

激光冲击强化 7050 铝合金薄板表面残余应力形成机制的实验研究

曹宇鹏^{1,2,3} 徐 影² 冯爱新^{1,3} 花国然² 周东呈² 张津超¹

¹温州大学机电工程学院, 浙江 温州 325035

²南通大学机械工程学院, 江苏 南通 226019

³江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

摘要 为研究激光冲击强化 7050 铝合金薄板表面残余应力的形成机制,采用 5 种不同功率密度的激光束冲击加载 7050 铝合金薄板,利用 PVDF(聚偏二氟乙烯)压电传感器测量激光冲击薄板试样的动态应变,利用 X 射线应力分析仪测量激光冲击后的残余应力分布,并借助三维显微系统观察激光冲击强化造成的表面微结构。结果表明,当激光功率密度为 1.02 GW/cm² 时,激光冲击引起的横向变形小;当激光功率密度为 1.53 GW/cm² 时,表面稀疏波与横向变形共同导致了试样最大残余主应力呈等双轴分布;当激光功率密度为 1.98 GW/cm² 和 2.77 GW/cm² 时,冲击区域中心比临近区域分别高出 5.680 μm 和 10.800 μm,在来回反射的冲击波与表面稀疏波的共同作用下产生了残余应力洞现象;当激光功率密度为 4.07 GW/cm² 时,试样冲击区域产生了较大的塑性变形且比较平滑,最大残余主应力呈均匀分布。

关键词 激光技术; 激光冲击波; 动态应变; 表面残余应力; 7050 铝合金薄板

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0702008

Experimental Study of Residual Stress Formation Mechanism of 7050 Aluminum Alloy Sheet by Laser Shock Processing

Cao Yupeng^{1,2,3} Xu Ying² Feng Aixin^{1,3} Hua Guoran²

Zhou Dongcheng² Zhang Jinchao¹

¹School of Mechanical and Electrical Engineering, Wenzhou University, Wenzhou, Zhejiang 325035, China

²School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong, Jiangsu 226019, China

³School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

Abstract In order to study the formation mechanism of residual stress of 7050 aluminum alloy sheet surface by laser shock processing, the samples are processed by laser beam with five different power densities. The dynamic strain induced by laser shock processing sheet samples is measured by the polyvinylidene fluoride (PVDF) piezoelectric sensor. Residual stress distribution after laser shock processing is measured by the X-ray stress analyser. Three-dimensional microscopy system is used to observe the surface microstructure by laser shock processing. The results show that when the power density is 1.02 GW/cm², the transverse deformation induced by laser shock is small. When the power density is 1.53 GW/cm², both of the surface rarefaction wave and transverse deformation result in the equal-biaxial distribution of the maximum principal stress on the sample surface. When the

收稿日期: 2015-12-23; 收到修改稿日期: 2016-03-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51505236,51305050)、江苏省普通高校研究生科研创新计划(CXLX13_642)、江苏省光子制造重点实验室开放基金资助项目(GZ201108)、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,博士生导师,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)

power densities are 1.98 GW/cm² and 2.77 GW/cm², the center of the impact region is 5.680 μm and 10.800 μm higher than the adjacent part, respectively. The shock wave which is reflected back and forth and the surface rarefaction wave cause the occurrence of residual stress hole. When the power density is 4.07 GW/cm², the sample impact area has a large plastic deformation and is relatively smooth, the maximum residual principal stress distribution is uniform.

Key words laser technique; laser shock wave; dynamic strain; surface residual stress; 7050 aluminum alloy sheet

OCIS codes 140.3390; 280.5475; 160.3900

1 引 言

激光冲击强化技术是利用脉宽为纳秒量级、功率密度为吉瓦每平方厘米量级的激光束,对金属表面的吸收层进行加载,诱导等离子体爆炸产生冲击波的力学效应,该技术可提高金属材料的强度、硬度、耐磨性和耐应力腐蚀等性能^[1-4]。目前,国内外学者关于激光冲击强化技术的研究主要是测试分析激光冲击强化区域的残余应力分布并进行工艺优化,而激光冲击波诱导表面残余应力形成机制的研究还处于理论模拟阶段,例如利用有限元分析(ABAQUS)软件建立激光冲击的有限元分析模型,忽略边界反射效应,探究残余应力洞的形成机制^[5-8]。通过检测分析激光冲击加载时材料的动态应变来探究材料表面残余应力形成机制的研究尚未见报道。

本文采用脉冲激光冲击 7050 铝合金薄板表面,借助 PVDF(聚偏二氟乙烯)压电传感器测量试样表面与背面的动态应变,利用 X 射线应力分析仪检测激光冲击区域的残余应力分布。通过改变激光功率密度,结合所测得的动态应变曲线来分析冲击区域残余主应力分布,并利用超景深三维显微系统(VHX-2000, KEYENCE, 日本)观察薄板试样表面微结构,探究薄板试样表面残余应力的形成机制,为激光冲击动态响应与表面应力分布的相关性研究提供理论和技术支持。

2 实验设计与理论

实验材料使用 7050 铝合金,具体化学成分见表 1,利用线切割将其加工成 50 mm×20 mm×1.5 mm 的试样,用砂纸打磨试样表面,将其厚度打磨为 1 mm,用乙醇清洗并风干。在试样表面激光冲击区域紧密贴合一层 6 mm×6 mm×150 μm 的铝箔作为能量吸收层,在吸收层上覆盖厚度为 4 mm 的 K9 玻璃作为约束层,用夹具使约束层紧贴吸收层。

表 1 7050 铝合金化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions 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 |

实验采用江苏大学强激光实验室的高能量脉冲灯抽运 YAG 激光器(Gaia-R 系列, THALES 公司, 法国),利用能量计对激光束能量进行标定,能量计采集激光器在每个电压值输出的 50 个脉冲能量,对其取均

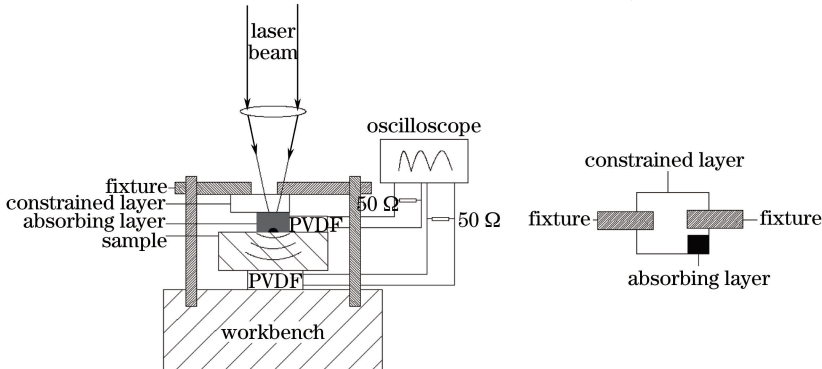


图 1 激光冲击试样表面动态应变检测原理图

Fig. 1 Schematic diagrams of detecting dynamic strain of sample surface induced by laser shock processing

值及标准偏差,使激光器输入电压 V 与激光实际冲击能量值 P 匹配。脉冲激光的加载能量分别为 2, 3, 3.89, 5.43, 8 J, 激光冲击光斑直径为 5 mm, 激光波长为 1064 nm, 脉宽为 10 ns, 在 K9 玻璃的约束下对试样进行单次冲击。由激光功率密度与激光能量的关系可得出激光功率密度分别为 1.02, 1.53, 1.98, 2.77, 4.07 GW/cm^2 。在试样表面沿激光光斑径向和在背面光斑中心处分别粘贴 PVDF 压电传感器, 其中表面压电传感器距光斑中心距离为 3 mm, 实验原理图如图 1 所示。测量时试样两端并联一个阻值为 50 Ω 的电阻, PVDF 压电传感器的信号由示波器采集, 根据应力波的相关理论可知, 在 7050 铝合金试样中激光束冲击诱导的应力波来回反射, 当冲击波传播到试样表面和背面时都会使 PVDF 压电传感器产生一个电压脉冲, 数字示波器可记录到该电压信号。

采用超景深三维显微系统观察激光冲击区域铝合金表面的三维形貌, 采用 X 射线应力分析仪 (X-350A, 河北爱思特应力技术有限公司, 中国) 测量光斑内表面残余应力分布。如图 2 所示, 5 个检测点位于冲击光斑的同一条直径上, 每个检测点在 0° , 45° 以及 90° 三个方向上各测一次。

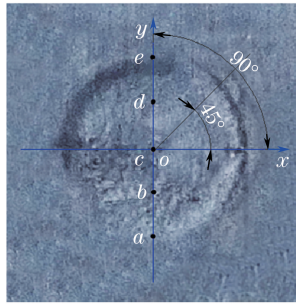


图 2 激光冲击区域检测点

Fig. 2 Test points in laser impact area

应力是具有方向性的矢量, 同一测量点在 0° 、 45° 、 90° 三个方向上的残余应力值各不相同, 为研究激光冲击区域应力分布特性, 该点任意方向上的应力可以用主应力空间三个相互垂直的力来表示。由二向应力解析法和单元体应力应变模型, 可得平面应力状态下主应力矢量的计算公式为^[9-10]

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

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

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

式中 σ_0 、 σ_{45} 、 σ_{90} 分别为检测点在 0° 、 45° 、 90° 方向上的残余应力值, σ_{\max} 为最大主应力, σ_{\min} 为最小主应力, α 为方向角。

3 实验结果与分析

3.1 表面残余应力分布

采用 X 射线应力分析仪测试激光冲击区域同一直径上的 5 个检测点在三个不同方向上的表面应力, 根据测试结果并结合 (1)~(3) 式, 可得不同激光功率密度作用下的残余主应力值和方向角, 即 σ_{\max} 、 σ_{\min} 、 α , 测试结果见表 2, 计算值见表 3。不同激光功率密度作用下冲击区域同一直径上的残余主应力和方向角分布, 如图 3 所示。

由图 3 可知, 当激光功率密度为 $1.02 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 时, 表面最大残余主应力曲线呈等双轴分布, 该曲线变化大说明应力分布均匀性差, 而主应力方向角曲线变化大, 表明主应力方向角分布较分散, 不易形成应力集中; 当激光功率密度为 $1.53 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 时, 表面最大残余主应力变化曲线和主应力方向角变化曲线与激光功率密度为 $1.02 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 时相似, 但压应力值较激光功率密度为 $1.02 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 时有明显提升; 当激光功率密度为 $1.98 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 时, 冲击区的表面残余应力为压应力, 最大残余主应力曲线变化较小, 应力分布相对均匀, 但最大残余应力未出现在冲击中心, 产生了残余应力洞, 且其主应力方向角曲线变化大, 不易产生应力集中现象; 当激光功率密度为 $2.77 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 时, 表面最大残余主应力变化曲线和主应力方向角变化曲线与激光功率密度为 $1.98 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 时相似, 冲击区域四周压应力值接近, 但中间区域残余应力洞更加明显, 中心 C 点处最

大残余主应力为拉应力;当激光功率密度为 4.07 GW/cm² 时,最大残余主应力为压应力且分布均匀,主应力方向角变化较小。

表 2 不同功率密度的激光冲击区域各检测点的残余主应力的测试结果

Table 2 Measured residual principal stresses of testing points in laser impact area for different power densities

| Power density / (GW/cm ²) | Point direction | Residual stresses of point a /MPa | Residual stresses of point b /MPa | Residual stresses of point c /MPa | Residual stresses of point d /MPa | Residual stresses of point e /MPa |
|---------------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1.02 | α_0 | -19 | -102 | -158 | -98 | -20 |
| | α_{45} | -14 | -155 | -98 | -54 | -15 |
| | α_{90} | -31 | -28 | -76 | 4 | -46 |
| 1.53 | α_0 | -34 | -50 | -140 | -53 | -45 |
| | α_{45} | -71 | -106 | -65 | -98 | -80 |
| | α_{90} | -92 | -41 | -101 | -46 | -60 |
| 1.98 | α_0 | -130 | -102 | 159 | -140 | -144 |
| | α_{45} | -106 | -119 | -218 | -106 | -144 |
| | α_{90} | -100 | -136 | -121 | -117 | -121 |
| 2.77 | α_0 | -156 | -106 | -172 | -45 | -118 |
| | α_{45} | -112 | -115 | -207 | -71 | -178 |
| | α_{90} | -130 | -132 | -26 | -93 | -140 |
| 4.07 | α_0 | -141 | -79 | -74 | -93 | -87 |
| | α_{45} | -147 | -81 | -125 | -75 | -79 |
| | α_{90} | -62 | -135 | -183 | 174 | -168 |

表 3 不同功率密度的激光冲击区域各测点残余主应力及其方向的计算结果

Table 3 Calculated residual principal stresses and directions of testing points in laser impact area for different power densities

| Power density / (GW/cm ²) | Residual principal stress | Station | | | | |
|---------------------------------------|---------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | a | b | c | d | e |
| 1.02 | σ_{\max} /MPa | -12.47 | 32.31 | -71.81 | 4.48 | -10.80 |
| | σ_{\min} /MPa | -37.53 | -162.31 | -162.19 | -98.48 | -55.20 |
| | α / (°) | -30.69 | -33.83 | 12.43 | -3.91 | 27.08 |
| 1.53 | σ_{\max} /MPa | -32.92 | 15.17 | -61.67 | -0.87 | -24.00 |
| | σ_{\min} /MPa | -93.08 | -106.17 | -179.33 | -98.13 | -81.00 |
| | α / (°) | 7.71 | -42.87 | 35.32 | 42.94 | -37.37 |
| 1.98 | σ_{\max} /MPa | -97.51 | -102 | -59.72 | -103.23 | -116.24 |
| | σ_{\min} /MPa | -132.49 | -136 | -220.28 | -153.77 | -148.76 |
| | α / (°) | 15.48 | 0 | -38.15 | -31.46 | -22.5 |
| 2.77 | σ_{\max} /MPa | -109.38 | -105.4 | 31.36 | -44.92 | -78.78 |
| | σ_{\min} /MPa | -176.62 | -132.6 | -229.36 | -93.08 | -179.22 |
| | α / (°) | 33.62 | -8.55 | -27.97 | 2.38 | -38.67 |
| 4.07 | σ_{\max} /MPa | -41.25 | -68.79 | -73.89 | -62.35 | -64.31 |
| | σ_{\min} /MPa | -161.75 | -145.21 | -183.11 | -204.65 | -190.69 |
| | α / (°) | -24.52 | -21.44 | -1.84 | -27.65 | 25.07 |

3.2 动态应变曲线

激光冲击波加载材料表面后,冲击波在材料内部形成轴向传播的纵波和剪切波,在材料表面形成稀疏波,并向四周传播^[11]。光斑边界可看成是稀疏波的波源,稀疏波由光斑边界向四周传播,一部分向中心汇聚,另一部分向外传播^[6]。PVDF 压电传感器在材料表面测得的压电波形 $V(\epsilon, t)$ 反应了激光冲击诱导的纵向冲击波和纵向冲击波激发的表面瑞利(Rayleigh)波,压电波形如图 4,5 所示,其中检测点检测到表面 Rayleigh 波的时刻为压电波形 $V(\epsilon, t)$ 中的 R 点,CH1、CH3、CH4 代表的是示波器的测量通道,利用 CH3 采集粘贴在表面的 PVDF 压电传感器的动态应变,利用 CH4 采集粘贴在背面的 PVDF 压电传感器的动态应变,CH1 为示波器的光电开关通道。

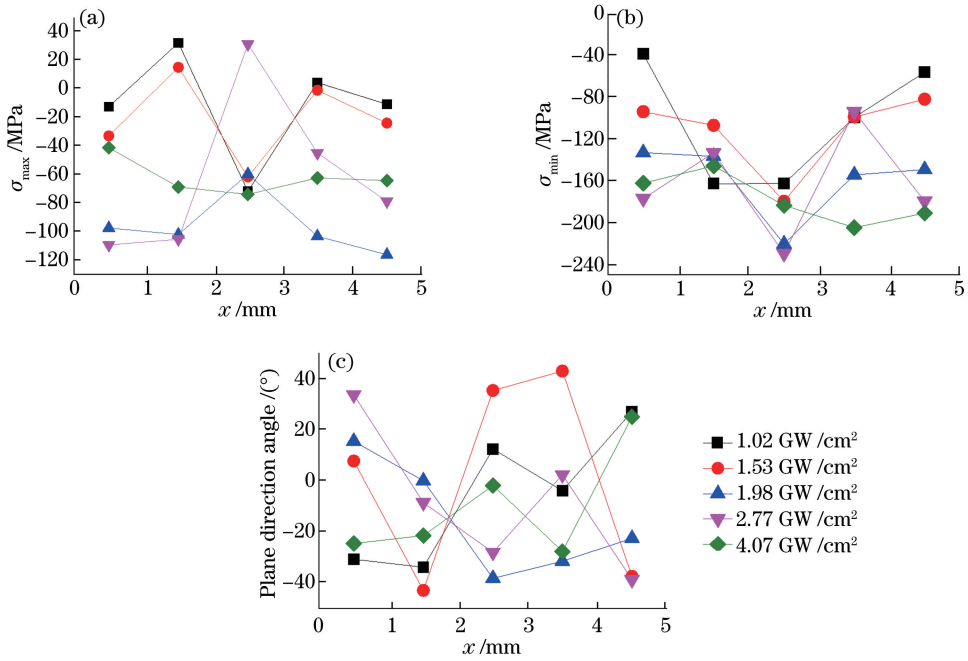


图 3 不同激光功率密度诱导的残余主应力分布。(a) 最大残余主应力分布；(b) 最小残余主应力分布；(c) 主应力方向角分布

Fig. 3 Distribution of residual principal stress for different laser power densities. (a) Distribution of the maximum residual principal stress; (b) distribution of the minimum residual principal stress; (c) angular distribution of principal stress

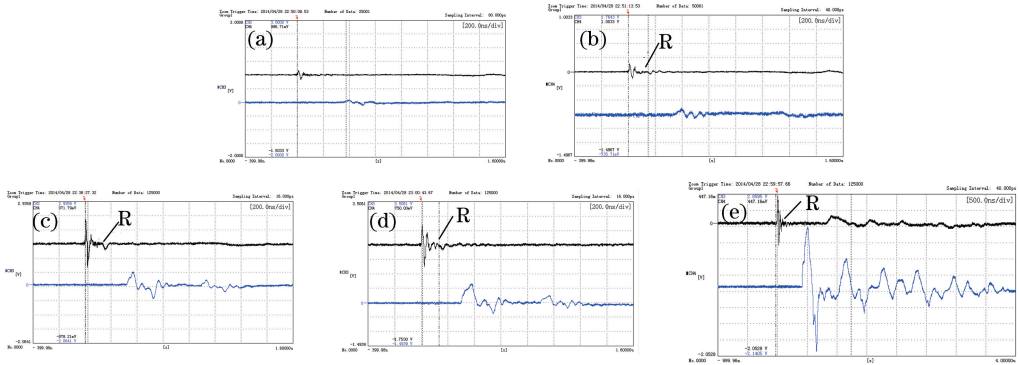


图 4 不同功率密度下激光冲击加载 7050 铝合金的动态应变。

(a) 1.02 GW/cm²; (b) 1.53 GW/cm²; (c) 1.98 GW/cm²; (d) 2.77 GW/cm²; (e) 4.07 GW/cm²

Fig. 4 Dynamic strain of 7050 aluminum alloy induced by laser shocks processing for different laser power densities.

(a) 1.02 GW/cm²; (b) 1.53 GW/cm²; (c) 1.98 GW/cm²; (d) 2.77 GW/cm²; (e) 4.07 GW/cm²

不同功率密度下激光冲击加载 7050 铝合金的动态应变如图 4 所示。由图可知,R 点比检测到剪切波的时刻要延后一点。纵向传播的剪切波在材料内部逐步衰减,当剪切波衰减接近 0 时,压电波形出现了幅值明显增大、波形下凹的压缩波,即表面 Rayleigh 波。当激光功率密度为 1.02 GW/cm² 时,由于激光能量过小,检测点无法准确测量到 Rayleigh 波;在其余 4 种功率密度激光作用下检测点均检测到 Rayleigh 波,以检测到剪切波的时刻为起始时刻,4 个 Rayleigh 波出现的时间分别为 139.8,140.1,139.9,141.2 ns。光斑中心与 PVDF 压电传感器的间距为 3 mm,光斑尺寸为 5 mm,激发点与检测点的间距为 0.5 mm,由此可知表面 Rayleigh 波的波速接近且小于 3.5×10³ m/s,与铝块中表面 Rayleigh 波传播速度的理论值 2.93×10³ m/s 相符,进一步证实该波为表面 Rayleigh 波。

研究显示,当脉冲激光消失后,激光冲击区域的体积发生塑性应变,受周围金属材料的限制,产生了平行于冲击表面的双轴压应力场^[5]。图 6 所示为 5 种激光功率密度冲击波在材料内部形成的轴向传播的纵波和

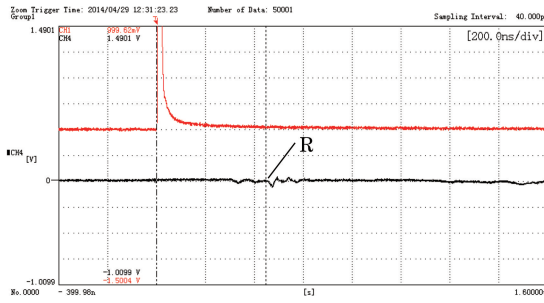


图 5 功率密度为 1.53 GW/cm^2 时激光冲击加载 7050 铝合金距边缘 1.5 mm 处的动态应变

Fig. 5 Dynamic strain of 7050 aluminum alloy induced by laser shock processing at the area of 1.5 mm away from the edge for laser power density of 1.53 GW/cm^2

剪切波的波幅。由图 4(a)、(b)及图 6 可知,当激光功率密度为 1.02 GW/cm^2 及 1.53 GW/cm^2 时,检测到剪切波与纵波的幅值均很小,且未测得冲击波在薄板试样中的来回反射,这说明激光冲击能量较小,可以忽略薄板内冲击波来回反射对表面塑性变形的影响。同时由图 4(a)可知,在激光功率密度为 1.02 GW/cm^2 时,可以检测到剪切波却无法准确检测到 Rayleigh 波,说明激光冲击区域横向变形较小;由图 4(b)、5 可知,当激光功率密度为 1.53 GW/cm^2 时,距离边缘 0.5 mm 处可分别检测到剪切波与 Rayleigh 波,在距边缘向外 1.5 mm 处,以激光束冲击加载试样的时刻为起始时刻,在 420 ns 时仅检测到波形下凹的压缩波,根据传播速度判断该压缩波为 Rayleigh 波,由此可知,由光斑边界向中心汇聚的稀疏波无法传播到中心,在稀疏波和横向变形的共同作用下,试样最大残余拉应力出现在距离冲击区域边缘约 1.5 mm 处,如图 3(a)所示。因此,表面稀疏波对试样表面残余应力的影响不可忽视,表面稀疏波与横向变形的共同作用导致试样最大残余主应力呈等双轴分布。

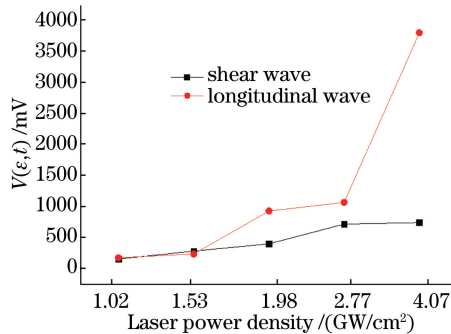


图 6 不同激光功率密度下冲击波的波幅

Fig. 6 Amplitudes of laser shock waves for different laser power densities

由图 4(c)、(d)可知,当激光功率密度为 1.98 GW/cm^2 、 2.77 GW/cm^2 时,冲击波在薄板试样中来回反射,但粘贴在冲击区域边缘的 PVDF 压电传感器并未检测到动态应变;由图 4(e)可知,当激光功率密度为 4.07 GW/cm^2 时,光斑边界再次检测到冲击波在薄板试样中多次来回反射而诱导的动态应变,该应变每次出现的时间点均为背面检测到的冲击波在试样中来回反射半个周期的时间点,即该动态应变为粘贴在冲击区域边缘的 PVDF 压电传感器所测得的压电波形。

将图 4(c)、(d)与图 4(e)进行对比可知,在激光冲击作用下光斑区域的近表面产生塑性变形,薄板试样内来回反射的冲击波与稀疏波先后传播到光斑中心,使得试样中心塑性区域的表面产生了上下位移而发生二次塑性变形,这样的二次塑性变形缓冲了冲击波与稀疏波,因此冲击区域表面的 PVDF 压电传感器在剪切波和 Rayleigh 波衰减之后未测得任何动态应变;随着激光能量的增强,冲击区域的近表面区域塑性变形加剧,冲击区域位错密度与硬度增加,从而导致粘贴于光斑边缘附近的 PVDF 压电传感器再次检测到动态应变。由此可知在铝合金薄板中,来回反射的激光冲击波对残余应力洞的形成有着不可忽视的作用。冲击波在薄板试样中来回一次所用的时间约为 548 ns ,表面波在铝块中传播的波速约为 $2.93 \times 10^3 \text{ m/s}$,由此计算可得表面稀疏波传播到光斑中心的时间约为 850 ns ,这说明冲击波和表面稀疏波是先后作用于激光冲击

区域中心,未产生叠加。所以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,之后激光冲击波在薄板试样中的来回反射使试样中心塑性区域的表面产生上下位移,同时稀疏波在光斑中心相遇,发生会聚,也使试样中心塑性区域的表面产生上下位移。由于冲击波与稀疏波先后作用于光斑中心,中心塑性区域表面剧烈的上下位移导致该区域产生了较大的剪切塑性应变,进而减弱了激光冲击波加载阶段产生的轴向和径向塑性变形,减小了激光光斑中心区域残余压应力,从而产生残余应力洞现象。

3.3 表面微结构响应

由于激光光斑直径为 5 mm,而超景深三维显微镜每次检测的区域约为 $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$,无法涵盖一个光斑内的微观形貌,因此进行冲击区域的边缘和几何中心多点检测,并选择其中最具有代表性的点为例。

当激光功率密度为 $1.98\ \text{GW}/\text{cm}^2$ 、 $2.07\ \text{GW}/\text{cm}^2$ 时,利用超景深三维显微系统对激光冲击区域的表面微观形貌进行观察,结果如图 7 所示,其中不同三维形貌高度用不同颜色表示,高度的颜色标尺位于图左上角。当激光功率密度为 $1.98\ \text{GW}/\text{cm}^2$ 时,冲击中心区域比临近区域高 $5.680\ \mu\text{m}$;当激光功率密度为 $2.77\ \text{GW}/\text{cm}^2$ 时,冲击中心区域比临近区域高 $10.800\ \mu\text{m}$,激光冲击中心区域高度明显大于边缘区域,三维显微系统观察结果与前文分析一致。

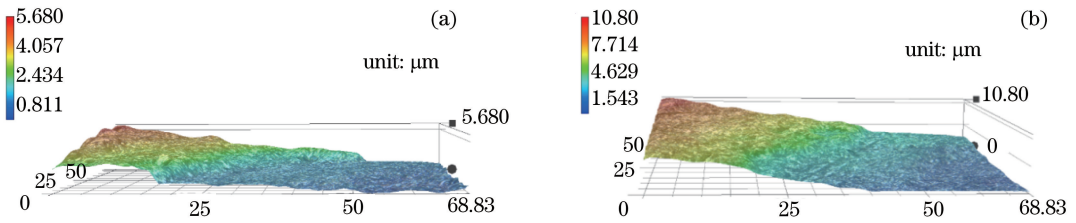


图 7 不同激光功率密度作用后冲击区域中心的三维形貌图。(a) $1.98\ \text{GW}/\text{cm}^2$; (b) $2.07\ \text{GW}/\text{cm}^2$

Fig. 7 Three-dimensional images of the laser impact center area for different power densities.

(a) $1.98\ \text{GW}/\text{cm}^2$; (b) $2.07\ \text{GW}/\text{cm}^2$

光斑中心附近区域的试样材料在激光冲击波的作用下产生轴向和径向的塑性变形,随着激光能量的进一步增强,光斑内近表面区域的塑性变形加剧,冲击区域位错密度与硬度增加,因此在试样中来回反射的冲击波和向中心传播的稀疏波导致的二次变形的变形量减小,冲击区域中心变得平滑。图 8 是激光功率密度为 $4.07\ \text{GW}/\text{cm}^2$ 的激光作用后激光冲击区域中心与边缘的三维形貌图,将图 7 与图 8(a)进行对比可知,当激光功率密度为 $4.07\ \text{GW}/\text{cm}^2$ 时,激光冲击区域中心更加平滑。

由图 8(b)可知,激光冲击边缘区域呈阶梯状,高度逐渐降低,且激光冲击区域与边缘区域的高度差为 $13.88\ \mu\text{m}$,这间接表明激光冲击区域产生了较大的塑性变形。

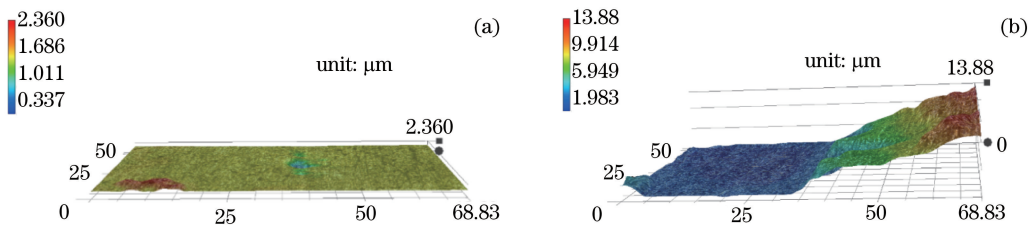


图 8 功率密度为 $4.07\ \text{GW}/\text{cm}^2$ 激光作用后冲击区域的三维形貌图。(a) 中心; (b) 右边缘

Fig. 8 Three-dimensional images of laser impact areas for power density of $4.07\ \text{GW}/\text{cm}^2$. (a) Center area;

(b) right edge area

4 结 论

1) 当激光功率密度为 $1.02\ \text{GW}/\text{cm}^2$ 时,激光冲击引起的横向变形小,当激光功率密度为 $1.53\ \text{GW}/\text{cm}^2$ 时,光斑边界效应引起的表面稀疏波对试样表面残余应力存在影响,表面稀疏波与横向变形的共同作用导致了试样最大残余主应力呈等双轴分布;

2) 当激光功率密度为 $1.98\ \text{GW}/\text{cm}^2$ 和 $2.77\ \text{GW}/\text{cm}^2$ 时,冲击波在薄板试样的背面与表面的来回反射

对表面残余应力的影响不可忽视,由于薄板试样中来回反射的冲击波以及向中心传播的稀疏波的作用,试样中心塑性区域表面产生上下位移,冲击区域中心比临近区域分别高出 $5.680\ \mu\text{m}$ 、 $13.88\ \mu\text{m}$,试样中心区域产生了较大的剪切塑性应变,减弱了激光冲击波加载阶段产生的轴向和径向塑性变形,从而减小了残余压应力,产生了残余应力洞现象;

3) 当激光功率密度为 $4.07\ \text{GW}/\text{cm}^2$ 时,试样冲击区域产生了较大的塑性变形且比较平滑,最大残余主应力分布均匀,主应力方向角分布变化较小,但其塑性变形程度与硬度的变化,需要借助透射电镜与显微硬度仪对其进行进一步的检测。

参 考 文 献

- 1 Cao Y P, Feng A X, Hua G R. Influence of interaction parameters on laser shock wave induced dynamic strain on 7050 aluminum alloy surface[J]. J Appl Phys, 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]. Appl Phys Lett, 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 Yang Jianfeng, Zhou Jianzhong, Feng Aixin, *et al.*. Measure and analysis the residual stress of laser shock processing[J]. Appl Laser, 2006, 26(3): 157-162.
杨建风, 周建忠, 冯爱新, 等. 激光冲击强化区的残余应力测试分析[J]. 应用激光, 2006, 26(3): 157-162.
- 6 Wang Xuede, Nie Xiangfan, Zang Shunlai, *et al.*. Fomation 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 Brockman R A, Braisted W R, Olson S E, *et al.*. Prediction and characterization of residual stresses from laser shock peening[J]. International Journal of Fatigue, 2012, 36(1): 96-108.
- 8 Ocana J L, Morales M, Molpeceres C, *et al.*. Numerical simulation of surface deformation and residual stresses fields in laser shock processing experiments[J]. Applied Surface Science, 2004, 238(1): 242-248.
- 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 Meyers M A. Dynamic Behavior of Materials[M]. New York: John Wiley & Sons, 1994: 27-31.