

# 紧固孔多点激光喷丸诱导残余应力的数值模拟

张兴权 黄志伟 章 艳 叶小华 张义伟 段士伟 黄志来

安徽工业大学机械工程学院, 安徽 马鞍山 243002

**摘要** 激光喷丸强化技术是一种新型的材料表面改性技术相比于传统喷丸强化技术,具有明显的优势。采用试验与有限元分析相结合的方法,探讨了在一定冲击顺序下,多点激光喷丸强化处理后紧固孔周围残余应力的分布情况。结果表明,通过多个直径为 2.6 mm 光斑的组合能形成一个直径近似为 6 mm 的较大圆形冲击区域,可用来替代大直径光斑进行冲击强化。在多点激光喷丸强化过程中,由于多个光斑叠加,导致冲击区域的表面残余压应力幅值由第一点冲击后的 134 MPa 增加到冲击结束后的 254 MPa,冲击区域变形深度也逐渐增大到 26.6  $\mu\text{m}$ 。在冲击区域钻孔后,紧固孔孔口边缘处的最大残余压应力值明显减小。模拟值与实验值吻合较好。

**关键词** 激光光学;紧固孔;多点激光喷丸强化;残余应力;表面形貌

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0602002

## Numerical Simulation of Residual Stress around Fastener Hole Subjected to Multiple Laser Shock Peenings

Zhang Xingquan Huang Zhiwei Zhang Yan Ye Xiaohua Zhang Yiwei

Duan Shiwei Huang Zhilai

School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan, Anhui 243002, China

**Abstract** Laser shock peening is a novel material surface modification technique, which is superior to conventional shot peening technology. The experiments and finite element analysis method are combined, the residual stress distribution of the fastener hole after laser shock peening is discussed under certain impact order. The results show that the combination of several small spots with diameter of 2.6 mm can lead to a large circular processed area of nearly 6 mm in diameter, which can replace a single large spot for shock peening. The amplitude of the surface residual stress is increased from 134 MPa after the first impact to 254 MPa after multiple laser shock peenings, and the maximum depth of shocked region is also gradually enhanced to 26.6  $\mu\text{m}$ . After hole drilling in the shocked region, the maximum residual stress around the fastener hole edge decreases sharply. The simulation value agrees well with the experimental value.

**Key words** laser optics; fastener hole; multiple laser shock peenings; residual stress; surface morphology

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 350.3850

## 1 引 言

在航空航天等制造业中,紧固孔被广泛用来装配和连接各部件,如一架飞机上的紧固孔就达几十万个。在航天器服役过程中,紧固孔受到交变载荷和腐蚀介质的反复作用,其应力集中的孔边容易发生疲劳开裂的情况,从而导致结构件失效。紧固孔的疲劳破坏约占飞机总失效率的 50%~90%,是飞机结构件最常见的损伤形式之一<sup>[1]</sup>。因此,为了保证飞行器的使用安全,在装配过程中需要对受力部位的紧固孔进行强化处理<sup>[2]</sup>,在其周围形成塑性强化层,提高其抵抗疲劳开裂的能力,从而延长飞行器的服役寿命。在早期研究中,通常采用单个直径较大的光斑诱导冲击波对紧固孔进行强化处理<sup>[3-4]</sup>。由于诱导冲击波的激光功率密度要

收稿日期: 2016-01-29; 收到修改稿日期: 2016-02-29

基金项目: 国家自然科学基金(51175002)、安徽省自然科学基金(090414156)

作者简介: 张兴权(1970-),男,博士,教授,主要从事激光表面强化方面的研究。E-mail: zhxq@ahut.edu.cn

达到  $10^8 \text{ W/cm}^2$  以上,激光器需要输出很高的能量才能满足大光斑诱导冲击波的功率密度要求。高能量的输出容易在激光器的光学器件中产生热透镜效应<sup>[5]</sup>,不仅影响输出光束的质量,而且对光学器件产生很大的热损伤,导致激光器的使用寿命大大缩短。而采用小光斑则可以降低脉冲输出的能量,从而有效避免热透镜效应,但强化区域较小,因此较大区域的强化通常采用多个光斑组合才能完成,目前这种方法已被越来越多地采用<sup>[6-7]</sup>。另外,在使用圆形光斑进行激光冲击强化时,采用光斑搭接可以有效抑制残余应力洞现象,还可以获得幅值较大且均匀的残余压应力场,明显提高了被冲击材料的疲劳特性<sup>[8]</sup>。

本文采用强激光诱导的冲击波对常用的 7075 航空铝合金上的紧固孔进行强化。主要通过 9 个直径为 2.6 mm 的光斑按照一定冲击顺序对指定的区域进行强化,然后在强化的区域钻孔,通过有限元分析软件 ABAQUS 模拟了在一定加载顺序下的残余应力场的形成过程和表面形貌的特点,并进行了相应的试验验证。

## 2 激光冲击原理

激光冲击强化是一种新型的表面处理技术,其原理是利用高能激光束穿过透明的约束层辐照在金属材料表面的吸收层上,使吸收层材料气化,形成等离子体,等离子体继续吸收激光能量后形成高温高压的等离子体,高温高压等离子体的迅速膨胀形成了激光冲击波。冲击波作用在金属材料表面上,形成了向金属材料内部传播的应力波。当应力波峰值压力超过了材料的动态屈服极限时,金属材料表层将发生不可逆的塑性变形,其表层组织结构和应力状态也发生改变,实现晶粒细化并产生残余压应力<sup>[9-10]</sup>,从而使材料的力学性能和机械性能得到了改善。残余压应力的存在能有效降低金属表面裂纹尖端的应力强度因子、减缓裂纹的扩展速率,进而延长了金属材料的疲劳寿命<sup>[11-12]</sup>。

## 3 有限元模拟

紧固孔的激光喷丸强化存在两种工艺:1)先在金属板材上打孔,再对孔的边缘进行激光喷丸强化;2)先在金属板材的指定区域进行激光喷丸强化,然后在被强化区域打孔。已有的研究表明<sup>[13]</sup>,采用先喷丸强化后打孔的工艺更有利于提高孔的疲劳寿命。因此,采用先强化后打孔的方案。

激光冲击是一个高应变率的瞬时动态过程,包含非常复杂的非线性分析问题。因此激光冲击强化诱导残余应力的数值模拟包括两部分:1)在 ABAQUS/Explicit 模块中完成材料对冲击波作用下动态响应的过程分析,当显式分析中动能趋于零,不再有塑性变形发生时,其形成的动态应力基本保持稳定,材料的动态响应分析结束;2)将 ABAQUS/Explicit 模块中得到的瞬态响应结果导入到 ABAQUS/Standard 模块中,模拟材料在高速冲击下的回弹,释放存储在动态结果中的弹性应变能,从而得到稳定的残余应力场。在研究对 9 点依次进行激光冲击处理的过程中,先对第 1 点冲击进行动态和静态分析,然后将其静态分析结果导入到动态模块中,作为第 2 点的初始状态,并进行第 2 次冲击加载,再进行动态和静态分析,以此类推。第 9 点动态分析结束后,先将孔部位的材料定义为一个集合,并且通过 ABAQUS 隐式分析中单元生死法的命令流来去除靶材中心部位的材料以形成紧固孔,再进行静态分析,最后得到孔口周边残余应力场<sup>[14]</sup>。模拟过程如图 1 所示。

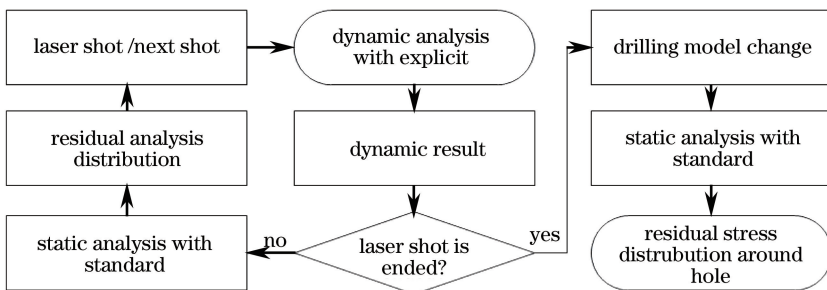


图 1 残余应力场的模拟过程

Fig. 1 Simulation process of residual stress field

### 3.1 有限元模型

在对多点激光冲击的建模过程中,考虑到试验的条件以及模拟与试验的一致性,建模时没有选择二维轴对称无限单元模型,而是建立了三维有限元模型,如图 2 所示,在有限元的边界区域和内部都采用有限单元<sup>[15-16]</sup>。模型的几何尺寸与试样的尺寸均为 12 mm×12 mm×3 mm,单元类型为 C3D8R。为了提高计算精度同时减少计算量,在有限元网格划分时,水平面内的单元长度均为 0.1 mm,但在模型厚度方向上单元长度不统一,上半部分的单元长度为 0.15 mm,下半部分的单元长度从 0.2 mm 依次增加到 0.3 mm,总共得到 241664 个单元,边界条件为底面全约束。

### 3.2 材料本构关系

激光喷丸强化过程中,靶材的应变率超过  $10^6 \text{ s}^{-1}$ ,因此在准静态条件下建立的材料本构关系将不再有效。随着应变率的增加,材料的屈服强度明显增加。冲击波作用后,材料表层产生了塑性变形,因此激光冲击还应考虑塑性强化带来的影响。为了精确分析材料在高应变率下的应力应变关系,工程上广泛采用 Johnson-Cook 模型,其较好地考虑了金属材料的加工硬化、应变率效应。关系式为<sup>[17]</sup>

$$\sigma = (A + B\epsilon^n) \left[ 1 + C \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right) \right], \quad (1)$$

式中  $A$ 、 $B$ 、 $C$  为材料常数, $\epsilon$  是等效塑性应变, $\dot{\epsilon}$  为应变率, $\dot{\epsilon}_0$  为准静态载荷下的应变率。7075 铝合金的 Johnson-Cook 模型中所需的参数如表 1 所示<sup>[18]</sup>。

表 1 7075 铝合金的力学性能参数

Table 1 Mechanical properties of 7075 aluminum alloy

Material	$A$ /MPa	$B$ /MPa	$n$	$C$	$\dot{\epsilon}_0$
7075	430	350	0.4	0.12	1

### 3.3 加载压力及冲击顺序

激光冲击波压力峰值大小和时空分布的确定是数值模拟的首要问题。在激光喷丸强化过程中,为了提高冲击波的压力峰值和延长其作用时间,增加强化效果,通常采用约束模型,常用的约束层为水或者有机玻璃,试验中采用水为约束层。根据已有的冲击波压力随时间演化的研究成果<sup>[19]</sup>,约束模型下冲击波压力持续时间为激光脉宽的 2~3 倍,在试验时采用的激光脉宽为 8 ns,则冲击波压力持续时间约为 24 ns。激光冲击诱导的峰值压力可以估算为<sup>[20]</sup>

$$P = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha + 3}} \sqrt{Z} \sqrt{I_0}, \quad (2)$$

$$\frac{2}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}, \quad (3)$$

式中  $\alpha$  为内能转化热能部分的系数,取值为 0.15, $Z$  为折合声阻抗,单位为  $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。 $I_0$  为激光功率密度,单位为  $\text{GW}/\text{cm}^2$ 。 $Z_1$ 、 $Z_2$  分别为吸收层和约束层的声阻抗,其中吸收层铝箔的声阻抗  $Z_1 = 1.41 \times 10^6 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ,约束层水的声阻抗  $Z_2 = 0.165 \times 10^6 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。

根据上述计算得到的冲击波峰值压力及其随时间的分布规律,模拟中采用的冲击波压力加载曲线如图

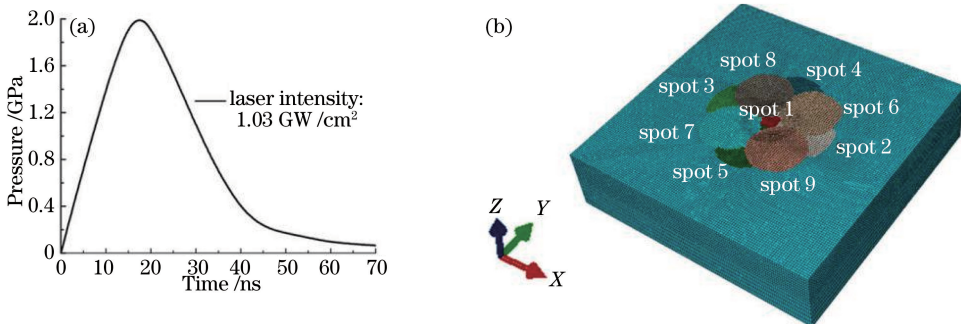


图 2 (a)加载曲线和(b)加载顺序

Fig. 2 (a) Loading curve and (b) loading sequence

2(a)所示。冲击顺序按照图 2(b)依次进行,从第 1 点位置开始,依次逐点进行,直到第 9 点结束。冲击过程中相邻两光斑的距离为 1.7 mm,最后得到了一个直径近似为 6 mm 的圆形冲击强化区域。

## 4 激光喷丸强化试验

采用线切割方法直接将厚度为 3 mm 的 7075 铝合金板料切割成 12 mm×12 mm 的试样。分别用粒度 800<sup>#</sup> 和 1200<sup>#</sup> 的 SiC 砂纸依次消除板材表面压制成型时的纹理,进行表面抛光,用蒸馏水洗净、吹干。然后在试样表面贴上一层厚度为 100 μm 的专用铝箔作为烧蚀层,用厚度约为 1 mm 的水帘作为约束层。试验所用的激光器为调 Q 型 Nd:YAG 激光器,频率为 8 Hz,波长为 1064 nm。机械手夹持试样边缘区域,通过控制机械手运动的轨迹控制激光的冲击顺序和路径。激光冲击后,去除试样表面残留的铝箔,用 OLYMPUS DSX510 型超景深显微镜观察试样的表面形貌。

采用 X 射线应力仪测定钻孔前和钻孔后的残余应力,在测量深度方向上的残余应力时,还需要采用电解抛光逐层剥离的方法。测定方法采用侧倾固定 Ψ 法测定衍射峰。X 射线由 Cr Kα 靶发出,衍射管直径约为 1 mm。测量时,X 射线衍射管的电压和电流分别为 20 kV 和 5.0 mA,Cr Kα 特征辐射,衍射晶面(211),2θ 角扫描步距为 0.10°,计数时间为 0.5 s,扫描的起始角和终止角分别为 130°和 142°。每个点的残余应力测量 3 次,取平均值作为结果。

## 5 结果分析与讨论

### 5.1 残余应力分析

利用有限元软件模拟激光逐点冲击,经过动态和静态分析后得到了 Von Mises 应力分布,表面的应力分布云图如图 3 所示。由图 3 可以看出,第 1 点冲击后,表面形成了一个与光斑大小相当的应力场,Von Mises 应力的最大值为 153.0 MPa。第 2 点冲击后,最大 Von Mises 应力值增加至 207.6 MPa,相比于第 1 点冲击后的应力,幅值增加了 54.6 MPa,最大应力出现在两光斑叠加的区域。第 3 点冲击结束后,应力场的面积继续扩大,Von Mises 应力最大为 213.0 MPa。在进行第 6 点的冲击时,冲击区域与前面的 5 次冲击区域不仅有两两的叠加,而且还出现 3 次叠加。因此该区域处的表面应力值最大,达到了 247.6 MPa。第 9 点冲击结束后,表面形成一个近似圆形的较大应力场,表面应力值最大为 271.0 MPa。在冲击区域去除材料形成孔后,孔边缘处的 Von Mises 应力值为 270.5 MPa。

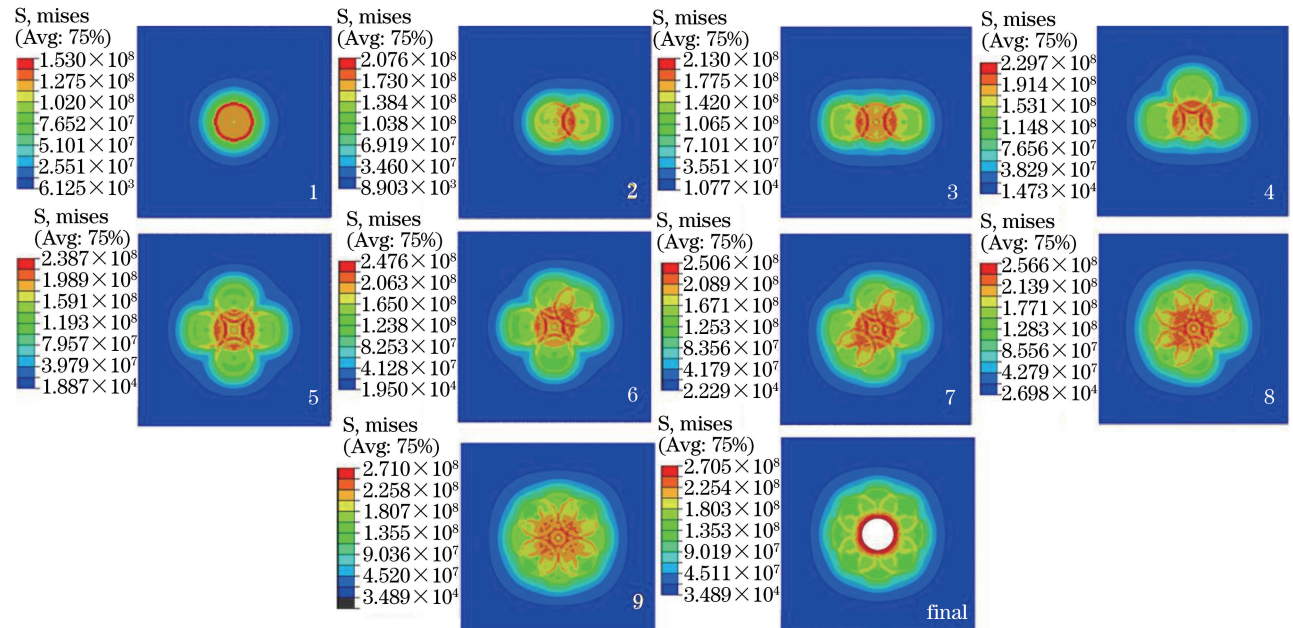


图 3 依次逐点冲击后表面的 Von-Mises 应力分布云图

Fig. 3 Von Mises stress distribution after laser shock peening spot by spot

材料在峰值压力为 2 GPa 的冲击波加载下,内部的质点远离平衡位置形成应力波。应力波消失后,加载的压力远高于材料的动态屈服极限,材料表层发生了塑性变形,其阻碍发生弹性变形的材料恢复到原来的平衡位置,因此产生了残余压应力。沿着平行于水平方向且经过试样中心的路径取值,图 4 为每次冲击加载后表面残余应力的分布曲线。在已有的加载顺序下,每一次加载后工件表面的残余应力都有所变化。第 1 点冲击结束后,表面残余压应力最大达到 134 MPa;第 2 点冲击结束后,表面残余压应力值增加较为明显,最大值为 182 MPa,增大了 48 MPa,这是因为在重叠区域进行了 2 次激光冲击,形成了残余压应力叠加,这与相关文献的研究结果<sup>[21]</sup>是一致的,该现象也存在于第 3 点冲击结束后。第 4 点和第 5 点冲击后表面残余压应力值增加不明显,这是因为取值路径与第 3 点冲击取值路径相同。在 9 次冲击结束后,随着冲击区域覆盖整个孔周围,表面残余压应力达到最大值。钻孔后,孔口边缘的残余压应力幅值减小明显,这是因为材料去除后,孔口边缘处的约束被解除,残余应力得到释放。

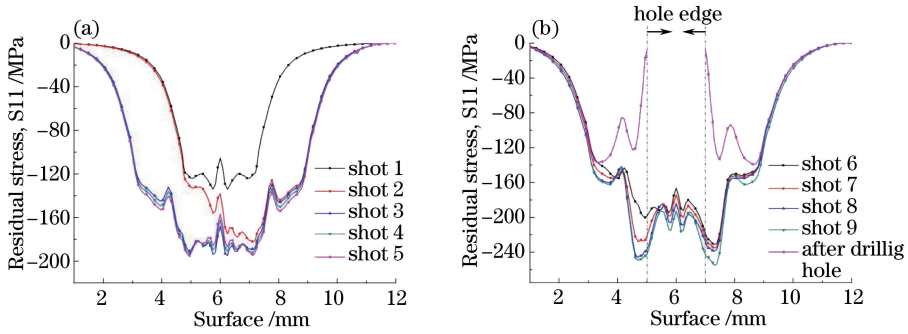


图 4 表面残余应力的分布。(a) 前 5 个点; (b) 后 4 个点和钻孔后

Fig. 4 Residual stress distribution of surface. (a) First five shots; (b) last four shots and after drilling hole

图 5 为钻孔前后厚度方向的残余应力分布云图。从图 5 可以看出,钻孔前和钻孔后表层均存在一定深度的残余压应力;残余压应力的存在将有效降低紧固孔在使用过程中由外力所引起的应力幅值,降低了裂纹的应力强度因子,从而延长了孔的疲劳寿命。

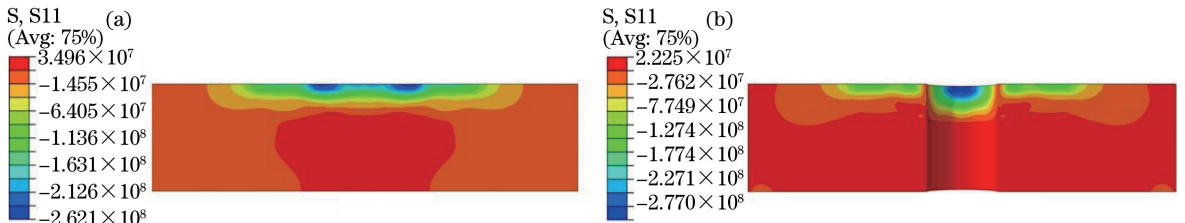


图 5 厚度方向的残余应力分布云图。(a) 钻孔前; (b) 钻孔后

Fig. 5 Residual stress distribution along thickness. (a) Before drilling hole; (b) after drilling hole

图 6 为钻孔前后表面和孔边深度方向的残余应力分布曲线。图 6(a) 显示在模拟和试验结果中,钻孔前表面最大残余压应力值分别为 254 MPa 和 226 MPa,钻孔后的表面最大残余压应力值分别为 133 MPa 和 138 MPa;模拟和试验结果均表明表面方向各点处残余压应力有所减小,这主要是残余应力被释放的缘故。

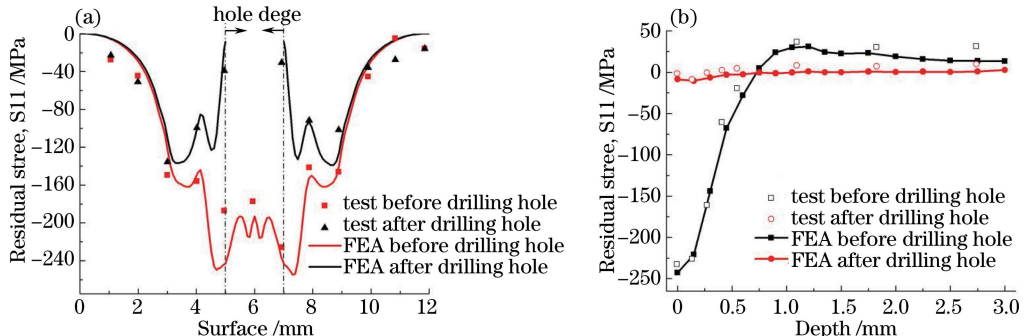


图 6 钻孔前后的残余应力分布。(a) 沿表面方向; (b) 沿孔深度方向

Fig. 6 Residual stress distribution before and after drilling hole. (a) Along surface direction; (b) along depth of hole edge

图 6(b)显示模拟结果中孔口处的残余压应力值由 242 MPa 减小至 8 MPa,试验结果由 231 MPa 减小至 5 MPa;孔边沿深度方向的残余应力值也明显减小,这也是由于钻孔后残余应力被释放。从图 6 可以看出,模拟得到的残余应力数据与实验数据吻合较好。

### 5.2 表面形貌分析

激光冲击引起表面变形形貌的模拟结果如图 7(a)所示,可以看出,9 点冲击结束后,试样的中心隆起,冲击区域的表面有多个深浅不同的凹坑,变形的区域为圆形。沿着测量路径 1 和 2 测量表面变形的深度,如图 7(b)所示。由图 7 可知,路径 1 和路径 2 所经过区域的变形深度不断变化,光斑重叠区域的变形深度比单次冲击区域的变形深度大,这是多次冲击引起塑性变形叠加的结果。路径 1 和 2 上最大变形深度分别约为 26.6  $\mu\text{m}$ 和 22.7  $\mu\text{m}$ ,最小变形深度出现在冲击区域的中心位置,这是后续冲击引起材料横向塑性流动在试样中心聚集的结果。

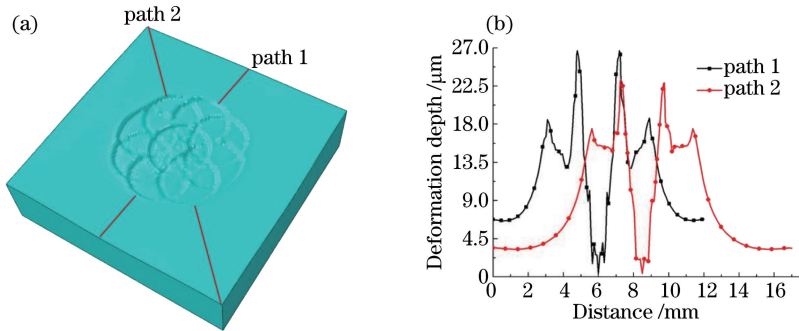


图 7 (a)冲击区域的变形形貌和(b)路径 1 和路径 2 的变形曲线

Fig. 7 (a) Deformation morphology of impacted region and (b) deformation curves of path 1 and path 2

激光冲击试验结束后,靶材上吸收层表面形貌、试样表面形貌及其放大的三维微观形貌和不同测量路径的表面变形深度如图 8 所示。从图 8(a)中可看出,激光辐照吸收层后,吸收层表面留下了被激光烧蚀的痕迹。从图 8(b)中可看出,试样表面没有被烧蚀的痕迹,这是因为试验中采用了铝箔作为烧蚀层,屏蔽了激光对金属材料表面的直接辐照,在激光烧蚀的过程中,流动的约束层水带走了大量热,同时激光辐照的时间极

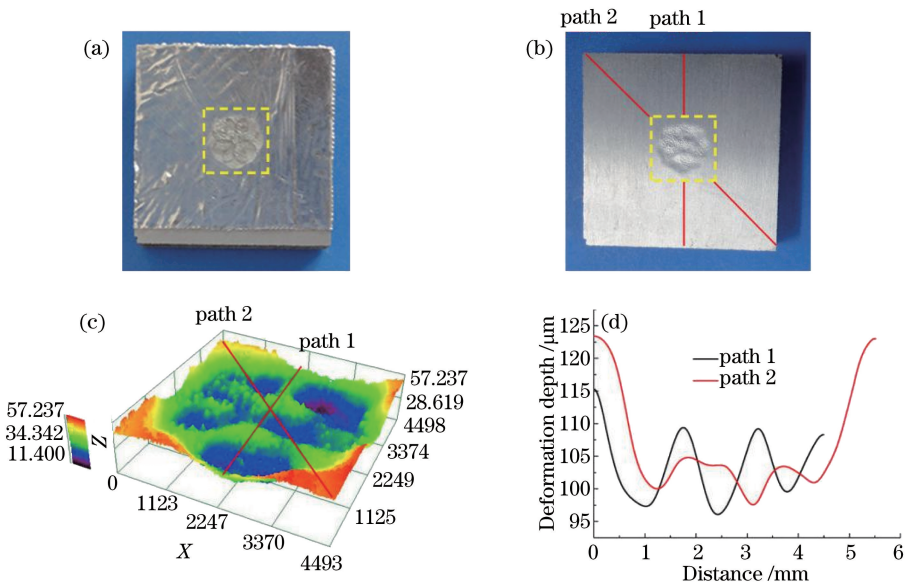


图 8 试验结束后的表面形貌。(a) 吸收层铝箔表面; (b) 试样表面; (c) 冲击区微观形貌放大图; (d) 沿不同测量路径的表面变形深度图

Fig. 8 Surface morphologies after test. (a) Absorbed layer surface; (b) treated surface; (c) magnified microscopic topography of impacted region; (d) deformation curves of different measuring paths

短(纳秒量级),生成的热也难以传递给金属靶材,因此工件的表面不会受到激光热损伤<sup>[22]</sup>。在冲击波的作用下,工件表面留下永久塑性变形的凹坑。从图 8(c)中激光冲击后的三维微观形貌图可以看出,冲击后留下了塑性坑的深度不统一,这是由于后续冲击时材料的横向流动对前期冲击形成的冲击坑有所覆盖,所以前期形成的冲击坑将不再明显,并且整个冲击区域呈现圆形的凹坑。

图 8(d)为在不同测量的路径下表体的变形曲线。从图中可以看出,路径 1 和路径 2 分别经过 3 个明显不同的冲击变形区域,其中路径 1 经过光斑 1、4、5 所在的区域,路径 2 经过光斑 1、8、9 所在的区域。在路径 1 和 2 上的最大变形深度分别约为  $19.1\ \mu\text{m}$  和  $25.7\ \mu\text{m}$ ,而模拟结果的最大变形深度为  $26.6\ \mu\text{m}$ ,因此模拟得到的表面变形深度与实验值能够较好地吻合。

## 6 结 论

通过多个小光斑按照一定顺序进行激光喷丸强化,可以形成一个较大的近似圆形的冲击区域,以替代较大光斑进行冲击强化。

在多点激光喷丸过程中,由于存在多个光斑的搭接,叠加区域相当于冲击次数的增加,所以该区域的变形深度和表面残余应力的幅值均有所增加。

在强化的区域钻孔后,孔口周围的表面和孔边深度方向的残余应力明显减小,这是因为去除材料后,孔边缘处的约束得到了消除,残余应力得到了释放。

## 参 考 文 献

- Zhang X Q, Chen L S, Yu X L, *et al.*. Effect of laser shock processing on fatigue life fastener hole[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(4): 969-974.
- Gopalakrishna H D, Murthy H N N, Krishna M, *et al.*. Cold expansion of holes and resulting fatigue life enhancement and residual stresses in Al 2024 T3 alloy-An experimental study[J]. Engineering Failure Analysis, 2010, 17(2): 361-368.
- Zou S K, Cao Z W, Zhao Y, *et al.*. Laser peening of aluminum alloy 7075 with fastener holes[J]. Chin Opt Lett, 2008, 6(2): 116-119.
- Cao Ziwen, Che Zhigang, Zou Shikun, *et al.*. The effect of laser shock peening on fatigue property of 7075 aluminum alloy fastener hole[J]. Applied Laser, 2013, 33(3): 259-262.  
曹子文, 车志刚, 邹世坤, 等. 激光冲击强化对 7075 铝合金紧固孔疲劳性能的影响[J]. 应用激光, 2013, 33(3): 259-262.
- Ding Xin, Ji Xue, Sheng Quan, *et al.*. Impact of residual and tangential thermal lens effect on output characteristics of high brightness lasers[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(11): 2780-2783.  
丁 欣, 季 雪, 盛 泉, 等. 径向、切向热透镜效应对高亮度激光器输出特性的影响[J]. 中国激光, 2010, 37(11): 2780-2783.
- Hfaiedh N, Peyre P, Song H, *et al.*. Finite element analysis of laser shock peening of 2050-T8 aluminum [J]. International Journal of Fatigue, 2015, 70: 480-489.
- Wang Cheng, Lai Zhilin, He Weifeng, *et al.*. Effect of multi-impact on high cycle fatigue properties of 1Cr11Ni2W2MoV stainless steel subject to laser shock processing[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0103001.  
汪 诚, 赖志林, 何卫锋, 等. 激光冲击次数对 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢高周疲劳性能的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0103001.
- Xue Yanqing, Zhou Xin, Li Yinghong, *et al.*. Validation and restraint of "residual stress hole" produced by laser shock peening[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(12): 121405.  
薛彦庆, 周 鑫, 李应红, 等. 激光冲击强化“残余应力洞”测试验证及抑制方法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(12): 121405.
- Cao Yupeng, Feng Aixin, Xue Wei, *et al.*. Experimental research and theoretical study of laser shock wave induced dynamic strain on 2024 aluminum alloy surface[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0903004.  
曹宇鹏, 冯爱新, 薛 伟, 等. 激光冲击诱导 2024 铝合金表面动态应变特性试验研究及理分析[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0903004.
- Liu Yuanxun, Wang Xi, Wu Xianqian, *et al.*. Surface morphology and deformation mechanism of 304 stainless steel

- treated by laser shock peening[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0103004.
- 柳沅汛, 王 曦, 吴先前, 等. 激光冲击处理 304 不锈钢表面的形貌特征及机理分析[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0103004.
- 11 Zhang Qinglai, Wang Rong, Zhang Bingxin, *et al.*. Effect of laser shock processing on mechanical properties and mesostructures of AZ31 magnesium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0303001.
- 张青来, 王 荣, 张冰昕, 等. 激光冲击强化对 AZ31 镁合金力学性能和组织结构的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0303001.
- 12 Zhang X Q, Li H, Yu X L, *et al.*. Investigation on effect of laser shock processing on fatigue crack initiation and its growth in aluminum alloy plate[J]. Materials and Design, 2015, 65: 425-431.
- 13 Ivetic G, Meneghin I, Troiani E, *et al.*. Fatigue in laser shock peened open-hole thin aluminum specimens[J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 534: 573-579.
- 14 Kim J H, Kim Y J, Kim J S. Effects of simulation parameters on residual stresses for laser shock peening finite element analysis[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2013, 27(7): 2025-2034.
- 15 Hu Y X, Gong C M, Yao Z Q, *et al.*. Investigation on the non-homogeneity of residual stress field induced by laser shock peening[J]. Surface & Coatings Technology, 2009, 203(23): 3503-3508.
- 16 Zhou Jianzhong, Yang Xiaodong, Huang Shu, *et al.*. Residual stress field of ZK60 specimen with central hole induced by both side laser shot peening[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(7): 1850-1855.
- 周建忠, 杨小东, 黄 舒, 等. 双面激光喷丸强化 ZK60 镁合金的残余应力数值研究[J]. 中国激光, 2010, 37(7): 1850-1855.
- 17 Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[C]. 7 th International Symposium on Ballistics, 1983, 21: 541-547.
- 18 Peyre P, Sollier A, Chaieb I, *et al.*. FEM simulation of residual stresses induced by laser peening[J]. The European Physical Journal Applied Physics, 2003, 23(2): 83-88.
- 19 Hong X, Wang S B, Guo D H, *et al.*. Confining medium and absorptive overlay: Their effects on a laser-induced shock wave[J]. Optics and Lasers in Engineering, 1998, 29(6): 447-455.
- 20 Fabbro R, Fournier J, Ballard P, *et al.*. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry[J]. J Appl Phys, 1990, 68(2): 775-784.
- 21 Voothaluru R, Liu C R, Cheng G J. Finite element analysis of the variation in residual stress distribution in laser shock peening of steels[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2012, 134(6): 061010.
- 22 Gill A S, Telang A, Vasudevan V K. Characteristics of surface layers formed on inconel 718 by laser shock peening with and without a protective coating[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 225: 463-472.