

压气机树脂叶片注塑模具型腔反变形优化技术

Reverse Deformation Methodology for Resin Blade Injection Mold Cavity of Compressor

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 赵德中 汪文虎 崔康 姚业建

[摘要] 针对航空发动机低转速研究用压气机试验台所用树脂叶片注塑成型控型的难题,提出并研究了树脂叶片注塑模具型腔反变形优化方法。首先,基于反变形原理,建立模具型腔反变形优化数学模型;通过数值模拟得到叶片注塑位移场,进而对模具型腔进行优化;最后,通过仿真实验验证,所提优化方法可有效提高压气机验证叶片的制造精度。

关键词: 树脂叶片 注塑成型 数值模拟 型腔优化

[ABSTRACT] To solve the resin blade precision control problem of low-speed research compressor of aeroengine, a reverse deformation optimization method is proposed. First, based on the reverse deformation theory, the optimization model is established. On this basis, the displacement field of resin blade is achieved through numerical simulation. Moreover, the mold cavity is optimized. Finally, a simulation sample application is presented for demonstration. And the result shows that the method can control the deformation of the resin blade and improve the manufacturing precision.

Keywords: Resin blade Injection molding Numerical simulation Cavity optimization

航空发动机压气机的设计质量是影响其性能的关键因素之一,为对压气机的设计方案进行评判和优选,传统方法需制造高成本金属叶片,在高速实验平台上进行验证。鉴于金属叶片材料昂贵及难加工的特点,其验证试验成本高、周期长。国外在30多年前设计了低转速研究用压气机试验台(LSRC),即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^[1],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,既可降低成本又能缩短周期。国外在这方面的研究已较成熟,而国内在此方面还处于起步阶段。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。

注塑模型腔对注塑件的成形精度具有很重要的影响,在注塑模具的设计制造过程中,模具型腔的设计非常重要^[2]。模具型腔设计必须考虑对铸件收缩变形的补偿^[3]。而目前,低转速研究用压气机试验台所用树脂验证叶片的注塑模具型腔设计方面,采用经验性的综合收缩率设计型面,认为各点收缩率相同,显然不完全合理,针对此,本论文提出基于叶片注塑仿真位移场的型腔反变形优化技术,通过对叶片注塑成型过程进行有限元数值模拟,得到叶片注塑仿真位移场,进而对模具型腔进行虚拟修模,为低转速研究用压气机试验台所用树脂叶片的注塑成型控型提供理论指导。

1 反变形优化方法

1.1 反变形原理

数值模拟和反变形技术已在实际生产中得到了较广泛的应用。反变形方法是基于CAE的模拟结果,根据注塑件变形量的大小和分布对模具的形状进行修正,使得注塑件在凝固收缩后的形状仍然满足几何精度的要求。

模具型腔反变形优化示意图如图1所示。其中图(b)中 Q 为经过注塑仿真后得到的截面线, ΔD 为注塑仿真计算得到的变形量;图(c)中 P 为下一次仿真的型腔截面线,它是在对 D 经过一个 ΔD 反变形后得到的。

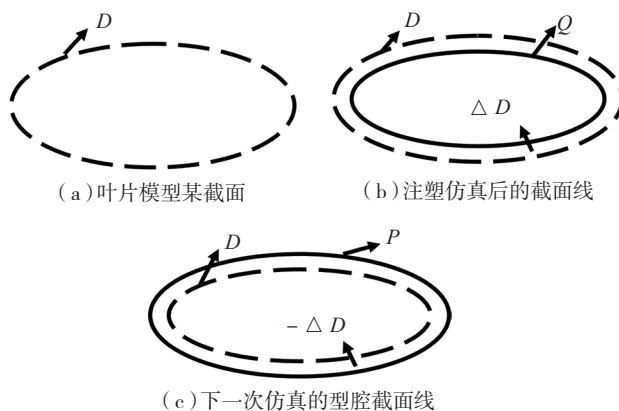


图1 反变形优化示意图

Fig.1 Diagram of reverse deformation optimization

1.2 反变形优化数学模型

基于上述反变形原理,建立叶片模具型腔反变形的数学模型。具体方法如下:

假设叶片的目标形状函数为 $D(x_i, y_i, z_i)$, 注塑变形量最大允许值为 Δ_{Max} 。第1次注塑前形状函数为 $P_1(x_i, y_i, z_i)$ (等同于 $D(x_i, y_i, z_i)$), 第1次注塑后的形状函数为 $Q_1(x_i, y_i, z_i)$, 则由第1次注塑模型与目标模型 D 的误差 ΔD_1 应为:

$$\Delta D_1(x_i, y_i, z_i) = Q_1(x_i, y_i, z_i) - D(x_i, y_i, z_i), \quad (1)$$

若 $\Delta D_1 < \Delta_{Max}$, 则以 P_1 作为注塑模腔。若 $\Delta D_1 > \Delta_{Max}$, 则需要进行反变形优化, 假设第 m 次注塑前形状函数为 $P_m(x_i, y_i, z_i)$, 第 m 次注塑后的形状函数为 $Q_m(x_i, y_i, z_i)$, 则由 $m-1$ 次反变形优化注塑的模型与目标模型的误差 $\Delta D_m(x_i, y_i, z_i)$ 应为:

$$\Delta D_m(x_i, y_i, z_i) = Q_m(x_i, y_i, z_i) - D(x_i, y_i, z_i)。$$

若 $\Delta D_m > \Delta_{Max}$, 则 $P_{m+1} = -\Delta D_m + P_m$, 再次优化; 若 $\Delta D_m < \Delta_{Max}$, 则 $P_m(x_i, y_i, z_i)$ 就是最终的理想反变形模具型腔形状函数。

1.3 叶片模具型腔反变形优化流程

根据以上的反变形原理及数学模型, 建立叶片注塑模具型腔反变形的流程图, 如图2所示。

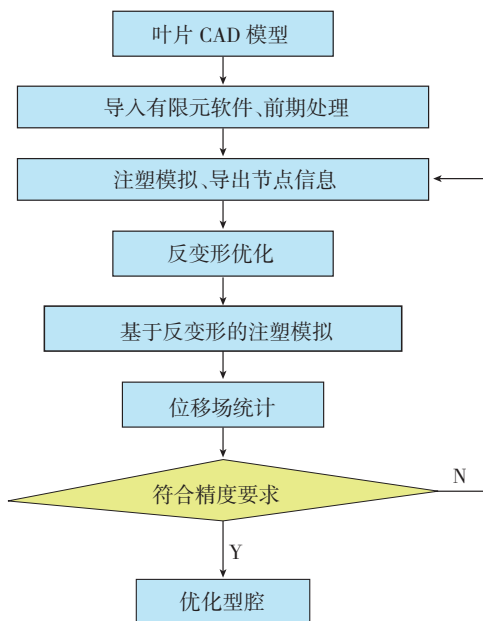


图2 型腔反变形优化流程图

Fig.2 Flow chart of reverse deformation of cavity

2 叶片注塑位移场仿真

2.1 数值模拟本构方程^[4-6]

塑料熔体在三维薄壁型腔内的流动属于带有运动

表面的粘性不可压缩流体的流动, 忽略垂直于流动方向的速度分量, 可采用广义的 Hele-Shaw 流动模型来描述, 它们在三维空间的表达形式为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(S \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(S \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial v}{\partial z} \right) = 0, \quad (3)$$

$$\rho c_p \left[\frac{\partial T}{\partial x} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \left(\eta \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right] = K \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \eta \gamma^2, \quad (4)$$

式中, u 和 v 分别为 x 和 y 方向的速度分量; p 、 T 、 ρ 、 c_p 、 η 分别为压力、温度、密度、定压比热容和剪切粘度; γ 为剪切速率。

考虑到塑料熔体剪切变稀行为, 粘度模型可采用与温度相关的 Cross 粘度模型:

$$\eta(\gamma, T) = \frac{\eta_0(T)}{\left(1 + \frac{\eta_0 \gamma}{\tau^*} \right)^{1+n}}, \quad (5)$$

式中, n 为幂律指数; τ^* 为由粘度指数过渡到幂律粘度时的剪切应力水平; $\eta_0(T)$ 为零剪切粘度。 $\eta_0(T)$ 可以用 Arrhenius 方程来描述:

$$\eta_0(T) = B \exp \frac{T_b}{T}, \quad (6)$$

式中, B 、 T_b 为材料常数。

压力边界条件为: 熔体入口处压力为给定的注射压力 $P_0(t)$, 熔体前沿压力为 0, 模壁处压力满足无渗透边界条件。温度边界条件为: 模壁处温度等于模壁温度, 并沿型腔中面对称。通过对式(2)、式(3)的积分并利用相应的边界条件可得到压力场求解的控制方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(S \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(S \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 0, \quad (7)$$

$$S = \int_0^b \frac{z^2}{\eta} dz, \quad (8)$$

式中, S 为流动率; b 为型腔半厚度。

2.2 叶片注塑仿真结果分析

基于 moldflow 软件对叶片注塑成型过程进行数值模拟, 得到结果如图3所示。从图中看出叶片 x 向最大变形量为 0.8007mm, y 向最大变形量为 0.7522mm, z 向最大变形量为 0.9797mm。叶片变形量太大, 无法达到试验台的精度要求。

叶片注塑数值模拟结果模型型面点云与叶片理论模型型面进行偏差比较, 可得到图4所示的注塑模拟位移量统计结果。从图中可直观地看到首次注塑的位移量分布, 位移量过大, 需对型腔进行反变形优。

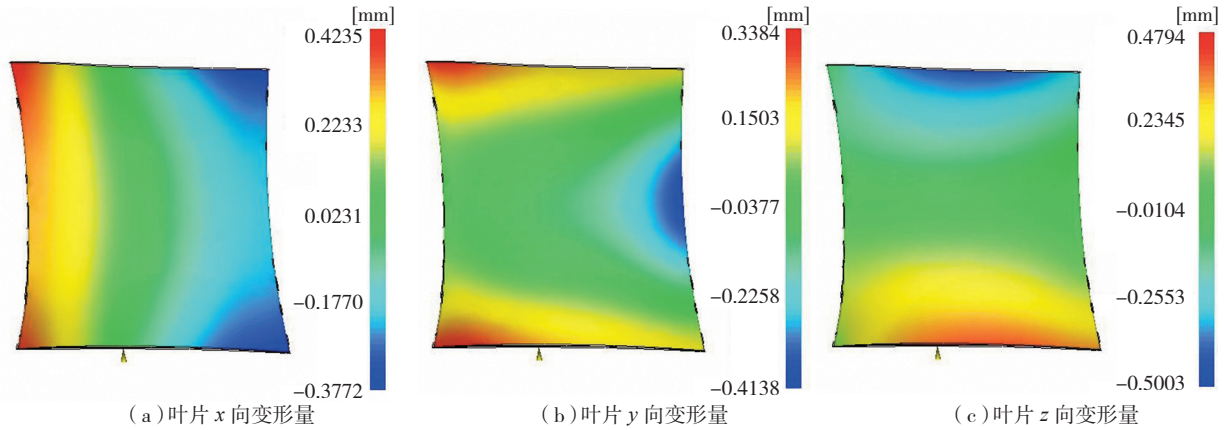


图3 初次数值模拟注塑结果
Fig.3 Result of initial numerical simulation injection

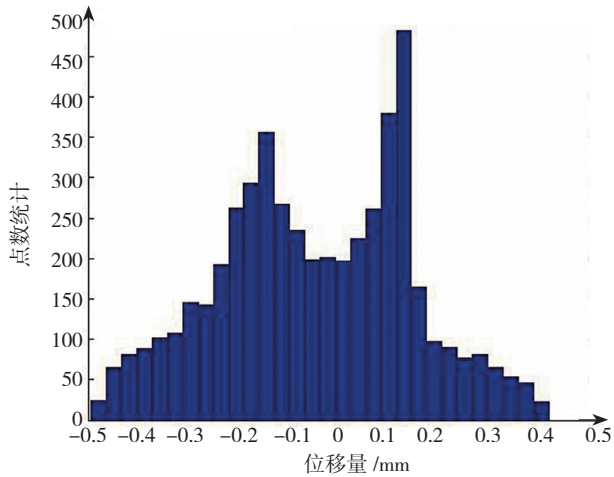


图4 初次注塑仿真位移场分布图
Fig.4 Displacement field distribution of the first injection molding simulation

3 叶片模具型腔优化

以每次仿真注塑前的叶片型腔为注塑型腔,把每次仿真注塑的位移场反向加到叶片设计型腔,即可得到该次反变形优化的模具型腔。图5展示了第1次反变形优化的模具型腔与优化前的模具型腔的对比。

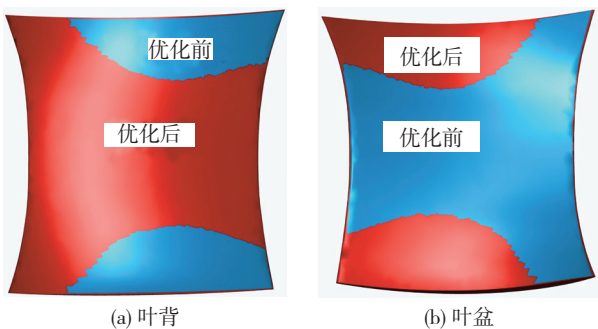


图5 优化型腔和初始型腔对比
Fig.5 Contrast between optimized cavity and original cavity

4 型腔反变形优化仿真验证

以优化后的模具型腔为初始型腔,对叶片进行同参数的注塑仿真实验,通过位移场计算可得到与第1次仿真注塑想对应的位移场数据。此时发现最大偏差已缩小到0.015mm。以同样方法,对叶片模具型腔进行第2次反变形优化,再次进行位移场计算,此时发现位移场已经严格控制在 $\pm 0.004\text{mm}$ 之内。叶片精度可达到试验台要求。说明修模后的模具型腔达到了设计要求。

图6和图7为第1次和第2次型腔反变形优化后注塑仿真位移分布图,从两图可以看出,型腔反变形优化后的叶片注塑成型精度显著提高。

针对初次仿真注塑和2次型腔优化后仿真注塑的叶片模型与叶片设计模型进行3D偏差比较,其结果如图8所示。

根据以上分析,即可用第2次反变形优化后的模型

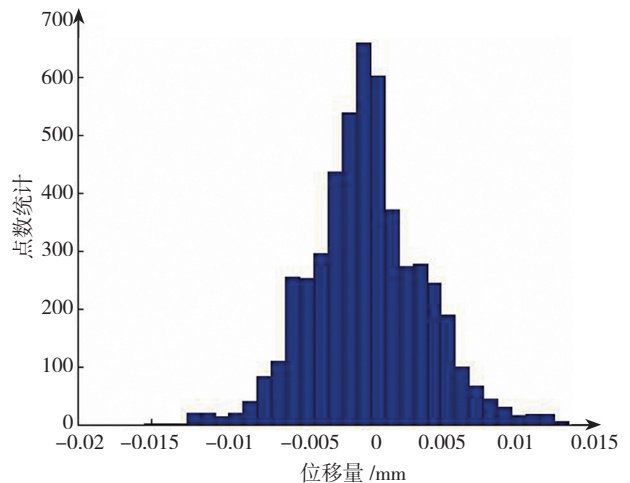


图6 第1次型腔优化注塑仿真位移场分布图
Fig.6 Displacement field distribution of the first cavity optimization injection molding simulation

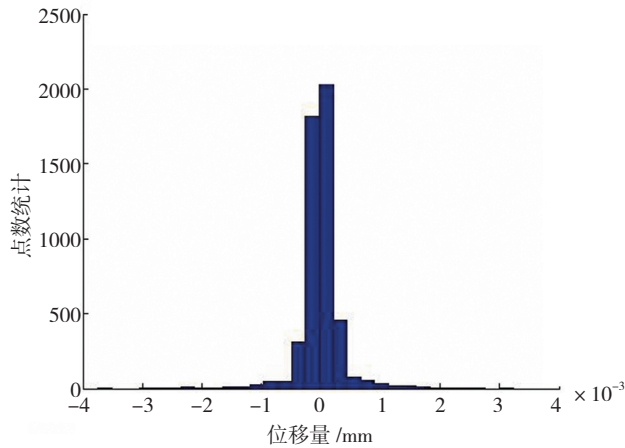


图7 第二次型腔优化注塑仿真位移场分布图

Fig.7 Displacement field distribution of the second cavity optimization injection molding simulation

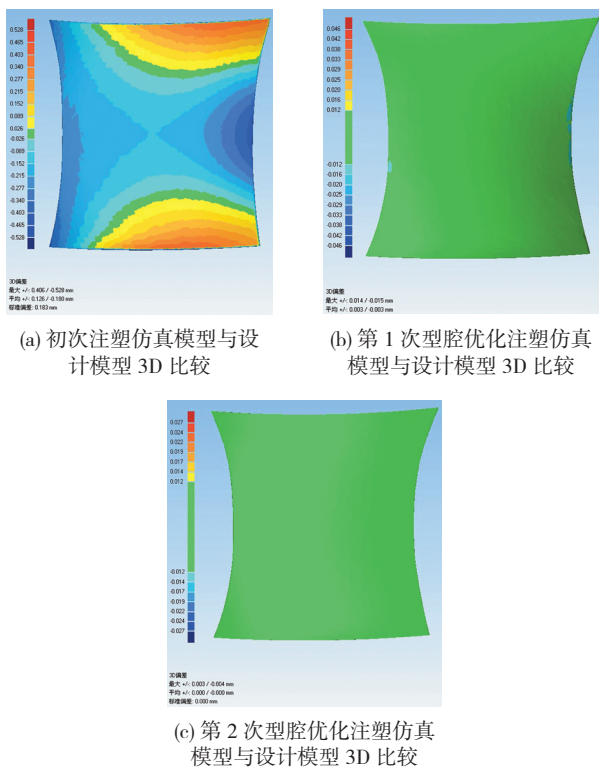


图8 叶片3次注塑仿真模型与设计模型3D比较

Fig.8 3D comparison between three-time injection molding simulation models and theoretical model of blade separately

作为叶片模具的设计造型腔。

5 结论

本论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控型的难题,提出基于位移场的模具型腔反变形优化方法。通过对树脂叶片注塑过程进行数值模拟,得到了叶片注塑仿真位移场,并用反变形方法对叶片注塑模具进行了虚拟修模。通过仿真实验验证,与

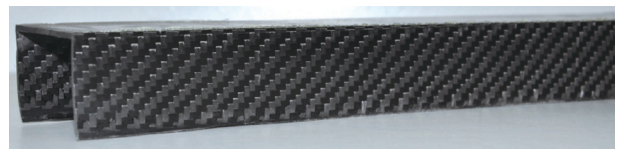
优化前的型腔相比,优化后的型腔能够显著提高叶片注塑成型精度。论文研究结果可作为树脂叶片注塑成型高精度控型的理论指导;并可以论文研究结果作为基础,下一步结合注塑工艺优化技术对叶片注塑成型高精度控型开展深入研究。

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] 邵健, 吕震, 柯映林. 基于特征技术的注塑模具型腔设计制造系统. 浙江大学学报(工业版), 2006, 40(3):438-442.
- [3] 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. 航空学报, 2006, 27(3):509-514.
- [4] 詹春毅, 岑运福. 塑料注射成型中充模阶段熔体流动的研究. 轻工机械, 2006, 24(2):26-29.
- [5] Hiber C A, Shen S F. Flow analysis of the non-isothermal two-dimensional filling process in injection molding. Israel Journal of Technology, 1978(16):248-254.
- [6] Hiber C A, Shen S F. A finite-element/finite-difference simulation of the injection molding filling process. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 1980(7):1-32.

(责编 夏宛)

(上接第89页)

图9 ADP成形的复合材料C型梁
Fig.9 Composites C-type beam by ADP

变变形), 直线度达到 0.5mm/m、C 型梁折角 $90^\circ \pm 0.5^\circ$, 力学性能优良。从而验证了理论分析的正确性和设计装置的可行性。

6 结束语

预浸料拉挤成形是一种低成本复合材料制造新方法, 国内尚属空白、亟待开发研制。本文以 C 型梁为研究对象, 提出预浸料连续变形的纤维束路径设计原理, 分析 C 型梁的预成形过程并建立分析模型, 构建预成形变形的路径并进一步优化得到符合实际要求的数据。通过预成形机构设计和拉挤成形试验, 验证这一方法的工程可行性及应用价值。根据这一原理及分析方法, 在完善 C 型梁 ADP 制造工艺研究的基础上, 进一步开展其他类型截面的预成形研究, 以形成具有自主知识产权的预浸料拉挤复合材料型材制造和应用技术, 填补国内空白, 形成研发和生产能力。

(责编 可岚)