doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.05.012

利用 FEM 修正法测量 Ti6Al4V 管件表面残余应力

孟龙晖, 何 宁, 杨吟飞, 赵 威

(南京航空航天大学 机电学院, 210016 南京)

摘 要: 为精确测量车削加工钛合金薄壁管件引起的表面残余应力,综合考虑测量精度、可操作性以及节约材料等因素,运用有限元法(FEM)分析确定零件合适的轴向长度,结果表明:当管件的轴向长度与外径比值 $\lambda \geqslant 1.11$ 时,其边缘效应对于测量结果的影响可以忽略不计. 为对零件剥层后新表面应力值变化进行补偿,运用 FEM 修正法对 X 射线法测得的剥层后表面应力值进行修正,测量结果表明:Ti6Al4V 管件车削加工引起的表面残余应力在轴向和切向上均呈压应力状态,切向应力高于轴向应力,深度为 60 μm 时,两个方向的残余应力都已基本趋于 0. 表明该修正方法计算简单,其修正精度明显高于传统修正方法,可以广泛运用于实际表面加工残余应力的测量过程.

关键词: 残余应力;腐蚀;有限元;X 射线;系数修正

中图分类号: TH161 **文献标志码**: A **文章编号**: 0367-6234(2015)05-0071-05

Application of FEM correction to measuring the surface residual stresses generated by turning Ti6Al4V tube parts

MEMG Longhui, HE Ning, YANG Yinfei, ZHAO Wei

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 210016 Nanjing, China)

Abstract: When measuring the surface residual stresses generated by turning Ti6Al4V tube parts, considering the accuracy, convenience of the measurements and material saving, an appropriate length of the tube was chosen based on the FEM result. When the ratio of the length to the external diameter reaches $\lambda \geqslant 50/45 = 1.11$, the edge effect to the accuracy of the measurements can be neglected. In order to compensate the changes of the residual stresses caused by layer removal, the FEM correction method was used to correct the stress values got by XRD method, and the results revealed that the surface residual stresses generated by turning in both cutting and normal directions were compressive, the magnitude of the residual stress in the cutting direction was larger than that in the normal direction, at the depth of 60 μm, the residual stresses in both directions reduced nearly to 0. The measuring process has revealed that the computation is simple, as proven by FEM, the accuracy of the FEM correction method is much higher than that of the traditional correction method, so it can be applied in practice.

Keywords: residual stress; corrode; FEM; X-ray diffraction (XRD); coefficient correction

钛合金材料具有密度低、比强度高、耐腐蚀、耐高温诸多等优点,在航空领域应用较为广泛[1]. 其表面加工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[2],会严重影响工件的形状、尺寸精度以及服役性能[3].残余应力的检测分为有损检测和无损检测两大类[4].有损检测方法主要有钻孔法、盲孔法、取条法、切槽法、剥层法等, 目前应用较多的是钻孔法[5].无损检测方法主要有 X 射线法、中子衍射法、同步衍射法、超声波法、电子散斑干涉法和磁性法,其中 X 射线法的工程应用最为广泛[6].针对表面加工残余应力自身的特点,目前主要采用 X 射线法结合剥层进行测量[7].由于剥层后,新表层的应力值会发生一

收稿日期: 2014-07-21.

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20123218120025);国防技术基础科研项目(J1520130001);中央高校基本科研业务费专项资金(NS2012011).

作者简介: 孟龙晖(1985—),男,博士研究生;
何 宁(1959—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 孟龙晖,huihui77585@126.com.

定的变化,刚性越弱的薄壁件,应力值的变化越大,因此需将 X 射线法测得的结果做进一步的修正补偿.

Moore 等[8]提出的管状零件内应力修正的 M&E 修正法计算过于复杂,且对零件的尺寸以及残余应力的性质都有较为严格的要求,在某些场合其精度还达不到工业上的需求,Savaria 等[9]提出的修正方法仅仅局限于局部剥层,且其并未考虑边缘效应.

本文在上述研究的基础上提出一种有限元(FEM)修正方法, 运用 "生死单元"技术模拟应力层被腐蚀剥层的过程,根据此过程中模型内残余应力发生的变化计算修正系数,对测得的应力进行修正补偿. FEM 修正方法比其他传统修正方法计算简单,对零件的尺寸没有过于苛刻的要求,其修正精度明显高于传统修正方法.

1　管件长度的 FEM 验证

由于边缘效应会严重影响到测量结果,因此零件的轴向长度越长对提高测量精度越有利,但是从实验的可操作性以及节约材料方面考虑,零件的轴向长度偏短为宜.综合考虑上述问题,这里选用 FEM 分析确定零件合适的轴向长度.

在 Abaqus 软件中根据实际零件建模,取外径 45 mm,内径 43 mm.根据 Ti6Al4V 材料的特性,取弹性模量 108 GPa,泊松比 0.34,在将加工残余应力逐层释放的过程中,零件承受的内应力远没有达到材料的弹性极限,因此无需设置模型的塑性参数.文献[2]指出,当管件轴向长度达到外径的 6 倍时,得到数据精度已经足够高.本文将模型的轴向长度设置为外径的 10 倍,即 450 mm,在圆筒的外壁施加随深度变化的残余应力.切向应力在直角坐标系中是不断变化的,属于不规则残余应力,需通过编写应力文件并将其导入模型中实现应力的施加.

根据表面残余应力自身的特点,将模型的残余应力层深度设置为 0.2 mm,并将应力层平均分成 10 份,即每层的厚度为 20 μm. 实际实验中主要关注轴向和切向的残余应力,因此在 FEM 模型中也主要施加这两个方向的应力.为便于施加应力,设定在任何一层内,残余应力的值在柱坐标系中保持一致,在应力文件中单元的应力值由其高斯积分点坐标值来确定.

给模型施加随深度变化的应力(如图 1).施加的应力与最终实验测得的应力并不一致,其只是作为验证零件长度而用的应力值,并不影响最终实验结果.

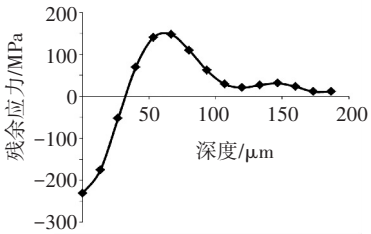


图 1　验证管零件长度时施加于模型的预应力

根据式(1),将柱坐标应力转换为 X、Y 方向的正应力 σ_{xx}、σ_{yy} 以及 XY 方向的切应力 τ_{xy},而 Z 方向即零件轴向的应力不需要变换,可以直接导入.

$$\begin{Bmatrix}\sigma_{xx}\\ \sigma_{yy}\\ \tau_{xy}\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}\cos^2\theta & \sin^2\theta & -\sin 2\theta\\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & \sin 2\theta\\ \frac{1}{2}\sin 2\theta & -\frac{1}{2}\sin 2\theta & \cos 2\theta\end{Bmatrix}\begin{Bmatrix}\sigma_{\rho}\\ \sigma_{\theta}\\ \tau_{\rho\theta}\end{Bmatrix}. \tag{1}$$

将 Matlab 计算得到的应力文件导入 Abaqus 中,其达到平衡后如图 2 所示. 可以看出,应力层内的残余应力值在深度方向上变化率很高,这是加工引起的表面残余应力的主要特征.

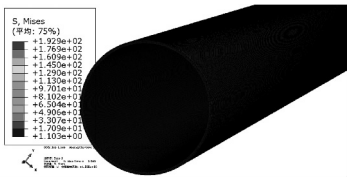


图 2　长模型施加预应力并自平衡后的效果图

运用 Abaqus 的"生死单元"技术将应力层单元由外向内逐层"杀死",以此来模拟实际实验中应力层被腐蚀剥层的过程.在每一层单元被"杀死"后,软件会计算模型内应力重新分布的过程,即实际实验每次剥层后,零件剩余部分的残余应力将会重新分布而达到一个新的平衡状态的现象.每去除一层单元并达到平衡后,记录模型外壁轴向中部的轴向和切向的应力值,在实际实验中,用 X 射线法测量时测量点也必须选在零件轴向中部位置,以减少边缘效应对测量结果的影响.

上述模型得到的数据精度较高,但是缺点很明显:其轴向太长,在实际操作中存在诸多不便以及浪费材料现象.利用 FEM 分析确定零件合适的轴向长度.运用 Python 语言对 Abaqus 进行二次开发,保持模型横截面始终一致,轴向初始长度设定为 20 mm,不断增加轴向长度并进行计算,并与上述模型进行对比,直到精度满足要求.设定模型的应力值相差不超过 0.5 MPa 为满足条件.程序流程图如图 3 所示.

最终结果表明: 轴向长度达到 50 mm 时已满足要求.由此得出结论: 在测量上述截面形状的

零件表面残余应力时，若取轴向长度为 50 mm，其精度是可靠的，是综合考虑测量精度、操作方便以及节约材料的结果.

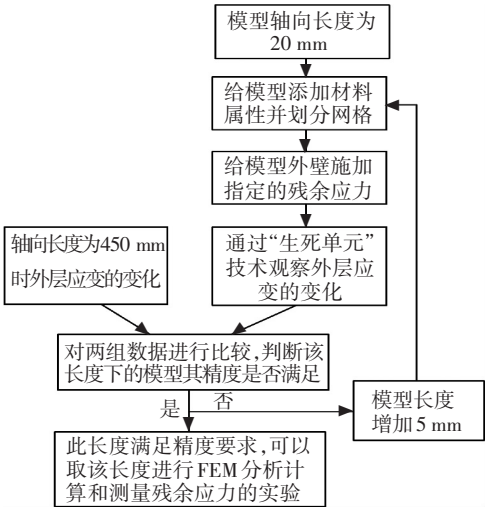
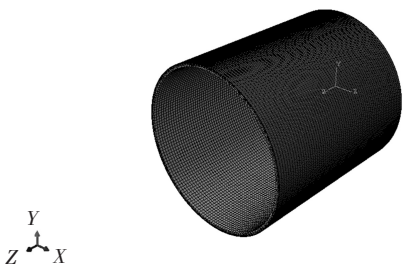


图 3　Python 二次开发流程图

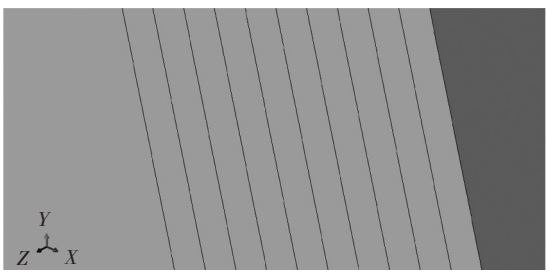
2　FEM 修正方法

2.1　修正原理

根据上述 FEM 分析结果，在软件 Abaqus 中建立模型，取外径为 45 mm，内径为 43 mm，轴向长度 50 mm，同样将应力层平均分成 10 份，每层的厚度为 20 μm，采用类型为 C3D8R 的网络进行划分，将网格的近似全局尺寸设置为 0.8，最终划分得到的网格数目为447 678.划分网格后的模型如图 4 所示.



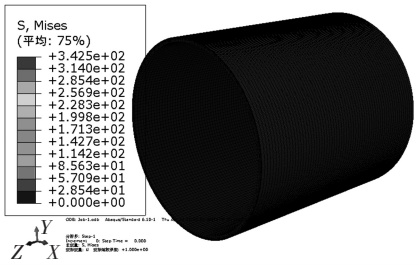
(a) 施加应力前完整模型



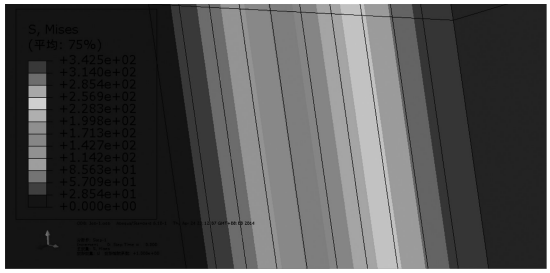
(b) 施加应力前局部模型

图 4　在 Abaqus 内建立的网格模型

给模型外壁应力层施加轴向和切向的残余应力，其达到自平衡后效果如图 5 所示.



(a) 自平衡状态下的完整模型



(b) 自平衡状态下的局部模型

图 5　短模型施加预定应力并自平衡后的效果图

利用 Abaqus 的“生死单元”技术，将模型的单元逐层“杀死”，记录每一单元层被“杀死”前后剩余各单元层的应力变化.

利用上述模型计算第 i 次剥层时从第 1 层(最内层) 到 $i-1$ 层(最外层) 的此剥层步骤的修正系数，修正系数以及应力计算公式如下：

$$(\Delta\sigma_h)_i = (\sigma_h)_i - (\sigma_h)_{i-1} = -K_{hi}\sigma m_i, \quad (2)$$

$$\sigma c_h = \sigma m_h + \sum_{i=1}^{h-1} K_{hi}\sigma m_i. \quad (3)$$

式中：i 为腐蚀剥层的次数，取值为自然数；h 为腐蚀剥层的深度；$(\Delta\sigma_h)_i$ 为第 $i-1$ 次和第 i 次腐蚀剥层后深度为 h 处的应力值之差；$(\sigma_h)_{i-1}$、$(\sigma_h)_i$ 分别为第 $i-1$ 次和第 i 次腐蚀剥层后深度为 h 处的应力值；σc_h 为最终修正后的深度为 h 处的残余应力值；σm_h 为剥层到深度为 h 处时零件的表面应力；K_{hi} 为相应的应力修正系数；σm_i 为第 i 次腐蚀剥层后用 X 射线法测得的表面应力.不同方向的修正系数并非一致，因此，需要分别进行计算.

经过多次 FEM 验证，最终得出结论：给同一模型施加不同的初始内应力，最终得到的修正系数 K_{hi} 一致，即修正系数并不依赖于模型的初始内应力，而只依赖于模型的尺寸和形状.因此在实验中运用此修正方法时，根据实际零件建模得到的修正系数才是有效的.

2.2　修正精度比较

对上述模型外壁施加一个随深度变化的残余应力，为验证此修正方法的正确性，该应力与上述计算修正系数时所施加的应力并非一致，待其自平衡后，记录模型外壁由表面到深度为 200 μm

处的切向和轴向的应力,其可以视作待测应力值.

运用 Abaqus 的"生死单元"技术,将外层单元逐层"杀死",每"杀死"20 μm 单元层,模型原有自平衡的状态将被打破,软件会计算其达到新平衡的状态,可以很明显观察到新表层的应力与原有应力相比已经发生了变化.此时模型新表层的应力值即为实际实验中 X 射线法测得的应力值.

根据 FEM 模型每去除一层单元后新表层的应力值,以及前面已计算得到的本模型的修正系数,对残余应力进行修正,并同时将 FEM 修正结果与 M&E 修正结果进行比较,结果如图 6 所示.

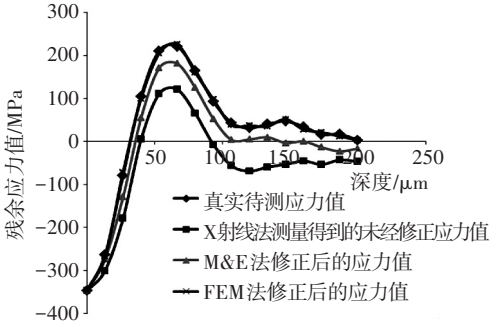


图 6　模型中残余应力的真实待测值、未经修正值以及两种修正方法得到的修正应力

由实际修正结果可以看出:未修正的应力值与真实应力值之间有较大的差别,经过 M&E 修正法修正后的应力值与真实应力值相对接近,但误差还是显而易见;运用 FEM 修正法修正后得到的应力值与真实应力值差别非常小,基本上是一致的;可见,FEM 修正法在精度上占有明显的优势.

3　实验过程

为避免零件自身内应力对测量结果的影响,在加工前需先进行退火处理,去除其原有的内应力.Ti6Al4V 材料的退火条件为:在真空炉中将其加热至 600 ℃,保持 2 h 后随炉冷却.对退火后的钛合金管的外表面进行车削加工,最后一次加工参数为:切削速度 v = 30 m/min,进给量 f = 0.05 mm/r,切削深度 d_p = 0.5 mm.测得零件的最终壁厚为 1 mm,外径为 45 mm.根据前期 FEM 分析结果,用线切割截取长度为 50 mm 的部分进行残余应力测量的实验,最终零件如图 7 所示.

选用 704 硅胶对零件内壁进行密封保护,用有机溶剂甲醛对零件表面进行超声清洗,去除表面的油污,保证腐蚀前工件表面的洁净.选用化铣方法对应力层进行腐蚀剥层的操作.钛合金化铣溶液选用 HF 作为腐蚀剂,其作用是加速钛合金的腐蚀溶解;选用 HNO_3 作为氧化剂,主要作用是抑制氢气的生成,提高化铣表面的光洁度;选用尿素作为添加剂,可在一定条件下提高化铣液寿命,并可减少黄烟(NO_2)的放出[10-12].

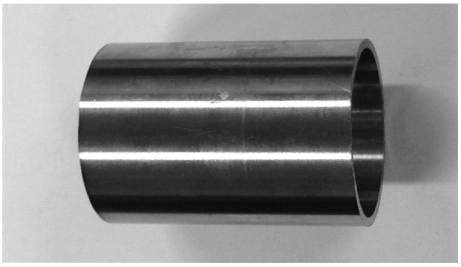


图 7　加工后的 Ti6Al4V 薄壁管状零件

将钛合金管放入化铣液中,缓慢搅拌化铣液,确保零件表面被均匀腐蚀,然后立即对其表面进行清洗.控制好每次腐蚀的时间,确保每次腐蚀的深度为 10 μm 左右.每腐蚀一层后用 X 射线法测量并记录零件外壁中部轴向和切向的残余应力值 $\sigma_{m_{iz}}$、$\sigma_{m_{it}}$.重复以上腐蚀剥层和测量的操作,直到测得的残余应力值稳定地趋于零,此时表面残余应力层已基本被腐蚀去除完毕.

在 Abaqus 中根据实际零件进行建模,并根据每次腐蚀剥层的深度对模型外壁进行分层.在模型上施加初始应力值,运用"生死单元"技术将外层单元逐层"杀死",记录每"杀死"一层单元后各层轴向和切向的应力值的变化,并根据公式(2)计算相应的修正系数 K_{hi}.根据 FEM 模型计算的修正系数 K_{hi},结合公式(3)对逐层腐蚀剥层后用 X 射线法测得的零件表层的应力值进行修正,最终得到外表面随深度变化加工残余应力如图 8 所示.

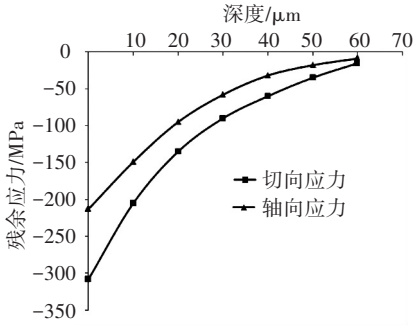


图 8　X 射线法结合 FEM 修正法测得的 Ti6Al4V 薄壁管件表面残余应力

可以看出,车削加工引起的钛合金零件表面残余应力在轴向和切向上均呈现压应力,切向应力在数值上要大于轴向应力.随着深度的变化,其应力值急剧减小,到达深度为60 μm处两个方向的应力值已趋于零,在实验中当继续腐蚀时发现测得的应力值仍然维持在 0 且不再有变化,说明

表面残余应力层的深度为60 μm左右.

4　FEM 修正法修正结果的验证

将测得的应力施加给根据实际零件建立的模型,并运用“生死单元”技术将模型的应力层逐层去除,每去除一应力层,模型的内应力重新分布后将其新表面的应力值与实际 X 射线法测的应力值进行对比,如图 9 所示.

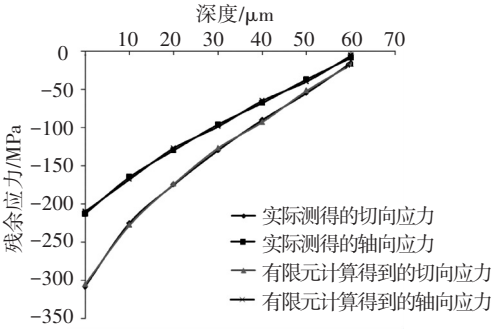


图 9　实际测得的应力值与 FEM 计算应力值的对比

由图 9 可知：X 射线法测量的残余应力值和 FEM 计算值均非常吻合,说明此修正方法的修正精度高,最大误差不超过 2 MPa,在实际工程中,是完全可以接受的.但实际测量中,用 X 射线法测量应力时,仪器自身会不可避免地引入部分误差[13],而 FEM 修正方法在 X 射线法测量结果的基础上进行修正,最终结果也会不可避免地引入部分误差.应力值未经修正而引入的误差比 X 射线应力仪自身引入的误差大很多,因此该修正方法在保证修正精度的基础上,将最终结果的总误差降到最低.

5　结　论

1)由 FEM 分析可知,在测量管状外壁残余应力时,对于不同管径的零件,当管的轴向长度与外径比值满足 $\lambda \geqslant 50/45 = 1.11$ 时,其边缘效应对于测量结果的影响已经可以忽略不计.

2)根据 FEM 模型计算修正系数 K_{hi} 时,若给同一模型施加不同的随深度变化的初始应力,最终得到的修正系数 K_{hi} 是一致的,即其修正系数 K_{hi} 只依赖于模型,而与初始应力没有关系.

3)运用 FEM 模型进行验证,与传统的 M&E 修正法相比,FEM 修正结果精度占有明显优势,且其计算远不及 M&E 修正法复杂.

4)通过 FEM 修正法对 X 射线法测得的 Ti6Al4V 薄壁管件车削加工表面残余应力进行修正,最终得到其轴向和切向的表面残余应力都呈压应力状态,且切向的残余压应力在在数值上高于轴向的残余压应力,在深度为 60 μm 处,两个方向的残余应力都已基本趋于 0.

参考文献

[1] 孟龙晖,何宁,李亮. TC4 管状零件内壁加工残余应力计算及其有限元分析[J]. 中国机械工程,2014,25(19):2583-2587.

[2] MENG L H, HE N, YANG Y F, et al. Method for Measuring residual stresses induced by boring in internal surface of tube and its validation with XRD method[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014,31(5):508-514.

[3] 徐骅, 金成哲. 车铣加工表面残余应力的研究[J]. 制造技术与机床, 2008 (1): 80-82.

[4] DAI F H, ZHANG B M, DU S Y. Three-dimensional finite element analysis of process-induced residual stress in resin transfer molding process[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008,15(2): 271-276.

[5] GONZALO O, GONZALO O, NAVAS V G, et al. Influence of the coating residual stresses on the tool wear [J]. Procedia Engineering, 2011, 19: 106-111.

[6] SEBASTIANI M, EBERL C, BEMPORAD E, et al. Depth-resolved residual stress analysis of thin coatings by a new FIB—DIC method[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528(27): 7901-7908.

[7] CARRERA E, RODRIGUEZ A, TALAMANTES J, et al. Measurement of residual stresses in cast aluminium engine blocks [J]. Journal of materials processing technology, 2007, 189(1): 206-210.

[8] MOORE M G, EVANS W P. Mathematical correction for stress in removed layers in X-ray diffraction residual stress analysis [R]. SAE Technical Paper, 1958, 580035. DOI:10.4271/580035.

[9] SAVARIA V, BRIDIER R, BOCHER P. Computation quantification and correction of the errors induced by layer removal for subsurface residual stress measurements[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2012, 64(1): 184-195.

[10] MENG L H, HE N, LI L, et al. Measurement of pre-self-balanced surface residual stresses induced by milling in titanium alloys and the FEM validation[C]// Advcanced Materials Research. Troyes: Trans Tech Publications Ltd, 2014: 996:615-621.

[11] 孟龙晖,何宁,李亮,等. TC4 零件铣削加工残余应力自平衡前值的测量及其有限元分析[J]. 稀有金属材料与工程,2008,43(8):1991-1996.

[12] 赵永岗, 张春刚, 王辉, 等. 化学铣切在钛合金加工中的研究及应用[J]. 表面技术, 2009 (6): 83-86.

[13] 马昌训, 吴运新, 郭俊康. X 射线衍射法测量铝合金残余应力及误差分析[J]. 热加工工艺, 2011 (24): 5-8.

(编辑　杨　波)