DOI: 10.3901/JME.2020.22.038

套孔工艺对深孔法测量残余应力精度的影响

赵美娟^{1,2} 陈 静^{1,3} 陈怀宁^{1,3}

(1. 中国科学院金属研究所 沈阳 110016;

2. 中国科学技术大学材料科学与工程学院 沈阳 110016;

3. 中国科学院核用材料与安全评价重点实验室 沈阳 110016)

摘要: 深孔法是目前三维残余应力测量方法中精度较高、破坏性较小、易于操作的一种技术,相比于中子衍射法,测量成本相对较低,正受到越来越多的关注。针对轴向套孔工艺能准确测量应力范围有限的问题,为提高该方法在高应力与复杂应力场中的测量精度、优化测量工艺,提出环向套孔工艺。以 Q345 低合金钢为研究对象,采用有限元分析方法分别建立两种套孔工艺计算模型,对比分析两种套孔工艺在不同应力状态下模拟计算值与实际值的误差分布情况。结果表明,两种套孔工艺均适用于弹性应力场的精确测量,但在应力较大时(超过屈服强度 50%),采用环向套孔工艺得到的应力计算结果精度更高、且深度方向应力分布的一致性更好。

关键词: 深孔法; 残余应力; 数值模拟; 套孔工艺; 测量精度

中图分类号: TG404

Influence of Trepanning Technology on the Accuracy of Residual Stress Measurement Using the Deep-hole Drilling Method

ZHAO Meijuan^{1,2} CHEN Jing^{1,3} CHEN Huaining^{1,3}

(1. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016;

2. School of Materials Science and Engineering,

University of Science and Technology of China, Shenyang 110016;

3. Key Laboratory of Nuclear Materials and Safety Assessment, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)

Abstract: The deep-hole drilling method is a high accuracy, low destruction and easy operation technology in three-dimensional residual stress measurements. Compared with neutron diffraction method, the cost of measurement is lower, and it is attracting more and more attention. In order to improve the measurement accuracy of this method in high and complex stress field, and also optimize the measurement process, a circumferential hole-trepanning technology is investigated since the stress range can be accurately measured using the axial hole-trepanning technology is limited. Taking the low alloy steel Q345 as the research object, two different calculation models of hole-trepanning technologies are established using finite element method, and then the error distributions between simulated and actual values of two kinds of hole-trepanning technologies under different stress states are compared and analyzed. The investigated results show that both methods are suitable for the accurate measurement of elastic stress field, but when the stress is large (over 50% yield strength), the stress calculation result obtained by using the circumferential hole-trepanning technology is more accurate and the stress distribution in depth direction is better.

Key words: deep-hole drilling method; residual stress; numerical simulation; trepanning technology; measurement accuracy

0 前言

在船舶、核电及航空航天等大型结构的设计制

造中,大型厚板及其焊接构件的使用必不可少。构件内部存在沿厚度方向的应力梯度时,准确测量其残余应力的分布规律有利于评定其对产品使用安全性能的影响^[1]。对于中厚板构件内部应力测试,虽然中子衍射法^[2-3]、逐层铣削法^[4]、R-N 切割法^[5]、轮廓切割法^[6]在实际工程测量中均有所应用,但深孔法

(Deep-hole drilling method, DHD)相比于上述方法具有低成本和低破坏性等优势,且设备简单,易于操作。

虽然深孔法提出时间较早,但由于施工工艺、设备和理论不完善等诸多原因,其应用仍然受到一定限制。相关研究表明,深孔法对残余应力的测量精度受限于弹性应力场,因此扩大该方法的应力测量范围、提高其测量精度一直是国内外学者的研究重点。针对测量精度问题,MAHMOUDI等^[7-9]利用有限元方法研究了轴向套孔时,1/2试板厚度截面上主应力方向参考孔径随轴向套孔深度的变化规律,发现高应力下套孔工具恰好通过参考点后即可获得该位置处孔径的最大改变量,为此提出了沿深度方向逐层套孔并测量其应变的增量套孔法(increment deep-hole drilling method, iDHD),从而提高塑性变形发生时该方法的测量精度。随后ZHENG等^[10]模拟钢焊缝应力在不同套孔直径下应力释放情况,提出分步套孔法(over deep-hole drilling method, oDHD),即以待测位置为中心分两步或三步依次缩小直径完成套孔过程,可使构件中的应力逐步实现弹性释放。测量工艺方面,GOUDAR等^[11-12]模拟了参考孔直径为3 mm时,套孔直径在5~40 mm范围内变化时套孔直径对应应力测量精度的影响,并结合试验证实套孔直径为10 mm时轴向套孔测量误差相对最小。国内张炯等^[13-14]在试验中发现钻孔易在上下表面处造成喇叭口,因此上下表面处应力的测量精度有待提高。这些理论问题的解决,促进了深孔法在核电异种钢接头、发动机涡轮盘等重要产品中的应用。

在深孔法的研究和应用中,以往的研究工作通常采用轴向套孔工艺,即套孔是环状旋转工具沿厚度方向不断向前推进实现材料的去除。实际上还可采用环向套孔工艺,即先用钼丝沿厚度方向穿透工件,再采用电火花加工技术实现绕参考孔环向套孔达到去除材料的目的。相比于轴向套孔,环向套孔的应力释放过程将有所不同,而目前环向套孔对残余应力释放及测量精度的影响研究极少。本文将利用有限元分别模拟围绕参考孔的轴向与环向套孔工艺过程,对比两种套孔工艺下应力释放差异、不同应力状态下模拟值与理论值的误差分布情况,为环向套孔工艺的实际应用范围提供理论参考依据。

1 测量步骤与计算方法简介

1.1 测量步骤

深孔法测量工件内部残余应力的一般试验步骤如图1所示。①采用枪钻等工具沿厚度方向钻取直

径为3 mm的参考孔。为减少表层附近的应力测量误差,可在待测部位上下表面粘贴衬板;②采用气动探头等工具测量步骤1中参考孔在同一深度不同角度及不同深度对应角度处的初始直径,记为 $d(\theta)$;③采用套孔工具套取与参考孔同心且直径为10 mm的圆柱环;④测量与步骤2中对应深度和角度处参考孔的最终直径,记为 $d'(\theta)$ 。

图1 深孔法测量残余应力的基本步骤

深孔法通过钻孔与套孔等过程释放参考孔处的应力,通过测量加工前后参考孔直径的改变,反求参考孔处应力场的分布。测量结果仅代表参考孔及周围套孔区域内,各方向应力沿深度方向的分布规律。与车削^[15]、铣削^[16]加工相比,电火花加工对表面粗糙度影响相对较小,且产生的加工应力仅仅作用于表面10 μm左右的深度范围^[17-18],该加工过程对原始应力场的影响可忽略不计。深孔法的操作难点主要与钻孔工艺和精确测量参考孔在不同位置的直径变化有关。

1.2 计算方法

深孔法基于弹性力学理论,利用参考孔处的直径变化引起的应变来反求应力。假设在钻孔与套取外圆柱环的过程中构件内部应力以线弹性方式释放,套孔前后小孔直径改变量为 $\Delta d(\theta)$,通过求解无限大带孔平板在单向应力场下小孔周围的应变即可获得深孔法测量残余应力的解析解。平面应力状态下,参考孔处应力场求解的力学表达式为^[19]

$$\varepsilon_r(\theta) = \frac{\Delta d(\theta)}{d(\theta)} = -\frac{1}{E} [f(\theta)\sigma_x + g(\theta)\sigma_y + h(\theta)\tau_{xy}] \quad (1)$$

$$\begin{cases} f(\theta) = 1 + 2\cos 2\theta \\ g(\theta) = 1 - 2\cos 2\theta \\ h(\theta) = 4\sin 2\theta \\ \Delta d(\theta) = d'(\theta) - d(\theta) \end{cases}$$

式中, $\varepsilon_r(\theta)$ 为小孔在 θ 角度处的应变; E 为材料弹性模量; σ_x 、 σ_y 、 τ_z 分别为所测点处 x 、 y 方向主应力及切应力。对于主应力方向未知的构件, 测量同一深度多个角度参考孔直径时, 式(1)可表示为

$$\bar{\varepsilon}_r = -\frac{1}{E} \mathbf{M} \times \bar{\sigma} \quad (2)$$

$$\bar{\varepsilon}_r = \begin{pmatrix} \varepsilon_r(\theta_1) \\ \vdots \\ \varepsilon_r(\theta_i) \\ \vdots \\ \varepsilon_r(\theta_N) \end{pmatrix} \mathbf{M} = \begin{pmatrix} f(\theta_1) & g(\theta_1) & h(\theta_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ f(\theta_i) & g(\theta_i) & h(\theta_i) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ f(\theta_N) & g(\theta_N) & h(\theta_N) \end{pmatrix} \bar{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix}$$

通过对式(2)中的 $\mathbf{M}$ 进行矩阵变换处理, 可获得应力场的求解公式。

$$\bar{\sigma} = -E \mathbf{M}^* \times \bar{\varepsilon}_r$$

$$\mathbf{M}^* = (\mathbf{M}^T \times \mathbf{M})^{-1} \times \mathbf{M}^T \quad (3)$$

只要获得小孔在不同深度、不同角度处, 套孔前后直径改变量, 由式(1)~(3)即可计算获得参考孔处应力沿深度方向的分布规律。

2 有限元模型的建立

2.1 模型建立与网格划分

模型完整尺寸为 100 mm×100 mm×50 mm, 参考孔与套取的圆柱环直径分别为 3 mm、10 mm。参考孔附近局部网格与模型整体网格考虑到电火花加工时钼丝与试板间的放电蚀除效果, 沿外环柱将存在 $\phi 0.2$ mm 范围的材料被去除, 划分情况如图 2 所示。参考孔附近的网格划分细密, 其他部位网格划分相对稀疏, 以实现网格的疏密过渡。

图2 模型局部与整体网格划分

参考孔区域平均单元尺寸为 0.5 mm×0.09 mm×0.5 mm, 参考孔区域以外单元厚度为 1 mm。轴向套孔时应力具有轴对称分布特点, 为提高计算效率可采用四分之一模型进行分析; 环向套孔时, 由于不同角度处应力释放程度与套孔过程密切相关, 且当主应力方向未知时, 起始切割位置也将影响应力释放, 因此对环向套孔工艺的研究采用完整模型更加合理。

2.2 材料属性与边界条件

以 Q345 低合金钢为研究对象, 其弹性模量 $E=208$ GPa, 屈服强度 $\sigma_s=345$ MPa, 泊松比 $\nu=0.28$, 材料遵循 Von Mises 屈服准则。忽略加工硬化对材料屈服强度及小孔周围应力集中的影响, 随着外力增大参考孔附近部分区域将发生不同程度的屈服, 为模拟加工过程中材料内部实际塑性流动情况, 有限元计算时输入材料的真实应力-应变关系曲线, 如图 3 所示。以参考孔为中心, 对模型中 $x=-50$ mm、 $y=-50$ mm 两端面上的节点分别施加 $x=0$ 、 $y=0$ 的位移约束; 为减少底部刚性约束对应力释放的影响, 仅对底面部分节点施加 $z=0$ 的位移约束。研究中将采用外加应力值模拟实际工程中材料内部存在的残余应力值, 分别在 $x=50$ mm、 $y=50$ mm 侧面上施加对应状态下的主应力值。

图3 Q345 塑性真实应力-应变曲线

2.3 载荷工况设置

两种套孔工艺的载荷工况设置如图 4 所示, 取 1/4 模型示意。图 4a 表示利用生死单元技术模拟铰刀沿厚度方向逐步去除材料获取参考孔的过程; 图 4b 表示环状电极工具沿厚度方向套取圆柱环的过程, 沿厚度方向每 2 mm 间距设置一次生死单元工况; 图 4c 表示环向套孔时以 x 正向为起切点, 沿逆时针方向每 5° 钼丝运行速度约 0.045 mm/s 设置一次生死单元载荷工况; 图 4d 为加工完成后的有限元模型。

图4 轴向与环向加工工艺示意图

3 模拟结果与分析

3.1 单向应力场下模拟结果比较与分析

利用有限元分别模拟轴向与环向套孔工艺在单向拉应力状态下, x 方向外加应力在 $0.1\sigma_s \sim 0.9\sigma_s$ 范围变化时应力模拟结果。以靠近中间位置($z=24\text{ mm}$)为分析截面, 通过提取参考孔在 $\theta=0^\circ$ 、 $\theta=45^\circ$ 、 $\theta=90^\circ$ 方向上的位移变化量, 利用前文的式(1)~(3)计算所得应力结果如图 5 所示。轴向与环向套孔工艺下, 外加应力分别为 $0.3\sigma_s$ 、 $0.6\sigma_s$ 、 $0.9\sigma_s$ 时, 套孔加工后中间深度截面处的等效屈服应力云图

分布情况如图 6 所示。

图5 单向应力场下轴向与环向套孔模拟结果

图6 单向应力状态下轴向与环向套孔等效应力云图

从图5所示的应力模拟结果曲线可以看出,外加应力不超过 $0.5\sigma_s$ 时,两种套孔工艺下的应力测量结果与实际值基本一致;外加应力超过 $0.6\sigma_s$ 后,两种套孔工艺的应力测量结果与实际值存在不同程度的偏差,且随着外加应力的增大而增大。对比两种套孔工艺下应力测量结果曲线,发现应力在超过 $0.6\sigma_s$ 后,环向套孔的模拟结果比轴向套孔时更接近实际值,其测量误差相对轴向套孔小。

比较图6所示套孔区域的等效应力云图,可以看出两种套孔工艺下应力释放方式存在差异。轴向套孔时,应力在同一深度平面上对称分布;而环向套孔同一深度截面上应力释放的非均匀程度随着外加应力的增大而增大。分析图6参考孔附近的应力变化情况,随着外加应力的增大,套孔后参考孔附近残余应力越大,靠近 y 方向处的等效应力越大。随着外加应力的增大, y 方向应力集中效应越明显,应力集中的存在严重影响了参考孔附近应力的释放,导致高应力状态下应力测量误差明显增大。对比两种套孔工艺下参考孔附近等效残余应力分布规律,可看出高应力状态下环向套孔在参考孔边缘的应力集中程度小于轴向套孔。这与两种套孔工艺在高应力状态下的应力测量结果一致。

分别采集外加应力为 $0.3\sigma_s$ 、 $0.6\sigma_s$ 、 $0.9\sigma_s$ 时, $1/2$ 厚度截面上 x 方向参考孔直径改变量随加工历程的变化情况,如图7所示,以此分析两种套孔工艺下应力释放的差异。图7中横坐标仅代表环向与轴向套孔时的增量步(等效于时间),正负号无实际意义,轴向与环向钻孔结束后的增量步分别对应沿深度方向与角度方向的加工过程。由于钻孔均沿轴向进行,因此两种套孔工艺钻孔过程中参考孔直径变化规律一致。从图7中可以发现,随着外加应力的增大,两种套孔工艺下套孔前后参考孔直径改变量 $\Delta d(\theta)$ 将发生变化。 $0.3\sigma_s$ 时两种套孔工艺下直径改变量基本相同; $0.6\sigma_s$ 时环向套孔下直径改变量略大于轴向套孔的直径改变量;当外加应力达到 $0.9\sigma_s$ 时环向套孔工艺下的直径改变量明显大于轴向套孔下的结果,这与图5中两种工艺下在高应力模拟结果的差异相符。

分析两种套孔工艺下应力释放的具体过程,轴向套孔时,待测深度位置处的应力在套孔工具恰好通过该位置后参考孔直径改变量最大(即图中圆圈

标注处),通过该位置后继续沿深度方向套孔将使其应力释放程度开始减弱;而环向套孔中,同一深度位置各角度处的应力随着环切过程逐步释放,已切割处的应力将随后续环切过程继续释放。通过比较

(a) $0.3\sigma_s$ 应力下孔径变化过程比较

(b) $0.6\sigma_s$ 应力下孔径变化过程比较

(c) $0.9\sigma_s$ 应力下孔径变化过程比较

图7 轴向与环向套孔应力释放过程比较

图7中轴向套孔时直径改变量 $\Delta d(\theta)$ 与最大直径改变量 $\Delta d(\theta)_{\max}$, 发现二者的差异随应力的增大而增大, $0.3\sigma_s$ 与 $0.6\sigma_s$ 时二者差异分别约为 $0.5\mu\text{m}$ 与 $1\mu\text{m}$, $0.9\sigma_s$ 时二者差异可达 $5\mu\text{m}$ 。应力水平较低时,采用 $\Delta d(\theta)$ 作为实际直径改变量即可符合应力测量精度;但应力水平较高时,将 $\Delta d(\theta)$ 作为实际直径改变量会使测量结果小于实际值。因此对于高应力状态下的轴向套孔工艺研究,研究人员提出将 $\Delta d(\theta)_{\max}$

作为参考孔直径改变量用于后续计算(即前言提到的 iDHD 测量技术), 该方法在一定程度上可解决高应力下的测量精度问题, 但该方法实际测量过程十分繁琐耗时。

3.2 双向应力场下模拟结果比较与分析

分别模拟 x 方向外加应力在 $0.1\sigma_s \sim 0.9\sigma_s$ 范围变化时, 双向应力场 $\sigma_x=2\sigma_y$ 下对应的应力测量结果, x 、 y 方向对应的应力结果如图 8 所示。双向应力状态下, x 方向模拟值与实际值的偏差情况与单向应力场中规律相似, 即误差随着外加应力的增大而增加, 但其偏离程度小于单向应力场。该双向应力场中主应力方向能准确测量的应力范围有所扩大。环向套孔时, x 方向能准确测量的范围由 $0.6\sigma_s$ 扩大至 $0.7\sigma_s$, 且 y 方向的测量结果在整个外加应力范围内与实际值基本重合; 但轴向套孔在应力在超过 $0.6\sigma_s$ 后仍与实际值存在较大偏差。

图 8 双向应力场下轴向与环向模拟结果比较

以轴向套孔时 $1/2$ 厚度截面上 $\theta=0^\circ$ 与 $\theta=90^\circ$ 为参考方向, 分析两种应力状态下参考孔直径在套孔前后的椭圆度变化规律, 参考孔径变化如表 1 所示。单向拉应力下, 套孔前孔径在 $\theta=0^\circ$ 方向扩张、 $\theta=90^\circ$ 方向收缩, 套孔后 $\theta=0^\circ$ 方向收缩、 $\theta=90^\circ$ 方向孔径扩张, 孔径变化程度与外加应力水平有关。单向应力状态下, $\theta=0^\circ$ 方向的收缩程度大于 $\theta=90^\circ$ 方向的收缩。双向应力状态下, 套孔前 $\theta=0^\circ$ 与 $\theta=90^\circ$ 方向均处于扩张状态, 套孔后两方向均有一定程度的收缩。对比两种应力状态下孔径变化程度, 发现 $0.9\sigma_s$ 双向应力状态下 $\theta=0^\circ$ 方向的收缩程度大于单向应力场中该方向的收缩结果。两种应力状态下参考孔边缘的收缩程度以及测量精度的差异与参考孔边缘的应力集中系数 k 有关。

表 1 不同应力状态下参考孔孔径变化

		$0.3\sigma_s$		$0.6\sigma_s$		$0.9\sigma_s$	
		0°	90°	0°	90°	0°	90°
单向	套孔前/ μm	3 004.2	2 998.8	3 008.6	2 997.7	3 014.6	2 997.5
	套孔后/ μm	3 000.0	3 000.0	3 000.7	3 000.3	3 009.2	3 000.3
双向	套孔前/ μm	3 003.6	3 000.9	3 007.3	3 001.8	3 011.9	3 003.9
	套孔后/ μm	3 000.0	3 000.0	3 000.5	3 000.1	3 004.3	3 002.2

$$k = 3 - \frac{|\sigma_y|}{|\sigma_x|} \quad (4)$$

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (5)$$

根据式(4)、(5)可知单向应力状态下应力集中系数 $k=3$, 该双向应力状态应力集中系数 $k=2.5$, Von Mises 屈服准则下该双向应力场等效屈服应力为单向应力场的 87%。与单向应力场相比, 其参考孔周围应力集中程度和屈服区域更小, 因此双向应力场在应力较高时的模拟结果精确度优于单向应力场。

3.3 应力沿深度分布比较

为分析套孔工艺对应力沿深度方向分布的影响, 避免上下表层测量工艺干扰, 分别计算两种应力状态下距上表面 4 mm、24 mm、46 mm 深度处的应力值。不同应力状态下采用两种套孔工艺模拟计算所得应力沿深度方向的分布规律分别如图 9 所示。

应力较大时, 轴向套孔下应力沿深度方向的分布不均匀, 由于轴向套孔过程中下方区域不断发生塑性累积, 因此应力沿深度方向逐渐减小。环向套孔时采用 Mo 丝同时穿透厚度截面, 套孔过程对厚度方向应力释放的影响是均匀的, 应力沿深度方向上基本无变化。但构件内应力较大时, 参考孔底部应力释放受钻孔过程影响, 引起环向套孔时底部应力与其他位置稍有轻微差异。同时在后续的研究中也发现, 当应力沿深度方向非均匀分布时也有类似于均匀应力场中的变化规律, 即轴向套孔时当工具电极通过约 $1/2$ 试板厚度位置后, 应力测量值开始偏离实际分布规律, 而环向套孔结果整个深度方向分布仍符合应力的实际分布规律。

图9 两种套孔工艺应力沿深度方向的分布规律

4 结论

(1) 深孔法中, 轴向和环向两种套孔工艺均适用于应力不超过材料 $0.5\sigma_s$ 时的精确测量, 该范围内测量误差均小于 5%; 但环向套孔工艺在 $0.6\sigma_s$ 时的测量误差小于 7%, 可认为环向套孔准确测量的应力范围可达 $0.6\sigma_s$, 且应力高于 $0.6\sigma_s$ 后环向套孔测量误差明显小于轴向套孔在高应力下的测量误差。

(2) 两种套孔工艺在套孔过程中产生的孔边塑性变形量不同, 导致在厚度方向均匀分布的应力场中, 深度方向的应力释放差别较大。应力超过 $0.5\sigma_s$ 后, 轴向套孔下测量结果沿深度方向逐步体现出差异; 相对于轴向套孔, 环向套孔在整个外加应力场下深度方向获得的应力测量结果更符合实际应力分布规律。

参考文献

- [1] FRICKE W. Effects of residual stresses on the fatigue behavior of welded steel structures[J]. Materials Science and Engineering Technology, 2005, 36(11): 642-649.
- [2] 李峻宏, 高建波, 李际周, 等. 中子衍射残余应力无损测量技术及应用[J]. 中国材料进展, 2009, 28(12): 10-14.
- [3] 沈军, 林波, 迟永刚, 等. 残余应力物理法测量技术研究状况[J]. 材料导报, 2012, 26(S1): 120-125.
- [4] 邹永丰, 李亚东, 黄志霜, 等. 基于逐层铣削法测量桥钢厚板焊缝区残余应力[J]. 机械制造文摘, 2016(6): 10-13.
- [5] 余陈, 陈静, 陈怀宁, 等. TC4 钛合金磁控窄间隙 TIG 焊试板热处理前后三维应力[J]. 机械工程学报, 2019, 55(6): 61-66.

测量技术及应用[J]. 中国材料进展, 2009, 28(12): 10-14.

LI Junhong, GAO Jianbo, LI Jizhou, et al. Technology and application of nondestructive residual stress measurement by neutron diffraction[J]. Materials China, 2009, 28(12): 10-14.

[3] 沈军, 林波, 迟永刚, 等. 残余应力物理法测量技术研究状况[J]. 材料导报, 2012, 26(S1): 120-125.

SHEN Jun, LIN Bo, CHI Yonggang, et al. Research status of residual stress physical method measurement techniques[J]. Materials Reports, 2012, 26(S1): 120-125.

[4] 邹永丰, 李亚东, 黄志霜, 等. 基于逐层铣削法测量桥钢厚板焊缝区残余应力[J]. 机械制造文摘, 2016(6): 10-13.

ZOU Yongfeng, LI Yadong, HUANG Zhishuang, et al. Residual stress measurement of steel thick plate in weld zone based onlayer removal method[J]. Mechanical Manufacturing Abstracts, 2016(6): 10-13.

[5] 余陈, 陈静, 陈怀宁, 等. TC4 钛合金磁控窄间隙 TIG 焊试板热处理前后三维应力[J]. 机械工程学报, 2019, 55(6): 61-66.

YU Chen, CHEN Jing, CHEN Huaining, et al. Triaxial

- stresses in TC4 Ti-alloy weldments by magnetically controlled narrow gap TIG welding before and after PWHT[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(6): 61-66.
- [6] 严益, 晏嘉陵, 刘明星, 等. 多次切割轮廓法测试局部补焊厚板内部残余应力分布[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(18): 28-35.
- YAN Yi, YAN Jialing, LIU Mingxing, et al. Measurement on the internal stress distribution in a thick specimen with a partial repair weld using multiple-cut contour method[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(18): 28-35.
- [7] MAHMOUDI A H, HOSSAIN S, TRUMAN C E, et al. A new procedure to measure near yield residual stresses using the deep hole drilling technique[J]. *Experimental Mechanics*, 2009, 49(4): 595-604.
- [8] MAHMOUDI A H, TRUMAN C E, SMITH D J, et al. The effect of plasticity on the ability of the deep hole drilling technique to measure residual stress[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2011, 53: 978-988.
- [9] MAHMOUDI A H, ZHENG G, SMITH D J, et al. A procedure to measure biaxial near yield residual stresses using the deep hole drilling technique[J]. *Experimental Mechanics*, 2013, 53: 1223-1231.
- [10] ZHENG G, HOSSAIN S, KINGSTON E, et al. An optimisation study of the modified deep hole drilling technique using finite element analyses applied to a stainless steel ring welded circular disc[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2017, 118: 146-166.
- [11] GOUDAR D M, TRUMAN C E, SMITH D J. Evaluating uncertainty in residual stress measured using the deep hole drilling technique[J]. *Strain*, 2011, 47: 62-67.
- [12] GOUDAR D M, SMITH D J. Validation of mechanical strain relaxation methods for stress measurement[J]. *Experimental Mechanics*, 2012, 53(2): 267-286.
- [13] 张炯, 徐济进, 吴静远, 等. 深孔法残余应力测量技术研究[J]. *热加工工艺*, 2015, 44(2): 109-111.
- ZHANG Jiong, XU Jijin, WU Jingyuan, et al. Study on deep hole drilling residual stress measuring approach[J]. *Hotworking Technology*, 2015, 44(2): 109-111.
- [14] 廖凯, 刘义鹏, 常星宇, 等. 深孔法技术在铝合金构件应力场测试中的应用[J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25(11): 3107-3112.
- LIAO Kai, LIU Yipeng, CHANG Xingyu, et al. Application of deep hole drilling technique on stress measurement of aluminum alloy component[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25(11): 3107-3112.
- [15] 安琪, 索双富, 林福严, 等. 车削粗糙表面的特征解耦与形貌仿真[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(23): 200-209.
- AN Qi, SUO Shuangfu, LIN Fuyan, et al. Feature decoupling and shape simulation of turning rough surface[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(23): 200-209.
- [16] 董情焱. 45#钢铣削工艺参数对加工表面残余应力影响的研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2018.
- DONG Qingyan. Effect of 45# steel milling process parameters on residual stress of machining surface[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2018.
- [17] 李晓舟, 孙宇博, 许金凯, 等. 304 不锈钢电火花线切割加工表面性能研究[J]. *表面技术*, 2015, 44(6): 104-108.
- LI Xiaozhou, SUN Yubo, XU Jinkai, et al. Research on 304 stainless steel surface properties by wire electrical discharge machining[J]. *Surface Technology*, 2015, 44(6): 104-108.
- [18] 王海斗, 朱丽娜, 邢志国. 表面残余应力检测技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- WANG Haidou, ZHU Lina, XING Zhiguo. Surface residual stress detection technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2013.
- [19] LEGATT R H, SMITH D J. Development and experimental validation of the deep hole method for residual stress measurement[J]. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 1996, 31(3): 177-185.
-
- 作者简介: 赵美娟, 女, 1996 年出生。主要研究方向为焊接残余应力检测与数值模拟。
E-mail: mjzhao18s@imr.ac.cn
- 陈怀宁(通信作者), 男, 1962 年出生, 博士, 研究员, 硕士研究生导师。主要研究方向为焊接接头性能控制技术、焊接残余应力测量与控制技术和异种金属可靠性连接技术。
E-mail: hnchen@imr.ac.cn