计方法,它是根据数理统计学和正交性原理,从大量的试验点中挑选适量的具有代表性的试验点,这些有代表性的点具备了“均匀分散、齐整可比”的特点,再应用一种标准化的“正交表”来合理安排多因素试验的一种科学的试验设计方法。该方法以最少数量的试验完成所考察试验参数在不同试验水平上组合的全部试验,确定出各个试验参数对试验目标的影响度大小,从而可以调节对试验目标影响最大的试验参数取得更好的试验结果,同时还可以获得各个试验参数的最佳水平组合,因此它是一种高效率、快速、经济的实验设计方法<sup>[6]</sup>。

正交试验采用正交表安排试验。正交表的一般记法为  $L_n(m^k)$ ,其中字母  $L$  表示正交表;  $n$  是表的行数,表示安排的试验次数;  $k$  是表的列数,表示因素的个数;  $m$  是各因素的水平数。本文中对树脂叶片注塑成型过程选择  $L_{18}(3^6)$  正交表,共有模具温度、熔体温度、注射时间、保压时间、保压压力、冷却时间 6 个因素,每个因素选择 3 个水平,共 18 次试验,具体的试验因子与水平如表 1 所示。

### 2.2 叶片注塑仿真结果分析

本文针对图 1 中的压气机树脂叶片叶身 UG 模型进行导入 Moldflow,通过划分网格、修复网格、选择充填-保压-翘曲的分析类型、设置工艺参数、注塑过程模拟等一系列工作后,得到正交试验结果。

压气机树脂叶片注塑成型翘曲变形正交试验结果直观分析如表 2 所示。

表 2 中,均值 1、均值 2、均值 3 分别表示某工艺参

表1 试验因素水平表

因素	水平		
	1	2	3
模具温度 $A/^\circ\text{C}$	40	60	80
熔体温度 $B/^\circ\text{C}$	260	275	290
注射时间 $C/\text{s}$	3	4	5
保压压力 $D/\text{MPa}$	40	50	60
保压时间 $E/\text{s}$	20	30	40
冷却时间 $F/\text{s}$	20	30	40

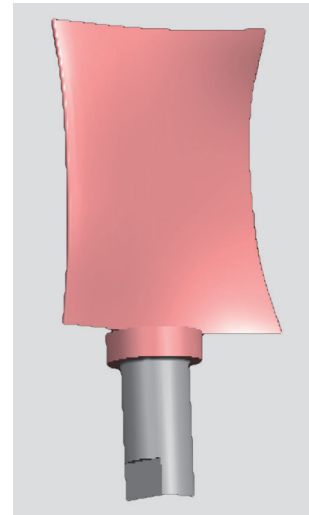


图1 树脂叶片模型

Fig.1 Model of resin blade

数在第 1、2、3 水平下的翘曲变形量的平均值,各因子平均翘曲变形量最小的水平组合的方案即为理论上的较优的工艺参数组合。极差表示均值  $k_i$  中的最大值与最小值之差,通过级差分析,可以确定各因素对翘曲变形量影响的重要程度,级差值越大,则对翘曲变形的影响越大。由直观分析表可以分析得出各因子水平对翘曲量的影响,如图 2 所示。

因子的偏差平方和为:

$$S_j = \frac{I_j^2 + II_j^2 + III_j^2}{9} - \frac{\left(\sum_{i=1}^{18} y_i\right)^2}{18} \quad (6)$$

式中,  $I_j$ 、 $II_j$ 、 $III_j$  为在某个工艺参数第 1、2、3 水平下的质量指标的平均值;  $S_j$  为每列一组的偏差平方和;  $y_i$  为每行工艺参数下最大翘曲量;  $j$  为因子;  $i$  为试验号。

对数据进行方差分析,如表 3 所示。

由以上图表分析可以得出以下结论:

(1) 各个因子对树脂叶片翘曲变形的影响程度从

表2 直观分析表

试验号	列号 1 A	列号 2 B	列号 3 C	列号 4 D	列号 5 E	列号 6 F	翘曲变形量/mm
试验 1	1	1	1	1	1	1	1.742
试验 2	1	2	2	2	2	2	1.735
试验 3	1	3	3	3	3	3	1.872
试验 4	2	1	1	2	2	3	1.751
试验 5	2	2	2	3	3	1	1.713
试验 6	2	3	3	1	1	2	1.596
试验 7	3	1	2	1	3	2	1.781
试验 8	3	2	3	2	1	3	1.429
试验 9	3	3	1	3	2	1	1.595
试验 10	1	1	3	3	2	2	1.670
试验 11	1	2	1	1	3	3	1.852
试验 12	1	3	2	2	1	1	1.520
试验 13	2	1	2	3	1	3	1.303
试验 14	2	2	3	1	2	1	1.839
试验 15	2	3	1	2	3	2	1.889
试验 16	3	1	3	2	3	1	1.686
试验 17	3	2	1	3	1	2	1.348
试验 18	3	3	2	1	2	3	1.703
均值 1 ( $k_1$ )	1.732	1.655	1.696	1.752	1.490	1.683	—
均值 2 ( $k_2$ )	1.682	1.653	1.626	1.668	1.715	1.670	—
均值 3 ( $k_3$ )	1.590	1.696	1.682	1.583	1.799	1.652	—
极差	0.142	0.043	0.070	0.169	0.309	0.031	—

大到小的顺序如下：保压时间 > 保压压力 > 模具温度 > 注射时间 > 熔体温度 > 冷却时间，其中保压时间和保压压力对翘曲变形的影响最大。

(2) 树脂叶片注塑成型翘曲变形量较小的较优的参数取值组合为  $A_3B_2C_2D_3E_1F_3$ ，即工艺参数设置如下：模具温度为 80℃，熔体温度为 275℃，注射时间为 4s，保压压力为 60MPa，保压时间为 20s，冷却时间为 40s。

### 3 叶参数优化仿真验证

本文应用正交试验结果分析得出较优的参数取值组合进行数值模拟，并采用 Moldflow 软件进行模拟试验，此时注塑成型的树脂叶片翘曲与正交

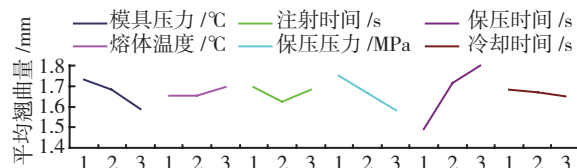


图2 各因子水平对翘曲量的影响  
Fig.2 Level of each factor on warpage

表3 方差分析表

因素	偏差平方和	自由度	F 比	F 临界值
模具温度	0.062	2	0.773	3.890
熔体温度	0.007	2	0.087	3.890
注射时间	0.017	2	0.212	3.890
保压压力	0.085	2	1.060	3.890
保压时间	0.307	2	3.830	3.890
冷却时间	0.003	2	0.037	3.890
误差	0.48	5	—	—

试验组相比最小，翘曲最大值为 1.291mm，表面质量较好，将使用其他工艺参数组合得到的结果列举一组与这组数据得到的结果进行比较。图 3 (a) 为试验 1 (即较优参数组合) 试验结果图形，图 3 (b) 为试验 2 (即正交试验组其中一组) 试验结果图形，试验 2 翘曲最大值为 1.872mm，参数优化后的相比较优化前的翘曲最大值下降了 0.581mm，再通过 Geomagic 软件分别把上述 2 种方案模型与叶片的建模模型进行 3D 偏差对比效果如图 4 (a) 和图 4 (b) 所示。可以看出，工艺参数的调整

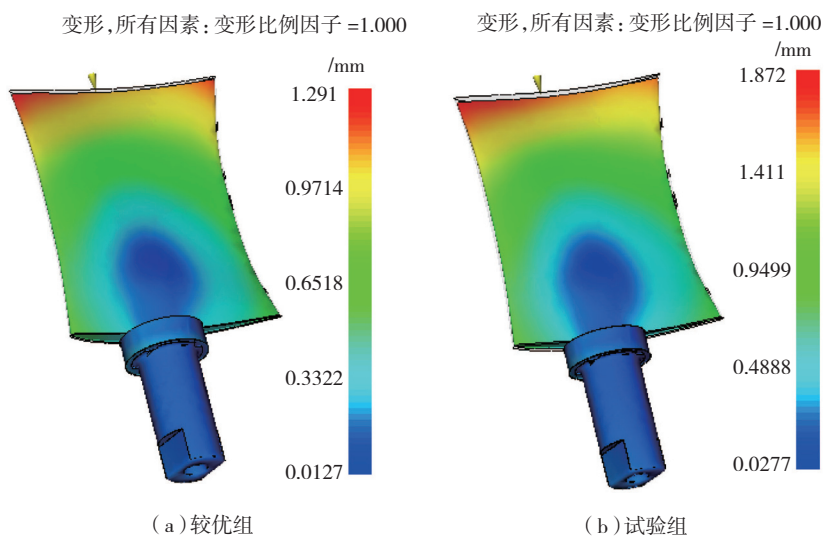


图3 较优组和试验组翘曲度对比

Fig.3 Warpage contrast between optimum group and experimental group

(下转第 91 页)

优于其他 2 种机型的心理因素人机需求;在功能布局评价中,空客公司同型号飞机优于其他 2 种机型的功能布局因素人机需求。

通过对以上 3 种型号飞机人机需求竞争性的分析,某型号飞机在客舱内环境设计中,将国内人体测量数据作为人机工程设计的主要对象进行分析研究,所以其生理因素更加适合于国内人群,即某型号飞机的生理因素竞争性优于波音、空客同类型飞机。同时,由于国内航空技术仍处于发展阶段以及在大型客机设计方面存在经验不足等因素,波音和空客同类型飞机在心理因素和功能布局方面的人机需求竞争性明显高于某型号飞机。

## 5 结论

人机工程设计是提升民用飞机内环境舒适性、宜人性和市场竞争力的重要工具,与 QFD 方法有效结合,能够全面、细致地对顾客需求展开分析,并形成质量特性矩阵,使内环境设计过程充分反映顾客需求。引入 AHP 方法确定人机需求重要度,与专家评分相结合针对某型民用飞机与国外同类机型的客舱内环境设计进行了评价分析,得到对人机需求的竞争性评估,为国内民用客机内环境设计水平的提高起到一定的指导作用。

### 参考文献

- [1] 解建喜. 飞机总体设计评价准则和评估方法研究. 机械科学与技术, 2003(11):16-19.
- [2] 黄俊, 武哲. 作战飞机总体设计评价准则和评估方法研究. 航空学报, 2000(1):70-73.
- [3] 王伟伟. 基于 Fuzzy-AHP 的飞机客舱内环境设计评价. 航空制造技术, 2010(10):80-84.
- [4] 李雄伟. 基于 Fuzzy-AHP 的通信网安全评价方法研究. 军事通信技术, 2005, 26(2):6-9.
- [5] 熊伟. 质量功能展开——从理论到实践. 北京: 科学出版社, 2009.
- [6] Hauser J R, Clausing D. The house of quality. Harvard Business Review, 1988, 5(6):63-73.
- [7] Cristiano J J, Liker J K. Key factors in the successful application of quality function deployment QFD. IEEE Transactions on EM, 2001(48):81-95.
- [8] 王二强. QFD 和信息熵在油罐车改良设计中的应用研究. 机械设计与制造, 2011(8):60-62.
- [9] Ayag Z, Özdemir R G. A fuzzy AHP approach to evaluating machine tool alternatives. J Intell Manuf, 2006(17):179-190.
- [10] 陈以增, 唐加福. 基于质量屋的产品设计过程. 计算机集成制造系统-CIMS, 2002, 8(10):757-761.
- [11] 冉承新, 凌云翔. AHP-Fuzzy 在仿真系统可信度综合评价中的应用. 计算机仿真, 2005, 22(8):59-61.

(责编 良辰)

(上接第 85 页)

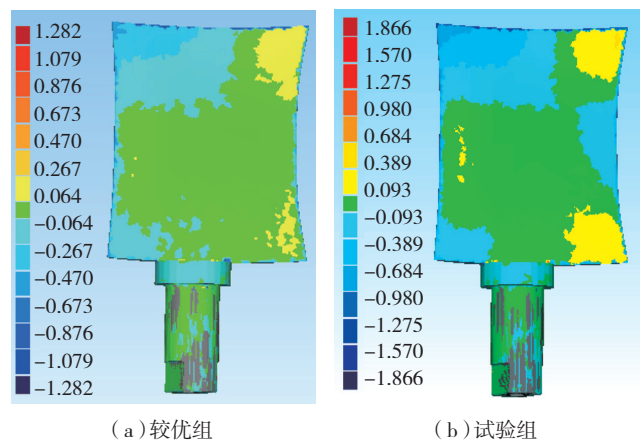


图4 较优组和试验组3D偏差对比

Fig.4 3D deviation contrast between optimum group and experimental group

使得翘曲问题得到了改善,叶片的变形区域与变形量均减小,采用正交试验法优化工艺参数的方法是可行的,通过分析试验结果,得到了较好的一组工艺参数值。

## 4 结论

本文针对低转速研究用压气机试验台所用树脂叶片注塑成型翘曲问题,提出基于正交试验的树脂叶片注塑参数优化方法。通过对树脂叶片注塑过程进行数值模拟,调整注塑参数,并通过仿真试验验证,与优化参数前的叶片相比,优化后的注塑参数设计能够显著减小叶片注塑成型翘曲度。

### 参考文献

- [1] 陈光. GE公司的低转速研究用压气机与涡轮试验器. 燃气涡轮实验与研究, 1995(4):1-3.
- [2] Wister D C, Halstead D E, Beacher B F. Improving compressor and turbine performance through cost-effective low-speed testing. Florence, Italy: 14th International symposium on air breathing engines, sept. 1999: 99-7073.
- [3] 马浩军, 胡广洪, 阮雪榆. 利用 MofdRow 软件分析解决注塑件翘曲问题. 模具技术, 2002(5):57-59.
- [4] Babur O T, Tuncay E. Determination of effecting dimensional parameters on warpage of thin shell plastic parts using integrated response surface method and genetic algorithm. International communications in heat and mass transfer, 2005(32): 1085-1094.
- [5] Hghoneim, Cahieber. Incorporation of density relaxation in the analysis of residual stresses in molded parts. Polymer Engineering and Science, 1997, 37(1):219-227.
- [6] Tuncay E, Babur O. Minimization of warpage and sink index in injection-molded thermoplastic parts using Taguchi optimization method. Materials and Design, 2006(27): 853-861.

(责编 亦非)