

激光损伤残余应力三维检测技术

齐乃杰¹, 袁晓东², 张丽娟², 刘诚^{1,3*}

¹江南大学理学院计算光学实验室, 江苏 无锡 214122;

²中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;

³中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

摘要 为了准确测量残余应力的分布情况, 提出一种基于反射式暗场白光数字全息残余应力三维检测技术。该技术将激光损伤点附近区域沿着轴向以数值化的形式离散成多层, 每层的暗场反射光强度正比于该层光学双折射的轴向梯度, 因此利用白光数字全息测量每层暗场反射光强度, 即可结合光弹效应重建各层的剪切应力。通过对激光损伤的熔石英玻璃测量, 实际验证所提技术可以对样品的三维残余应力分布进行准确重建, 且轴向分辨率可达 10 μm 。实验结果表明, 所提技术可以提高加工工艺和衡量产品的质量。

关键词 测量; 光弹性; 残余应力检测; 白光全息

中图分类号 O343

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1004001

Three-Dimensional Detection Technology of Laser Damage Residual Stress

Qi Naijie¹, Yuan Xiaodong², Zhang Lijuan², Liu Cheng^{1,3*}

¹Computational Optics Laboratory, School of Science, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

²Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China;

³Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract To accurately measure the residual stress distribution, a reflective dark-field white light digital holography-based three-dimensional (3D) residual stress detection technology is proposed herein. This technology discretizes the area near the laser damage point into multiple layers in a numerical manner along the axis. The intensity of the dark-field reflected light of each layer is proportional to the axial gradient of the optical birefringence of the layer. Therefore, white-light digital holography is used to measure each layer. By measuring the reflected light intensity of each layer dark field with white light digital holography, the shear stress of each layer can be reconstructed by combining the photoelastic effect. Through the measurement of laser-damaged fused silica glass, it is verified that the proposed technique can accurately reconstruct the three-dimensional residual stress distribution of the sample, and the axial resolution can reach 10 μm . Experimental results show that the proposed technology can improve processing technology and also measure the quality of products.

Key words measurement; photoelasticity; residual stress detection; white light holography

OCIS codes 120.3180; 120.4290; 140.3380; 170.6960

1 引言

随着激光材料性能的不不断提升^[1]和脉冲展宽压缩技术^[2]的成熟应用, 激光器的输出功率和单脉冲的能量越来越高^[3], 而高强激光已经成为众多前沿科学研究和先进技术研发的重要工具, 被广泛应用

于粒子加速^[4]、实验室天体物理^[5]、聚变能源^[6]及质子医疗^[7]等前沿科学研究领域和材料切割^[8]、光学抛光^[9]及微型光学器件制造^[10]等精密工程技术领域。在高能量密度的条件下, 激光链路中元件的轻微瑕疵、安装误差、泵浦不均匀和热量沉积等因素所引起的微小光束不均匀性^[11-12], 都会因为强激光条

收稿日期: 2020-03-13; 修回日期: 2020-04-18; 录用日期: 2020-04-28

基金项目: 国家自然科学基金(U1730132, 61705092)、江苏省自然科学基金(BK20170194)、中央高校基本科研业务费专项(JUSRP51721B)

* E-mail: chengliu@siom.ac.cn

件下的各种复杂非线性光学效应而被急剧放大,并在下游光路中产生能量超过光学元件材料损伤阈值的局域聚焦点,使光学元件发生损伤^[13-16]。激光损伤的发生往往是级联性的,一个已经发生损伤的元件在透过率、折射率和应力状态等方面的改变^[17-18]会作为新的不均匀问题,而损伤光路下游更多的元件,进而造成整个激光系统的性能迅速下降。高功率激光元件一般尺寸大、精度高而且加工周期长,特别是高功率纳秒激光装置三倍频段熔石英材质的光学元件,发生损伤后需要激光修复才能再次使用。激光修复^[19-20]的原理:利用聚焦激光束对损伤坑及周围的碎屑和微小裂纹进行辐照,使其在短时间内被气化蒸发或熔融,将激光损伤从包含很多损伤碎屑和气化凝结物的初始状态修复到光滑状态,从而显著改善元件的透过率。由于熔石英材料对 CO₂ 激光有良好吸收性,工程应用中大多使用 CO₂ 激光对材料进行激光修复。但 CO₂ 激光在去除材料微小裂纹和碎屑的同时,会在修复后的损伤坑周围产生残余应力^[21-22],并因存在的双折射效应使高功率激光束产生新的不均匀问题。在残余应力较大的情况下,修复后的损伤坑周围会产生新的细碎裂纹。CO₂ 激光损伤修复的应力控制是目前激光损伤修复技术所面临的一个主要问题,客观上需要对光学元件修复前和修复后的应力状态进行精确测量,以实现修复工艺的改进和修复效果的评估。

用于激光损伤测量的传统应力测量技术包括光弹法^[23]、氢氟酸腐蚀法^[24]、拉曼散射法^[25]和纳米压印法^[26]等。纳米压印法仅能探测元件表面的应力状态,对于元件内部的应力状态无法检测;拉曼散射法对于内部无序结构的玻璃等材质的元件,该方法对元件应力无法进行有效检测;氢氟酸刻蚀法通过

逐层剥离光学元件表层并每次测量表层的应力分布来实现三维测量,但会对元件造成不可逆的损伤,不能用于激光修复的检测;光弹法是目前用于光学元件激光损伤检测中较为实用的测量技术^[23],其将线偏振平行光束垂直照射到元件的损伤点上,并在元件后表面放置一个与照明光偏振方向垂直的偏振片,偏振片后的光强平方根正比于损伤产生的剪切应力的轴向平均值。因此光弹性测量方法仅能提供应力沿着光轴方向的投影,而不能测量应力的精确三维分布,其所提供的二维应力分布信息对于理解应力的产生机制、评估损伤的修复效果和提升修复工艺的的帮助都非常有限。

为了对激光损伤和激光修复的残余应力分布进行准确的三维测量,本文提出一种基于反射式暗场白光像面全息三维应力检测技术,实现对激光损伤区域剪切应力 $\tau(x, y, z)$ 的精确三维测量。在对测量技术进行系统理论分析的同时,并对其可行性进行实验验证,以 10 μm 的轴向分辨率实现对 $\tau(x, y, z)$ 的三维高精度测量。所提技术可以为 CO₂ 激光修复效果的衡量和修复工艺的改进提供新的有力检测工具。

2 基本原理

根据激光损伤的相关研究^[27-28],激光损伤点周围的残余应力分布特性如图 1 所示。从图 1(a) 可以看到,主应力 $\sigma_{//}(x, y, z)$ 大致在以损伤点为中心的径向上分布,另一个主应力 $\sigma_{\perp}(x, y, z)$ 大致在以损伤点为中心的环向上分布。从图 1(b) 可以看到,将损伤点周围存在的残余应力区域沿 z 轴方向分成多层,其中第 k 层与主应力相平行的径向和环向的主折射率可以分别表示为 $n_k^{//}(x, y)$ 和 $n_k^{\perp}(x, y)$ 。

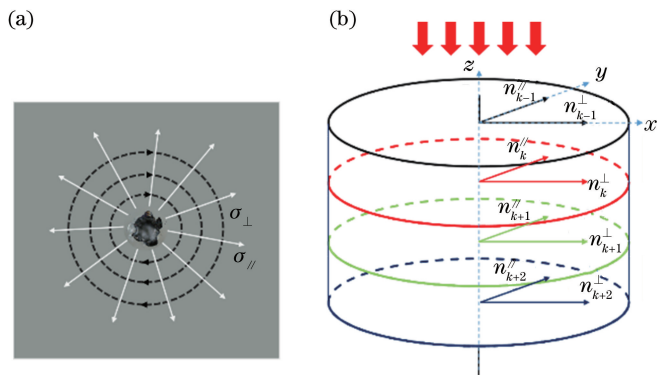


图 1 激光损伤点周围的残余应力分布特性。(a)两个主应力轴;(b)沿 z 轴方向数值切片的双折射分布
Fig. 1 Residual stress distribution characteristics around laser damage point. (a) Two principal stress axes;
(b) birefringence distribution of numerical slices along z -axis

由图 1(b)可知,当线偏振光从顶部照向损伤材料时,会在不同层的界面上发生反射。在大多数情况下^[29-30],由应力双折射引起的折射率变化远小于空气折射率 n_0 的千分之一,因此每层上的照明光强

度都近似等于第一层的光强。如果样品的照明光是复振幅模为 E_0 的线偏振光,且偏振方向与 x 轴的夹角为 θ ,则在第 k 层与第 $k+1$ 层界面反射的反射光场为

$$E_k^{\parallel}(x, y) = E_0 \cos \theta \frac{n_k^{\parallel}(x, y) - n_{k+1}^{\parallel}(x, y)}{n_k^{\parallel}(x, y) + n_{k+1}^{\parallel}(x, y)} \exp \left[2i \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^{z_k} n^{\parallel}(x, y, z) dz \right], \quad (1)$$

$$E_k^{\perp}(x, y) = E_0 \sin \theta \frac{n_k^{\perp}(x, y) - n_{k+1}^{\perp}(x, y)}{n_k^{\perp}(x, y) + n_{k+1}^{\perp}(x, y)} \exp \left[2i \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^{z_k} n^{\perp}(x, y, z) dz \right], \quad (2)$$

式中: λ 为光的波长; z_k 为第 k 层的深度。反射光在通过与入射光偏振方向正交的检偏器后,其光场的合振动可以表示为

$$E_k(x, y) = \frac{1}{2} E_0 \sin 2\theta \left\{ \frac{n_k^{\parallel}(x, y) - n_{k+1}^{\parallel}(x, y)}{n_k^{\parallel}(x, y) + n_{k+1}^{\parallel}(x, y)} \exp \left[2i \int_0^{z_k} \frac{2\pi}{\lambda} n^{\parallel}(x, y, z) dz \right] - \frac{n_k^{\perp}(x, y) - n_{k+1}^{\perp}(x, y)}{n_k^{\perp}(x, y) + n_{k+1}^{\perp}(x, y)} \exp \left[2i \int_0^{z_k} \frac{2\pi}{\lambda} n^{\perp}(x, y, z) dz \right] \right\}. \quad (3)$$

相应的光强可以表示为

$$I_k(x, y) = I_0 \sin^2 2\theta (A + B - C + D) / 4, \quad (4)$$

其中

$$A = \left[\frac{n_k^{\parallel}(x, y) - n_{k+1}^{\parallel}(x, y)}{n_k^{\parallel}(x, y) + n_{k+1}^{\parallel}(x, y)} \right]^2, \quad (5)$$

$$B = \left[\frac{n_k^{\perp}(x, y) - n_{k+1}^{\perp}(x, y)}{n_k^{\perp}(x, y) + n_{k+1}^{\perp}(x, y)} \right]^2, \quad (6)$$

$$C = 2 \frac{n_k^{\parallel}(x, y) - n_{k+1}^{\parallel}(x, y)}{n_k^{\parallel}(x, y) + n_{k+1}^{\parallel}(x, y)} \frac{n_k^{\perp}(x, y) - n_{k+1}^{\perp}(x, y)}{n_k^{\perp}(x, y) + n_{k+1}^{\perp}(x, y)}, \quad (7)$$

$$D = 4 \frac{n_k^{\parallel}(x, y) - n_{k+1}^{\parallel}(x, y)}{n_k^{\parallel}(x, y) + n_{k+1}^{\parallel}(x, y)} \frac{n_k^{\perp}(x, y) - n_{k+1}^{\perp}(x, y)}{n_k^{\perp}(x, y) + n_{k+1}^{\perp}(x, y)} \sin^2 \left\{ \int_0^l [n_k^{\parallel}(x, y) - n_k^{\perp}(x, y)] dl \right\}, \quad (8)$$

式中: I_0 为光强; l 为第 k 层材料的光学厚度。由于(8)式远小于(7)式,因此(4)式可以简化为

$$I_k(x, y) \approx \frac{1}{4} I_0 \sin^2 2\theta \left[\frac{n_k^{\parallel}(x, y) - n_{k+1}^{\parallel}(x, y)}{n_k^{\parallel}(x, y) + n_{k+1}^{\parallel}(x, y)} - \frac{n_k^{\perp}(x, y) - n_{k+1}^{\perp}(x, y)}{n_k^{\perp}(x, y) + n_{k+1}^{\perp}(x, y)} \right]^2. \quad (9)$$

由于 $n_k^{\parallel} + n_{k+1}^{\parallel} \approx 2n_0$ 和 $n_k^{\perp} + n_{k+1}^{\perp} \approx 2n_0$, 因此(5)式可以进一步简化为

$$I_k(x, y) \approx \frac{1}{4} I_0 \sin^2 2\theta \left[\frac{n_k^{\parallel}(x, y) - n_{k+1}^{\parallel}(x, y)}{2n_0} - \frac{n_k^{\perp}(x, y) - n_{k+1}^{\perp}(x, y)}{2n_0} \right]^2 = \frac{1}{4} I_0 \sin^2 2\theta \left[\frac{\Delta n_k(x, y) - \Delta n_{k+1}(x, y)}{2n_0} \right]^2. \quad (10)$$

根据光弹性原理^[31], $n_k^{\parallel}(x, y) - n_k^{\perp}(x, y) = P\tau_k(x, y)$, $n_{k+1}^{\parallel}(x, y) - n_{k+1}^{\perp}(x, y) = P\tau_{k+1}(x, y)$, 其中 P 为应力双折射系数,所以(10)式可以表示为

$$\Delta\tau_k(x, y) = \frac{4n_0}{P} \sqrt{\frac{I_k(x, y)}{I_0}}. \quad (13)$$

$I_k(x, y) = \frac{P^2}{16n_0^2} E_0^2 \sin^2 2\theta [\tau_k(x, y) - \tau_{k+1}(x, y)]^2$. (11)
如果照明光为圆偏振光,则(11)式可以表示为

由于(13)式中的 $\Delta\tau_k(x, y)$ 是第 k 层和第 $k+1$ 层切片之间的剪切应力差,可以通过测量每个界面的反射光强度来计算所有界面的剪切应力差,然后对 $\Delta\tau_k(x, y)$ 沿 z 轴向求和,得到每一层的剪切应力分布 $\tau_i(x, y)|_{i=1,2,3,\dots,n}$, 则表达式为

$$I_k(x, y) = E_0^2 [\Delta\tau_k(x, y)]^2. \quad (12)$$

从而得到剪切应力的轴向差为

$$\tau_k(x, y) = \sum_0^{k-1} \Delta\tau_k(x, y). \quad (14)$$

3 实验与分析

为了验证所提方法的可行性,搭建的暗场白光数字全息光路如图 2 所示,其中 CCD 为电子耦合器件。使用功率为 0.8 W 的超连续谱激光,经过准直和扩束后的激光束被起偏器转变为线偏振光,然后被分光棱镜分为两束,一束从激光损伤点的背面对损伤区域进行照明,另一束照射在参考物体上。从两臂反射回来的光束经过检偏器后被透镜收集,最后被放置在样品和参考物共同像平面上的探测器所记录。激光的中心波长为 850 nm,并且光谱的半峰全宽为 100 nm,照明光的相干长度约为 7.2 μm 。因此,只有当物光和参考光的光程差小于 7.2 μm 时,损伤区域不同深度的界面反射光才能与参考光发生干涉并形成规则的干涉条纹。当沿光轴逐步移

动参考物体时,可以测量图 1(b)所有界面反射光的强度,并利用(13)式来计算所有深度的剪切应力轴向差 $\Delta\tau_k(x, y)$,并进一步计算得到各个深度的剪切应力 $\tau_k(x, y)$ 。图 2 中的四分之一波片能够改变参考镜入射光的偏振状态,旋转其角度可以实现对参考光的强度调整。同时,损伤坑内滴入折射率匹配液以减少来自玻璃-空气界面的反射光干扰。所用的样品是一块厚度为 5 mm 的熔石英玻璃,在其表面上有使用能量为 5.3 J、波长为 1064 nm 的聚焦脉冲激光导致的激光诱导损伤点,损伤坑的全场显微结构如图 2 插图所示。从图 2 插图可以看到明显的损伤碎屑和气化凝结物。当实际测量时,若图 1(b)各界面与元件表面不平行,则(4)式不能严格成立,因此为了减小测量误差,需要避免测量样品倾斜。

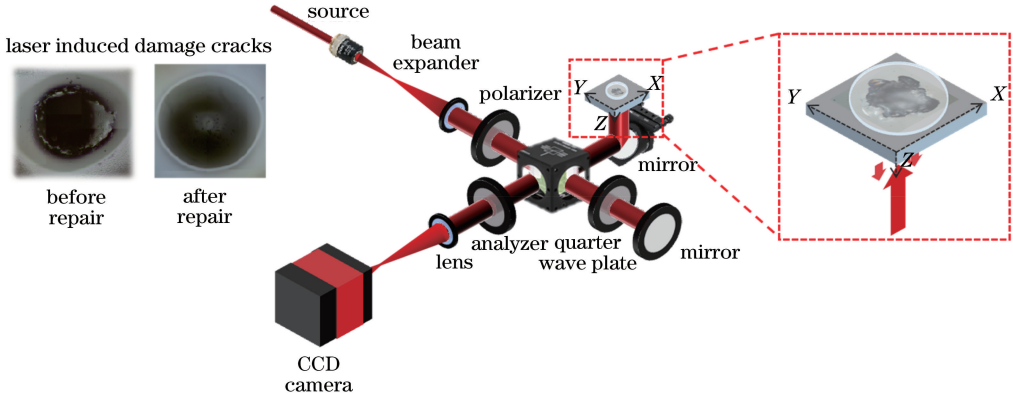


图 2 测量激光诱导损伤残余应力的实验装置

Fig. 2 Experimental setup for measuring residual stress of laser-induced damage

图 3(a)为一组参考镜在不同深度所记录的干涉图样。从局部放大图可以看到规则的干涉条纹,但由于只有与参考光光程相等的界面反射光才能形成干涉条纹,因此条纹的可见性较低。图 3(b)为相应界面上的反射光强度 $I_k(x, y)$,而反射光强度与应力梯度成正比,则(11)式可以改写为

$$\Delta\tau_k(x, y, z) =$$

$$\Delta z \left. \frac{\partial \tau(x, y, z)}{\partial z} \right|_{z=z_k} = \frac{4n_0}{P} \sqrt{\frac{I_k(x, y)}{I_0}}, \quad (15)$$

式中: Δz 为每个薄层的厚度。根据函数最大值处的一阶导数为零这一基本数学定理, $\tau(x, y, z)$ 在其最大值的深度处一定满足 $\frac{\partial \tau(x, y, z)}{\partial z} = 0$, 所以由(15)式可知,反射光强度 $I(x, y)$ 在 $\tau(x, y, z)$ 取最大值的深度将接近于零。从图 3(b)可以看到,深度为 60 μm 处的反射光强度趋近于零,据此可判断应力在此深度处达到最大。采用(14)式可

以计算得到不同深度的轴向应力梯度,进一步计算所有深度的剪切应力,得到部分深度的剪切应力如图 3(c)所示。从图 3(c)可以看到,残余剪切应力在每个深度处几乎都是旋转对称的,而且从光学元件的表面开始,随着深度的增加,剪切应力快速增加,并在深度为 60 μm 处达到最大值,然后随着深度的增加而逐渐变弱,直到深度为 110 μm 处接近于零。

为了分析激光修复后损伤点周围的应力分布情况,使用聚焦 CO_2 激光去除损伤点周围的细微裂纹、碎屑和气化凝结物,修复后损伤点的显微照片如图 2 插图所示。从图 2 插图可以看到,修复后的损伤点变得非常光滑,透过率大大提高。使用相同装置对修复后的损伤点进行再次测量,部分深度的残余应力如图 3(d)所示。与图 3(c)相比可以看到,修复后的激光损伤点周围的残余应力明显变小,可以显示出很好的修复效果。

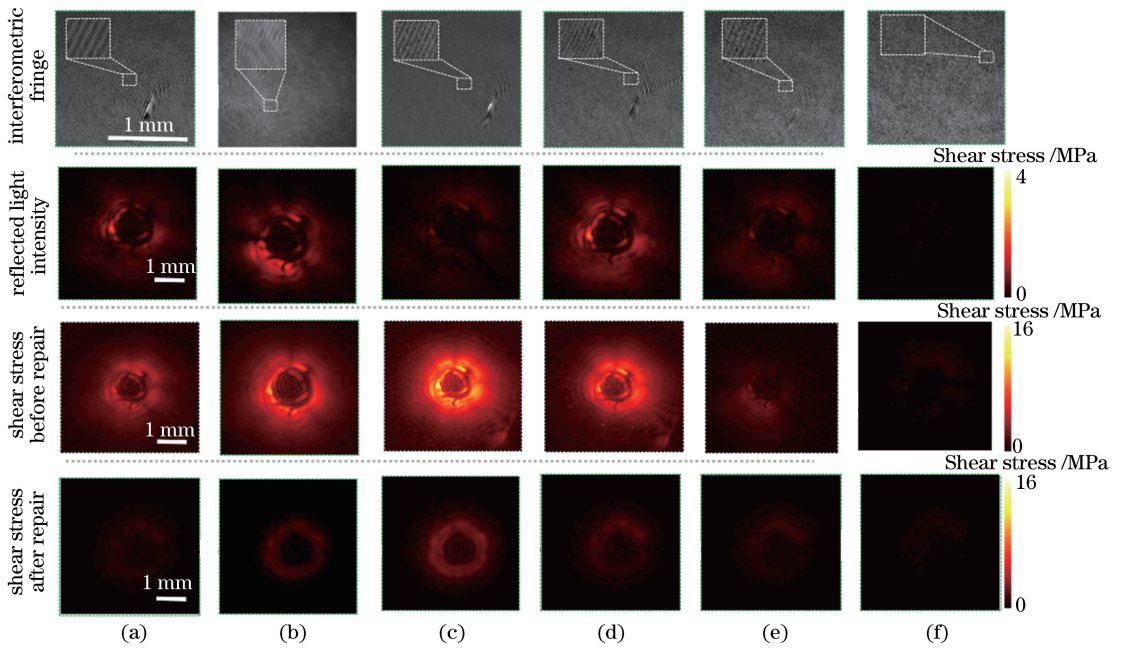


图 3 不同深度的干涉图样、反射光强度及剪切应力。(a) 30 μm ; (b) 50 μm ; (c) 60 μm ; (d) 70 μm ; (e) 100 μm ; (f) 110 μm

Fig. 3 Interference patterns, reflected light intensity and shear stress at different depths.

(a) 30 μm ; (b) 50 μm ; (c) 60 μm ; (d) 70 μm ; (e) 100 μm ; (f) 110 μm

对修复后和修复前在 20 μm 处的剪切应力 $\tau_k(x, y)$ 进行比较, 结果如图 4(a) 和图 4(b) 所示。修复前和修复后的各层平均应力与深度的关系, 如图 4(c) 所示。从图 4(c) 可以看到, 修复前和修复后的最大应力都出现在 60 μm 的深度处, 但是修复后的应力仅约为修复前的 1/4。图 4(d) 为修复前和修

复后在 60 μm 深度处的剪切应力径向分布, 其中实线表示修复前的应力, 虚线表示修复后的应力。从图 4(d) 可以看到, 修复后的最大应力为修复前应力的 1/4, 而且修复前在径向 400 μm 和 600 μm 处的两个应力峰已经消失, 初步猜测是在去除碎屑和裂纹的过程中, 损伤坑外扩, 导致应力得到部分释放。

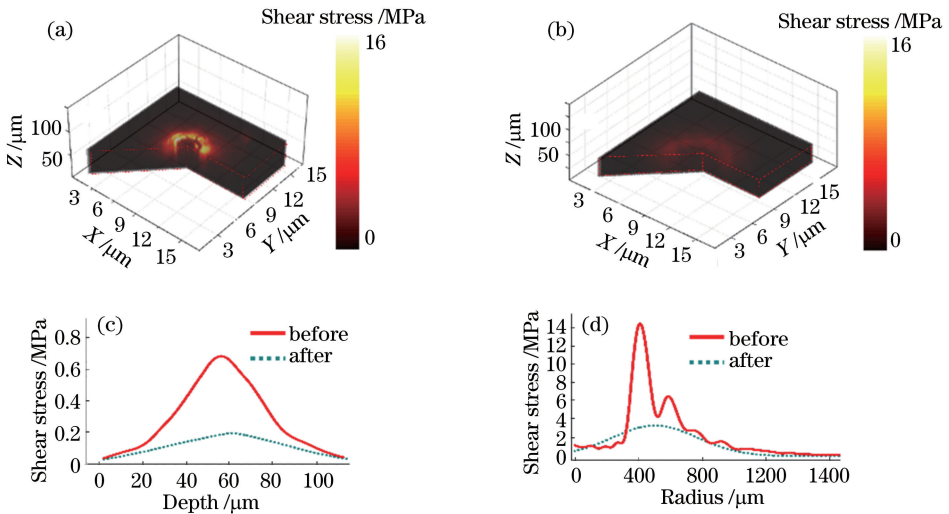


图 4 修复前后的残余应力的三维图和平均应力分布。(a) 修复前的残余应力的三维图; (b) 修复后的残余应力的三维图; (c) 沿深度的平均应力分布; (d) 沿径向的平均应力分布

Fig. 4 Three-dimensional graphs and average stress distribution of residual stress before and after repair. (a) Three-dimensional diagram of residual stress before repair; (b) three-dimensional diagram of residual stress after repair; (c) average stress distribution along depth; (d) average stress distribution along radial direction

为了测量实验系统的轴向分辨率,使用分辨率板作为样品进行实验。由于分辨率板不是双折射样品,为了记录其图像,需要将检偏器旋转角度约为 2° ,使系统“漏出”少部分物光的能量。尽管此时记录的图像不再是暗场光弹性图像,但系统的轴向分辨率保持不变。图5为实验装置的轴向分辨率测量结果,其中图5(a)为沿轴向不同深度对应点的平均强度变化曲线,图5(b)为系列图像沿轴向 $50\ \mu\text{m}$ 范围内,每间隔 $1\ \mu\text{m}$ 所重建的强度图像。从图5可以看到,在深度

为 $25\ \mu\text{m}$ 的位置 P_3 处,强度达到最大;在深度为 $16\ \mu\text{m}$ 和 $30\ \mu\text{m}$ 的位置 P_2 和 P_4 处,强度减小到最大值的一半;在深度为 $0\ \mu\text{m}$ 和 $50\ \mu\text{m}$ 的位置 P_1 和 P_5 处,强度已经近似为零。实验结果表明,实验系统的轴向分辨率为 $10\ \mu\text{m}$ 。需要说明的是, $14\ \mu\text{m}$ 的轴向分辨率是在空气中测量的结果,系统的轴向分辨率对应于光学切片的光程,即 $L = n_1 d_1 = n_0 d_0$,其中 n_1 为材料的折射率, d_1 为材料光学切片的厚度, d_0 为电动平移台的步进距离。

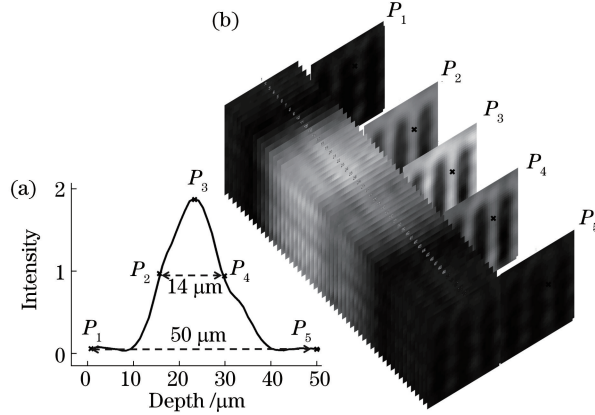


图5 实验装置的轴向分辨率测量结果。(a)沿轴向不同深度对应点的平均强度变化曲线;(b)每间隔 $1\ \mu\text{m}$ 所重建的强度图像
Fig. 5 Axial resolution measurement results of experimental setup. (a) Average intensity change curve of corresponding points at different depths along axis; (b) intensity image reconstructed every $1\ \mu\text{m}$

4 结 论

提出基于白光干涉的激光损伤残余应力检测技术,该技术可以较好地解决传统测量方法无法对激光损伤点周围的残余应力进行无损三维测量的难题。实验结果表明,实际测量的轴向分辨率高达 $10\ \mu\text{m}$,基本满足高功率激光领域中对 CO_2 激光修复残余应力的测量要求。该测量方法能够实现无损的三维应力检测,不经改动就可加工激光光学器件,并可用来测量加工过程所产生的残余应力,也可以提高加工工艺和衡量产品质量。

参 考 文 献

[1] He D B, Kang S, Zhang L Y, et al. Research and development of new neodymium laser glasses [J]. High Power Laser Science and Engineering, 2017, 5: e1.
[2] Seidel M, Arisholm G, Brons J, et al. All solid-state spectral broadening: an average and peak power scalable method for compression of ultrashort pulses [J]. Optics Express, 2016, 24(9): 9412-9428.
[3] Bowers M, Wisoff J, Herrmann M, et al. Status of NIF laser and high power laser research at LLNL [J].

Proceedings of SPIE, 2017, 1008: 1008403.
[4] Ledingham K W D, Galster W. Laser-driven particle and photon beams and some applications [J]. New Journal of Physics, 2010, 12(4): 045005.
[5] Liu X M, Li Y, Zhang Y J, et al. Collisionless shockwaves formed by counter-streaming laser-produced plasmas [J]. New Journal of Physics, 2011, 13(9): 093001.
[6] Hora H, Korn G, Giuffrida L, et al. Fusion energy using avalanche increased boron reactions for block-ignition by ultrahigh power picosecond laser pulses: ERRATUM [J]. Laser and Particle Beams, 2015, 33 (4): 773.
[7] Danson C, Hillier D, Hopps N, et al. Petawatt class lasers worldwide [J]. High Power Laser Science and Engineering, 2015, 3(1): e3.
[8] Sharma A, Yadava V. Experimental analysis of Nd-YAG laser cutting of sheet materials-a review [J]. Optics & Laser Technology, 2018, 98: 264-280.
[9] Weingarten C, Schmickler A, Willenborg E, et al. Laser polishing and laser shape correction of optical glass [J]. Journal of Laser Applications, 2017, 29 (1): 011702.
[10] Pinkerton A J. Lasers in additive manufacturing [J]. Optics & Laser Technology, 2016, 78: 25-32.

- [11] Conder A, Chang J, Kegelmeyer L, et al. Final optics damage inspection (FODI) for the National Ignition Facility [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7797: 77970P.
- [12] Yin X H, Zhang G W, Zhou S L, et al. Criteria study of laser induced damage [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(1): 011404.
尹宪华, 张国文, 周申蕾, 等. 激光损伤机理判断研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(1): 011404.
- [13] Glass A J, Guenther A H. Laser induced damage of optical elements—a status report [J]. *Applied Optics*, 1973, 12(4): 637-649.
- [14] Cao Z, He H B, Hu G H, et al. Time-resolved investigation of multiple-pulse laser-induced bulk damage in fused silica [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(8): 0803001.
曹珍, 贺洪波, 胡国行, 等. 多脉冲激光诱导熔石英体损伤的时间分辨研究[J]. *中国激光*, 2019, 46(8): 0803001.
- [15] Shan C, Zhao Y A, Zhang X H, et al. Study on laser damage threshold of optical element surface based on gaussian pulsed laser spatial resolution [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(1): 0104002.
单翀, 赵元安, 张喜和, 等. 基于高斯脉冲激光空间分辨测量光学元件表面激光损伤阈值研究[J]. *中国激光*, 2018, 45(1): 0104002.
- [16] Li T T, Zhang M J, Tian K Z, et al. Femtosecond laser-induced damage on Ge-Sb-S chalcogenide glass [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 1016001.
李铜铜, 张鸣杰, 田康振, 等. Ge-Sb-S 硫系玻璃的飞秒激光诱导损伤研究[J]. *光学学报*, 2019, 39(10): 1016001.
- [17] Chambonneau M, Diaz R, Grua P, et al. Origin of the damage ring pattern in fused silica induced by multiple longitudinal modes laser pulses [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(2): 021121.
- [18] Demos S, Staggs M, Minoshima K, et al. Characterization of laser induced damage sites in optical components [J]. *Optics Express*, 2002, 10(25): 1444-1450.
- [19] Hu G H, Zhao Y A, Li D W. Technology and mechanism of CO₂ laser treatment for mitigating surface damage growth [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0814001.
胡国行, 赵元安, 李大伟. 抑制损伤发展的 CO₂ 激光修复技术及机理研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(8): 0814001.
- [20] Mendez E, Nowak K M, Baker H J, et al. Localized CO₂ laser damage repair of fused silica optics [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(21): 5358-5367.
- [21] Cormont P, Gallais L, Lamaignère L, et al. Impact of two CO₂ laser heatings for damage repairing on fused silica surface [J]. *Optics Express*, 2010, 18(25): 26068-26076.
- [22] Li X B, Wang H J, Yuan X D, et al. Effects of CO₂ laser irradiation on surface morphology and stress distribution of fused silica [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(9): 0903002.
李熙斌, 王海军, 袁晓东, 等. CO₂ 激光辐照对熔石英表面形貌与应力分布的影响[J]. *中国激光*, 2011, 38(9): 0903002.
- [23] Narayanamurthy C S, Pedrini G, Osten W. Digital holographic photoelasticity [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(13): 213-217.
- [24] Wong L, Suratwala T, Feit M D, et al. The effect of HF/NH₄F etching on the morphology of surface fractures on fused silica [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2009, 355(13): 797-810.
- [25] Zhang Y, Xu Y S, You C Y, et al. Raman gain and femtosecond laser induced damage of Ge-As-S chalcogenide glasses [J]. *Optics Express*, 2017, 25(8): 8886-8895.
- [26] Dahmani F, Lambropoulos J C, Schmid A W, et al. Nanoindentation technique for measuring residual stress field around a laser-induced crack in fused silica [J]. *Journal of Materials Science*, 1998, 33(19): 4677-4685.
- [27] Zhang Z, Liu H J, Huang J, et al. Residual stress near cracks of K9 and fused silica under 1064 nm nanosecond laser irradiation [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(11): 114201.
- [28] Gallais L, Cormont P, Rullier J. Investigation of stress induced by CO₂ laser processing of fused silica optics for laser damage growth mitigation [J]. *Optics Express*, 2009, 17(26): 23488-23501.
- [29] Masters B R, Boyd R W. *Nonlinear optics* [M]. 3rd ed. Massachusetts: Academic Press, 2009.
- [30] Sakakura M, Terazima M. Initial temporal and spatial changes of the refractive index induced by focused femtosecond pulsed laser irradiation inside a glass [J]. *Physical Review B*, 2005, 71(2): 024113.
- [31] Kuske A, Robertson G. *Photoelastic stress analysis* [M]. London: Wiley, 1974.