基于云纹干涉技术的环芯和切槽残余应力测量方法的实验研究

吴立夫^①, 张宝鸽^②, 霍成民^③, 朱建国^②, 谢惠民^{①*}

① 清华大学航天航空学院, 教育部应用力学重点实验室, 北京 100084;

② 江苏大学力学与工程科学系, 镇江 212013;

③ 中航工业沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015

* E-mail: xiehm@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2014-10-08; 接受日期: 2015-02-02

摘要 本文将环芯法和切槽法分别与云纹干涉技术相结合, 对过盈配合试样中的残余应力进行了测量. 对于环芯云纹干涉法, 通过使用不同焦距的场镜与 CCD 相结合, 获得了变视场区域不同放大倍数的干涉条纹, 实现了云纹干涉条纹的载波校正与零场调节; 对于切槽云纹干涉法, 提出了基于位移差的应力修正方法, 克服了由位移释放区域过大造成的零级干涉条纹确定上的困难. 本文研究中, 针对过盈配合试件, 将所提出方法的测量结果分别与钻孔云纹干涉法和钻孔应变电测法的测量结果进行了比较, 结果表明: 两方法的结果具有较好的一致性; 相对于切槽法而言, 云纹干涉环芯法的测量精度更高、更易于操作, 而且可以获得面内残余应力的所有分量, 具有更为广泛的适用性.

关键词

残余应力
云纹干涉
过盈配合
环芯法
切槽法

1 引言

材料和构件在其加工过程中, 会经历复杂的热力学过程, 因而不可避免地会在其内部引入残余应力. 研究表明, 材料和构件内的残余应力会对其性能和服役寿命产生很大的影响^[1]. 因而, 表征和测量构件内部的残余应力对于构件的性能评估和寿命预测而言, 具有重要的意义.

由于残余应力仅存在于材料或构件内部, 而且是自平衡的, 其表征和测量往往具有较大的复杂性和不确定性. 目前常用的测量方法可以分为两类, 即无损方法和有损方法. 无损方法在测量时不需要破坏试样, 主要包括中子衍射^[2-5]、同步辐射^[6,7]、短波

长 X 射线衍射^[5,7,8]、超声检测^[9,10]和拉曼光谱测量^[11,12]等方法. 有损方法则需要去除试样上的一部分材料以释放残余应力, 根据释放变形的大小, 推算试样内部的残余应力. 通常释放残余应力的方法包括钻孔法^[13-16]、环芯法^[17-24]和切槽法^[25-27]等. 由于有损方法具有测量成本较低、适用范围广泛、可分析沿试样厚度方向的分布等优点, 在相关的科学研究和工程应用中备受关注.

云纹干涉作为一种相干光学测量方法, 具有全场测量、高精度、高灵敏度的优势^[28-30], 适用于微小变形的检测. 结合有损方法时, 可以准确地获得试样释放残余应力后的变形场. 目前, 钻孔云纹干涉方法已经成为一个相对成熟的技术, 被广泛用于焊缝^[31]、

引用格式: 吴立夫, 张宝鸽, 霍成民, 等. 基于云纹干涉技术的环芯和切槽残余应力测量方法的实验研究. 中国科学: 技术科学, 2015, 45: 503-511
Wu L F, Zhang B G, Huo C M, et al. Experimental study on residual stress measurement methods of moiré interferometry based on ring-core and slitting (in Chinese). Sci Sin Tech, 2015, 45: 503-511, doi: 10.1360/N092014-00354

陶瓷涂层^[32]、复合材料^[33~35]等的残余应力测量中,而基于环芯法和切槽法的云纹干涉残余应力测量技术还有待进一步的研究。

本文将环芯法和切槽法分别与云纹干涉技术相结合,对过盈配合试样中的残余应力进行了测量,并对其测量精度进行了对比分析,发展了基于云纹干涉的残余应力测量技术。

2 环芯和切槽云纹干涉法残余应力测量实验研究

2.1 试样的准备

实验中使用的残余应力试样如图1所示。试样材料为LY12铝合金,厚度为10 mm。试样由两部分构成,即芯部和外环,芯部直径(50.17 mm)略大于外环的内径(50.00 mm)。加工时,将外部环用高温炉加热膨胀,同时将芯部至于液氮中冷却收缩。待二者温度充分加热和冷却后,将其取出并迅速拼装,形成过盈配合试样。当整个试样恢复至室温时,试件芯部区域将处于双向等压的残余应力状态。

在实验之前,将1200线/mm的商品正交光栅转移到试件芯部的表面待测区域。由于芯部面积较大,我们认为在某一测试点钻孔或切割环芯后,对远离该点区域残余应力的影响是可以忽略的。在保证实验结果互不干扰的前提下,在同一个过盈配合试样上进行了不同残余应力释放方法的实验,并进一步

将测试结果进行对比。此外,考虑到不同试样中可能存在残余应力的差异,实验中对每个试样都使用残余应力应变花按照标准[36~38]进行了测量,将其测量结果作为该试样的残余应力参考值。

2.2 环芯法和切槽法释放残余应力

使用环芯法测量残余应力时,需要在试件栅区域内切一个闭合的环槽,通过测量环芯上释放的变形,来表征试样内部的残余应力。本文利用图2所示的铣刀,通过铣削的方式直接在试件表面被测区域加工环槽。切割环槽时铣刀转速为3600 r/min,铣刀进给速率约为20 $\mu\text{m/s}$ 。由于环槽铣刀端面和内壁切削刃之间并非绝对垂直,环芯的尺寸会随着环槽深度的增加而减小。同时考虑到环槽较深时,其外部释放的位移量较大,不利于云纹干涉条纹的调节,最终环槽的深度选择为315 μm 。切割环芯后的试件栅如图3所示,其中环槽外壁的直径为5 mm,环芯的直径为1.7 mm。此时将试样放入云纹干涉仪,即可测量环芯法释放的残余变形。

切槽法只需切割一条直槽,为了便于位移场的分析,实验中切槽的方向与光栅主方向相垂直。实验中的切槽过程是在铣床上完成的,铣刀直径为3 mm,切槽深度为1 mm。切槽后的试件栅如图4所示。

2.3 环芯和切槽法释放残余的变形场的测量

通过对测量对象进行切割环芯和直槽释放残余应力,将释放过程中产生的变形直接记录到试件栅上,

图1 过盈配合残余应力试样

图2 环槽铣刀

图 3 切割环芯后的试样

图 4 切槽后的试样

随后将试件栅放置在云纹干涉仪中进行变形场测量。

2.3.1 环芯法干涉条纹的调节

云纹干涉测量时, 如果参考栅与试件栅频率不匹配, 则会出现载波条纹。由于载波条纹并非由试件栅变形而产生, 会对试件变形测量结果产生干扰, 所以在采集干涉条纹前应对载波条纹予以校正。常用的校正方法是进行零场调节, 即使得零级条纹出现在已知的位移为零的区域。然而, 对于环芯法干涉条纹而言, 零级条纹应该位于环槽边界之外的远场区域。因而, 云纹干涉的视场应该足够大, 以观测到远场的干涉条纹; 同时, 又需要较高的放大倍数来记录环芯上的条纹。为了方便零场的调节, 本文实验中

不同焦距的场镜与 CCD 相机组合, 获得了试件变视场区域(不同放大倍数)的干涉条纹。测试中, 首先在低放大倍数下, 将环槽外围的区域调成零场的状态, 并将环芯置于图像的中心位置, 如图 5 所示; 然后, 在高放大倍数下观测并记录干涉条纹。同时, 为了精确获得全场位移, 本文通过调整云纹干涉仪上的压电陶瓷, 使得云纹条纹的相位发生变化。然后基于四步相移技术, 求解云纹条纹的相位场并转化为位移场。图 6 为实验中记录的相移条纹。

2.3.2 切槽法干涉条纹的调节

切槽法零级条纹的调节存在与环芯法相同的困难: 试件表面由于切槽释放的位移场, 其零级条纹出现距离槽边很远的区域。若要记录零级干涉条纹, 则需要较大面积的试件栅, 进而增加实验成本。针对这一问题, 我们利用载波的线性特性, 提出了基于位移差的应力修正方法, 使用小面积光栅对试件的残余应力进行了切槽云纹干涉测量。基于该方法, 在调节干涉条纹时, 只需将条纹调至与槽边平行的状态, 并使得光栅的最远端条纹最稀疏。图 7 为实验中记录的相移干涉条纹。

3 有限元参数标定

在获得释放的残余变形场之后, 根据残余变形和残余应力之间的关系参数, 即可确定试样中的残余应力。本文使用商用有限元软件 ABAQUS/Standard, 对上述关系参数进行了标定。

图 5 低放大倍数下的干涉条纹

图 6 环芯上云纹干涉条纹的四步相移

图 7 切槽法云纹干涉条纹的四步相移(水平方向)

3.1 环心法有限元系数标定

假设试件中的残余主应力 σ_1 , σ_2 和坐标系之间的存在图 8 所示的方向关系, 则在切割环槽后环芯上释放的位移可表示为如下的形式^[39]:

$$u_r(r, \theta) = A(r)L + B(r)M\cos 2\theta - B(r)N\sin 2\theta, \quad (1)$$

式中

$$\begin{cases} L = -\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}, \\ M = -\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2\phi}{2}, \\ N = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)\sin 2\phi}{2}, \end{cases}$$

$A(r)$, $B(r)$ 为未知系数. 为了简单起见, 不妨假设

图 8 环芯法示意图

残余应力的主方向和坐标轴重合, 即 $\phi=0$, 则有

$$\begin{cases} \sigma_1 = \sigma_{xx}, \\ \sigma_2 = \sigma_{yy}, \end{cases} \quad (2)$$

$$u_r(r, \theta) = A'(r)(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) + B'(r)(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})\cos 2\theta, \quad (3)$$

式中的待定系数 $A'(r)$, $B'(r)$ 通过有限元标定获得.

一般而言, 残余应力的释放是一个线弹性过程. 由叠加原理可知, 残余应力弹性释放产生的变形, 等价于在无残余应力构型上施加反向载荷时产生的变

形. 因而在环心法的有限元标定中, 于环槽内壁和外壁施加与单向应力状态相对应的载荷:

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = 1 \text{ MPa}, \\ \sigma_{yy} = 0 \text{ MPa}, \\ \tau_{xy} = 0 \text{ MPa}. \end{cases} \quad (4)$$

数据采集点应远离环芯的边缘, 以避免切割时塑性变形的影响; 同时不宜过于接近环芯的中心, 因为中心径向位移的幅值很小, 可能会带来较大的相对误差. 本文中, 数据采集点选择在 $r=0.6 \text{ mm}$ 的位置. 标定时的有限元模型如图 9 所示. 模型的尺寸与试样的真实尺寸一致, 同时, 利用试样的对称特性, 仅建立了 1/4 模型以减少运算量. 图 10 给出了标定的结果. 当 θ 分别取 0° 和 90° 时, 数据采集点处的径向位移 u_r 分别为 5.814×10^{-6} 和 $-0.591 \times 10^{-6} \text{ mm}$. 由公式(3), (4)可得

$$\begin{cases} A' = 2.612 \times 10^{-6} \text{ mm/MPa}, \\ B' = 3.203 \times 10^{-6} \text{ mm/MPa}. \end{cases} \quad (5)$$

3.2 切槽法有限元系数标定

切槽法的标定模型与环心法标定模型相似, 同样是基于试样的真实结构建立的. 需要说明的是, 由于存在载波, 光栅最远端的条纹稀疏区域并不是零级条纹. 实际上, 在距离槽边较远的位移仍然不可忽略. 切槽法的 FEM 标定参数应同时考虑残余应力释放对测量点、光栅边界点和远场点处的位移的影响.

切槽法的有限元标定模型如图 11 所示. 在切槽内壁施加 1 MPa 的载荷, 并提取模型表面对称轴上距离槽边 1.0 mm (测量点, 单位下同), 9.0 (光栅边界点)和 73.5 (远场点)处三点的位移分量 u_x 作为标定参数, 结果如表 1 所示.

图 9 环芯法参数标定的有限元模型

图 10 (网络版彩图)单向应力时环芯法释放的位移场

图 11 切槽法参数标定的有限元模型

表 1 切槽法标定参数

$x \text{ (mm)}$	1.0	9.0	73.5
$\tilde{u}_x(x)$ (10^{-5} mm/MPa)	2.902	0.901	0.356

$\tilde{u}_x$ 表示释放单位残余在试样表面应力产生的位移

4 结果和讨论

4.1 环心法残余应力测量结果

通过求解相位, 由相位和位移的关系可以获得环芯上由于残余应力释放产生的位移场, 如图 12 所示. 分别提取 $r=0.6 \text{ mm}$, $\theta=0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 对应点

图 12 (网络版彩图)通过相移法求解获得的环芯位移场
(a) U 场; (b) V 场

的位移, 如表 2 所示. 可见, 环芯上释放的位移场基本是中心对称的, 说明试件内部的残余应力处于双向等值的状态, 即 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$, 分别将上述位移值取平均后, 结合有限元标定计算的参数 A , 可以获得试样内部的残余应力

$$\sigma_1 = \sigma_2 = -84.94 \text{ MPa}, \quad (6)$$

应力为负值说明测量区域的残余应力为压应力.

表 2 环心法释放的位移

θ	$r=0.6 \text{ mm}$			
	0°	90°	180°	270°
$u_r(r, \theta) (10^{-4} \text{ mm})$	3.7334	-3.9628	3.3824	-3.2776

4.2 切槽法残余应力测量结果

为了避免切槽两端引入的误差, 本文将计算区域选在了槽的中垂线附近, 如图 13 所示. 测量点距离槽边 1 mm, 定义光栅的最远端距离槽边 9 mm 的点为“位移零点”, 这与有限元标定模型是一致的. 图 14 为通过相移法求解得到水平方向位移. 可见, 相对于“位移零点”, 测量点的位移为 $-1.295 \times 10^{-3} \text{ mm}$.

正如前文所述, 光栅最远端的条纹稀疏区域并不是零级条纹. 因而定义了位移零点后获得的位移场, 相当于在真实的位移场上叠加了载波位移场. 切槽释放的真实位移 Δu_{True} 、云纹干涉测量的位移 Δu_{Moire} 以及载波位移 $\Delta u_{\text{Carrier}}$ 三者之间的关系如图 15 所示. 可见, 云纹干涉测量的位移只是真实位移的一部分. 由于载波位移场是线性的, 故测点载波位移可以利用远场点和位移零点的真实位移通过线性外推得到. 使用本文提出的基于位移差的应力修正方法, 可以通过下述步骤实现残余应力的反演和修正. 首先, 利用云纹干涉法求解的相对位移进行初始估算

$$\sigma' = \frac{\Delta u_{\text{Moire}}}{\tilde{u}_x(9.0 \text{ mm}) - \tilde{u}_x(1.0 \text{ mm})}. \quad (7)$$

图 13 切槽法测量时计算区域、测量点和位移零点的选择

图 14 (网络版彩图)通过相移法求解的切槽水平位移场

图 15 真实位移、测量位移以及载波位移之间的关系

然后, 根据初始估算求得的应力, 计算载波位移修正量和真实位移

$$\Delta u_{\text{Carrier}} = \sigma' \left[\tilde{u}_x(9.0 \text{ mm}) - \tilde{u}_x(73.5 \text{ mm}) \right] \frac{x_0}{x_1 - x_0}, \quad (8)$$

$$\Delta u_{\text{True}} = \Delta u_{\text{Moire}} + \Delta u_{\text{Carrier}}. \quad (9)$$

最后计算修正后的残余应力

$$\sigma = \frac{\Delta u_{\text{True}}}{\tilde{u}_x(9.0 \text{ mm}) - \tilde{u}_x(1.0 \text{ mm})}. \quad (10)$$

由实验数据和标定参数计算可得, 未修正和修正后的残余应力分别为 -64.72 和 -66.92 MPa.

4.3 对比和讨论

在本文研究中, 使用钻孔、环芯、切槽云纹干涉法对过盈配合试样的残余应力进行了测量; 同时, 为了进行测量精度进行比较, 我们参照标准[36~38], 结合应变花和钻孔应变电测技术测量了对于每个试样的残余应力, 云纹干涉和应变电测法的测量结果如表 3 所示. 面内主应力的差异主要来源于两个方面: 首先, 使用电测法时, 钻孔的位置必须严格确定, 即应变花的中心位置然而在实际操作中, 盲孔难免会

偏离中心位置, 从而引入测量误差, 造成测得的主应力值不相等. 我们采用文献[38]中给出的修正方法, 对测量结果进行了修正, 使得误差被控制在可以接受的范围. 同时, 由于机械加工以及装配误差, 试件芯部残余应力状态并不是严格的双向等压, 从而造成主应力值的差异. 针对这一问题, 我们使用两方向主应力的均值对试件中双向等压的残余应力的大小进行表征.

表 3 中云纹干涉钻孔法和环芯法是在同一个试样上完成的, 故它们的电测残余应力值是相同的. 云纹干涉切槽法会释放较多的残余应力, 故将其在另一个试样上完成, 以避免对其他实验结果产生干扰. 如果以应变电测法测量残余应力的均值作为参考标准, 采用不同残余应力释放方式时, 云纹干涉法测量值的相对误差见表 3 的最后一列. 对比发现: 钻孔云纹干涉法的测量精度是最高的. 环芯云纹干涉法测量精度次之, 但是与标准值比较接近, 测量误差在 10% 以内. 此外, 对于同一个试样, 钻孔和环芯云纹干涉法测得的残余应力数值是吻合的, 从而证明了环芯云纹干涉法也可以作为一种高精度的残余应力测量方法. 相对于上述两种方法, 切槽法测量精度最低, 而且仅能获得垂直于槽边方向的应力分量. 但是切槽法具有加工简单、释放变形大的优点, 适用于残余应力较小的情况. 同时, 采用本文提出的基于位移差的有限元标定和修正方法, 切槽云纹干涉法的测量精度可以得到相应的提高.

此外, 相对于应变电测法, 云纹干涉法的优势在于: 1) 钻孔位置较为灵活, 操作方便. 应变电测法要求盲孔钻于应变花中心, 否则会造成较大的测量误差; 云纹干涉法只要在试件栅区域钻孔、切割环芯或直槽, 就可以对残余应力进行测量. 2) 应变片测得的敏感栅区域的平均应变, 因而应变片的尺寸会对测量结果产生影响; 云纹干涉能可实现全场位移测量,

表 3 云纹干涉法和应变电测法得到的残余应力对比

残余应力释放方式	云纹干涉法测量值 (MPa)	应变电测法测量值(MPa)			相对误差
		σ_1	σ_2	平均	
钻孔法	-80.83	-84.44	-72.72	-78.58	2.9%
环芯法	-84.94				8.1%
切槽法(未修正)	-64.72	-77.67	-72.74	-75.21	14.0%
切槽法(修正)	-66.92				11.0%

即使释放残余变形的梯度很大时, 也可获得准确的结果.

5 结论

本文将环芯法和切槽法分别与云纹干涉技术相结合, 对过盈配合试样中的残余应力进行了测量. 验证了环芯和切槽云纹干涉方法测量残余应力的可行性. 对于环芯云纹干涉法, 通过使用不同焦距的场镜

与 CCD 相结合, 获得了变视场区域不同放大倍数的干涉条纹, 实现了云纹干涉条纹的载波校正与零场调节; 对于切槽云纹干涉法, 分析了载波对于释放位移场的影响, 提出了基于位移差的应力修正方法. 此外, 通过与钻孔云纹干涉法和钻孔应变电测法的测量结果对比, 结果表明: 相对于切槽法而言, 云纹干涉环芯法的测量精度更高、更易于操作, 而且可以获得面内残余应力的所有分量, 具有更为广泛的适用性.

参考文献

- 何世平. 光力学在航空领域的一些应用. 中国科学技术大学学报, 2007, 37: 1185–1241
- Albertini G, Bruno G, Carrado A, et al. Rustichelli, determination of residual stresses in materials and industrial components by neutron diffraction. Meas Sci Technol, 1999, 10: R56–R73
- Withers P J. Mapping residual and internal stress in materials by neutron diffraction, C R Physique, 2007, 8: 806–820
- Tanaka K, Akiniwa Y, Hayashi M. Neutron diffraction measurements of residual stresses in engineering materials and components. Mater Sci Res Int, 2002, 8: 165–174
- 张津, 高振桓, 牟建雷, 等. 晶体材料内部残余应力衍射法无损检测的研究. 理化检验-物理分册, 2010, 46: 695–700
- Singh D R P, Deng X, Chawla N, et al. Residual stress characterization of Al/SiC nanoscale multilayers using X-ray synchrotron radiation, Thin Solid Films, 2010, 519: 759–765
- Prevéy P S. Current applications of X-ray diffraction residual stress measurement. Proceedings of 28th Annual Conference on Materials Characterization Technologies. Albuquerque, 1995. 103–110
- 郑林, 张津, 何长光, 等. 短波长 X 射线衍射无损测定铝板内部残余应力. 精密成形工程, 2001, 3: 25–30
- Araki W, Kamikozawa T, Adachi T. Determination of residual stress in spherical balls by resonant ultrasound spectroscopy. NDT&E Int, 2008, 41: 82–87
- 虞付进, 赵燕伟, 张克华. 超声检测表面残余应力的研究与发展. 表面技术, 2007, 36: 72–75
- Sahoo S, Sharma G L, Katiyar R S. Raman spectroscopy to probe residual stress in ZnO nanowire. J Raman Spectrosc, 2012, 43: 72–75
- 韩志勇, 张华, 王志平. 热障涂层残余应力的拉曼光谱测量及数值分析. 航空学报, 2012, 33: 369–374
- Beghini M, Bertini L. Recent advances in the hole drilling method for residual stress measurement. J Mater Eng Perform, 1998, 7: 163–172
- 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. Exp Mech, 2013, 53: 1223–1231
- Baldi A. Residual stress measurement using hole drilling and integrated digital image correlation techniques. Exp Mech, 2014, 54: 379–391
- Qin L, Xie H M, Zhu R H, et al. Study of the location of testing area in residual stress measurement by Moiré interferometry combined with hole-drilling method. Sci China Phys Mech, 2014, 57: 708–715
- Li K Y, Ren W. Application of miniature ring-core and interferometric strain/slope rosette to determine residual stress distribution with depth—Part I: Theories. J Appl Mech, 2007, 74: 298–306
- Li K Y, Ren W. Application of miniature ring-core and interferometric strain/slope rosette to determine residual stress distribution with depth—Part I: Experiments. J Appl Mech, 2007, 74: 307–314
- Hu Z X, Xie H M, Lu J, et al. Residual stresses measurement by using ring-core method and 3D digital image correlation technique. Meas Sci Technol, 2013, 24: 085604
- 张景忠, 吕洪岱, 郁红, 等. 环芯法测定残余应力的基本原理及其应用. 一重技术, 1997, 3: 56–59
- 张景忠, 商成海, 于克江, 等. 用环芯法测定残余应力的基本原理和潜在的应用范围. 一重技术, 2001, 2–3: 135–138
- 王桂芳, 陈惠南. 环芯法测量深度方向上的残余应力分布. 机械强度, 1997, 19: 22–26
- 陈惠南. 大型汽轮机、发电机转子残余应力测量新方法—环芯法及国外应用实例. 大型铸锻件, 1997, 1: 40–45
- 周新灵, 张小伍, 李兴东, 等. 测试大型汽轮机转子残余应力的环芯法和 X 射线法. 理化检验-物理分册, 2008, 44: 196–202
- Pagliaro P, Prime M B, Swenson H, et al. Measuring multiple residual-stress components using the contour method and multiple cuts, Exp

- Mech, 2010, 50: 187–194
- 26 Mahmoudi A H, Sheikhpour M R, Heydarian S. A novel cutting strategy for measuring two components of residual stresses using slitting method. *Exp Mech*, 2014, 54: 1237–1246
 - 27 何世平, 傅绍军, 苏永刚. 应用云纹干涉法测量冷挤压孔周残余应力分布. *实验力学*, 1987, 2: 67–76
 - 28 王召煌, 李国禄, 王海斗, 等. 云纹干涉法测量残余应力的研究进展. 2011 年全国青年摩擦学与表面工程学术会议论文集. 北京: 中国机械工程学会. 2011
 - 29 Han B, Post D, Ifju P G. Moiré interferometry for engineering mechanics: Current practices and future developments. *J Strain Anal Eng*, 2001, 36: 101–117
 - 30 Ifju P G, Han B. Recent applications of moiré interferometry. *Exp Mech*, 2010, 50: 1129–1147
 - 31 戴福隆, 亚敏, 谢惠民, 等. 云纹干涉与钻孔法测量残余应力的实验方法与系统. *实验力学*, 2003, 18: 313–318
 - 32 齐红宇, 刘金龙, 杨晓光, 等. 基于云纹干涉法与钻孔法的等离子热障涂层残余应力实验. *航空动力学报*, 2001, 26: 617–621
 - 33 马兆芳, 邢永明, 姜爱峰, 等. 利用显微云纹干涉法对一种硼/环氧树脂复合纤维材料的单纤维界面热残余应力的测量. *力学与工程应用*, 2010, 13: 170–172
 - 34 常红, 姚河省, 侯丽丽. 相移云纹干涉法与盲孔法相结合检测复合材料的残余应力. *力学季刊*, 2006, 27: 511–514
 - 35 金香花, 陈巨兵, 辛全成. 钻孔法和光栅应变花测试复合材料的残余应力. *实验力学*, 2005, 20: 77–82
 - 36 ASTM. Standard test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain-gage method (ASTM E837-13a), 2013
 - 37 中华人民共和国水利部. 钻孔应变法测量残余应力的标准测试方法, 2010
 - 38 中华人民共和国工业和信息化部. 残余应力测试方法钻孔应变释放法, 2013
 - 39 朱建国. 热障涂层宏观残余应力的测试和分析. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 2013. 61–63

Experimental study on residual stress measurement methods of moiré interferometry based on ring-core and slitting

WU LiFu¹, ZHANG BaoGe², HUO ChengMin³, ZHU JianGuo² & XIE HuiMin¹

¹ AML, Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

² Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

³ AVIC Shenyang Engine Design and Research Institute, Shenyang 110015, China

In this study, we combined moiré interferometry with ring-core and slitting to measure the residual stress in the interference assembled specimens. For ring-core method coupled with moiré interferometry, the moiré patterns of the tested region were obtained through observing the specimen in different magnifications. And a rectification method was proposed for slitting method coupled with moiré interferometry, using which more accurate measurement results can be obtained. Moreover, residual stress of each specimen was measured using a strain rosette, whose result was taken as a reference value. Through comparisons, we found that residual stresses in the specimens measured by moiré interferometry-based methods agreed well with their reference values, which validated the feasibilities of these two approaches. Besides, when coupled with moiré interferometry, ring-core method was found of higher accuracy compared with slitting method.

residual stress, moiré interferometry, interference assembled specimen, ring-core, slitting

doi: 10.1360/N092014-00354