

TA19 钛合金车削表面非均匀残余应力场的构建方法

石耀闻¹,杨吟飞¹,丁小岑¹,鲍璐²

(1. 南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016; 2. 南京师范大学 数学科学学院,江苏 南京 210023)

摘要:为了表征车削加工表面残余应力的非均匀状态,提出一种残余应力场的非参数构建方法。采用 X 射线残余应力分析仪对断续车削表面的残余应力进行测量,利用局部线性地理加权回归方法建立表面应力分布的空间变系数模型,并通过残差分析方法将空间变系数模型与多项式模型和高斯模型的应力拟合结果进行比较。结果表明:局部线性地理加权回归方法建立的空间变系数模型拟合精度较高,适用于加工表面非均匀残余应力场的构建。

关键词:TA19 钛合金;切削加工表面;非均匀残余应力场;空间变系数模型;局部线性地理加权回归
中图分类号:TG506 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)03-0044-04

Construction Method of Non-uniform Residual Stress Field on TA19 Titanium Alloy Turning Surface

SHI Yaowen¹, YANG Yinfei¹, DING Xiaocen¹, BAO Lu²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. School of Mathematical Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: A non-parametric construction method of residual stress field was proposed to characterize the non-uniform state of residual stress on the turning surface. An XRD stress tester was applied to measure the residual stress of the intermittent turning surface. By local linear geographic weighted regression method, a spatial variable coefficient model of the surface stress distribution was established, and through the residual analysis, the fitting results of the spatial variable coefficient model with the polynomial model and the Gaussian model were compared. The results show that the spatial variable coefficient model established by the LL-GWR method has high fitting accuracy and is suitable for the construction of the non-uniform residual stress field on the machined surface.

Keywords: TA19 titanium alloy; machined surface; non-uniform residual stress field; spatially variable-coefficient models; local linear geographically weighted regression

0 引言

随着航空航天器性能要求的不断提高,越来越多的钛合金构件被采用。残余应力是物体不受外部载荷时内部自相平衡的应力场,表面残余应力会影响工程构件的疲劳寿命^[1]。准确地评估表面完整性有利于实现结构件高品质设计和制造,故需要更高精度的模型以研究表面残余应力的分布状况。在以往的研究中,通常以被测点残余应力取平均值的方式来考查工件的残余应力,或只研究工件上沿某一直线的应力分布,抑或是以极少数离散点的测量结果表征平面应力状态,很少有研究聚焦于平面残余应力场。LI X Y 等^[2]发现 7050-T7451 铝合金侧铣薄壁件表面残余应力不确定度较大,不同切削参数下分布规律并不一致。WANG F Y 等^[3]对 X316 不锈钢铣削表面应力进行了测量,发现在 30 mm×10 mm 的平面上测量数据有显著的波动,测量值与平均值相差最大达到 200 MPa,取平均值不足以表征其应力状态。故加工表面残余应力数值波

动性大且分布无明显规律的情况广泛存在。

应力场的构建方法从原理上可以分为参数方法和非参数方法。当应力服从某种分布(最常用的为多项式分布)时使用参数方法,如铝合金预拉伸板应力分布的裂纹柔度法^[4]测量与构建。当应力分布模型未知,或假设的分布模型与实际不符时,参数方法的拟合精度不高,而非参数方法由于其不需要任何参数假设,具有一定的优越性。空间变系数模型的局部线性地理加权回归^[5]方法属于非参数方法。空间变系数模型假设空间位置不同的测量数据之间是相互影响的,即回归参数不具一致性。空间变系数模型将数据的空间位置信息纳入模型,基于局部线性地理加权回归(local linear geographically weighted regression, LL-GWR)建立的空间变系数模型中各数据采样点上的回归系数函数不同,利用回归系数函数在各空间位置的估计值分析回归关系的空间变化特征,适用于在空间非均匀分布数据的处理^[6]。目前该方法在残余应力场的构建方面尚未有相关应用。

本文以 TA19 钛合金断续车削表面为研究对象,利用

基金项目:国家科技重大专项(2017-VII-0001-0094);国家自然科学基金项目(52075251)

第一作者简介:石耀闻(1994—),男,江苏徐州人,硕士研究生,研究方向为航空结构件加工表面完整性测量与分析。

X 射线衍射法获得加工表面残余应力数值,基于 LL-GWR 方法构建了非均匀残余应力的空间变系数模型,并通过残差分析探究其拟合效果。

1 试验

1.1 试验设置

试验所用材料为 TA19 钛合金,试样几何尺寸 $150\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 。TA19 钛合金材料的名义成分为 $\text{Ti}-6\text{Al}-2\text{Sn}-4\text{Zr}-2\text{Mo}-0.1\text{Si}$ 。试验件毛坯在退火处理后采用电火花线切割加工方式获得,样块经超声清洗后烘干备用。车削试验机床为 SK50P 卧式数控车床;刀片基体材料为硬质合金,表面涂层为 $\text{PVD}-\text{Al}_2\text{O}_3$,刀片为菱形刀片,菱形角度 35° ,刀尖圆角半径 0.8 mm ,前角 5° ;加工方式为断续端面车削,无冷却润滑;根据钛合金精密车削典型参数范围^[7-8],选取了切削参数:切削速度 30 m/min ,进给速度 0.15 mm/s ,背吃刀量 0.1 mm 。加工过程如图 1 所示。

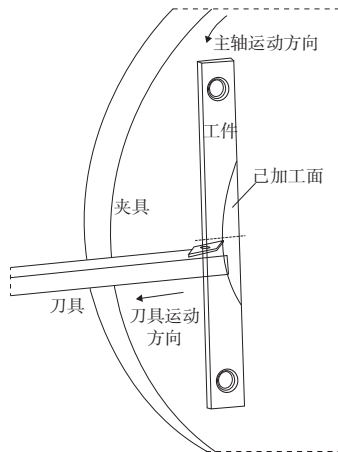


图 1 试验件加工示意图

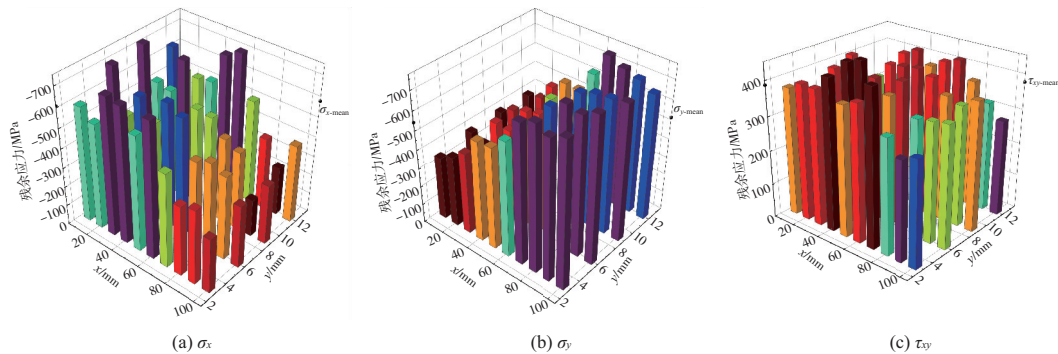


图 3 表面残余应力测量结果

表 1 测量结果统计数据 单位:MPa

项目	σ_x	σ_y	τ_{xy}
最小值	-727.0	-770.0	450.0
最大值	-190.0	-339.0	227.0
最大值-最小值	537.0	431.0	223.0
均值	-577.4	-512.3	376.4
标准差	141.7	140.6	45.5

使用 X 射线残余应力分析仪测定表面残余应力,工作电压 $U=30\text{ kV}$,电流 $I=1\text{ mA}$,靶材选用 V,特征射线选择 $K\alpha$,X 射线入射角度为 30° ,准直器直径为 1 mm ,测量晶面为 103。残余应力测量点以均布点阵形式排布,测量点为 4 行 10 列, x 方向间距 10 mm , y 方向间距 3 mm , $x=60\text{ mm}$ 位于试验件对称轴位置处,测量点排布如图 2 所示;测量数据包含 x 和 y 方向正应力以及 xy 面切应力。在平面应变的假设条件下,用上述 3 个应力分量表征表面残余应力状态。

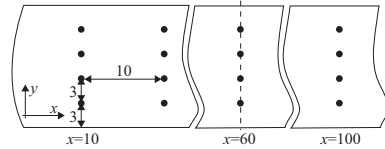


图 2 试验件表面残余应力测量点

1.2 结果与分析

同一批次 3 个试样,测量结果显示其分布状态相似,故以其中一试样为例。试样表面 x 和 y 两个方向的正应力 σ_x 和 σ_y 以及切削平面 xy 的切应力 τ_{xy} 的测量结果如图 3 所示。进行点的数据统计分析,相关统计数据如表 1 所示。 σ_x 、 σ_y 和 τ_{xy} 的均值分别为 -577.4 MPa 、 -512.3 MPa 、 376.4 MPa ,3 个应力分量有不同程度的波动。工件表面 x 向和 y 向的正应力数值离散度较大, σ_x 和 σ_y 的极差均超过 400 MPa ,标准差达到 140 MPa ,二者的离散水平近似一致。 xy 平面切应力数值 τ_{xy} 在切入切出段出现波动,极差为 223 MPa ,标准差 45.5 MPa ,总体离散度相对正应力较小。可见 TA19 钛合金断续车削表面残余应力是非均匀分布的,且 3 个应力分量的分布规律各不相同。

2 残余应力空间变系数模型构建

平面非均匀分布的匀残余应力空间变系数模型形式为

$$\sigma_i = \beta(x_i, y_i) + \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中: $\beta(x_i, y_i)$ 为表面坐标 (x_i, y_i) 处的未知函数; σ_i 代表在第 i 个测量点 (x_i, y_i) 处某一残余应力分量值; n 为实际测量点的个数; ε_i 为独立同分布的随机扰动误差。

假定空间位置为精准可测量的非随机变量,利用 LL-GWR 方法在目标点集 $\{(x_j, y_j)\}$ 进行局部线性地理加权

求解。加权最小二乘法的目标函数如下:

$$\operatorname{argmin}_{\theta} \sum_{i=1}^n \{ \sigma_i - [\beta(x_j, y_j) + \beta^{(x)}(x_j, y_j)(x_i - x_j) + \beta^{(y)}(x_j, y_j)(y_i - y_j)] \} K_h(d_{ij}) \quad (2)$$

式中: d_{ij} 代表 (x_i, y_i) 到 (x_j, y_j) 的距离; $\theta = \{\beta(x_j, y_j), \beta^{(x)}(x_j, y_j), \beta^{(y)}(x_j, y_j)\}$ 为待估计的多元函数; $\beta^{(x)}(x_j, y_j)$ 、 $\beta^{(y)}(x_j, y_j)$ 为 $\beta(x_j, y_j)$ 的偏导数。权重矩阵 K_h 为

$$K_h(d_{ij}) = \frac{1}{h} K\left(\frac{d_{ij}}{h}\right) \quad (3)$$

式中:核函数 $K(\cdot)$ 为高斯核函数 $G(x)$; h 表示光滑参数。

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{h}} \exp\left(-\frac{1}{2}x^2\right) \quad (4)$$

即

$$K_h(d_{ij}) = \frac{1}{\sqrt{h^3}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{d_{ij}}{h}\right)^2\right] \quad (5)$$

对式(2)求解得到各 β 在 (x_j, y_j) 的估计值

$$\hat{\beta}(x_j, y_j) = (X^T W(x_j, y_j) X)^{-1} X^T W(x_j, y_j) \sigma \quad (6)$$

式中: $W(x_j, y_j)$ 为在 (x_j, y_j) 点构造的一组权重系数 $w_i(x_j, y_j)$ ($i=1, 2, \dots, n$) 组成的对角矩阵。

$$w_i(x_j, y_j) = K_h(d_{ij}) \quad (7)$$

$$X(x_j, y_j) = \begin{bmatrix} 1 & x_1 - x_j & y_1 - y_j \\ 1 & x_2 - x_j & y_2 - y_j \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n - x_j & y_n - y_j \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \vdots \\ \sigma_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

在 (x_j, y_j) 处某一应力分量 σ 的估计值为

$$\hat{\sigma}_j = \hat{\beta}_1(x_j, y_j) + \hat{\beta}_2(x_j, y_j)(y_j - y_j) + \hat{\beta}_3(x_j, y_j)(y_j - y_j) \quad (10)$$

式中 $\hat{\beta}_m(x_j, y_j)$ 为向量 $\hat{\beta}(x_j, y_j)$ 的第 m 个分量, 即

$$\hat{\sigma}_j = \hat{\beta}_1(x_j, y_j) \quad (11)$$

进一步可得 LL-GWR 估计的残差为

$$\hat{\varepsilon} = \sigma - \hat{\sigma} \quad (12)$$

度量拟合优度的确定系数 R-square 为曲面预测值 \hat{y}_k 和采样数据均值 \bar{y} 之差的平方和与采样值 y_k 与采样数据均值 \bar{y} 之差平方和的比值:

$$R^2 = \frac{\sum_{k=1}^n (\hat{y}_k - \bar{y})^2}{\sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})^2} \quad (13)$$

3 结果与讨论

由空间变系数模型 LL-GWR 方法得到的残余应力数值模型如图 4 所示, 模型结果可直观且较为全面地展示车削表面残余应力的分布规律。

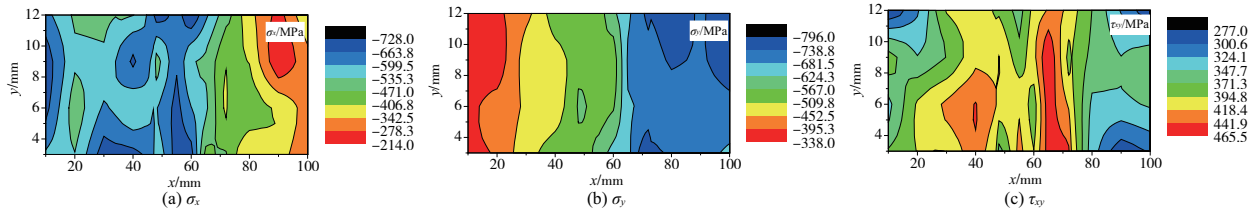


图 4 残余应力空间变系数模型结果

为了分析模型的拟合结果, 从模型的残差图及相关统计量如和方差 (sum of squares error, SSE)、方均根误差 (root mean square error, RMSE)、确定系数 (R-square) 等参数进行分析。SSE 和 RMSE 越小代表拟合效果越好,

R-square 取值范围为 $[0, 1]$, R-square 越大拟合效果越好。3 个残余应力分量拟合结果的残差分布情况如图 5 所示。由图 5 残差的分布可以发现残差的变化并没有明显的趋势, 说明模型回归关系正确。

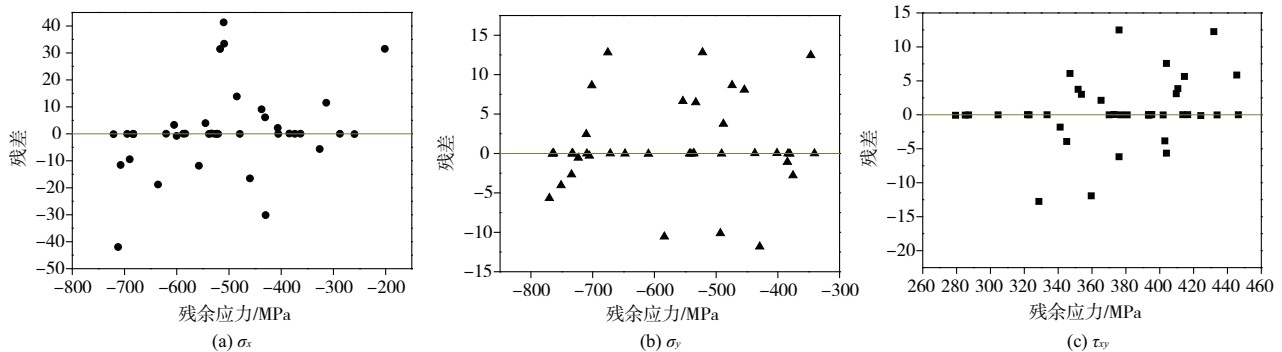


图 5 残余应力空间变系数模型结果残差散点图

为进一步说明本模型的有效性,将本模型拟合结果与两种常用参数方法高斯模型和多项式模型获得的结果进行比较。高斯函数模型为

$$f(x,y) = z_0 + A \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{x \cos \theta + y \sin \theta - x_c \cos \theta - y_c \sin \theta}{w_1} \right)^2 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{-x \sin \theta + y \cos \theta + x_c \sin \theta - y_c \cos \theta}{w_2} \right)^2 \right] \quad (14)$$

多项式模型形式为 PolyMN, M 和 N 为 ≤ 5 的自然数, 分别表示模型中 x 和 y 的最高阶数。在多项式模型中, 通过对各阶数组合得到的多项式模型的拟合结果进行残差分析, 其中拟合效果最好的为 Poly51, 表达式如下:

$$f(x,y) = p_{00} + p_{10}x + p_{01}y + p_{20}x^2 + p_{11}xy + p_{30}x^3 + p_{21}x^2y + p_{40}x^4 + p_{31}x^3y + p_{50}x^5 + p_{41}x^4y \quad (15)$$

3 种方法构建模型的统计结果如表 2 所示。

表 2 不同残余应力构建模型统计参数对比

应力	模型	SSE	RMSE/MPa	R-square
σ_x	高斯模型	2.70×10^5	90.56	0.649
	多项式模型	1.59×10^5	74.06	0.794
	LL-GWR	8.97×10^3	14.97	0.946
σ_y	高斯模型	5.62×10^5	41.29	0.928
	多项式模型	4.43×10^4	39.10	0.943
	LL-GWR	1.22×10^3	5.53	0.994
τ_{xy}	高斯模型	3.27×10^4	31.48	0.594
	多项式模型	3.18×10^4	33.15	0.605
	LL-GWR	1.37×10^3	5.86	0.948

由表 2 可知, 总体上 LL-GWR 方法在 3 个应力分量的评价标准上高于高斯模型和多项式模型。高斯模型和多项式模型中 σ_y 的拟合结果较好, R-square 达到了 0.9 以上, RMSE 均为 40 MPa 左右为相对较低的水平; 而与 σ_y 相比, 高斯模型和多项式模型的 σ_x 和 τ_{xy} 拟合精度较低, 仅为 0.6 左右。不同应力分量拟合结果的差异说明参数模型对数据本身的分布有要求, 在数据分布规律未知的情况下, 参数方法处理散乱数据点并不总能获得较好的结果。

LL-GWR 方法充分考虑了数据的空间非平稳性, 在处理数据随空间位置的变化而产生非均匀变化且无规律分布的情况时, 表现出了比高斯模型和多项式模型更小的残差。LL-GWR 模型中 3 个应力分量的拟合结果 R-square 均达到 0.94 以上, RMSE 均低于 15 MPa, 在各应力分量上都表现出较好的拟合效果。

4 结语

本文通过 X 射线残余应力分析仪获得了端面断续车削加工表面的残余应力数据并进行了分析与处理, 在此基础上利用空间变系数模型的 LL-GWR 方法对非均匀残余应力场进行构建, 得到了更加详细的表面应力数据, 主要结论如下:

1) 断续端面车削加工方式下表面应力分布波动性较大, 且 σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy} 分布规律明显不同, 对测量点应力取平均值的方式不能有效表征非均匀残余应力场的分布;

2) 残余应力空间变系数模型建立在测量数据的基础上, 且不需预设残余应力分布符合的数学模型, 适用于表面非均匀残余应力场的构建;

3) LL-GWR 方法构建的模型具有较高的精度, 能够较为准确地表征表面应力趋势, 且拟合精度优于高斯函数、多项式等参数方法。

参考文献:

- [1] YAO C F, LIN J N, WU D X, et al. Surface integrity and fatigue behavior when turning γ -TiAl alloy with optimized PVD-coated carbide inserts [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31(4):826-836.
- [2] LI X Y, YANG Y F, LI L, et al. Uncertainty quantification in machining deformation based on Bayesian network [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2020, 203:107113.
- [3] WANG F Y, MAO K M, WU S G, et al. Prediction of residual stress field in milling planes by establishing bivariate mathematical models [J]. MATEC Web of Conferences, 2017, 104:02021.
- [4] DONG F, YI Y P, HUANG S Q. Measuring internal residual stress in Al-Cu alloy forgings by crack compliance method with optimized parameters [J]. Journal of Central South University, 2020, 27(11):3163-3174.
- [5] 梅长林, 王宁. 近代回归分析方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [6] WANG N, MEI C L, YAN X D. Local linear estimation of spatially varying coefficient models: an improvement on the geographically weighted regression technique [J]. Environment and Planning A: Economy and Space, 2008, 40(4):986-1005.
- [7] ABBOD E, ATTIA H, SHI B, et al. Residual stresses and surface integrity of Ti-alloys during finish turning - guidelines for compressive residual stresses [J]. Procedia CIRP, 2016, 45:55-58.
- [8] 薛锴. 航空钛合金车削加工工艺试验研究 [J]. 工具技术, 2015, 49(5):44-47.

收稿日期: 2021-02-24