

激光参数对圆杆件残余应力场影响的数值模拟

汪静雪 章 艳 张兴权 戚晓利 裴善报 陈 彬

安徽工业大学机械工程学院, 安徽 马鞍山 243032

摘要 利用三维有限元技术模拟预测激光单次冲击圆杆件诱导的残余应力场,并与实验结果比较,残余应力场的预测值与实验测量值一致性较好。探讨了激光功率密度、冲击角度以及冲击次数等激光参数对残余应力场的影响。结果表明,在激光冲击圆杆件过程中,激光功率密度越大,光斑中心区域的残余压应力越小,残余应力状态最终由残余压应力变为残余拉应力;光斑中心区域的残余压应力随冲击角度的增大而增大;冲击次数在一定阈值范围内时,光斑中心的残余压应力增幅显著,之后逐渐趋于饱和。塑性强化层深度随激光功率密度和冲击次数的增加而增大,激光冲击角度对塑性强化层深度几乎没有影响。

关键词 激光技术;残余应力;有限元分析;圆杆件;塑性强化层深度

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0802007

Numerical Simulation of Residual Stress Field Induced in Round Rod Part Affected by Laser Parameters

Wang Jingxue Zhang Yan Zhang Xingquan Qi Xiaoli Pei Shanbao Chen Bin

School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan, Anhui 243032, China

Abstract A three-dimensional finite element model is established to estimate the residual stress field induced by single laser shock processing (LSP) in aluminum alloy round rod part. The simulation results are consistent with the experimental results. The effects of laser parameters including laser power density, shock angle and shock times on residual stress field are systematically investigated with the aid of the established model. The results show that during the laser shocking of round rod, larger laser power density causes smaller compressive residual stress in the central spot area. The compressive residual stress in the center area turns into tensile residual stress with the increase of laser power density, and increases with the increasing shock angle. Moreover, the compressive residual stress at the spot center increases significantly under certain impact times and gradually reaches saturation. The plastically affected depth increases with the increase of laser power density and shock times, and is almost not affected by the shock angle.

Key words laser technique; residual stress; finite element analysis; round rod part; plastically affected depth

OCIS codes 140.3380; 350.3390; 120.6650

1 引 言

杆形件已经在内燃机连杆、气门阀挺杆、飞机起落架等动力机械工程实践中广泛使用,其中有些杆件长期受到拉伸和压缩的循环载荷作用影响,当杆件上有孔等不连续变化的几何表面时,容易引起应力集中,该区域发生疲劳破坏使杆件失效。传统的表面强化技术主要包括机械喷丸强化^[1]和滚压强化^[2],这些技术在金属表层诱导的残余压应力的深度较浅,提高杆件抗疲劳性能的效果有限。激光强化技术是近年来迅速发展的一项表面强化技术,已广泛应用于板料表面强化等领域^[3],与其他表面强化技术相比,激光冲击强化

收稿日期: 2016-03-16; 收到修改稿日期: 2016-04-22

基金项目: 国家自然科学基金(51175002)、安徽省自然科学基金(090414156)、安徽工业大学研究生创新研究基金(2014056)、安徽工业大学青年教师科研基金(QZ201518)

作者简介: 汪静雪(1990—),女,硕士研究生,主要从事激光表面强化等方面的研究。E-mail: ww199720@163.com

导师简介: 张兴权(1970—),男,博士,教授,硕士生导师,主要从事激光表面强化等方面的研究。

E-mail: zhxq@ahut.edu.cn

(LSP)在工件内部产生较高的残余压应力值和较深的塑性强化层,从而减小由外部循环拉伸载荷在杆件中引起的应力幅值,推迟裂纹源的形成,减慢疲劳裂纹的扩展速率,从而延长杆件的寿命。高立等^[4]进行了激光冲击长杆料火花塞实验,实验结果表明激光冲击能够在长杆料火花塞表面诱导残余压应力并提高表面硬度,从而显著提高长杆料火花塞的耐腐蚀和抗疲劳性能。陈瑞芳等^[5]利用数值模拟和实验相结合的方法对不同形状的试件(平面试件、漏斗形试件和圆柱形试件)进行表面冲击,主要针对漏斗形和圆柱形试件的曲面,探讨了不同的曲面形状对激光冲击诱导的残余应力场的影响。吴先等^[6]建立有限元模型,计算了不同参数条件下金属靶体受冲击载荷作用的动态响应。张兴权等^[7]数值模拟了圆杆在激光冲击作用下的动态响应,探讨了圆杆直径对应力波衰减特性和应力分布的影响。目前,有关激光参数对板料件残余应力场影响的研究较多,但有关激光参数对圆杆件残余应力场影响的研究鲜有报道。

本文研究对象为航空铝合金 2024,尺寸为 $\Phi 20 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$,以 ABAQUS 有限元分析软件模拟功率密度为 2.97 GW/cm^2 ,光斑直径为 3 mm 时激光单次冲击诱导的残余应力场,再通过实验对模拟结果进行验证。在实验结果和模拟结果较为一致的基础上,使用该模型进一步探讨了激光功率密度、激光冲击角度以及冲击次数等激光参数对残余应力场的影响。

2 激光冲击强化原理

激光冲击强化原理如图 1 所示。在靶材表面涂覆一层黑漆或铝箔作为烧蚀层,以防止靶材表面被强激光烧蚀,提高材料对能量的吸收率。随后在烧蚀层上覆盖一层玻璃或流水作为约束层以增大冲击波的峰值压力,延长冲击波作用时间。激光束穿透约束层照射烧蚀层时,烧蚀层吸收激光能量瞬间气化、电离,产生高温高压等离子体,等离子体随后膨胀、爆炸,产生向金属材料内部传播的应力波。当应力波的峰值压力大于材料的动态屈服强度时,材料表层形成一定深度的残余压应力,使工件材料的机械性能和疲劳特性得到提升^[8]。

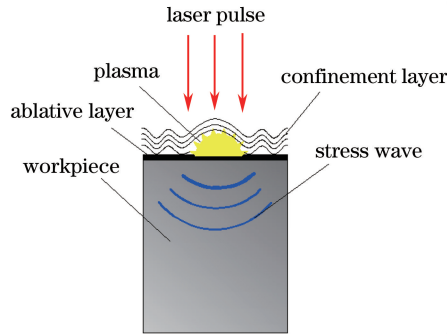


图 1 激光冲击强化原理图

Fig. 1 Schematic for LSP

3 数值模拟

3.1 有限元模型

激光冲击圆杆件的三维有限元模型如图 2 所示,圆杆件的几何尺寸为 $\Phi 20 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$,图 2 中红色区域为激光冲击区,激光的光斑直径为 3 mm。划分模型所用的单元类型为 C3D8R,为了保证计算精度和效率,加载区域网格划分得较细,远离冲击区网格划分得较疏,划分单元后获得 1.98×10^5 个单元。模型的边界条件采用底面全约束。

采用有限元软件 ABAQUS 模拟激光冲击强化诱导的残余应力场。模拟计算过程通常包括两个分析步,即显式动态分析步和隐式静态分析步。首先利用显式动态分析步模拟冲击波压力作用下材料与应力波的动态响应。显式动态分析求解完成后,将显式动态分析结果导入隐式静态分析中进行隐式分析,得到稳定的残余应力场。根据胡永祥等^[9]和 Ding 等^[10]的研究,可根据材料中能量的变化选择显式动态分析的求解时间。当材料中的动能趋于零、内能趋于稳定时,表明材料中应力波的相互作用十分微弱,材料的塑性变形也趋于稳定,其动态应力已基本保持稳定,因此可作为显式动态分析的求解时间。而静态求解时间通常达到

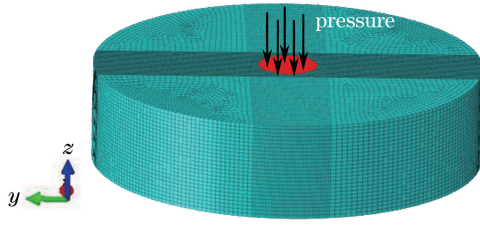


图 2 激光冲击圆杆件有限元模型

Fig. 2 Finite element model of laser shocked round rod part

毫秒量级。本文显式动态分析的求解时间设定为 5000 ns, 隐式静态分析的求解时间设为 1 s。

3.2 冲击波压力

冲击波压力时间历程是精确分析圆杆激光冲击强化过程的基本前提, Fabbro 等^[11] 推导得到冲击波峰值压力的计算公式为

$$P_{\max} = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha + 3}} \cdot \sqrt{Z} \cdot \sqrt{I_0}, \quad (1)$$

式中 α 为内能转化为热能的系数, 通常 α 取 0.1~0.2, 本文取 α 为 0.11^[12]; I_0 为激光功率密度; Z 为烧蚀层和约束层的折合声阻抗, Z 定义为

$$2/Z = 1/Z_1 + 1/Z_2, \quad (2)$$

式中 Z_1, Z_2 分别为烧蚀层铝箔和约束层水的声阻抗值, $Z_1 = 1.41 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $Z_2 = 1.65 \times 10^5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。联立(1)式和(2)式可知, 当激光功率密度分别为 3.96, 6.19, 8.92 GW/cm² 时, 对应的激光冲击波峰值压力分别为 2, 2.5, 3 GPa。

采用冲击波压力的加载曲线为高斯型曲线。研究发现, 约束模型下激光诱导的冲击波压力持续时间是脉宽的 2~3 倍^[13]。由于实验激光脉宽为 8 ns, 选择压力持续时间为 24 ns, 因此三种不同激光功率密度对应的压力随时间变化的曲线如图 3 所示。

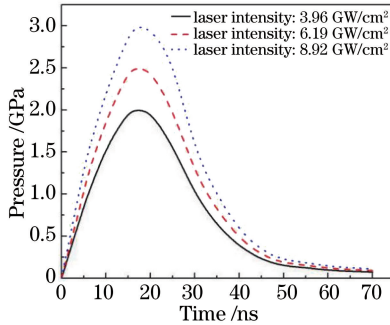


图 3 冲击波压力随时间变化的曲线

Fig. 3 Relationship between shock wave pressure and time

3.3 材料本构模型

材料本构模型采用模拟激光冲击强化中广泛使用的 Johnson-Cook (JC) 模型, JC 模型形式简单, 能够较为准确地描述激光冲击强化中材料的动态屈服应力和硬化效应对变形的影响。由于激光冲击强化利用冲击波的力学效应而非热效应诱导靶材发生塑性变形, 属于冷加工范畴, 因此采用简化的 JC 模型^[14]:

$$\sigma = (A + B\epsilon^n) [1 + C \ln(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)], \quad (3)$$

式中 σ 为屈服应力; A, B, C, n 为材料常数; ϵ 为等效塑性应变; $\dot{\epsilon}$ 为塑性应变率; $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率。JC 模型中 2024-T3 的主要参数值如下^[15]: $A = 369 \text{ MPa}$, $B = 684 \text{ MPa}$, $C = 8.3 \times 10^{-3}$, $n = 0.73$, $\dot{\epsilon}_0 = 1$ 。

4 激光冲击实验

在车床上将铝合金棒料加工成尺寸为 $\Phi 20 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的圆杆。随后采用规格为 500 # ~ 2400 # 的 SiC

砂纸对圆杆表面逐级抛光,逐步消除车削过程中由切削力在杆件端部引起的残余应力层的影响,之后再进行电解抛光,最后用无水乙醇清洗圆杆并吹干,选用铝箔作为能量吸收层,厚度为 0.1 mm;流水作为约束层,厚度为 2 mm。实验采用 Nd:YAG 型脉冲激光器,波长为 1064 nm,脉冲宽度为 8 ns,光斑直径为 3 mm,重复频率为 1 Hz。

试样表面和次表面的残余应力采用 X 射线应力仪(X350A 型)测定,利用侧倾固定 Ψ 法,交相关法定峰方式;X 射线管电压为 26 kV,电流为 6 mA,准直管的直径为 1 mm;Cu $k\alpha$ 特征辐射,衍射晶面(422), 2θ 角扫描步距为 0.10° ,计数时间为 1 s,扫描起始角和终止角分别为 133° 、 140° , Ψ 角为 0° 、 24.2° 、 35.3° 、 45° ,应力常数为 $-179 \text{ MPa}/(^\circ)$ 。为测量试样表面和次表面的残余应力,对圆杆逐层电解抛光,实验中采用 95% (体积分数) $\text{NH}_4\text{Cl} + 5\% \text{ C}_3\text{H}_8\text{O}_3$ 的电解抛光液。

5 结果与分析

5.1 表面形貌

激光冲击处理过程中,当激光照射在试样表面的吸收层铝箔时,铝箔吸收激光能量,铝箔表面材料出现熔化、气化和喷溅等现象,产生高压等离子体后,形成应力波^[16]。激光辐照后铝箔表面形貌如图 4(a)、(b)所示。由图中可以看出,铝箔被激光烧蚀,光斑中心烧蚀强烈,该区域材料被激光烧蚀熔化,产生气泡。

揭去试样表面的铝箔,并用丙酮轻轻擦除试样表面残留的吸收层,观察激光冲击后试样的表面形貌,如图 4(c)、(d)所示。从图中可以看出,圆杆经激光冲击后,表面留下光斑直径大小的凹坑,凹坑最大变形深度为 $42.16 \mu\text{m}$,且试样表面无烧蚀痕迹。这是由于铝箔作为吸收层,避免了激光对试样表面造成的热损伤,从而使得冲击凹坑内的表面形貌非常光滑。

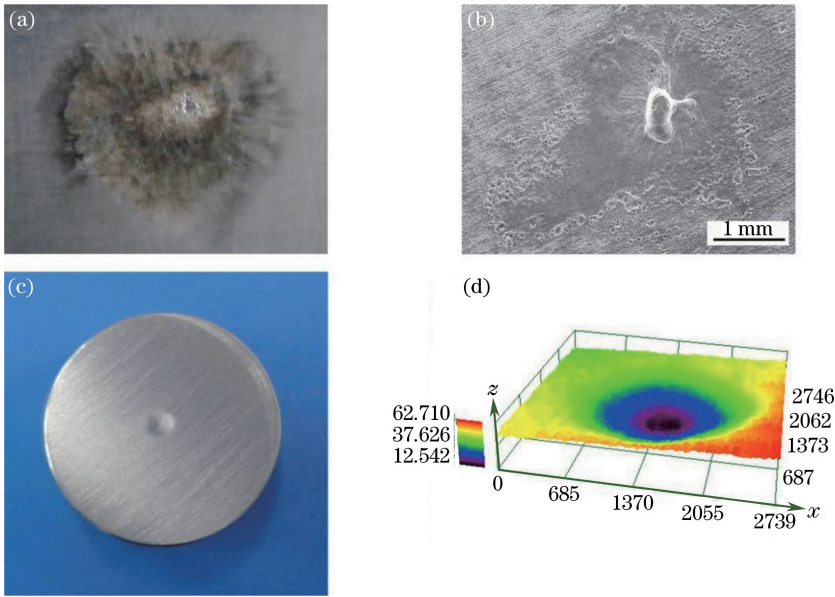


图 4 吸收层和试样表面冲击形貌图。(a) 铝箔烧蚀形貌图;(b) 铝箔烧蚀扫描电子显微镜(SEM)图像;
(c) 冲击试样的形貌图;(d) 冲击凹坑的放大图

Fig. 4 Surface morphologies of impacted ablative layer and specimen. (a) Morphology of ablated aluminum foil surface;
(b) SEM image of ablated aluminum foil surface; (c) morphology of impacted specimen surface;
(d) magnified image of crater

5.2 残余应力

激光单次冲击杆件前,采用 X 射线衍射仪测量棒料端面芯部的初始残余应力值为 -15 MPa 左右,冲击后光斑中心残余应力的测试结果如图 5 所示。残余应力沿圆杆表面方向和深度方向的分布如图 6 所示。由图 5 和图 6(a)可知,激光冲击后圆杆件光斑中心处残余压应力的测量值为 -69.7 MPa ,模拟得到光斑中心的残余压应力值为 -52.5 MPa 。表面残余压应力最大值均出现在光斑中心附近,表明激光单次冲击圆杆件

中存在光斑中心残余压应力缺失^[17]。这种在工件的加载几何中心表现为残余压应力缺失的现象称为残余应力洞,即残余压应力场中心出现的残余压应力值小于加载边缘。国内外的研究学者均认为这种现象是由于激光冲击强化过程中冲击加载边缘产生表面波(如瑞利波和剪切波),这些波沿径向向光斑中心会聚和叠加,从而引起光斑中心发生局部反向屈服,产生拉应力,降低了此处的原残余压应力值^[15,18]。

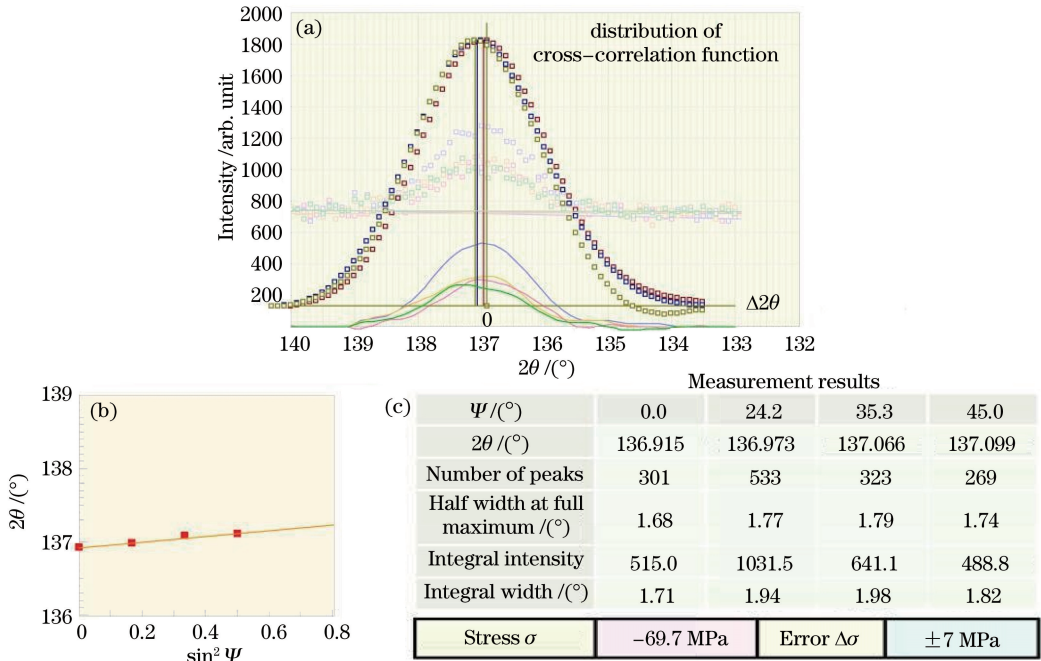


图 5 光斑中心残余应力测试结果

Fig. 5 Measurement results of residual stress at spot center

从图 6(b)可以看出,测得材料次表层的残余压应力最大值达到-125 MPa,而模拟得到的残余压应力最大值为-114 MPa;实验测得塑性强化层深度约为 1.3 mm,模拟得到的塑性强化层深度为 1 mm。实验值整体上比模拟值稍大,这主要是棒料中有初始残余压应力造成的。如果考虑初始残余应力的影响,实验值和模拟预测值较为一致,说明所建模型正确。在此基础上,进一步模拟激光功率密度、冲击角度以及冲击次数等激光参数对残余应力场的影响。

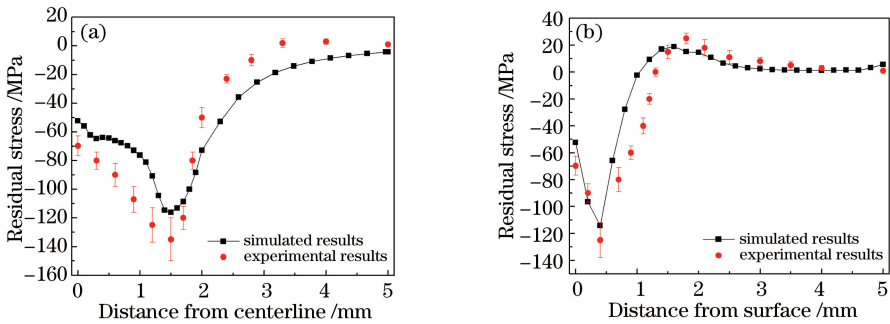


图 6 单次激光冲击 $\Phi 20$ mm 杆件的残余应力分布图。(a) 沿表面方向;(b) 沿深度方向

Fig. 6 Residual stress distributions induced by single LSP for round rod with 20 mm diameter.

(a) Along surface direction; (b) along depth direction

6 激光参数对残余应力的影响

6.1 激光功率密度

在激光脉冲宽度为 8 ns,光斑直径为 3 mm 不变的情况下,激光功率密度分别选取 3.96, 6.19, 8.92 GW/cm^2 探讨激光功率密度对残余应力场的影响。图 7 所示为不同激光功率密度下沿光斑表面方向和深度方向的残余应力分布。从图 7(a)可以看出,光斑中心区域的残余压应力值随激光功率密度增大而逐渐

减小,残余应力值由-52.5 MPa依次减小至-6.95 MPa和21.5 MPa,光斑中心区域的残余应力状态逐渐由残余压应力变为残余拉应力。与激光冲击板料件相比,激光功率密度对中心残余压应力缺失的影响更大^[19-20]。这是由于在激光冲击圆杆件中,激光功率密度越大,向杆中心会聚的瑞利波和剪切波等稀疏波的强度越大,在光斑中心产生的拉应力越大,从而大幅度降低了光斑中心的残余压应力。从图7(b)可以看出,随着激光功率密度的增大,次表层的残余压应力最大值和塑性强化层深度均增加。当激光功率密度从3.96 GW/cm²逐渐增大到8.92 GW/cm²时,次表层的残余压应力最大值从-114 MPa增加到-148 MPa和-159 MPa,塑性强化层深度从1 mm增加到1.4 mm和1.65 mm。结果表明增大激光功率密度能显著提高次表层的残余压应力最大值和塑性强化层深度^[21]。

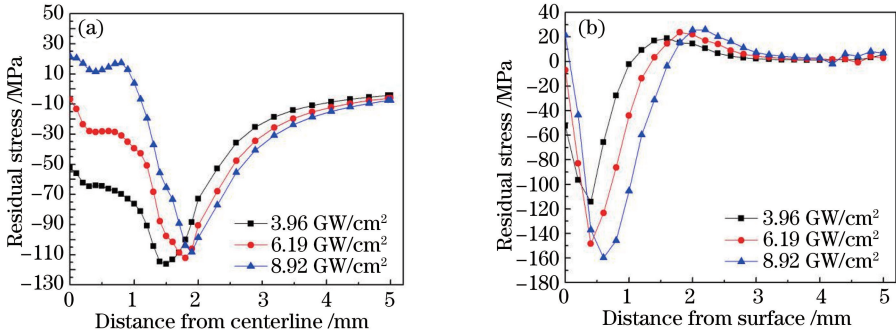


图7 不同激光功率密度下残余应力场的分布。(a)沿表面方向;(b)沿深度方向

Fig. 7 Residual stress distributions for different power densities. (a) Along surface direction; (b) along depth direction

6.2 冲击角度

冲击角度定义为激光束与工件表面法线之间的夹角。当激光功率密度为3.96 GW/cm²,激光光斑直径为3 mm,激光脉冲宽度为8 ns时,分别选取激光冲击角度为30°,45°,60°,并与激光束垂直冲击时相比较,探讨激光冲击角度对残余应力场的影响。激光束倾斜冲击时,投射到工件表面的光斑形状由圆形变为椭圆形。图8所示为不同激光冲击角度下沿光斑表面(长轴)方向和深度方向残余应力场的分布。从图8(a)可以发现,激光冲击角度由0°(垂直冲击)依次增大至30°,45°,60°时,光斑中心的残余压应力值由垂直冲击时的-52.5 MPa逐渐增大到-57,-78,-105 MPa,增加幅度分别为8.6%,37%,35%。主要原因在于圆形光斑边界上任意一点都关于圆心对称,经光斑边界反射的稀疏波全部会聚到光斑中心,产生较大的拉应力。随着冲击角度的增大,光斑形状由圆形变为椭圆形,椭圆长轴和短轴的长度不等,使得从光斑边界处反射的稀疏波不能全部同时到达光斑中心,表面稀疏波在中心的会聚强度减弱;且冲击角度越大,椭圆长短轴差值越大,使得稀疏波在传播过程中由于行程不等造成的相互抵消量增大,因此光斑中心产生的拉应力减小,使得最终光斑中心的残余压应力增大。由图8(b)可知,次表层的残余压应力最大值随激光冲击角度增大而逐渐趋于饱和,当激光冲击角度由0°依次增大至30°,45°,60°时,次表层的残余压应力最大值分别由-114 MPa增大至-122,-123,-125 MPa。随着激光冲击角度的增大,塑性强化层深度均保持在1 mm左右,表明在激光冲击圆杆件中,激光冲击角度的变化对塑性强化层深度几乎没有影响。

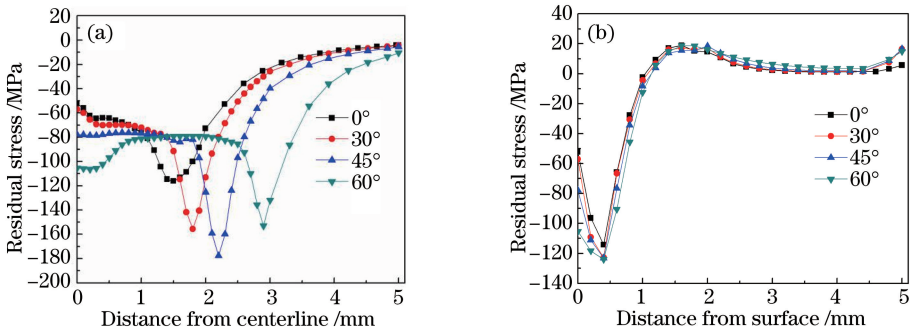


图8 不同冲击角度下残余应力场的分布。(a)沿表面方向;(b)沿深度方向

Fig. 8 Residual stress distributions for different shocking angles. (a) Along surface direction; (b) along depth direction

6.3 冲击次数

为探讨激光冲击次数对残余应力场的影响,在激光脉冲宽度为 8 ns,激光功率密度为 3.96 GW/cm² 不变的情况下,对同一区域进行多次冲击。图 9 所示为不同冲击次数下沿表面方向和深度方向残余应力场的分布。由图 9(a)可知,在同一位置进行 2 次重复冲击后,光斑中心的残余压应力由 -52.5 MPa 增加到 -78 MPa,增加幅度为 48.5%。然而经 3 次、4 次和 5 次冲击后,光斑中心的残余压应力分别减小到 -75, -74, -72 MPa。说明两次冲击对冲击区域中心的强化效果最好。由图 9(b)可知,冲击次数由 1 次逐渐增大到 4 次后,残余压应力最大值由 -114 MPa 依次增大至 -157, -162, -168 MPa,然而在同一位置进行 5 次冲击后,残余压应力最大值减小至 -157 MPa,表明经过 4 次冲击后,杆件内部的残余压应力值已经趋于饱和,继续增大冲击次数反而会降低残余压应力值。这是由于先前的冲击使得冲击区表面硬化,提高了材料的强度,先前冲击在一定程度上阻碍了后续冲击时材料的变形,导致光斑中心的残余压应力和残余压应力最大值降低。同时可以发现,随着冲击次数的增加,为了维持杆件内部的应力平衡,次表层的残余拉应力值增加幅度较大。塑性影响层深度随激光冲击次数的增加而增大,当冲击次数从 1 次增大到 5 次时,塑性影响层深度分别由 1 mm 增加到 1.3, 1.4, 1.48, 1.55 mm,增加幅度分别为 30%, 7.6%, 5.7%, 4.7%。表明增加冲击次数可显著提高塑性影响层的深度,但增加的幅值随冲击次数的增多而逐渐减小^[22]。

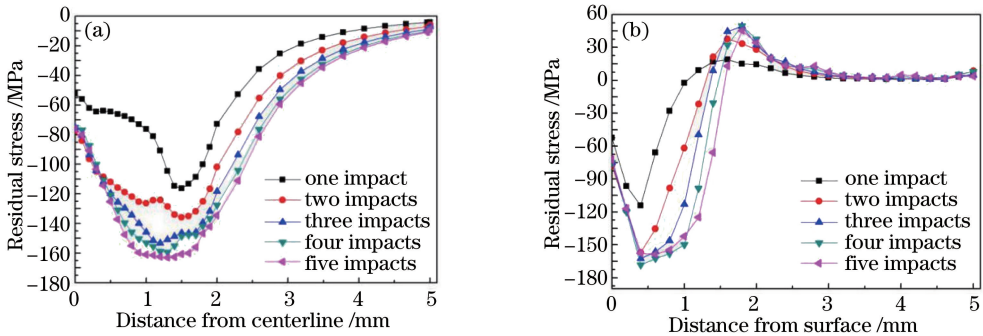


图 9 不同冲击次数下残余应力场的分布。(a) 沿表面方向;(b) 沿深度方向

Fig. 9 Residual stress distributions for different number of shocks. (a) Along surface direction; (b) along depth direction

7 结 论

铝箔作为烧蚀层有隔热作用,铝箔被激光强烈烧蚀,产生气泡,避免了强激光直接烧蚀试样表面造成热损伤,从而使得冲击凹坑的表面形貌非常光滑。与激光对板件冲击强化相比,在激光冲击圆杆件过程中,激光功率密度对光斑中心区域的残余压应力影响较大。激光功率密度越大,光斑中心区域的残余压应力缺失效应越严重,残余应力状态最终由残余压应力转变为残余拉应力;次表层的残余压应力最大值和塑性强化层深度随激光功率密度增大而增大。在其他参数相同的情况下,光斑中心的残余压应力随激光冲击角度的增大而增大,有利于改善光斑中心残余压应力的缺失效应。但次表层的残余压应力最大值随激光冲击角度的增大逐渐趋于饱和;激光冲击角度对塑性强化层深度几乎没有影响。冲击次数在一定阈值内时,光斑中心的残余压应力和残余压应力最大值的增幅较大,随后逐渐趋于饱和;而塑性影响层深度则随着激光冲击次数的增加而增大。

参 考 文 献

- 1 吴则中, 于维成, 路广元. 采用喷丸强化工艺提高抽油杆的疲劳寿命[J]. 石油机械, 1991, 19(6): 1-5.
- 2 Wang Ying, Kang Dachang. Experimental study on surface peening of pumping rod by rolling technology[J]. Hot Working Technology, 2004(6): 16-18.
王 迎, 康达昌. 抽油杆表面滚压强化的试验研究[J]. 热加工工艺, 2004(6): 16-18.
- 3 Vasu A, Hu Y X, Grandhi R V. Differences in plasticity due to curvature in laser peened components[J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 235: 648-656.
- 4 Gao Li, Zhang Yongkang. Experimental and numerical simulation of laser shock strengthening of Ni-Co alloy pole[J].

- Laser Technology, 2006, 30(5): 507-510.
- 高立, 张永康. 镍-钴合金杆料激光冲击强化的实验和数值模拟[J]. 激光技术, 2006, 30(5): 507-510.
- 5 Chen Ruifang, Chen Yuxiao, Hua Yinqun. Geometrical effects on residual stress in TC4 titanium alloy subject to laser shock processing[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2011, 32(2): 190-194.
- 陈瑞芳, 陈玉晓, 花银群. 几何形状对激光冲击波诱发残余应力场的影响[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2011, 32(2): 190-194.
- 6 Wu Xianqian, Huang Chenguang, Song Hongwei. Parameters analysis of residual stress induced by laser shock processing[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(10): 2632-2637.
- 吴先前, 黄晨光, 宋宏伟. 激光冲击强化诱导的残余应力影响因素分析[J]. 中国激光, 2010, 37(10): 2632-2637.
- 7 Zhang Xingquan, Zhang Yan, Duan Shiwei, *et al.* Numerical simulation of dynamic response of round rod subjected to laser shocking[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(9): 0903009.
- 张兴权, 章艳, 段士伟, 等. 圆杆在激光冲击作用下动态响应的数值模拟[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0903009.
- 8 Lai Zhilin, Wang Cheng, Li Yinghong, *et al.* Effect of laser shock peening and ultrasonic shot peening on fatigue property of 1Cr11Ni2W2MoV stainless steel[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(5): 051403.
- 赖志林, 汪诚, 李应红, 等. 激光冲击强化与超声喷丸对1Cr11Ni2W2MoV不锈钢疲劳性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(5): 051403.
- 9 Hu Yongxiang, Yao Zhenqiang, Hu Jun. Numerical simulation of residual stress field for laser shock processing[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(6): 846-851.
- 胡永祥, 姚振强, 胡俊. 激光冲击强化残余应力场的数值仿真分析[J]. 中国激光, 2006, 33(6): 846-851.
- 10 Ding K, Ye L. FEM simulation of two sided laser shock peening of thin sections of Ti-6Al-4V alloy[J]. Surface Engineering, 2003, 19(2): 127-133.
- 11 Fabbro R, Fournier J, Ballard P, *et al.* Physical study of laser-produced plasma in confined geometry[J]. Journal of Applied Physics, 1990, 68(2): 775-784.
- 12 Yang C H, Hodgson P D, Liu Q C, *et al.* Geometrical effects on residual stresses in 7075-T7451 aluminum alloy rods subject to laser shock peening[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 201(1): 303-309.
- 13 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.
- 14 Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[C]. Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics, 1983, 21: 541-547.
- 15 Fabbro R, Peyre P, Berthe L, *et al.* Physics and applications of laser-shock processing[J]. Journal of Laser Applications, 1998, 10(6): 265-279.
- 16 Xu Bin, Wu Xiaoyu, Luo Feng, *et al.* Ablation of 0Cr18Ni9 stainless steel films by femtosecond laser[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(1): 45-51.
- 徐斌, 伍晓宇, 罗烽, 等. 0Cr18Ni9不锈钢箔的飞秒激光烧蚀[J]. 光学精密工程, 2012, 20(1): 45-51.
- 17 Jiang Yinfang, Lai Yanling, Zhang Lei, *et al.* Investigation of residual stress hole on a metal surface by laser shock[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(8): 2073-2079.
- 姜银方, 来彦玲, 张磊, 等. 激光冲击材料表面“残余应力洞”形成规律与分析[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2073-2079.
- 18 Hu Yongxiang. Research on the numerical simulation and impact effects of laser shock processing[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.
- 胡永祥. 激光冲击处理工艺过程数值建模与冲击效应研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- 19 Wei X L, Ling X. Numerical modeling of residual stress induced by laser shock processing[J]. Applied Surface Science, 2014, 301(20): 557-563.
- 20 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.
- 21 Luo K Y, Lu J Z, Wang Q W, *et al.* Residual stress distribution of Ti-6Al-4V alloy under different ns-LSP processing parameters[J]. Applied Surface Science, 2013, 285(19): 607-615.
- 22 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.