

Ti6Al4V 零件铣削加工表面等效残余应力 与作用深度的测量

孟龙晖, 杨吟飞, 何宁, 赵威

(南京航空航天大学, 江苏 南京 210016)

摘要: 为了预测 Ti6Al4V 零件因铣削加工所致表面残余应力而引起的变形, 介绍了一种测量表面等效残余应力及其作用深度的方法。通过对被加工面的背面进行两次腐蚀剥层的操作, 使得零件的厚度和中性层的位置发生变化, 测量此过程中零件挠度和表面应变的变化, 进而计算得到铣削加工引起的零件表面等效残余应力及其作用深度值。通过有限元分析验证, 发现有限元计算得到的零件挠度和应变的变化与实际测量值非常吻合, 因此可以断定该方法得到的结果是正确的。其可以正确评估铣削加工引起的表面残余应力性质和大小并能准确预测零件铣削加工后因表面残余应力而引起的工件的变形量, 从而可以预测零件是否满足精度要求。

关键词: 残余应力; 腐蚀; 有限元分析; X 射线衍射

中图分类号: TH161

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)01-0213-06

金属切削加工是一个伴随着高温、高压、高应变率的金属塑性大变形过程。热应力和相变等多因素的综合作用^[1,2], 会在已加工表面层上产生随深度变化的残余应力, 其在工件表面的分布较浅, 一般不超过 0.2 mm, 但在深度方向上有着较高的变化率, 其值的精确测量有一定的困难。

钛合金材料由于自身密度低、比强度高、耐腐蚀、耐高温等诸多方面的优点, 目前在航空领域应用较为广泛^[3,4]。其表面由于切削加工而产生的残余应力的性质和大小是工件已加工表面质量的重要标志之一, 特别是刚性较弱的薄壁件, 会严重影响其形状和尺寸精度^[5], 甚至还会影响到材料的耐腐蚀性能以及疲劳寿命^[6,7], 从而最终影响到零件的服役性能。数控切削加工变形问题是自动化制造领域的瓶颈问题, 切削过程的复杂性及引起变形的多因素性使加工变形问题很难得到精确的解析解^[8]。因此, 研究加工表面残余应力对保证零件的尺寸精度和表面质量有重要意义。

残余应力的测试技术开始于 20 世纪 30 年代, 发展至今形成了数十种测量方法^[9]。针对切削加工表面残余应力的特征, 目前其主要测量方法为腐蚀剥层结合 X 射线衍射法^[10,11]。由于在深度方向其应力值的变化梯度较大, 因此若想较准确测量其在深度方向的变化趋势, 必须对应力层分多次进行剥层。由于整个应

力层很薄, 因此对每次腐蚀去除的材料层的厚度要求很高, 即每次剥层去除的材料层必须足够薄才能较精确测得应力随深度的变化, 同时必须考虑每次剥层后部分应力释放引起的新表层的应力的变化, 必须对 X 射线衍射法测得的新表层的应力值进行相应的修正才能得到正确的初始应力值^[12-15]。因此表面残余应力的测量是一项工作量较大且繁琐的任务。同时由于 X 射线应力仪的价格较为昂贵, 目前其普及使用还存在一定的困难。尽管本文作者在文献^[16-18]中提供了一种基于挠度变化的表面残余应力测量方法, 其所需的设备价格较低廉, 但是其缺点也很明显, 即其只提供了表面铣刀进给方向残余应力的测量方法, 而未提供铣刀轴向残余应力的测量方法, 同时其测量过程也是分多次腐蚀剥层, 工作量同样较大, 测量过程繁琐。

本研究提供了一种基于挠度和应变变化同时测量 Ti6Al4V 零件表面铣刀进给方向和轴向的等效残余应力及其作用深度的方法。在测量某一方向的等效残余应力时只需腐蚀去除材料层两次即可, 且对去除材料层的厚度没有很高的要求, 其工作量大大减少, 在操作上也较为简便。经有限元验证其测量精度很高, 其对评估铣削加工引起的表面残余应力的性质和大小以及预测零件加工后的变形量具有重要意义。

收稿日期: 2015-12-19

基金项目: 国家自然科学基金 (51405226); 国防技术基础科研项目 (J1520130001)

作者简介: 孟龙晖, 男, 1985 年生, 博士生, 南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016, 电话: 025-84892502, E-mail: menglonghui@nuaa.edu.cn

1 零件加工方式

通过线切割得到的 Ti6Al4V 条状零件如图 1a 所示。其尺寸为：长度 $L_0=170\text{ mm}$ ，宽度 $b_0=20\text{ mm}$ ，厚度 $H_0=6\text{ mm}$ 。为消除零件自身内应力对后期测量结果的影响，首先对其进行退火处理，以去除其自身绝大部分内应力。退火方法为：在真空炉中加热到 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 保持 2 h 后，随炉冷却到室温。

采用直径为 11 mm 的四刃圆柱铣刀进行侧铣加工，零件的装夹和切削方式如图 2 所示。

对零件分 4 次进行侧铣加工，最后一次铣削加工所用参数为：切削速度 $v_c=50\text{ m/min}$ ，每齿进给量 $f_z=0.02\text{ mm/z}$ ，径向切深 $a_e=0.5\text{ mm}$ ，轴向切深 $a_p=20\text{ mm}$ ，最终得到的零件其加工部分的剩余厚度为 1.5 mm。下文中在被加工零件上将铣刀的进给方向定义为 X 向，铣刀轴向定义为 Z 向，加工完后零件的形状以及零件方向的定义如图 1b 所示。

加工完成后测得零件两头夹持未加工部分的长度约为 20 mm，后期测量挠度变化时选取中间长度为 120 mm 的已加工部分。

2 测量原理

2.1 切削方向 (X 向) 残余应力测量原理

设定零件长度为 L ，厚度为 H ，零件的中性层处于零件几何中间位置，即中性层的厚度为 $H/2$ 。

通过激光位移传感器扫描零件的被加工面而得到零件的初始挠度 V_0 ，对铣削加工面的背面进行剥层去除材料的操作，第 1 次去除材料层的厚度为 Δh_1 ，由于中性层始终在零件的几何中间的位置，因此第 1 次剥层后中性层会向远离去除材料层的方向移动 $\Delta h_1/2$ ，如图 3 所示。



图 1 零件加工前后

Fig.1 Workpiece before and after machining: (a) unmachined workpiece and (b) machined workpiece

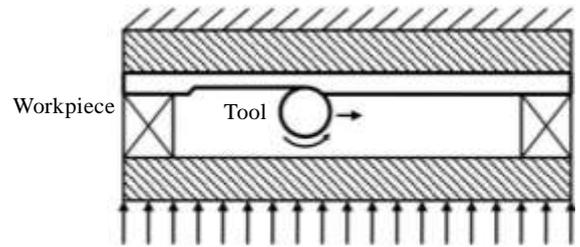


图 2 零件装夹和切削方式示意图

Fig.2 Sketch diagram of the clamping and machining method

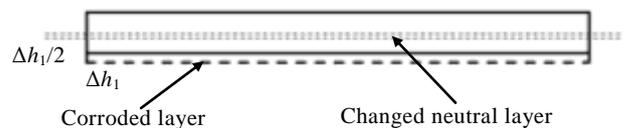


图 3 零件被腐蚀剥层后中性层位置发生变化的示意图

Fig.3 Sketch diagram of the changed position of the neutral layer after removing the material layer

通过测量，剥层后零件被加工面的挠度为 V_1 ，通过求两条曲线之差进而可以得到第 1 次剥层去除材料引起的零件的挠度变化为 $\Delta V_1=V_1-V_0$ ，如图 4 所示。

假设铣削加工引起的零件表面 X 向的等效残余应力为 σ_1 ，作用深度为 h_1 ，以上在对零件的加工面的背面进行剥层去除材料的过程中，被加工面的残余应力层并未受到任何影响。因此可以判断零件挠度的变化 ΔV_1 是由于零件的弯矩和二次截面矩的变化而引起的。而零件的弯矩的变化是由于零件中性层的位置的变化而引起，二次截面矩的变化是由于零件横截面厚度的变化而引起，在对零件进行剥层去除材料之前，零件受到的 X 向的弯矩 M_0 可以表示为：

$$M_0 = \sigma_1 b h_1 (H - h_1) / 2 \tag{1}$$

其中， b 为被测试样在 Z 向的宽度，在对零件进行剥层去除材料之前，零件垂直于 X 向的横截面的二次截面矩 I_0 可以表示为：

$$I_0 = b h^3 / 12 \tag{2}$$

根据挠度与弯矩之间关系式：

$$V = M L^2 / 8 E I \tag{3}$$

其中， M 为零件所受到的 X 向的弯矩， E 为零件材料的弹性模量， I 为零件垂直于 X 向的横截面的二次截面

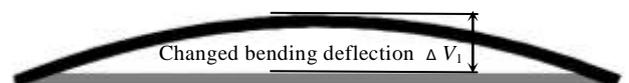


图 4 零件挠度变化示意图

Fig.4 Sketch diagram of the change of the workpiece's bending deflection

矩, 进而得到零件的初始挠度 V_0 , 可以表达为:

$$V_0 = \frac{M_0 L^2}{8EI_0} + V' = \frac{(3\sigma_1 h_1 (H - h_1)) L^2}{4Eh^3} + V' \quad (4)$$

其中, V' 为由于零件表面不够平整而引起的零件的挠度测量结果的变化。

在对零件被加工面的背面去除厚度为 Δh_1 的材料层后, 零件受到的 X 向的弯矩 M_1 以及垂直于 X 向的横截面的二次截面矩 I_1 可以分别表示为:

$$M_1 = \sigma_1 b h_1 (H - h_1 - \Delta h_1) / 2 \quad (5)$$

$$I_1 = b(H - \Delta h_1)^3 / 12 \quad (6)$$

因此第1次剥层去除材料后零件的挠度 V_1 可以表达为:

$$V_1 = \frac{(3\sigma_1 h_1 (H - h_1 - \Delta h_1)) L^2}{4E(H - \Delta h_1)^3} + V' \quad (7)$$

进而得到第1次剥层后零件的挠度的变化 ΔV_1 , 可以表达为:

$$\Delta V_1 = V_1 - V_0 = \frac{3\sigma_1 h_1 (H - h_1 - \Delta h_1) L^2}{4E(H - \Delta h_1)^3} - \frac{3\sigma_1 h_1 (H - h_1) L^2}{4EH^3} \quad (8)$$

继续对零件被加工面的背面进行第2次剥层去除材料, 第2次去除的材料层的厚度为 Δh_2 , 用激光位移传感器测得第2次剥层前后零件挠度的变化为 ΔV_2 , 第2次剥层去除材料后零件受到的 X 向的弯矩 M_2 以及垂直于 X 向的横截面的二次截面矩 I_2 , 可以分别表示为:

$$M_2 = \sigma_1 b h_1 (H - h_1 - \Delta h_1 - \Delta h_2) / 2 \quad (9)$$

$$I_2 = b(H - \Delta h_1 - \Delta h_2)^3 / 12 \quad (10)$$

同理, 可以将第2次剥层后零件挠度的变化 ΔV_2 表达为:

$$\Delta V_2 = V_2 - V_1 = \frac{3\sigma_1 h_1 (H - h_1 - \Delta h_1 - \Delta h_2) L^2}{4E(H - \Delta h_1 - \Delta h_2)^3} - \frac{3\sigma_1 h_1 (H - h_1 - \Delta h_1) L^2}{4E(H - \Delta h_1)^3} \quad (11)$$

式(8)和(11)中未知量只有 σ_1 和 h_1 , 其它全部都是已知量, 求得 ΔV_1 与 ΔV_2 的比值, 以消除未知量 σ_1 , 得到:

$$\frac{\Delta V_1}{\Delta V_2} = \frac{k_1(k_2 - h_1) - k_3(k_4 - h_1)}{k_5(k_6 - h_1) - k_1(k_2 - h_1)} \quad (12)$$

其中, $k_1 = \frac{1}{4(H - \Delta h_1)^3}$, $k_2 = H - \Delta h_1$, $k_3 = \frac{1}{4H^3}$,

$k_4 = H$, $k_5 = \frac{1}{4(H - \Delta h_1 - \Delta h_2)^3}$, $k_6 = H - \Delta h_1 - \Delta h_2$ 。

最终得到 X 向残余应力层的作用深度 h_1 , 可以表达为:

$$h_1 = \frac{\Delta V_2(k_1 k_2 - k_3 k_4) - \Delta V_1(k_5 k_6 - k_1 k_2)}{\Delta V_1(k_1 - k_5) - \Delta V_2(k_3 - k_1)} \quad (13)$$

进而根据式(8)可得到 X 向残余应力层的等效应力 σ_1 , 可以表达为:

$$\sigma_1 = \frac{\Delta V_1}{\frac{3h_1(H - h_1 - \Delta h_1)L^2}{4E(H - \Delta h_1)^3} - \frac{3h_1(H - h_1)L^2}{4EH^3}} \quad (14)$$

根据式(13)、(14)即可求得铣削加工引起的零件表面 X 向的等效残余应力 σ_1 及其作用深度 h_1 。

2.2 铣刀轴向(Z 向)残余应力测量原理

假设铣削加工引起的零件表面 Z 向(即铣刀轴向)的等效残余应力为 σ_2 , 作用深度为 h_2 , 由于零件在该方向的尺寸较短, 测量该方向的挠度的变化是很困难的, 因此这里选择基于应变变化的测量方法。

测得零件的初始厚度为 H' 。将应变片贴于被测试样的被加工面上, 用以测量在腐蚀去除被加工面背面材料的过程中, 被加工面在 Z 向的应变的变化。第1次去除材料层的深度为 $\Delta h_1'$, 去除材料后零件的中性层的位置会向远离去除材料层的方向移动 $\Delta h_1'/2$, 通过应变片测得第1次剥层去除材料前后应变的变化为 $\Delta \varepsilon_1$ 。

在对被测试样剥层去除材料前, 其受到的 Z 向的弯矩 M_0' 、被加工面至中性层的距离 y_0 以及垂直于 Z 向的横截面的二次截面矩 I_0' 分别为:

$$M_0' = \sigma_2 b' h_2 (H' - h_2) / 2 \quad (15)$$

$$y_0 = H' / 2 \quad (16)$$

$$I_0' = b' H'^3 / 12 \quad (17)$$

其中, b' 为被测试样在 X 向的宽度。在第1次剥层去除材料后, 被测试样受到的 Z 向的弯矩 M_1' 、被加工面至中性层的距离 y_1 以及垂直于 Z 向的横截面的二次截面矩 I_1' 分别为:

$$M_1' = \sigma_2 b' h_2 (H' - h_2 - \Delta h_1') / 2 \quad (18)$$

$$y_1 = (H' - \Delta h_1') / 2 \quad (19)$$

$$I_1' = b' (H' - \Delta h_1')^3 / 12 \quad (20)$$

根据应变与零件内弯矩的关系:

$$\varepsilon = \frac{M' y}{EI'} \quad (21)$$

其中, M' 为零件所受到的 Z 向的弯矩, y 为被加工面至中性层的距离, 即零件厚度的一半, E 为零件材料的弹性模量, I' 为零件垂直于 Z 向的横截面的二次截面矩, 进而得到应变片测得的第1次剥层去除材料前后应变的变化为 $\Delta \varepsilon_1$, 可以表示为:

$$\Delta \varepsilon_1 = \frac{M_1' y_1}{EI_1'} - \frac{M_0' y_0}{EI_0'} = \frac{3\sigma_2 h_2 (H' - h_2 - \Delta h_1')}{E(H' - \Delta h_1')^2} - \frac{3\sigma_2 h_2 (H' - h_2)}{EH'^2} \quad (22)$$

对被测试样加工面的背面进行第2次剥层去除材

料, 第 2 次去除材料层的深度为 $\Delta h_2'$ 。在第 2 次剥层去除材料后零件的内弯矩 M_2' , 测量点至中性层的距离 y_2 以及垂直于 Z 向的横截面的二次截面矩 I_2' 分别为:

$$M_2' = \sigma_2 b' h_2 (H' - h_2 - \Delta h_1' - \Delta h_2') / 2 \quad (23)$$

$$y_2 = (H' - \Delta h_1' - \Delta h_2') / 2 \quad (24)$$

$$I_2' = b' (H' - \Delta h_1' - \Delta h_2')^3 / 12 \quad (25)$$

第 2 次剥层去除材料后用应变片测得的应变的变化 $\Delta \varepsilon_2$ 可以表示为:

$$\Delta \varepsilon_2 = \frac{M_2' y_2}{E I_2'} - \frac{M_1' y_1}{E I_1'} = \frac{3 \sigma_2 h_2 (H' - h_2 - \Delta h_1' - \Delta h_2')}{E (H' - \Delta h_1' - \Delta h_2')^2} - \frac{3 \sigma_2 h_1 (H' - h_1 - \Delta h_1')}{E (H' - \Delta h_1')^2} \quad (26)$$

式 (22)、(26) 中, 只有 σ_2 和 h_2 为未知量, 其它都是已知量, 求得 $\Delta \varepsilon_1$ 与 $\Delta \varepsilon_2$ 的比值, 以消除未知量 σ_2 , 得到:

$$\frac{\Delta \varepsilon_1}{\Delta \varepsilon_2} = \frac{k_7 (k_8 - h_2) - k_9 (k_{10} - h_2)}{k_{11} (k_{12} - h_2) - k_7 (k_8 - h_2)} \quad (27)$$

其中, $k_7 = \frac{1}{(H' - \Delta h_1')^2}$, $k_8 = H' - \Delta h_1'$, $k_9 = \frac{1}{H'^2}$, $k_{10} = H'$, $k_{11} = \frac{1}{(H' - \Delta h_1' - \Delta h_2')^2}$, $k_{12} = H' - \Delta h_1' - \Delta h_2'$ 。

最终得到 Z 向残余应力层的作用深度 h_2 , 可以表达为:

$$h_2 = \frac{\Delta \varepsilon_2 (k_7 k_8 - k_9 k_{10}) - \Delta \varepsilon_1 (k_{11} k_{12} - k_7 k_8)}{\Delta \varepsilon_1 (k_7 - k_{11}) - \Delta \varepsilon_2 (k_9 - k_7)} \quad (28)$$

根据式 (22) 可以得到 Z 向残余应力层的等效应力 σ_2 , 可以表达为:

$$\sigma_2 = \frac{\Delta \varepsilon_1}{\frac{3 h_2 (H' - h_2 - \Delta h_1')}{E (H' - \Delta h_1')^2} - \frac{3 h_2 (H' - h_2)}{E H'^2}} \quad (29)$$

根据式 (28)、(29) 即可求得铣削加工引起的零件表面 Z 向的等效残余应力 σ_2 及其作用深度 h_2 。

3 实验

3.1 X 向残余应力的测量

将零件的被加工面用 704 硅胶进行密封保护, 采用文献[16]所提供的化铣方法对零件被加工面的背面进行化铣剥层去除材料。由于铣削加工引起的零件表面残余应力层的厚度不超过 0.2 mm^[16], 因此为了保护残余应力层, 必须保证剥层去除材料后零件的最终厚度不少于 0.2 mm。

对零件被加工面的背面分两次化铣剥层去除材料, 每去除一层材料后去除表面的硅胶, 用激光位移传感器扫描零件被加工面以测量零件挠度的变化, 如图 5 所示。



图 5 利用激光位移传感器测量零件的挠度

Fig.5 Measurement of the workpiece's bending deflection by laser displacement sensor

第 1 次剥层去除材料后, 用测厚规测得去除的材料层厚度为 $\Delta h_1=0.472$ mm, 用激光位移传感器测得其挠度的变化为 $\Delta V_1=0.246$ mm, 如图 6 所示。

用同样的方法, 对零件进行第 2 次剥层去除材料, 测量所去除材料层的厚度以及零件挠度的变化, 得到第 2 次去除材料层的厚度和零件挠度的变化分别为 $\Delta h_2=0.52$ mm, $\Delta V_2=3.60$ mm。

根据以上测量值, 结合式 (13)、(14), 最终计算得 X 向残余应力层的作用深度为 $h_1=60$ μm 、等效应力 $\sigma_1=-63$ MPa。

3.2 Z 向残余应力的测量

考虑到测量的方便性, 首先将零件从 Z 向用线切割割断, 并得到测量试样, 如图 7 所示。

将应变片贴于测量试样的被加工面, 用以测量 Z 向的应变, 如图 8 所示。同时考虑到在实验过程中环境温度的变化对于测量结果的影响, 采用半桥连接法, 运用温度补偿片对实验过程中室温的变化进行补偿。

将测量试样贴应变片的一面用 704 硅胶进行密封保护, 并对其背面采用与之前相同的化铣方法进行化

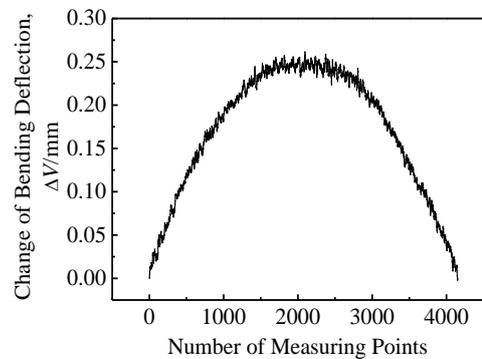


图 6 利用激光位移传感器测得零件挠度的变化

Fig.6 Change of the workpiece's bending deflection measured by laser displacement sensor

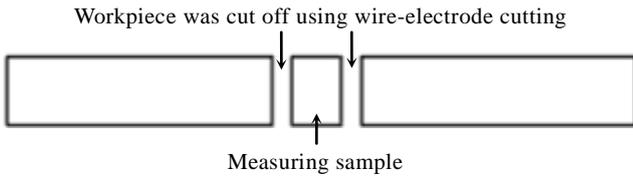


图 7 用线切割割断零件示意图

Fig.7 Sketch diagram of cutting the workpiece using wire-electrode cutting

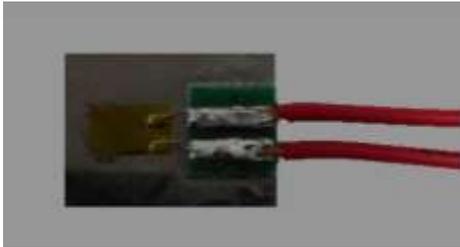


图 8 利用应变片测量试样的应变

Fig.8 Measurement of the strains on the sample by strain gauge

铣剥层去除材料，通过应变片测得腐蚀剥层后被加工面应变的变化。

最终测得两次去除的材料层的厚度分别为 $\Delta h_3=0.42\text{ mm}$ ， $\Delta h_4=0.37\text{ mm}$ ，两次腐蚀剥层后应变片测得的应变的变化分别为 17×10^{-6} ， 34×10^{-6} ，结合式 (26)、(27) 计算得到作用深度为 $h_2=43\text{ }\mu\text{m}$ 、等效应力 $\sigma_2=-46\text{ MPa}$ 。

4 有限元验证

为验证上述求得的结果的正确性，在有限元软件 Abaqus 6.10 中根据零件的实际尺寸进行建模，并将求得结果代入模型，将计算结果与实际测得的挠度和应变的变化进行对比。

首先验证 X 向的表面残余应力。将测得的 X 向残余应力层的作用深度为 $h_1=60\text{ }\mu\text{m}$ 、等效应力 $\sigma_1=-63\text{ MPa}$ 施加给模型，并根据两次剥层去除的材料层的厚度，运用“生死单元”技术去除模型相应的网格部分，以模拟实际实验中去除材料的过程。有限元计算得到两次剥层零件的挠度变化分别为 0.245，3.611 mm，与实际测得值相比差别分别为 0.4%，0.3%。有限元验证模型如图 9 所示。

再验证 Z 向的表面残余应力。同样根据零件被割断后得到的测量试样的实际尺寸进行建模，将计算得到的结果施加给模型，并运用“生死单元技术”去除模型相应的网格部分以模拟零件实际被腐蚀去除材料

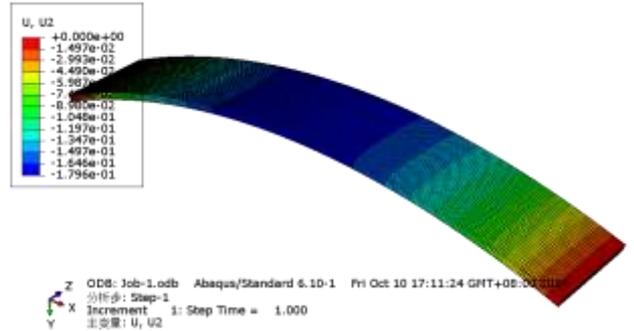


图 9 X 向等效残余应力有限元验证模型

Fig.9 Finite element model for validating the equivalent residual stress in X direction

的过程。有限元计算得到两次去除材料后零件被加工面的应变的变化与实际测得值相比差别分别为 0.2%，0.18%。有限元验证模型如图 10 所示。

可见有限元计算值与实际测得值是非常吻合的，其微小的差别主要归因于模型网格划分不够细致所导致。

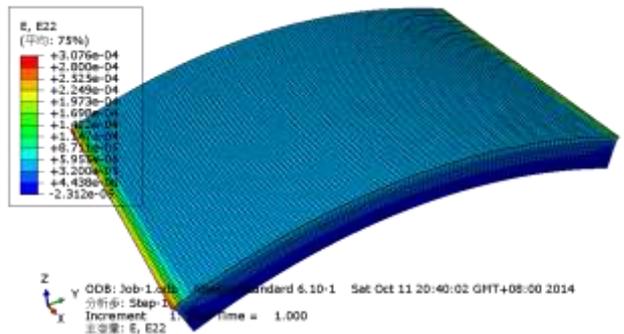


图 10 Z 向等效残余应力有限元验证模型

Fig.10 Finite element model for validating the equivalent residual stress in Z direction

5 结论

1) 在分别计算铣削加工引起的 X 向和 Z 向的等效残余应力及其作用深度过程中，只需分别对零件被加工面的背面腐蚀剥层两次即可。分别测量每次腐蚀后零件加工面的挠度和应变的变化，通过计算得到的等效残余应力及其等效作用深度可以预测零件因铣削加工表面残余应力引起的零件的变形量。

2) 在本研究所采用的切削参数和切削方式下，Ti6Al4V 零件表面的残余应力在 X 向和 Z 向上均呈现压应力状态。在压应力的数值上，X 向要大于 Z 向；在作用深度上，X 向也同样大于 Z 向。

3) 将有限元计算的结果与实验测的结果进行对比, 发现两者非常吻合, 可以验证本研究所提出的计算表面等效残余应力及其作用深度的方法是正确的, 计算结果是准确的。

参考文献 References

- [1] Yu X X, Lau W S, Lee T C. *Tools Manufact*[J], 1997, 37 (10): 1525
- [2] Singh A, Agrawal A. *Journal of Materials Processing Technology* [J], 2015, 225: 195
- [3] Liu Chuan, Zhang Jianxun, Wu Bing *et al. Materials and Design*[J], 2012, 34: 609
- [4] Meng Longhui, He Ning, Yang Yinfei *et al. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*[J], 2014, 31(5): 508
- [5] Meng Longhui (孟龙晖), Yang Yinfei(杨吟飞), He Ning(何宁) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2016, 45(3): 617
- [6] Xiong Qingren(熊庆人), Li Weiwei (李为卫), Fu Anqing(付安庆) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(S2): 749
- [7] Ren X D, Zhan Q B, Yang H M, *et al. Materials & Design*[J], 2013, 44: 149
- [8] Wang Litao(王立涛), Xu Lingping(许玲评), Zhang Haitao(张海涛) *et al. Journal of Anhui Engineering Institute of Technology*(安徽工程科技学院学报)[J], 2004, 19(2): 36
- [9] Withers P J, Bhadeshia H. *Materials Science and Technology* [J], 2001, 17(4): 355
- [10] Jang D Y, Watkins T R, Kozaczek K J *et al. Wear*[J], 1996, 194(1): 168
- [11] Polatidis E, Frankel P, Wei J *et al. Journal of Nuclear Materials*[J], 2013, 432(1): 102
- [12] Hu Huanan(胡华南), Chen Chengzhou(陈澄洲). *Journal of South China University of Technology, Natural Science Edition*(华南理工大学学报, 自然科学版)[J], 1992, 20(4): 47
- [13] Meng Longhui(孟龙晖), He Ning(何宁), Yang Yinfei(杨吟飞) *et al. Journal of Harbin Institute of Technology*(哈尔滨工业大学学报)[J], 2015, 47(5): 71
- [14] Meng Longhui(孟龙晖), He Ning(何宁), Li Liang(李亮). *China Mechanical Engineering*(中国机械工程)[J], 2014, 25(19): 2583
- [15] Meng Longhui(孟龙晖), He Ning(何宁), Yang Yinfei(杨吟飞) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(10): 2381
- [16] Meng Longhui(孟龙晖), He Ning(何宁), Li Liang(李亮) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(8): 1991
- [17] Meng Longhui, He Ning, Li Liang *et al. Advanced Materials Research*[J], 2014, 996: 615
- [18] Meng L, Atli M, Yang Y *et al. Journal of Materials Research* [J], 2016, 31(14): 2076

Measurement of Equivalent Surface Residual Stresses and the Depth of Affected Layer on Milled Ti6Al4V Workpiece Surface

Meng Longhui, Yang Yinfei, He Ning, Zhao Wei

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to predict the deformations caused by surface residual stresses generated by milling of Ti6Al4V parts, a method for measuring the equivalent surface residual stresses and the effective depth was presented. The material in the surface opposite to the machined surface was removed twice; therefore, the thickness and the neutral layer of the workpiece were changed. Afterwards, the change of the bending deflections and the strains on the machined surface was measured, and then the equivalent surface residual stresses and the effective depth were calculated. FEA (finite element analysis) was used to validate the correctness of this method. The results calculated by FEA correspond well with those measured in the experiments. So it can be concluded that the results got from the method proposed in this paper are correct. It can be used to evaluate the surface residual stresses generated by milling and to predict the deformations caused by surface residual stresses, thereby forecasting whether the parts accuracy can meet the requirement.

Key words: residual stress; corrode; FEA (finite element analysis); X-ray diffraction (XRD)

Correspond author: Yang Yinfei, Ph. D., Lecturer, College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, P. R. China, Tel: 0086-25-84892502, E-mail: yyfgoat@nuaa.edu.cn