

doi: 10.3969/j.issn.1005-3026.2017.03.018

# 可调节气囊提高航空薄壁件加工精度的研究

林文强<sup>1</sup>, 焦明裕<sup>1</sup>, 赵西松<sup>2</sup>, 喻先勇<sup>1</sup>

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司, 辽宁 沈阳 110043)

**摘 要:** 以前机匣为典型零件,提出了提高航空薄壁件加工精度的可调节压力气囊支撑系统.系统采用正交分析法,对薄壁件进行切削有限元仿真,分析比较了薄壁件在不同工装参数下的切削变形,并研究切削点变形随工装参数的变化趋势.由此对薄壁件工装进行优化,优化后因工装参数引起的误差可减小60%以上,直接对航空薄壁件加工提出指导性意见.在优化的工装基础上,提出了使用可调节压力气囊作为支撑,根据切削点的变形情况使用不同压力的气囊,装夹变形可在优化后基础上再次减小40%以上,从而减小让刀变形、控制薄壁件的加工精度.

**关键词:** 航空薄壁零件;正交分析;有限元仿真;工装优化;压力气囊

中图分类号: V 261.2 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2017)03-0390-05

## Study on Improving the Machining Accuracy of Aviatric Thin-Walled Parts with the Adjustable Airbag

LIN Wen-qiang<sup>1</sup>, JIAO Ming-yu<sup>1</sup>, ZHAO Xi-song<sup>2</sup>, YU Xian-yong<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. AVIC Shenyang Liming Aero-Engine Group Co., Ltd., Shenyang 110043, China. Corresponding author: LIN Wen-qiang, E-mail: wqlin@me.neu.edu.cn)

**Abstract:** Taking the front casing as typical part, the adjustable pressure airbag was proposed to improve the machining accuracy of aviatric thin-walled parts. The orthogonal analysis method was adopted in the system to carry out the finite element simulation in thin-walled cutting, the cutting deformation under different work parameters was analyzed, and then the deformation trend of the cutting point changing with work parameters was studied. Thereby, the work parameters were optimized in thin-walled parts. As a result, the error caused by work parameters was reduced by more than 60%, which could directly provide guidance on the processing of thin-walled parts. On the basis of optimized work parameters, an adjustable pressure airbag was taken as the support. Using different pressure airbags according to the deformation of cutting points, the clamping deformation can be reduced by more than 40% on the basis of optimization, which will reduce the part deflection and control the machining precision of thin-walled parts.

**Key words:** aviatric thin-walled part; orthogonal analysis; finite element simulation; work optimization; pressure airbag

航空机匣是航空工业产品中较常见的一类薄壁类零件,设计结构有整体机匣和对开机匣两类,其结构复杂、尺寸大、薄壁、加工精度要求高<sup>[1]</sup>;材料多为钛合金,切削时因零件变形存在“让刀”现象,加工难度大.国内外学者对此有所研究,其中,Ratchev等试图通过单方向的修正刀具路径来补偿加工变形<sup>[2]</sup>,Sutheriand等则分析了刀具变

形的影响<sup>[3]</sup>,并且取得巨大的进展.

本文以航空发动机的前机匣为研究对象,利用有限元分析法对机匣零件加工过程中出现的问题进行分析,系统地、全面地改进机匣加工用的工装结构和设计方法,探索出一条有效控制零件加工变形、提高加工精度的途径.

## 1 航空薄壁件装夹方案研究

前机匣为两个零件通过螺栓连接在一起后,再被装夹至定位件后加工,使用辅助固定支承提高工件刚度<sup>[4]</sup>;同时,考虑压紧顺序对刚度的影响<sup>[5]</sup>.定位件保证了零件中心与工作台旋转中心的误差、工作台基准在误差允许的范围内.

实际加工中,众多工装影响因素纵横复杂且交叉影响,基于此,本文针对薄壁件各影响因素进行了深入研究并提出了减小装夹变形的工装优化方案.

## 2 有限元分析

### 2.1 几何模型

本文考虑了底面平面度误差对变形产生的影响,对模型进行简化:经分析夹具变形所产生的误差在2%以内,故忽略夹具变形对分析结果的影响,仅将夹具作为边界条件,在压紧位置划分分割面以便施压紧力;两零件之间建立绑定接触代替螺栓连接;在零件下法兰底部一半割去0.06 mm厚度作为平面度误差的影响.

### 2.2 载荷模型

分别采用指数公式法、Walter 刀具公司提供的计算软件,得到铣削的切削三向力.由于刀具的磨损,导致加工中心切削功率是新刀的2倍.最终得到修正后的铣削三向力如表1所示.

表1 修正后铣削三向力大小

Table 1 Corrected milling force of 3D N

$F_f$	$F_{IN}$	$F_c$
260	200	116

### 2.3 约束模型

定位件位移约束:零件下端面与定位件建立面面接触,定位件下端面施加全部约束.

支撑件的位移约束:支撑件安装在夹具凹槽内,同时与工件内壁有接触,故零件与支撑件建立面面接触,并将与工装凹槽接触面设置为全约束.

零件之间约束:两个零件通过螺栓连接在一起,故在有限元分析中在零件螺栓连接处建立绑定接触.

### 2.4 有限元计算与分析

有限元分析时采用 solid187 单元<sup>[6]</sup>,进行自由网格划分,在施加切削力的位置进行单元局部

细化,设置零件(钛合金)、工作台、支撑件(天然橡胶)的材料属性.

利用 ANSYS 13.0 软件,对航空发动机机匣零件进行有限元分析,其装夹变形结果见图1.

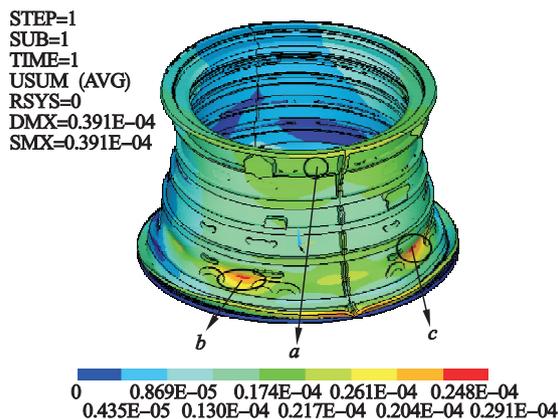


图1 零件装夹变形图

Fig. 1 Clamping deformation chart

由图1可以得出:装夹过程中,压紧力位置变形量较大,而铣削点越高,零件所受弯矩越大.为此对零件在如图1所示的  $a, b, c$  三个位置分别施加切削力.图2为  $b$  位置施加铣削力时零件变形情况.

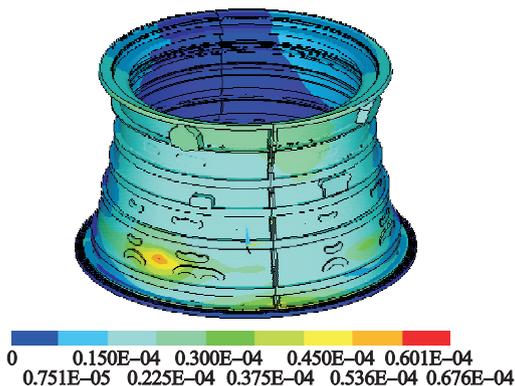


图2 铣削变形云图

Fig. 2 Cloud chart of milling deformation

## 3 铣削变形实验验证

该实验目的是获得铣削加工情况的局部位移,并与有限元分析结果对比分析,相互验证.同时,为薄壁件铣削位移的测量搭建了一个完整可靠的测试系统.其测试系统如图3所示.

传感器选用 PM-R1 微小位移传感器;数据采集仪为 DH5923 动态信号测试仪.当立铣刀加工至测量位置时,使用传感器分别测出径向、轴向变形量.图4为测量径向位移时,传感器的安装位置.

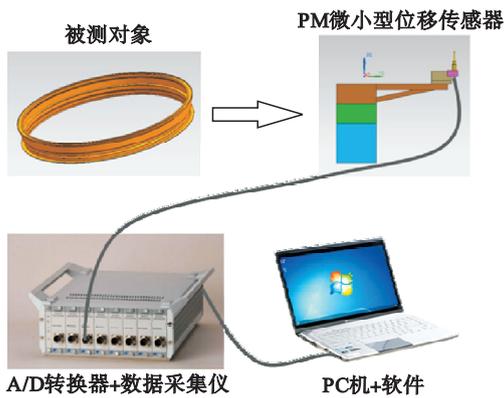


图3 铣削变形实验测试系统

Fig. 3 Test system of milling deformation



图4 传感器安装位置

Fig. 4 Installation location of the sensor

通过实验测出,径向与轴向变形量分别为  $33.75, 34.11 \mu\text{m}$ ; 使用有限元软件, 采用以上方法分析, 得到径向与轴向变形分别为  $25, 28.4 \mu\text{m}$ .

由以上数据可知, 根据软件计算出来的理论值与实验测量的实测值差值很小, 均不足  $0.01 \text{ mm}$ ; 仿真值小于实测值是由于仿真为理想模型, 而实际加工存在材料缺陷、刀具磨损等因素. 因此, 理论计算与实际切削情况基本相符, 理论计算结果可以在实际加工中加以利用.

## 4 航空薄壁零件工装优化

由前机匣零件工装可知: 夹具压紧件分为上下压板两部分, 下压板起主要作用, 使零件固定在定位件上; 上压板起辅助支撑作用, 保证零件在加工过程中的稳定性. 考虑了动态切削力与材料去除的影响<sup>[7]</sup>, 压紧力可调节, 在满足不滑移、不失稳条件下<sup>[8]</sup>, 下压紧力分别取  $3.5, 7, 14 \text{ MPa}$ , 上压紧力取  $0.01, 0.05, 0.1 \text{ MPa}$  进行计算. 支撑橡

胶条水平放置, 长度可调; 压板个数、压紧面积 (为扇形, 宽  $5.5 \text{ mm}$ , 长度如表 2 所示) 皆可变, 具体数值见表 2.

表2 实验方案  
Table 2 Test plan

试验号	支撑件长度 mm	压板数	压板长度 mm	压紧力 / MPa	
				下	上
1	140	8	130	3.5	0.01
2	140	8	130	7	0.01
3	140	8	130	14	0.01
4	140	8	130	3.5	0.05
5	140	8	130	3.5	0.1
6	140	8	115	3.5	0.01
7	140	8	145	3.5	0.01
8	140	6	130	3.5	0.01
9	140	12	130	3.5	0.01
10	120	8	130	3.5	0.01
11	160	8	130	3.5	0.01

通过有限元仿真得到铣削时零件变形量, 绘制成曲线, 如图 5 所示.

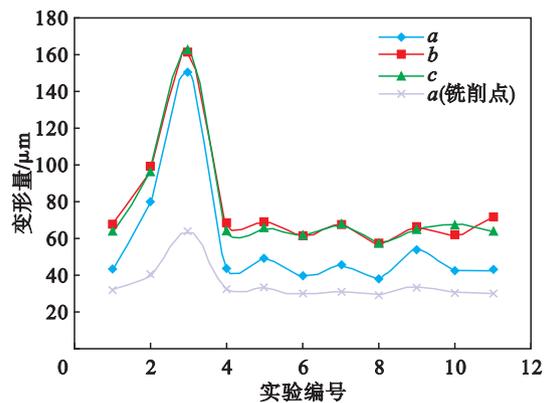


图5 铣削数据拟合曲线

Fig. 5 Fitting curves of milling data

通过对图 5 结果进行对比分析, 从静态分析模型中, 找到工装实验最优工装参数: 支撑橡胶条长  $140 \text{ mm}$ , 6 个  $5.5 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$  的压紧件, 下压紧力  $3.5 \text{ MPa}$ , 上压紧力  $0.01 \text{ MPa}$ . 其中, 压紧力大小对加工变形影响最大, 夹具设计时应根据工件变形程度能够调节压紧力大小<sup>[9]</sup>.

## 5 可调节压力气囊研究

由前文分析可知, 零件因装夹引起的变形量较大, 在加工过程中会产生明显的回弹及“让刀”现象, 从而导致加工精度的降低. 因此, 引入气囊

作为辅助支承来减小工件因刚度不足引起的加工变形<sup>[10]</sup>。气囊将根据加工不同位置的实际变形情况,调节气压至合适的大小,补偿零件的让刀变形,从而达到提高加工精度且精度可控的效果。

由于零件在下压板位置因装夹引起的变形较大,如图6所示,将支撑件移至下压板处,并且使用压力大小可调节的压力气囊代替橡胶条。气囊外圈与零件接触、内施加全约束,内部有大小可调的气压。在此,不考虑零件底面平面度误差的影响,按零件工装,加工下压板位置时,切削点变形量为 $46.2\ \mu\text{m}$ 。

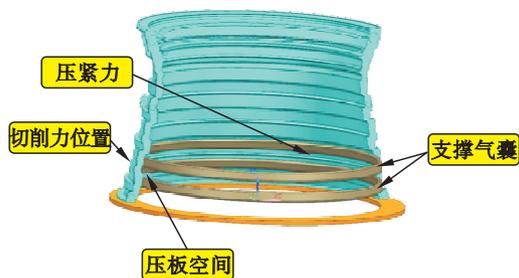


图6 气囊安装位置

Fig. 6 Installation position of the airbag

图7是气囊内部压力为 $101.3\ \text{kPa}$ 时零件的变形情况,改进后变形量降为 $58.2\ \mu\text{m}$ ,与改进前相比,变形量减少了 $22.51\%$ ,所以改进后装夹方案能够减小机匣的装夹及让刀变形。

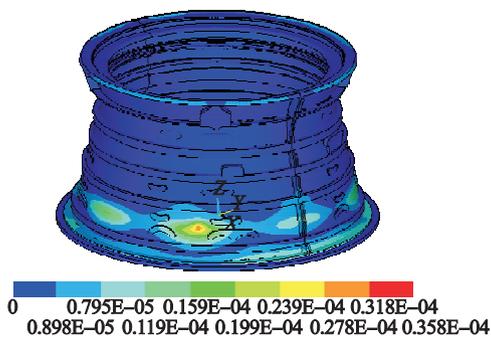


图7 使用气囊时零件变形

Fig. 7 The deformation of parts using the airbag

图8零件变形-压力曲线中,①为改变支撑件位置后,零件变形减小情况;②为零件变形随气囊压力变化曲线。通过曲线可以看出,零件变形与气囊压力呈线性关系,在一定范围内,压力越大,变形量越小。当压力大于 $303.9\ \text{kPa}$ 时,零件最大变形大于切削点变形(如③线所示),而切削点变形继续减小。

参照橡胶材料的应力-应变曲线,图8所示的最大变形在弹性范围内,且本文主要研究切削点让刀变形,因此可以根据气囊所能承受的最大

压力(如:橡胶气囊承受压力不超过 $202.6\ \text{kPa}$ ),以及加工不同位置的实际变形情况,可相应地调整气囊至最合适的压力值,从而提高零件的加工精度。

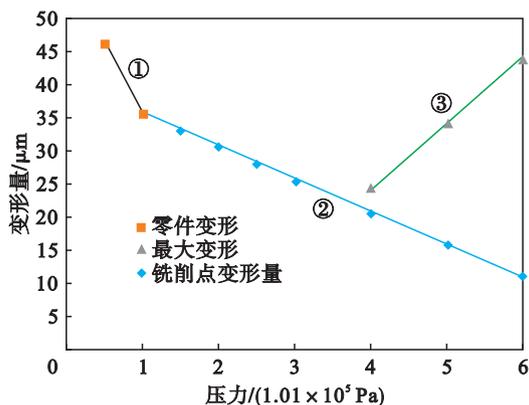


图8 零件变形-压力曲线

Fig. 8 Deformation-pressure curves of the part

## 6 结 论

1) 航空薄壁零件加工变形受压紧力影响较大,而受其他因素影响很小。对工装进行优化,尤其是压紧力优化,能够明显改善航空薄壁件的装夹变形。

2) 对于需要在中间或顶部位置压紧的零件,此时压力不宜太大,且夹紧位置越高,压力值应越小;压紧力为 $14\ \text{MPa}$ 时,装夹变形为 $161\ \mu\text{m}$ , $3.5\ \text{MPa}$ 时降至 $57.5\ \mu\text{m}$ ,精度相对提高了 $64.29\%$ 。

3) 压板数量越多,装夹变形量越大;压板面积越大,受力越均匀,变形越小;支撑橡胶条对静力分析结果影响最小,但在加工过程中能够减小零件振动,可适当增加橡胶条长度(数量)以减小振动。

4) 使用压力气囊能够明显减小零件的让刀变形,提高加工精度及表面质量;当变形量有限时,变形随压力变化近似于直线。当在切削点使用气囊仅作为弹性支撑时,零件让刀变形即减小 $22.51\%$ ,当内部施加 $303.9\ \text{kPa}$ 压力时,变形减小 $45.02\%$ ,大大减小了零件的让刀变形。

## 参考文献:

- [1] 王聪梅. 控制较大尺寸机匣件加工变形的工艺措施[J]. 航空制造技术,2012(22):96-98.  
(Wang Cong-mei. Technology measures of controlling machining deformation for large case [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*,2012(22):96-98.)
- [2] Ratchev S, Liu S, Becker A A. Error compensation strategy in

- milling flexible thin-wall parts [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 162: 673 - 681.
- [3] Sutherland J W, DeVor R E. Anim proved method for cutting and surface error prediction in flexible end milling systems [J]. *Transactions of the ASME Journal of Engineering for Industry*, 1986, 108(4): 269 - 279.
- [4] Behzadi M R, Arezoo B. Static and dynamic models for predicting the effects of supports on machining flatness and roughness [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2000, 216(5): 735 - 742.
- [5] Cogun C. The importance of the application sequence of clamping forces on workpiece accuracy [J]. *Journal of Engineering for Industry*, 1992, 114(4): 539 - 543.
- [6] 王鑫, 麦云飞. 有限元分析中单元类型的选择 [J]. 机械研究与应用, 2009, 22(6): 43 - 46.  
(Wang Xin, Mai Yun-fei. The choice of element type in FEA [J]. *Mechanical Research & Application*, 2009, 22(6): 43 - 46.)
- [7] Deng H Y, Melkote S N. Determination of minimum clamping forces for dynamically stable fixturing [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, 46(7/8): 847 - 857.
- [8] 陈盛秒. 薄壁外压容器设计的公式法 [J]. 石油化工设备技术, 2008, 29(6): 12 - 15.  
(Chen Sheng-miao. Formular method for design of thin-wall external pressure vessel [J]. *Petro-Chemical Equipment Technology*, 2008, 29(6): 12 - 15.)
- [9] Nee A Y C, Kumar A S, Tao Z J. An intelligent fixture with a dynamic clamping scheme [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2000, 214(3): 183 - 196.
- [10] Tsai J S, Liao C L. Finite-element modeling of static surface errors in the peripheral milling of thin-walled workpieces [J]. *Journal of Material Processing Technology*, 1999 (94): 235 - 246.

(上接第 344 页)

扩孔率达到 94%, 延伸凸缘性能及低温冲击性能均良好, 韧脆转变温度低于  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 达到轮辐用钢的加工要求。

3) 细晶强化、固溶强化、析出强化、相变强化为主要强化机制。

#### 参考文献:

- [1] 姜超, 陈林, 黄国杰. 汽车轮毂材料的发展现状及制备工艺 [J]. 金属热处理, 2007, 12(29): 35 - 39.  
(Jiang Chao, Chen Lin, Huang Guo-jie. Development status of automobile wheel hub material and its production process [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2007, 12(29): 35 - 39.)
- [2] 张磊峰, 宋仁伯, 赵超, 等. 新型汽车用钢——低密度高强度韧钢的研究进展 [J]. 材料导报, 2014, 28(10): 111 - 117.  
(Zhang Lei-feng, Song Ren-bo, Zhao Chao, et al. Lightweight vehicle, research progress of new automotive steel—low-density high strength-toughness steel [J]. *Materials Review*, 2014, 28(10): 111 - 117.)
- [3] 徐鑫, 时晓光, 韩斌, 等. 汽车用高强度车轮钢 LQ540 的研制 [J]. 鞍钢技术, 2011, 1(9): 27 - 31.  
(Xu Xin, Shi Xiao-guang, Han Bin, et al. Development of high strength automobile wheel steel LQ540 [J]. *Angang Technology*, 2011, 1(9): 27 - 31.)
- [4] Han Y, Shi J, Xu L, et al. Effect of hot rolling temperature on grain size and precipitation hardening in a Ti-microalloyed low-carbon martensitic steel [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2012, 553(3): 192 - 199.
- [5] Kamimura T, Stratmann M. The influence of chromium on the atmospheric corrosion of steel [J]. *Corrosion Science*, 2001, 43(3): 429 - 447.
- [6] Takahiro K, Shunichi H, Youichi M. 780 N/mm<sup>2</sup> grade hot-rolled high-strength steel sheet for automotive suspension system [J]. *JSAE Review*, 2003, 24(1): 81 - 82.
- [7] 甘晓龙, 岳江波, 陈子宏, 等. Ti-Nb 微合金化对低碳高强度钢组织和性能的影响 [J]. 特殊钢, 2012, 33(6): 32 - 35.  
(Gan Xiao-long, Yue Jiang-bo, Chen Zi-hong, et al. Effect of Ti-Nb microalloying on structure and properties of low carbon high strength steel [J]. *Special Steel*, 2012, 33(6): 32 - 35.)
- [8] Shen Y F, Wang C M, Sun X. A microalloyed ferrite steel strengthened by nanoscale precipitates [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2011, 528(2): 8150 - 8156.
- [9] 冯锐, 李胜利, 李贞顺, 等. Nb-V-Ti 微合金钢复合析出相的特征 [J]. 材料热处理学报, 2013, 34(2): 37 - 41.  
(Feng Rui, Li Sheng-li, Li Zhen-shun, et al. Characteristic of diphas precipitate of Nb-V-Ti microalloyed steel [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2013, 34(2): 37 - 41.)
- [10] 胡军, 杜林秀, 王万慧, 等. 590MPa 级热轧 V-N 高强度车轮钢组织性能控制 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2013, 34(6): 820 - 823.  
(Hu Jun, Du Lin-xiu, Wang Wan-hui, et al. Microstructural control and mechanical properties of 590 MPa grade hot-rolled V-N high strength steel [J]. *Journal of Northeastern University( Natural Science)*, 2013, 34(6): 820 - 823.)
- [11] Pietrzyk M, Roucoules C, Hodgson P D. Modelling the thermo-mechanical and microstructural evolution during rolling of a Nb HSLA steel [J]. *ISIJ International*, 1995, 35(5): 531 - 532.