

# 超薄零件车削加工变形研究<sup>\*</sup>

曹月, 房丰洲

(天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

**[摘要]** 超薄零件车削加工后存在较大的变形, 严重制约了该类关键器件的广泛应用。为实现超薄零件加工变形的预测与分析, 基于力学分析, 建立了加工仿真系统并进行超薄零件精加工过程模拟研究。实际加工验证了所建立模型的准确性, 同时基于该系统对超薄零件加工后变形进行分析, 其结果对改进加工工艺和减小工件变形具有指导意义。

**关键词:** 超薄零件; 加工仿真系统; 加工变形; 车削

## Study on Ultra-Thin Part Deformation in Turning

CAO Yue, FANG Fengzhou

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instrument, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**[ABSTRACT]** Large deformation appears after turning of ultra-thin parts. To realize the prediction and analysis of the deformation, a finite element simulation system was established to simulate the finishing process. The accuracy of the finite element system was verified by the machining experiment. Deformation of ultra-thin parts after unloading was explained based on the system, which could guide the improvement of processing and reduce deformation.

**Keywords:** Ultra-thin part; Machining simulation system; Machining deformation; Turning

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2017.22.096

超薄零件具有重量轻、表面质量高、比表面积大等突出特点, 在微型器件、新型能源、悬浮传感器等方面有广泛的应用前景。在超精密车削过程中, 超过 80% 的坯料都将以切屑的方式去除, 加工过程中最突出的问题是加工应力会引起工件变形<sup>[1]</sup>。加工结束去除装夹后, 超薄零件会发生弯曲等结构变形, 难以达到设计要求。实际生产过程中, 主要通过加工经验来减小零件变形, 缺少定性分析, 导致零件质量不能得到保证。因此, 预测零件加工后变形, 分析变形的机理, 并通过改进加工工艺来减小零件变形具有十分重要的工程意义。

有限元作为一种重要的数值计算方法, 在实际工程中得到了广泛应用。采用切削加工有限元仿真可以在计算机中再现工件切削加工过程, 可以较准确地预测加工前后的应力与变形。研究人员对大型薄壁件的切削仿真开展了较多研究<sup>[2-5]</sup>, 但针对高精度超薄零件加工变形研究的报道却很少见。超薄件长厚比远大于薄壁

件, 加工过程对超薄零件变形的影响将明显区别于薄壁件, 因此超薄零件加工变形仿真具有重要研究意义。此外, 仿真中薄壁件铣削路径可简化为直线式, 而车削超薄零件需简化为环形路径加工, 因此超薄件加工变形的仿真对工件网格划分、切削载荷确定提出了新的要求。本文以超精密车削超薄铝作为研究对象, 建立用于预测超薄零件整体加工变形的有限元仿真系统, 通过加工试验验证有限元仿真过程的正确性, 并对整体变形原因进行分析, 从而指导加工工艺的改进和优化。

### 1 切削加工仿真系统

在超薄零件切削加工模拟中, 涉及沿刀具路径的众多切削位置的计算, 以及每一个位置材料去除的分析。基于有限元研究, 可将加工仿真系统分为 4 部分<sup>[6]</sup>:

(1) 外部数据输入: 用于实现几何模型导入、模型网格划分、单元节点重新编号。为方便模拟沿刀具路径的整体切削过程, 需要进行节点排序、单元编号, 几何模型可从计算机辅助设计(CAD)导入。

(2) 有限元模型搭建: 该部分用于实现模型参数的输入、起始状态的输入以及相关求解器的调用。

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家重点基础研发计划项目(2016YB1102200); 国家自然科学基金(51320105009、61635008); 国家引智计划“111”项目(B07014)。

(3) PYTHON 脚本编写: 利用程序语言进行各部分整合, 从而实现对各切削位置的切削载荷加载、边界条件施加、材料去除, 全部仿真过程由程序控制, 实现操作自动化。

(4) 子程序结果处理: 该部分用于结果分析, 利用 PYTHON 与 MATLAB 对仿真结果进行后处理, 对所需的数据进行提取分析。

整体仿真流程如图 1 所示, 首先对零件进行初始网格划分, 通过 MATLAB 进行节点排序、单元编号, 从而生成包含几何特征与网格定义的文件; 然后自动施加边界条件和切削载荷, 调用有限元求解器对切削加工过程进行仿真计算。由于仿真工件切削整个过程计算量大, 在各环加工完成后要进行结果的重启动, 将结果映射到下一次加工中, 生成包含前一次加工信息的模型文件, 再次施加边界条件与切削力, 循环直至加工完成, 整个过程可通过 PYTHON 语言编程实现。

## 2 加工工艺向仿真系统的参数转换

### 2.1 车削加工参数的仿真转换

仿真参数要反映实际切削参数, 才能在模拟中实现真实的工件加工过程。因此在整体仿真中, 需要将切削加工参数转化为网格划分中单元在 3 个维度上的尺寸。切削深度决定切削层单元厚度, 切削速度决定单元环形长度, 图 2 所示的刀鼻半径  $R$  与切削深度  $a_p$  综合决定切削宽度, 瞬时切削宽度  $p$  为主轴旋转一周的进给量,

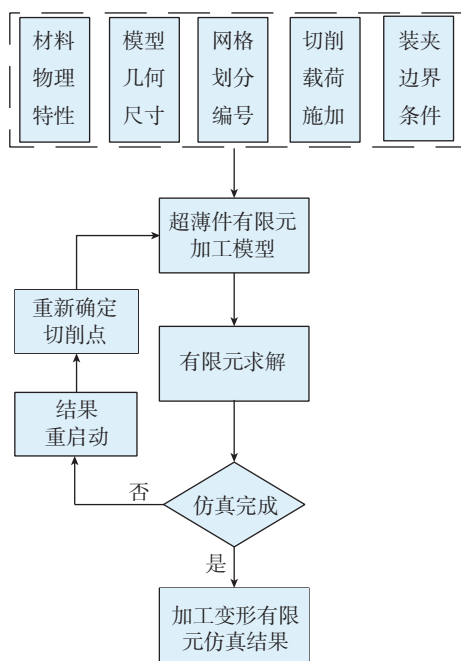


图1 整体加工仿真流程图  
Fig.1 Flow chart of machining simulation

单元径向长度由切削宽度与仿真效率共同确定。

切削过程中的材料去除由“单元生死”技术实现<sup>[7-8]</sup>, 即通过程序将有限元方程的刚度阵乘以减缩系数, 完成单元失效。失效单元的相关载荷为 0, 同时质量等物理量也变为 0。在使用生死单元的过程中, 没有切屑的出现, 但是切屑与车刀的作用将通过切削载荷加载的形式实现。

### 2.2 车削加工路径的仿真转换

车削加工路线对工件变形的产生至关重要, 仿真切削路径必须尽可能真实地反映实际刀具切削路径。超精密加工端面车削过程中刀具路径为螺旋线, 但有限元模拟中受到网格划分的影响, 很难按照螺旋线轨迹进行单元去除, 因此需要对刀具路径进行简化。将切削过程简化为向中心逼近的环形切削, 仿真刀具路径如图 3 所示。

在网格划分后, 为了快速进行单元查找, 需要进行模型切削层的单元编号、节点排序, 利用 MATLAB 对单元按照刀具路径重新编号, 各单元 8 个节点可以用  $(i, i+1, i+64, i+65, j, j+1, j+64, j+65)$  表示, 通过  $(i, j)$  就可以快速定位切削单元, 最终通过 PYTHON 语句实现仿真路径中的单元去除。

### 2.3 车削加工切削载荷的仿真转换

#### 2.3.1 切削力的仿真转换

法向力  $F_z$  影响工件的几何形状, 切向力  $F_y$  对切削用量的选择具有重要意义。各环切削力通过带有厚度

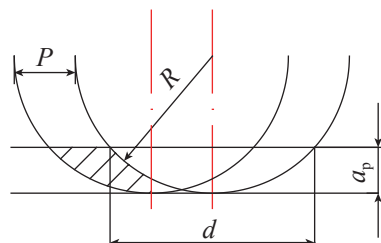


图2 瞬态切削示意图  
Fig.2 Sketch of transient cutting

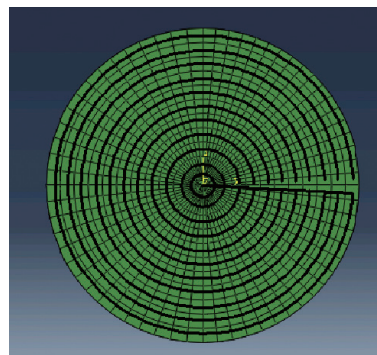


图3 仿真刀具路径  
Fig.3 Tool path of simulation

的二维正交切削仿真得到。刃倾角是三维切削仿真区别于二维切削仿真的最明显特征,而正交切削中刃倾角为0,因此带厚度的二维正交切削可满足仿真要求。以切削速度 90000mm/min、切削深度 10 μm、切削宽度 0.9mm 为例,两方向仿真切削力如图 4 所示,仿真切削力稳定段取平均即为各环切削力。考虑仿真准确性及仿真效率,整体仿真中单元径向长度远大于瞬态切削宽度。因此,仿真切削力并不是实际切削力,是为了产生与实际切削相同切削效果所需的切削力。

为验证整体仿真中各环切削力准确性,结合试验、计算模型与仿真,将试验所得切削力进行转化。类似于切削力经验公式中进给量,考虑切削宽度  $d$ ,将与切削速度  $v$  有关的切削力经验公式进行扩展:

$$\begin{cases} F_z = C_{Fz} d^{p_{Fz}} v^{q_{Fz}} \\ F_y = C_{Fy} d^{p_{Fy}} v^{q_{Fy}} \end{cases} \quad (1)$$

试验测切削力可确定切削速度指数  $q$ ,不同切削宽度的试验与仿真数据可确定切削宽度指数  $p$ ,确定切削力经验公式为:

$$\begin{cases} F_z = 2.423 d^{0.24783} v^{0.02909} \\ F_y = 0.879 d^{0.22399} v^{0.04468} \end{cases} \quad (2)$$

在各环仿真切削力中取 3 组,与切削力公式计算值比较,结果如表 1 所示,仿真误差均在 1% 以下,表明正交仿真切削力具有一定的准确性。

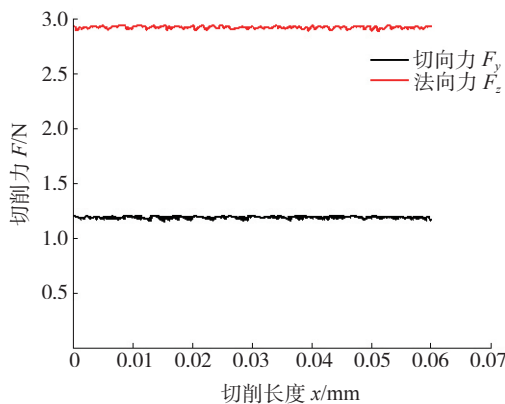


图4 仿真切削力

Fig.4 Cutting force of simulation

表1 切削宽度  $d=0.9\text{mm}$  各速度下仿真与计算切削力

切削力		$v / (\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$		
		9420	51840	85800
仿真值 /N	$F_y$	1.071	1.165	1.193
	$F_z$	2.730	2.880	2.920
公式计算 /N	$F_y$	1.076	1.161	1.188
	$F_z$	2.735	2.874	2.916
误差 /%	$F_y$	0.46	0.13	0.42
	$F_z$	0.18	0.21	0.14

### 2.3.2 切削热的仿真转换

在 3 个变形区的切削热中,第二变形区的切削热主要对刀具与切屑加温,第三变形区后刀面与已加工表面摩擦热很小,所以对工件温度影响最大的是第一变形区产生的切削热。第一变形区的剪切能<sup>[9]</sup>可以表示为:

$$U = F_y v \quad (3)$$

假设剪切能全部转化为热能,其中流入工件的热能系数为  $R_w$ ,则加载热源为:

$$Q = R_w F_y v \quad (4)$$

$$R_w = 1 / (1 + 0.754 \sqrt{\frac{v a_p}{\alpha [\cot \phi + \tan(\phi - \gamma)]}}) \quad (5)$$

式中,  $\alpha$  为导温系数,  $\phi$  为剪切角,  $\gamma$  为前角。

### 2.3.3 施加切削载荷

图 5 为某时刻切削简化图,对单元 1 进行材料去除时,需要对切削面节点  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  施加切向力  $F_y$ ,对切削面底层节点  $c$ 、 $d$  施加法向力  $F_z$ ,同时对切削面节点  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  施加切削热边界条件。切削过程中,切削载荷在不同的切削位置进行加载卸载。切削速度决定加载与卸载时间,载荷在单元保持的时间由单元长度决定,仿真中可定义时间-载荷函数曲线描述<sup>[10]</sup>。

## 3 模拟变形及试验验证

考虑实际加工需求,模拟加工的超薄铝几何尺寸为  $\phi 20 \times 0.1$  (mm)。具体模拟切削参数如下: 主轴转速  $s=1500\text{r/min}$ ,进给量  $f=2\text{mm/min}$ ,切削深度  $a_p=10\ \mu\text{m}$ 。为观察整体加工后的工件变形,工件车削加工仿真分为两个阶段<sup>[11]</sup>: (1) 在吸盘吸附下的车削加工模拟,在该过程中约束底面  $x$ 、 $y$ 、 $z$  3 个方向的自由度; (2) 去掉吸盘吸附后的工件变形,在该过程中释放底面约束,对底面不共线 3 点利用 3-2-1 原则进行约束,既保证限制刚体位移,又可实现工件的自由变形。

采用超精密机床进行同尺寸超薄铝的加工,机床  $X$  轴、 $Z$  轴直线度  $0.2\ \mu\text{m}/250\text{mm}$ ,  $C$  轴旋转精度  $0.3''$ ,刀具采用单晶金刚石车刀,前角  $0^\circ$ 、后角  $12^\circ$ ,加工路径为由外向内的螺旋切削。实际加工中的工件尺寸与切削参数均与仿真条件一致,验证仿真对于超薄零件车削加工变形预测的正确性。图 6 为仿真模拟工件加

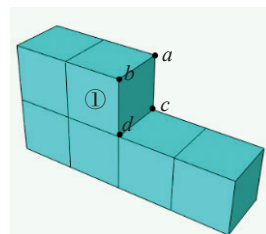


图5 切削载荷添加示意图

Fig.5 Sketch map of cutting load

工后的整体变形,图7为超薄铝加工某一直径下仿真变形值与实际加工变形值的比较。从图7可知,仿真预测整体变形与实际变形在外环基本一致,仿真所得弯曲高度差为14.35 $\mu\text{m}$ ,试验所得高度差为15~16 $\mu\text{m}$ ,实际加工工件在中间位置有约2 $\mu\text{m}$ 凸出。为在试验结果中去除机床、装夹等影响,在同加工参数下加工尺寸为 $\phi 20 \times 0.3$  (mm)的稍大厚度工件。图8所示是变形量与超薄件变形量的比较,0.3mm厚度工件弯曲高度差

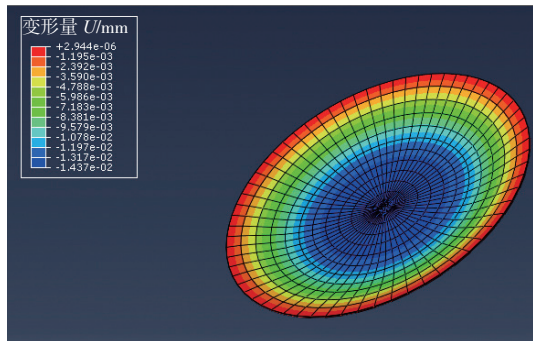


图6 模拟超薄零件加工后变形

Fig.6 Simulation of deformation of ultra-thin part

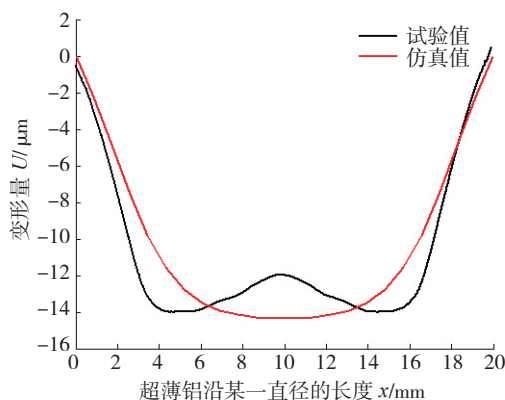


图7 试验值与仿真值对比

Fig.7 Comparison between experiment deformation and simulation deformation

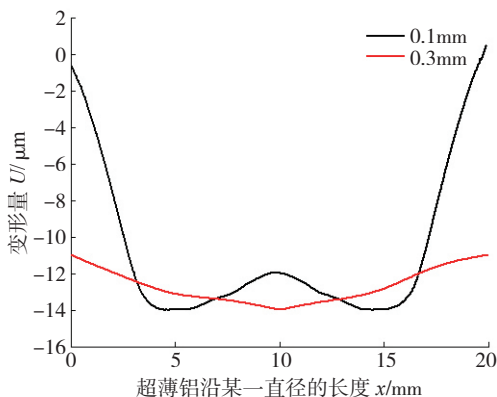


图8 两不同厚度零件试验变形量对比

Fig.8 Comparison between deformation of two parts in different thickness

约3 $\mu\text{m}$ ,认为超薄件外环较大变形大部分来自精加工过程。仿真中也存在一定的简化,认为模拟结果可以接受。

#### 4 超薄零件车削加工变形讨论

图9所示为加工某时刻应力分布。可知,在加工位置有最高的应力值,在已加工表面也有一定的应力分布,在未加工表面应力很小。在加工位置应力值已超过工件材料的屈服应力,表明在加工位置已出现塑性变形。

在加工过程中,工件内的应力分布发生变化,进行变形能储存,在吸盘吸附释放后,工件会通过变形进行应力释放从而重新达到平衡状态。因此,工件变形与装夹释放前的应力分布紧密相关,通过仿真可以得到加工完成后装夹卸载前的应力分布,绘制直径各点的应力分布曲线,如图10所示。可知,在距圆心半径6~8mm位置出现应力较为集中的现象,这种应力集中使超薄铝在外环出现较大的变形。

分析得知,切削力与切削热为影响装夹释放前工件应力分布的主要因素。切削力、切削热对已加工表面层应力产生影响,法向切削力使已加工表面产生压

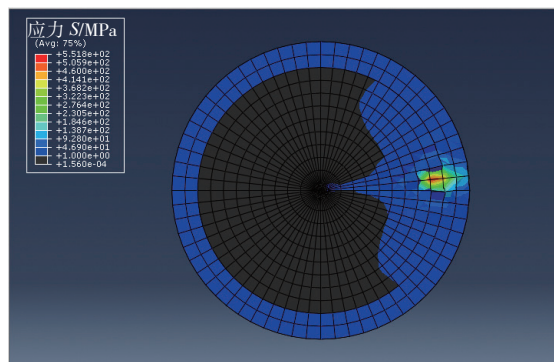


图9 某时刻应力分布

Fig.9 Transient stress distribution

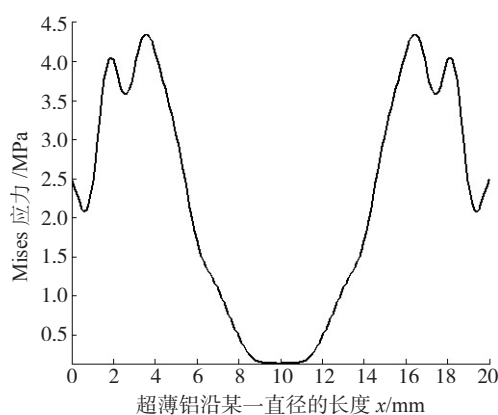


图10 装夹释放前的应力分布

Fig.10 Stress distribution before clamping

应力,切削热则产生拉应力<sup>[12]</sup>。切削热与切削速度成正比,从外环到中心的切削过程中切削热不断下降。在切削速度较大的外环切削加工时,可认为切削热对已加工表面影响更大。已加工表面应力表现为拉应力,而靠近加工的中心位置时,切削力影响更大,已加工表面应力表现为压应力,中间必然存在拉压应力的过渡,使得工件在中间某半径位置处出现应力较为集中的现象。通过工件法向应力进一步验证,装夹释放前的法向应力如图 11 所示,可认为在距圆心 8mm 位置有拉压应力的转变,影响了整个工件的应力分布。因此,在加工过程中可通过减小主轴转速,在工件整体应力减小的基础上,切削热相较于切削力更多的减少,使工件应力在整个切削过程中保持同一状态,可减少工件整体变形。

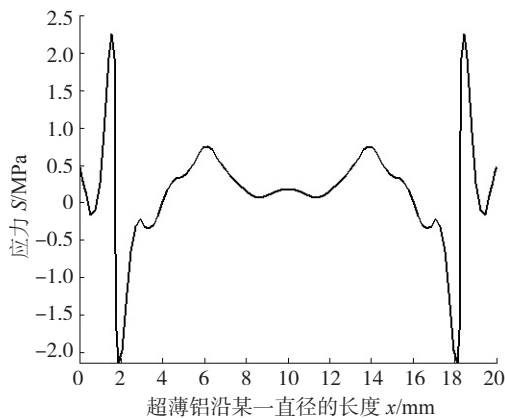


图11 装夹释放前的法向应力分布

Fig.11 Normal stress distribution before clamping

## 5 结论

(1) 本文基于有限元分析,建立了用于预测超薄零件整体加工变形的仿真系统。对加工工艺向仿真系统转换进行了研究,最大程度保证实际加工与仿真的一致性。并将实际加工后工件变形与仿真结果比较,确定了仿真系统模拟结果的准确性。

(2) 分析认为,工件外侧较大变形主要与切削载荷有关,切削载荷在工件已加工表面产生拉压应力的转变,因此在该位置出现应力较为集中的现象,从而影响整体应力分布,产生变形。基于该系统对超薄零件加工后变形进行分析,其结果对改进加工工艺和减小工件变形具有指导意义。

## 参考文献

[1] RATCHEV S, LIU S, HUANG W. An advanced FEA based force induced error compensation strategy in milling[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(5): 542-551.  
 [2] HUANG X M, SUN J, LI J F. Effect of initial residual stress and

machining-induced residual stress on the deformation of aluminium alloy plate[J]. Strojniški Vestnik-Journal of Mechanical Engineering, 2015, 61(2):131-137.

[3] YANG Y, LI M, LI K R. Comparison and analysis of main effect elements of machining distortion for aluminum alloy and titanium alloy aircraft monolithic component[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 70(9-12): 1803-1811.

[4] 赵威,何宁,武凯.航空薄壁件的刀具偏摆数控补偿加工技术[J].机械制造与自动化,2002,10(5):18-20.

ZHAO Wei, HE Ning, WU Kai. A NC compensation approach of machining aeronautical thin-walled workpiece by tilting tools[J]. Machinery Manufacturing and Automation, 2002, 10(5): 18-20.

[5] MELKOTE S N, SIEBENALER S P. Prediction of workpiece deformation in a fixture system using the finite element method[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(1): 51-58.

[6] 张攀,陈蔚芳.薄壁件加工变形预测及主动补偿方法[J].现代制造工程,2008,30(3):70-72.

ZHANG Pan, CHEN Weifang. Deformation prediction in machining of thin-walled parts and an active method of compensation[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2008, 30(3): 70-72.

[7] 章正伟,百万金.航空薄壁整体结构件加工变形的有限元分析[J].机械设计,2011,28(5):92-96.

ZHANG Zhengwei, BAI Wanjin. Finite element analysis of milling deformation of thin-walled aerospace monolithic structure parts[J]. Journal of Machine Design, 2011, 28(5): 92-96.

[8] 楼文明,吴建军,康永刚.薄壁工件铣削加工变形的预测[J].工具技术,2007,41(5):40-44.

LOU Wenming, WU Jianjun, KANG Yonggang. Investigation on prediction method of surface deformation of thin-walled workpiece in peripheral milling[J]. Tool Engineering, 2007, 41(5): 40-44.

[9] 成群林.航空整体结构件切削加工过程的数值模拟与实验研究[D].杭州:浙江大学,2006.

CHENG Qunlin. Research on finite element simulation and experiment in machining aerospace monolithic component[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.

[10] 孙杰,柯映林.残余应力对航空整体结构件加工变形的影响分析[J].机械工程学报,2005,41(2):117-122.

SUN Jie, KE Yinglin. Study on machining distortion of unitization airframe due to residual stress[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(2): 117-122.

[11] 唐志涛.航空铝合金残余应力及切削加工变形研究[D].济南:山东大学,2008.

TANG Zhitao. Study on residual stress and machining deformation of aerospace aluminum alloy[D]. Ji'nan: Shandong University, 2008.

[12] 白万金.航空薄壁件精密铣削加工变形的预测理论及方法研究[D].杭州:浙江大学,2008.

BAI Wanjin. Study on deformation prediction theory and methods of the aerospace thin-walled components during precision milling process[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.

通讯作者:房丰洲,教授,研究方向为超精密设计、加工与检测, E-mail: fzfang@tju.edu.cn.

(责编 逸飞)