

# 激光冲击 7050 铝合金薄板试样形成残余应力洞的机制

曹宇鹏<sup>1,3</sup> 周东呈<sup>1</sup> 冯爱新<sup>2,3</sup> 花国然<sup>1</sup> 蒋苏州<sup>1</sup>

<sup>1</sup>南通大学机械工程学院, 江苏 南通 226019

<sup>2</sup>温州大学机电工程学院, 浙江 温州 325035

<sup>3</sup>江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

**摘要** 为研究激光冲击 7050 铝合金薄板试样形成残余应力洞的机制, 分别使用功率密度为 1.98 GW/cm<sup>2</sup> 和 2.77 GW/cm<sup>2</sup> 的激光冲击 7050 铝合金试样。采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元分析软件模拟分析了在功率密度为 1.98 GW/cm<sup>2</sup> 的激光束冲击下的薄板试样。实验中利用 X 射线应力分析仪测量薄板试样和厚板试样的残余应力分布, 利用压电薄膜传感器测量激光冲击时试样的动态应变, 并利用三维显微系统观察激光冲击区域的表面微结构。实验结果表明, 功率密度为 1.98 GW/cm<sup>2</sup> 和 2.77 GW/cm<sup>2</sup> 的激光束冲击 7050 铝合金薄板试样后均产生了残余应力洞现象。反射边界条件下的模拟结果与实验数据具有较好的一致性, 表明稀疏波在光斑中心的会聚是产生残余应力洞现象的主要原因。由残余应力分布和动态应变可知, 在试样内来回反射的冲击波对残余应力洞的影响不容忽视; 功率密度为 2.77 GW/cm<sup>2</sup> 的激光束冲击加载后, 薄板、厚板试样冲击区域中心的厚度分别比临近区域的厚度大 10.800 μm 和 8.150 μm; 在表面稀疏波与冲击波的共同作用下, 试样表面均产生了残余应力洞现象。

**关键词** 激光技术; 激光冲击; 残余应力洞; 7050 铝合金

**中图分类号** TN249

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201643.1102003

## Formation Mechanism of Residual Stress Hole on 7050 Aluminum Alloy Sheet Sample Under Laser Shock

Cao Yupeng<sup>1,3</sup> Zhou Dongcheng<sup>1</sup> Feng Aixin<sup>2,3</sup> Hua Guoran<sup>1</sup> Jiang Suzhou<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong, Jiangsu 226019, China

<sup>2</sup>School of Mechanical and Electrical Engineering, Wenzhou University, Wenzhou, Zhejiang 325035, China

<sup>3</sup>School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

**Abstract** To investigate the formation mechanism of residual stress holes on 7050 aluminum alloy sheet sample under laser shock, the 7050 aluminum alloy samples are shocked by laser with the power densities of 1.98 GW/cm<sup>2</sup> and 2.77 GW/cm<sup>2</sup>, respectively. The finite element analysis software ANSYS/LS-DYNA is applied to simulating the sheet samples shocked by the laser with the power density of 1.98 GW/cm<sup>2</sup>. The distributions of residual stress on the thin plate and thick plate samples are analyzed by the X-ray stress analyzer, the dynamic strain of the samples shocked by laser is measured with the piezoelectric thin film sensor, and the surface microstructures on the shocked areas are observed through a three-dimensional microscopy system. The experimental results show that the residual stress holes on the 7050 aluminum alloy sheet samples can be caused by the laser shock with the power densities of 1.98 GW/cm<sup>2</sup> and 2.77 GW/cm<sup>2</sup>. Under reflecting boundary conditions, the simulation results agree well with the experimental data, which indicates that the gathering of the rarefaction waves to the center of the light spot is the

**收稿日期:** 2016-07-11; **收到修改稿日期:** 2016-08-11

**基金项目:** 国家自然科学基金(51505236, 51305050)、江苏省光子制造重点实验室开放基金(GZ201101)、江苏高校 2016 年度“青蓝工程”、南通大学院级课题(jx2014001)

**作者简介:** 曹宇鹏(1981—), 男, 博士研究生, 讲师, 主要从事激光加工检测技术方面的研究。

E-mail: cyp19812004@ntu.edu.cn

**导师简介:** 冯爱新(1970—), 男, 博士, 教授, 主要从事激光加工与检测技术、机械制造及其自动化等方面的研究。

E-mail: aixfeng@126.com(通信联系人)

major reason for occurrence of the residual stress holes. Through analyzing the distribution of residual stress and dynamic strain, the influence of the shock waves reflected back and forth in the samples on the residual stress holes cannot be ignored. The thicknesses of the central areas of the thin and thick plate samples are 10.800  $\mu\text{m}$  and 8.150  $\mu\text{m}$  thicker than those of their surrounding areas respectively after the samples are shocked by laser with power density of 2.77  $\text{GW}/\text{cm}^2$ . The residual stress holes on sample surfaces are caused by the joint effect of rarefaction waves and laser shock waves.

**Key words** laser technique; laser shock; residual stress holes; 7050 aluminum alloy

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900

## 1 引 言

激光冲击强化技术作为一种材料表面改性的新方法,可显著提高金属材料的综合机械性能,其原理为将高能量的激光束加载于金属表面的吸收层,利用等离子体冲击波的力学效应,使材料表面发生塑性变形并残留压应力,以改善材料的表面性能<sup>[1-4]</sup>。激光冲击强化技术多数采用光斑能量呈高斯分布的圆形光斑,光斑中心具有最大的冲击波压力;但实验研究发现,激光冲击强化后的金属试样表面残余压应力最大值位置并不在光斑中心,冲击区域常产生残余应力洞现象。Peyre 等<sup>[5]</sup>认为光斑边界处产生了表面稀疏波并向光斑中心会聚,使得光斑中心产生反向塑性变形,因此产生了残余应力洞;聂祥樊等<sup>[6-7]</sup>通过数值模拟,研究了表面稀疏波的传播过程,并讨论了不同光斑形状和冲击参数对表面残余应力洞的影响;冯爱新等<sup>[8]</sup>采用应变片检测模块建立了 2024 铝合金薄板试样冲击波加载模型,得到冲击波的反射也会削弱冲击区域的残余压应力的结论。之前的相关研究主要通过数值模拟探讨了激光冲击工艺参数对残余应力洞形成过程的影响,但未结合实验分析激光冲击产生的稀疏波和试样内冲击波的反射对残余应力洞的影响,因此存在一定的局限性。

本文利用脉冲激光冲击加载 7050 铝合金薄板试样和厚板试样,采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元分析软件在侧面设置无反射边界条件和反射边界条件,模拟了功率密度为 1.98  $\text{GW}/\text{cm}^2$  的激光束冲击 7050 铝合金薄板试样的过程。借助 X 射线应力分析仪测量试样表面的残余应力分布,利用压电聚偏二氟乙烯 (PVDF) 薄膜传感器测得动态应变曲线和冲击区域的表面微结构响应。通过对比不同厚度试样表面的残余应力分布,探究激光冲击 7050 铝合金薄板试样残余应力洞的形成机制,对稀疏波和试样内冲击波共同作用下的残余应力洞的产生过程进行了单因素分析,为激光冲击下表面压应力分布的定量调控提供了理论和技术支持。

## 2 实验设计与理论

实验材料采用 7050 航空铝合金,化学成分如表 1 所示。使用线切割将 7050 铝合金试样割为 50 mm $\times$ 20 mm $\times$ 1.5 mm 和 50 mm $\times$ 20 mm $\times$ 5.5 mm 两种规格的试样,使用砂纸(400~2000 号)依次打磨试样表面,将试样打磨成厚度分别为 1 mm 的薄板和 5 mm 的厚板,使用乙醇清洗试样并在冷风中风干。在试样表面冲击区域覆盖 150  $\mu\text{m}\times$ 6 mm $\times$ 6 mm 的铝箔作为吸收层,并在吸收层上覆盖厚度为 4 mm 的 K9 玻璃作为约束层。采用高能量脉冲灯抽运 YAG 激光器(Gaia-R 系列,THALES 公司,法国),激光的光斑直径为 5 mm,波长为 1064 nm,脉宽为 10 ns,脉冲能量分别选择 3.89,5.43,8 J。使用能量为 3.89 J 和 5.43 J 的脉冲对薄板试样和厚板试样进行冲击,使用能量为 8 J 的脉冲对薄板试样进行冲击。

表 1 7050 铝合金的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of 7050 aluminum alloy (mass fraction, %)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn
0.12	0.15	2.0-2.6	0.1	1.9-2.6	5.6-6.7

沿光斑径向在试样表面粘贴 PVDF 压电传感器,位置距光斑中心 3 mm;在试样背面正对光斑中心位置粘贴 PVDF 压电传感器,具体实验装置如图 1 所示。根据应力波的相关理论,激光冲击诱导的应力波在试样中来回反射,每当应力波传播到试样表面或背面时,PVDF 压电传感器产生一个电压脉冲,该电压信号可由示波器采集和记录,CH3、CH4 分别为示波器的测量通道,其中 CH3 用于采集粘贴在试样背面的 PVDF 压电传感器的动态应变,CH4 用于采集粘贴在试样表面的 PVDF 压电传感器的动态应变。

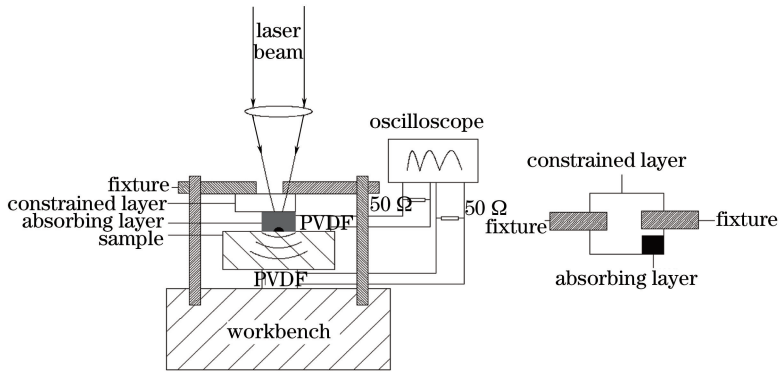


图 1 激光冲击试样动态应变检测装置示意图

Fig. 1 Detection device schematic for dynamic strain of samples induced by laser shock

采用超景深三维显微系统 (VHX-2000, 基恩士, 日本) 观测激光加载区域的三维形貌, X 射线应力分析仪 (X-350A, 河北爱思特应力技术有限公司) 用于测量激光加载区域表面残余应力分布, 在激光光斑同一条直径上均匀分布 5 个测量点, 每个测量点分别在  $0^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $90^\circ$  三个方向各测一次, 如图 2 所示。测试参数选择: 使用 Cr 靶, 管电压设置为 20 kV, 管电流设置为 5 mA, 准直管直径选择 1 mm, 晶面类型选择 311, 应力参数设为  $-162$  MPa。由于应力为方向性矢量, 为探索激光冲击加载区域残余应力的分布特征, 使用该点主应力空间三个相互垂直的力表示任意方向的应力。根据二向应力解析法和单元体应力应变模型, 可得<sup>[9-10]</sup>

$$\tan 2\varphi = -\frac{\sigma_0 + \sigma_{90} - 2\sigma_{45}}{\sigma_0 - \sigma_{90}}, \quad (1)$$

$$\sigma_{\max} = 0.5 \left[ \sqrt{(\sigma_0 - \sigma_{90})^2 + (\sigma_0 + \sigma_{90} - 2\sigma_{45})^2} + \sigma_0 + \sigma_{90} \right], \quad (2)$$

$$\sigma_{\min} = 0.5 \left[ \sigma_0 + \sigma_{90} - \sqrt{(\sigma_0 - \sigma_{90})^2 + (\sigma_0 + \sigma_{90} - 2\sigma_{45})^2} \right], \quad (3)$$

式中  $\varphi$  为主应力方向角,  $\sigma_{\max}$  为最大主应力,  $\sigma_{\min}$  为最小主应力,  $\sigma_0$ 、 $\sigma_{45}$ 、 $\sigma_{90}$  分别为测试点三个方向 ( $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ ) 的残余应力值。

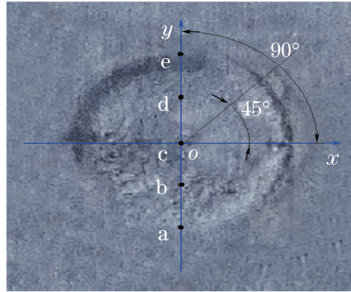


图 2 激光冲击区域测试点位置

Fig. 2 Positions of test points in laser shock region

### 3 数值模拟

利用有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA 建立激光冲击强化的有限元模型的步骤: 1) 选择材料单元类型和本构模型参数, 建立试样物理模型; 2) 网格划分, 施加边界条件, 施加外载荷; 3) 求解控制, 输出 K 文件并适当修正, 进行回弹分析。为减少计算时间, 以尺寸为  $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  的长方体薄板作为分析对象, 单元类型为 solid 164, 网格尺寸统一为 0.1 mm。由于冲击波的横波效应, 将冲击波压力加载区域半径延伸至光斑半径的 1.2 倍<sup>[11]</sup>, 即压力加载区域半径为 3 mm。激光冲击波峰值压力  $P$  可表示为<sup>[5]</sup>

$$P = 0.01 \sqrt{\alpha / (\alpha + 3)} \cdot \sqrt{ZI}, \quad (4)$$

式中  $\alpha$  为效率系数,  $\alpha = 0.15$ ;  $Z$  为折合阻抗,  $Z = 0.296 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $I$  为功率密度。当脉冲激光功率密度为  $1.98 \text{ GW/cm}^2$  时, 根据 (4) 式, 得到激光冲击波峰值压力为 1953 MPa。激光脉宽为 10 ns, 激光诱导

的冲击波作用时间大约为脉宽的 2~3 倍<sup>[12]</sup>,可设冲击波作用时间为 30 ns,冲击波加载的压力曲线如图 3 所示。

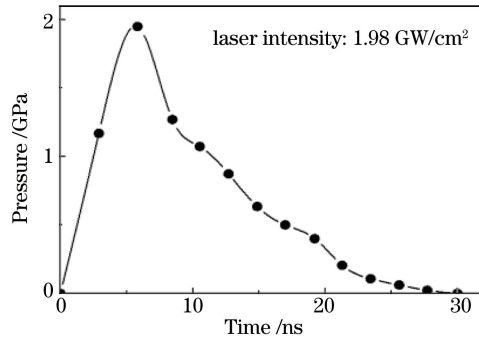


图 3 冲击波加载的压力曲线

Fig. 3 Pressure curve loaded by laser shock wave

选用 Johnson-Cook 本构模型,忽略热效应产生的温度上升效应(即选用简化后的 Johnson-Cook 本构模型),残余应力值  $\sigma$  可表示为

$$\sigma = (A + B\epsilon^n) [1 + C \ln(\epsilon'/\epsilon'_0)] , \quad (5)$$

式中  $A$ 、 $B$ 、 $n$  为材料的应变硬化特征参数,  $A=300$  MPa,  $B=400$  MPa,  $n=0.13$ ;  $C$  为应变率对材料性能影响的参数,  $C=0.013$ ;  $\epsilon$  为应变;  $\epsilon'$  为应变率;  $\epsilon'_0$  为参考应变率。7050 铝合金的力学性能参数:弹性模量  $E=72$  GPa,密度  $\rho=7.85$  g/cm<sup>3</sup>,泊松比  $\nu=0.3$ 。模型侧面分别设置为无反射边界条件和反射边界条件,分别模拟激光的冲击过程。无反射边界阻止应力波在模型侧面的反射,仅允许应力波在侧面发生透射,无反射边界条件的示意图如图 4(a)所示;当边界条件为反射边界条件时,应力波可以在模型侧面自由地反射和透射,反射的应力波将重新注入模型并影响计算结果,反射边界条件示意图如图 4(b)所示。

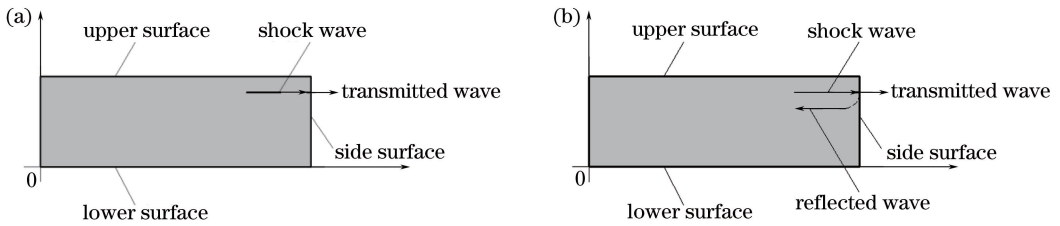


图 4 边界条件示意图。(a)无反射边界条件;(b)反射边界条件

Fig. 4 Diagrams of boundary conditions. (a) Non-reflecting boundary condition; (b) reflecting boundary condition

## 4 结果与分析

### 4.1 表面稀疏波对残余应力场的影响

数值模拟中定义反射边界条件后,薄板模型不同时刻的动态应力波云图如图 5 所示。由图 5 可知,试样在 30 ns 时刻基本完成冲击波压力的加载,此时试样内部形成向试样背面传播的纵向压缩波;在 150 ns 时刻,纵向压缩波继续向试样底面传播,在试样表面光斑边界处可观察到沿径向传播的表面波;在 250 ns 时刻,纵向压缩波到达试样底面并发生反射,形成弹塑性拉伸波并继续向试样表面传播;在 500 ns 时刻,弹塑性拉伸波到达试样表面并再次发生反射。其中,在 250 ns 和 500 ns 时刻,向外扩展的表面波波阵面  $R$  向前传播了 0.7072 mm,计算得到表面波波速为  $2.86 \times 10^3$  m/s,与铝块中表面 Rayleigh 波波速的理论值一致,表明该表面波为表面 Rayleigh 波。应力波经多次反射后在模型内部形成稳定的残余应力场,反射边界条件时稳定的残余应力云图的整体分布如图 6(a)所示,冲击中心区域放大图如图 6(b)所示。数值模拟中定义无反射边界条件后,再次进行冲击模拟,获得稳定的残余应力云图如图 7 所示。



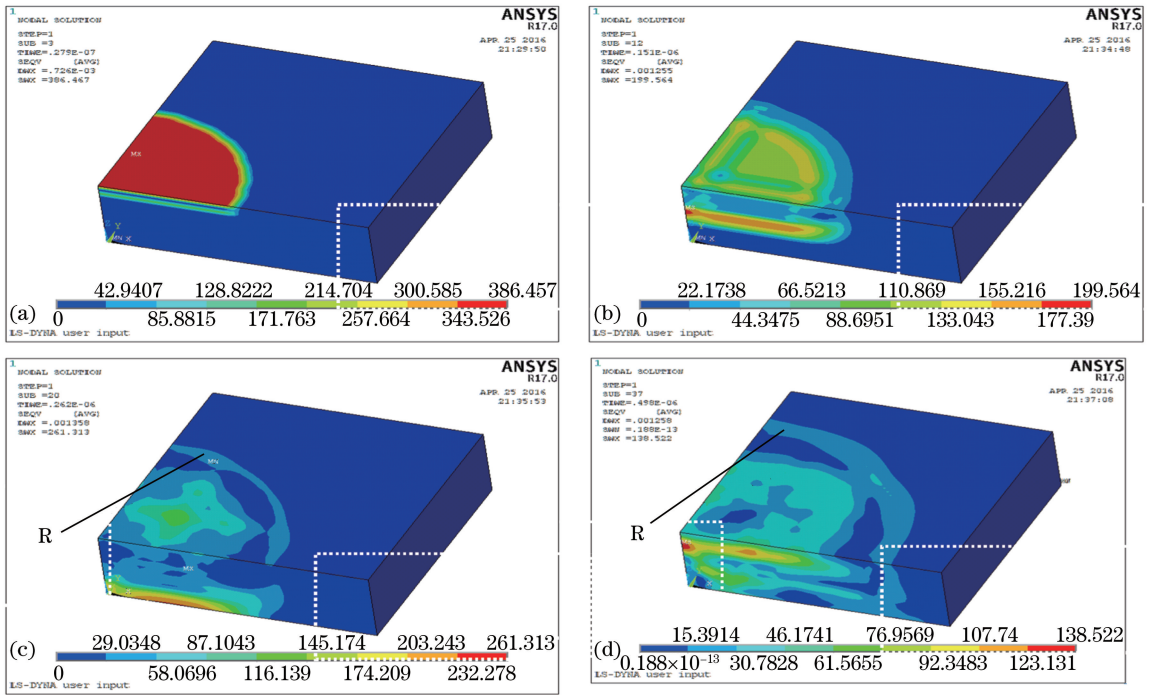


图 5 反射边界条件下不同时刻的动态应力波云图。(a) 30 ns; (b) 150 ns; (c) 250 ns; (d) 500 ns  
 Fig. 5 Nephograms of dynamic stress waves at different moments under reflecting boundary condition.  
 (a) 30 ns; (b) 150 ns; (c) 250 ns; (d) 500 ns

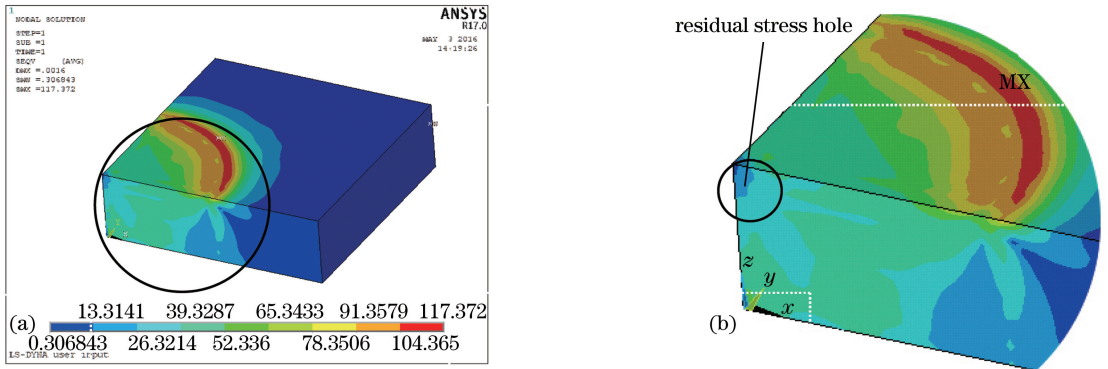


图 6 反射边界条件下的残余应力云图。(a)整体分布;(b)冲击中心区域放大图  
 Fig. 6 Nephograms of residual stress under reflecting boundary condition. (a) Overall distribution; (b) enlarged drawing of central area of shocking

不同边界条件下模拟得到的试样表面径向残余应力分布曲线如图 8 所示。设出现最大应力值的位置与光斑中心的距离为  $d$ 。定义反射边界条件后,模型表面出现了残余应力的剧变区域,光斑中心处的残余压应力值仅为 5.84 MPa,最大残余压应力值出现在距光斑中心约 2.5 mm 处(117.7 MPa)。此时,光斑中心并不是最大残余压应力所在的位置,即产生了残余应力洞现象。设置无反射边界条件后,残余应力场整体呈双轴分布,残余压应力值最大值为 65.1 MPa,且位于光斑中心。

当激光束的功率密度分别为  $1.98 \text{ GW/cm}^2$  和  $2.77 \text{ GW/cm}^2$  时,薄板试样的表面残余应力分布可由 X 射线应力分析仪测得,被测点(a、b、c、d、e)在不同方向角 ( $\beta_0$ 、 $\beta_{45}$ 、 $\beta_{90}$ ) 条件下的表面残余应力测量值如表 2 所示;计算得到的最大残余主应力  $\sigma_{\max}$ 、最小残余主应力  $\sigma_{\min}$  及方向角  $\beta$  如表 3 所示。在激光器的两种功率密度条件下,最大残余压应力并未出现在冲击中心,光斑中心表面最大残余主应力分别为 59.72 MPa 和 31.36 MPa,光斑中心出现残余压应力的缺失,冲击区域产生残余应力洞现象,并且薄板试样的主应力方向角均较为离散,表明薄板试样表面各处均不易形成应力集中。

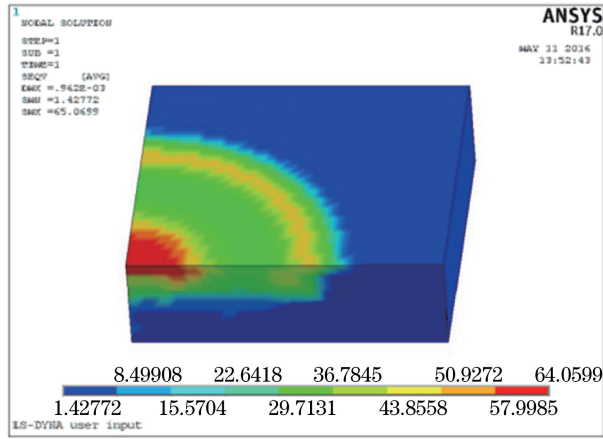


图 7 无反射边界条件时的残余应力云图

Fig. 7 Nephogram of residual stress under non-reflecting boundary condition

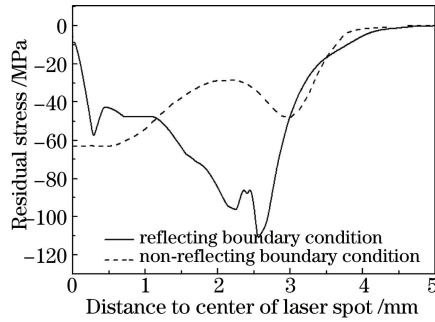


图 8 试样表面径向残余应力分布

Fig. 8 Distribution of radial residual stress on sample surface

表 2 不同功率密度的激光冲击下薄板试样被测点的表面残余应力

Table 2 Superficial residual stresses of detected points on thin plate sample shocked by laser with different power densities

Power density / (GW · cm <sup>-2</sup> )	Point direction	Superficial residual stress / MPa				
		a	b	c	d	e
1.98	$\beta_0$	-130	-102	-159	-140	-144
	$\beta_{45}$	-106	-119	-218	-106	-144
	$\beta_{90}$	-100	-136	-121	-117	-121
2.77	$\beta_0$	-156	-106	-172	-45	-118
	$\beta_{45}$	-112	-115	-207	-71	-178
	$\beta_{90}$	-130	-132	-26	-93	-140

表 3 不同功率密度的激光冲击下薄板试样被测点的残余主应力及方向角

Table 3 Residual principal stresses and directional angles of detected points on thin plate sample shocked by laser with different power densities

Power density / (GW · cm <sup>-2</sup> )	Measured parameter	Detected point				
		a	b	c	d	e
1.98	$\sigma_{max}$ / MPa	-97.51	-102.00	-59.72	-103.23	-116.24
	$\sigma_{min}$ / MPa	-132.49	-136.00	-220.28	-153.77	-148.76
	$\beta$ / (°)	15.48	0	-38.15	-31.46	-22.50
2.77	$\sigma_{max}$ / MPa	-109.38	-105.40	31.36	-44.92	-78.78
	$\sigma_{min}$ / MPa	-176.62	-132.60	-229.36	-93.08	-179.22
	$\beta$ / (°)	-33.62	8.55	27.97	-2.38	-38.67

当激光功率密度为  $1.98 \text{ GW/cm}^2$  时,利用试样的四分之一模型对激光冲击 7050 铝合金试样进行模拟,将设置反射边界条件时得到的径向残余应力分布曲线与 X 射线应力分析仪测得的表面残余应力分布曲线进行对比,如图 9 所示。在数值模拟中,当定义反射边界条件后,光斑边界处产生的稀疏波由四周向光斑中心会聚,造成光斑中心二次塑性变形,降低了光斑中心的残余压应力,产生残余应力洞现象;当定义无反射边界条件后,光斑边界产生的稀疏波直接被模型侧面吸收。由两种边界条件下的模拟结果可知,若稀疏波向光斑中心会聚,产生残余应力洞;若无稀疏波向中心会聚,表面残余应力呈双轴分布。利用 X 射线应力分析仪测得的表面残余应力分布曲线与定义反射边界条件后模拟得到的径向残余应力分布曲线基本一致,因此稀疏波向光斑中心的会聚是产生残余应力洞现象的主要原因。

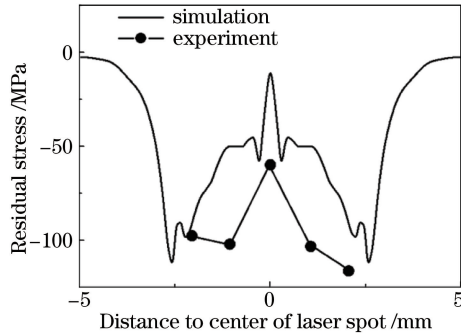


图 9 试样表面残余应力的模拟和实验结果对比

Fig. 9 Comparison between experimental and simulation results of residual stress on sample surface

#### 4.2 试样内冲击波反射对残余应力场的影响

为研究激光冲击波在试样内的来回反射对 7050 铝合金表面残余应力分布的影响,在功率密度分别为  $1.98 \text{ GW/cm}^2$  和  $2.77 \text{ GW/cm}^2$  的激光束冲击作用下,采用 X 射线应力分析仪测量厚板试样的表面残余应力分布,各个被测点的应力测试结果如表 4 所示。分别测量了各个被测点方向角为  $\beta_0$ 、 $\beta_{45}$ 、 $\beta_{90}$  时的残余应力值,残余主应力的最大值  $\sigma_{\max}$ 、残余主应力的最小值  $\sigma_{\min}$  及方向角  $\beta$  计算结果如表 5 所示。结合上述薄板试样表面残余应力测试数据,得到了薄板试样和厚板试样表面的残余主应力分布,如图 10 所示。

表 4 不同功率密度的激光冲击厚板各个被测点的表面残余应力

Table 4 Superficial residual stresses of detected points on thick plate shocked by laser with different power densities

Power density /( $\text{GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	Point direction	Superficial residual stress /MPa				
		a	b	c	d	e
1.98	$\beta_0$	-114	-150	-146	-160	-179
	$\beta_{45}$	-163	-216	-78	-114	-147
	$\beta_{90}$	-169	-180	-95	-126	-122
2.77	$\beta_0$	-188	-190	-139	-185	-148
	$\beta_{45}$	-166	-253	-39	-278	-148
	$\beta_{90}$	-121	-184	-133	-187	-137

表 5 不同功率密度的激光冲击厚板被测点的残余主应力及方向角

Table 5 Residual principal stresses and directions on thick plate shocked by laser of different power densities

Power density /( $\text{GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	Measured parameter	Detected point				
		a	b	c	d	e
1.98	$\sigma_{\max}$ /MPa	-106.99	-111.55	-71.19	-109.65	-122.18
	$\sigma_{\min}$ /MPa	-175.81	-218.05	-170.01	-175.65	-179.02
	$\beta$ /( $^\circ$ )	-19.02	-36.65	-29.33	-29.44	-3.54
2.77	$\sigma_{\max}$ /MPa	-118.47	-121.33	-39.26	-94.20	-134.84
	$\sigma_{\min}$ /MPa	-189.83	-253.07	-233.04	-278.10	-150.26
	$\beta$ /( $^\circ$ )	9.95	43.65	-44.22	-44.74	23.55

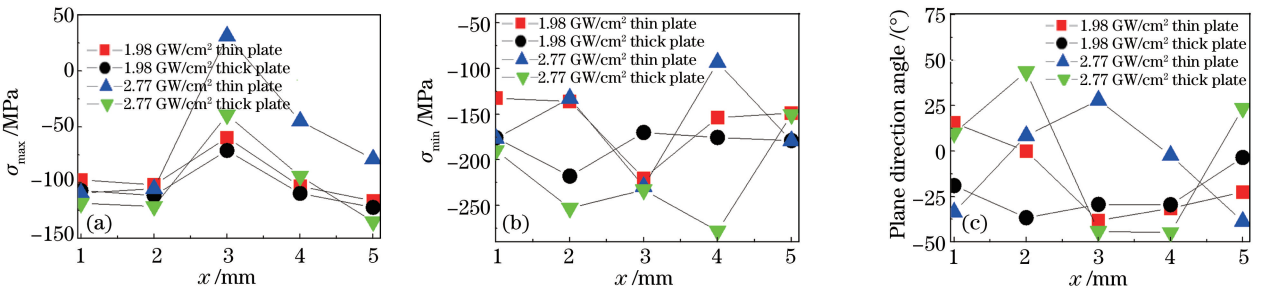


图 10 不同厚度板材表面的(a)最大残余主应力,(b)最小残余主应力和(c)主应力方向角

Fig. 10 (a) Maximum residual principal stress, (b) minimum residual principal stress and (c) direction angle of principal stress on plates with different thicknesses

厚板试样厚度为 5 mm,薄板试样厚度为 1 mm,冲击波在厚板试样中的反射行程和传播损耗远大于薄板试样,因此冲击波在厚板试样中的来回反射对表面残余应力分布的影响远小于薄板试样。由图 10 可知,在功率密度为 1.98 GW/cm<sup>2</sup> 的激光冲击作用下,7050 铝合金薄板试样和厚板试样的各个被测点最大残余主应力较为接近,均产生残余应力洞现象,其中薄板试样的残余应力洞现象比厚板试样略明显;在功率密度为 2.77 GW/cm<sup>2</sup> 的激光冲击作用下,厚板试样各个被测点的最大残余主应力值均大于薄板试样,薄板试样冲击区域中心 c 点处最大残余主应力为拉应力,光斑中心出现残余压应力的缺失。与厚板试样相比,薄板试样冲击区域产生的残余应力洞现象更加明显,因此冲击波在试样中的来回反射对残余应力洞的影响不可忽略,增加试样厚度可削弱冲击波在试样内的反射对表面残余应力的影响。

当采用功率密度为 4.07 GW/cm<sup>2</sup> 的激光束冲击 7050 铝合金薄板试样后,利用 X 射线应力分析仪分析薄板试样表面残余应力分布,发现最大残余主应力为分布均匀的压应力,并未产生残余应力洞。为分析冲击波在试样内来回反射对残余应力洞产生的影响,采用 PVDF 压电传感器测量功率密度为 4.07 GW/cm<sup>2</sup> 和 1.98 GW/cm<sup>2</sup> 时激光冲击试样表面的动态应变,两者的压电波形  $V(\epsilon, t)$  如图 11 所示。

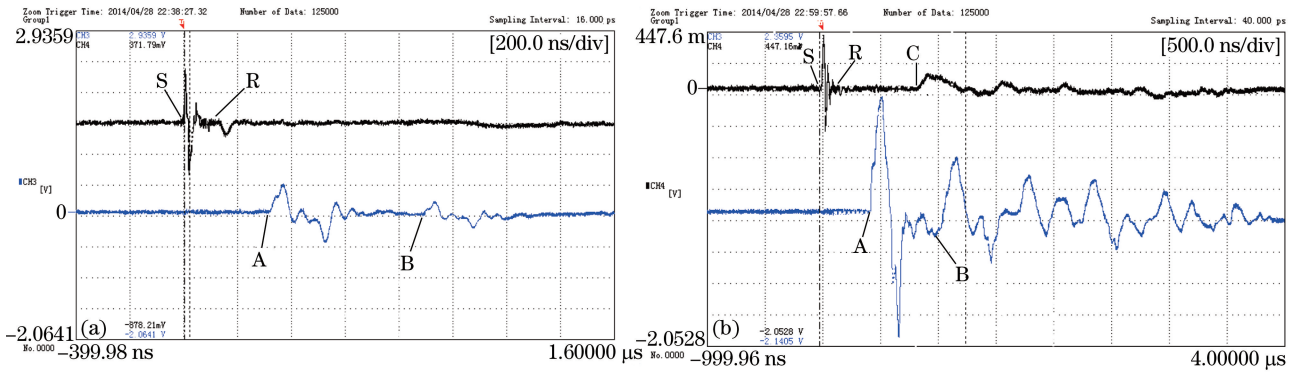


图 11 不同功率密度的激光冲击下试样表面的动态应变。(a) 1.98 GW/cm<sup>2</sup>; (b) 4.07 GW/cm<sup>2</sup>

Fig. 11 Superficial dynamic strain on sample surface shocked by laser with different power densities.

(a) 1.98 GW/cm<sup>2</sup>; (b) 4.07 GW/cm<sup>2</sup>

由图 11(a)、(b)可知,不同功率密度的激光冲击下试样表面的动态应变具有一些共同特征:从时间点 S 开始,压电传感器可检测到剪切波,剪切波向材料内部传播时逐渐衰减,当趋近时间点 R 时波形幅值已衰减为 0;时间点 R 后,  $V(\epsilon, t)$  曲线出现了幅值明显增大、波形下凹的压缩波,根据波速判断该压缩波为表面 Rayleigh 波。图 11(a)、(b)中表面动态应变(通道 CH4)的不同之处:图 11(a)中 Rayleigh 波衰减之后未检测到任何动态应变,图 11(b)中 Rayleigh 波衰减之后仍可检测到动态应变。PVDF 压电传感器在试样背面检测到冲击波在试样中来回反射。由图 11(a)中背面动态应变(通道 CH3)可知,在时间点 A,压电传感器首次检测到传播到试样背面的纵向压缩波,纵向压缩波在试样界面处发生反射形成弹性拉伸波并继续在试样中传播;在时间点 B,压电传感器第二次在背面检测到在试样内部来回反射了一个行程的冲击波。由图 11(b)中背面动态应变(通道 CH3)可知,在激光功率密度增加至 4.07 GW/cm<sup>2</sup> 的过程中,冲击波在试样中



来回反射的次数也随之增加,试样背面粘贴的压电传感器多次检测到传播至背面的冲击波。

由图 11(a)、(b)的压电波形可知,激光冲击波加载阶段试样材料表面产生了轴向和径向的塑性变形,表面稀疏波和来回反射的冲击波先后传播至激光加载区域中心,使材料表面中心塑性区域产生上下位移。由于二次塑性变形卸载了冲击波与稀疏波,图 11(a)表面动态应变(通道 CH4)中 Rayleigh 波衰减之后未测得任何动态应变;随着激光能量的增强,激光加载区域近表面的塑性变形加剧,该区域的硬度与位错密度也随之增加, PVDF 压电传感器再次检测到动态应变,如图 11(b) (通道 CH4) 所示。该动态应变出现的时间点 C 与通道 CH3 中时间点 A 的时间间隔恰好为通道 CH3 时间点 A 与时间点 B 之间时间间隔的一半,说明通道 CH4 在时刻点 C 时反射的冲击波传播至试样表面。综上所述,当功率密度为  $1.98 \text{ GW/cm}^2$  的激光冲击加载薄板试样后,在试样内反射的冲击波使表面中心塑性区域产生上下位移,造成二次塑性变形,从而对残余应力洞产生影响。

采用超景深三维显微镜(VHX-2000)观察激光加载区域的微观形貌,由于激光光斑直径为  $5 \text{ mm}$ ,三维显微镜每次的检测区域约为  $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ ,无法涵盖一个光斑的微观形貌,因此围绕冲击区域的边缘和几何中心进行多点检测,并选择其中最具有代表性的一点为例。当功率密度为  $1.98 \text{ GW/cm}^2$  和  $2.77 \text{ GW/cm}^2$  的激光束冲击试样后,试样表面形成残余应力洞,在来回反射的冲击波与向光斑中心会聚的稀疏波的共同作用下,7050 铝合金薄板试样表面中心塑性区域产生的上下位移不仅拉低了残余压应力,还产生残余拉应力,使冲击区域中心位置高于四周。当功率密度为  $2.77 \text{ GW/cm}^2$  的脉冲激光冲击强化的 7050 铝合金薄板试样和厚板试样后,冲击区域中心的三维形貌图如图 12 所示。不同的颜色表示不同的高度。由图 12 可知,薄板试样冲击中心区域比临近部分高  $10.800 \mu\text{m}$ ,在相同功率密度激光束冲击下,厚板试样冲击区域中心比临近部分高  $8.150 \mu\text{m}$ ,三维显微系统观察结果与上述分析一致。

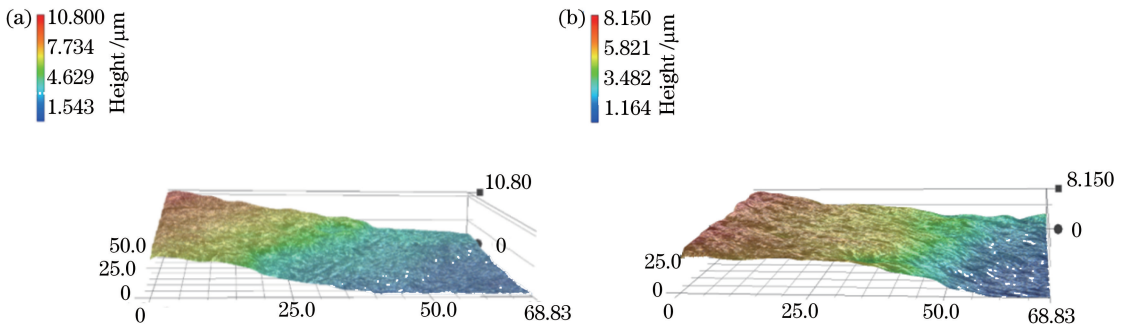


图 12 激光功率密度为  $2.77 \text{ GW/cm}^2$  时冲击区域中心的三维形貌图。(a)薄板试样;(b)厚板试样

Fig. 12 Three-dimensional topography of center area shocked by laser with power density of  $2.77 \text{ GW/cm}^2$ .

(a) Thin plate sample; (b) thick plate sample

## 5 结 论

为研究激光冲击 7050 铝合金薄板试样形成残余应力洞的机制,分别使用功率密度为  $1.98 \text{ GW/cm}^2$  和  $2.77 \text{ GW/cm}^2$  的激光冲击 7050 铝合金试样,得到以下结论。

1) 在功率密度分别为  $1.98 \text{ GW/cm}^2$  和  $2.77 \text{ GW/cm}^2$  的脉冲激光冲击下,7050 铝合金薄板试样表面均产生残余应力洞现象。

2) 在数值模拟中,当边界条件设定为反射边界条件时,模型表面产生残余应力洞现象;当边界条件设定为无反射边界条件时,模型表面残余应力呈双轴分布;实验测试结果与设定反射边界条件的模拟结果具有较好的一致性,表明稀疏波会聚为试样表面形成残余应力洞的主要原因。

3) 增加试样厚度可削弱试样内来回反射的冲击波对表面残余应力的影响。在功率密度为  $2.77 \text{ GW/cm}^2$  的激光冲击作用下,厚板试样各被测点的最大残余主应力值均大于薄板试样,薄板试样与厚板试样冲击区域中心厚度比临近区域分别高出  $10.800 \mu\text{m}$  和  $8.150 \mu\text{m}$ ;薄板试样冲击区域中心出现残余压应力的缺失,与厚板试样相比,薄板试样冲击区域产生的残余应力洞现象更加明显;由残余应力分布和表面动态应变



可知,在试样内来回反射的冲击波对残余应力洞的影响不可忽视,残余应力洞现象是由表面稀疏波与在试样内反射的冲击波共同作用的结果。

## 参 考 文 献

- 1 Cao Y, Feng A, Hua G. Influence of interaction parameters on laser shock wave induced dynamic strain on 7050 aluminum alloy surface[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116(15): 153105.
- 2 Ren X D, Yang H M, Zheng L M, *et al.* A conversion model of graphite to ultrananocrystalline diamond via laser processing at ambient temperature and normal pressure[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(2): 021908.
- 3 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. 激光冲击波诱导 2024 铝合金表面动态应变特性试验研究及理论分析[J]. *中国激光*, 2014, 41(9): 0903004.
- 4 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.
- 5 Peyre P, Fabbro R, Merrien P, *et al.* Laser shock processing of aluminium alloys. Application to high cycle fatigue behaviour[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1996, 210(1-2): 102-113.
- 6 Wang Xuede, Nie Xiangfan, Zang Shunlai, *et al.* Formation mechanism of “residual stress hole” induced by laser shock peening[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(11): 119003.  
王学德, 聂祥樊, 臧顺来, 等. 激光冲击强化“残余应力洞”的形成机制[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(11): 119003.
- 7 Nie Xiangfan, Zang Shunlai, He Weifeng, *et al.* Sensitivity analysis and restraining method of “residual stress hole” induced by laser shock peening[J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(7): 2107-2112.  
聂祥樊, 臧顺来, 何卫锋, 等. 激光冲击“残余应力洞”的参数敏感性分析及其抑制方法[J]. *高电压技术*, 2014, 40(7): 2107-2112.
- 8 Feng Aixin, Nie Guifeng, Xue Wei, *et al.* Experimental research on laser shock wave loading mechanism of 2024 aluminum alloy sheet[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2012, 48(2): 205-210.  
冯爱新, 聂贵锋, 薛 伟, 等. 2024 铝合金薄板激光冲击波加载的实验研究[J]. *金属学报*, 2012, 48(2): 205-210.
- 9 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.
- 10 Feng Aixin, Shi Fen, Sun Huaiyang, *et al.* Adjustment of surface stress state of 5B05 aluminum alloy by laser shock wave[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(8): 1793-1796.  
冯爱新, 施 芬, 孙淮阳, 等. 激光冲击波对 5B05 铝合金表面应力状态的调整[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(8): 1793-1796.
- 11 Peyre P, Fabbro R. Laser shock processing: a review of the physics and applications [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1995, 27(12): 1213-1229.
- 12 Hong X, Wang S, Guo D, *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.