

# 激光诱导冲击波加载下铝合金弯曲变形规律与表面特性研究

曹子文 邹世坤 车志刚

北京航空制造工程研究所高能束流加工技术重点实验室, 北京 100024

**摘要** 利用纳秒脉冲激光诱导冲击波对 2024 铝合金试片进行单面冲击成形实验, 分析了冲击成形试片的弯曲变形、残余应力和表面形貌。研究发现, 激光功率密度和覆盖率影响试片冲击表层的塑形应变大小及其分布, 进而影响试片的弯曲变形; 随着覆盖率增大, 冲击表面趋于平整; 相同激光冲击参数下厚度大于 4mm 的铝合金试板的曲率半径与试板厚度平方成正比, 试片正/反面均为压应力分布, 试片弯曲对正面强化表面的残余压应力具有松弛作用。

**关键词** 激光技术; 激光加工; 激光冲击成形; 弯曲变形; 2024 铝合金

中图分类号 TG392 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.121405

## Bending Deformation and Surface Characteristics of 2024 Aluminum Alloy Processed by Laser-Induced Shock Wave

Cao Ziwen Zou Shikun Che Zhigang

Science and Technology on Power Beam Processes Laboratory, Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China

**Abstract** 2024 aluminum alloy is deformed by shock waves which are induced by pulse laser of nanosecond duration. Bending deformation, residual stress and surface morphology are studied on laser-shocked specimens. It is found that laser power density and coverage rate strongly influence plastic strains and its distributions, which drive specimens to curve. The laser-shocked surfaces becomes uniform with coverage rate increasing. For specimens of thickness more than 4mm, curvature radius are proportional to specimen thickness, and the compressive residual stresses on shock surface gets more relaxed with arc height increasing.

**Key words** laser technique; laser material processing; laser shock forming; bending deformation; 2024 aluminum alloy

**OCIS codes** 350.3390; 350.3850; 350.5400; 350.7420

### 1 引言

利用纳秒脉冲激光诱导产生的等离子体冲击波效应, 使受冲击金属材料产生所需外形, 即激光冲击成形技术<sup>[1-2]</sup>, 它具有塑形成形和表面强化的双重技术特点<sup>[3-5]</sup>, 在飞机机翼大厚度整体壁板成形<sup>[6]</sup>、复杂型面构件校形、微电子器件<sup>[7]</sup>成形领域具有广阔的应用前景。

激光冲击成形具有两种变形模式: 朝向激光束方向弯曲的凸面成形和背离激光束方向弯曲的凹面成形。国内外学者对薄板激光冲击的凹面成形研究较多<sup>[8-11]</sup>, 对于厚板的激光冲击成形研究相对较少, 尤其是对成形机理研究不够深入。2008年, 美国波音公司报道了利用激光冲击成形技术制造 747-8 客机机翼, 随后, 国内外学者对厚板冲击成形的研究逐渐增多。2012年, 胡永祥等<sup>[12]</sup>开展了基于固有应变的大尺寸板材激光冲击成形有限元分析, 为激光冲击成形发展奠定了理论基础。但国内在厚板激光冲击成形技术的发展缓慢, 国外对于厚板激光冲击成形技术不公开, 而国内研究大多局限在薄板成形及其理论分析, 对于具有工程化指导意义的研究甚少。针对 2024 铝合金进行了激光冲击成形实验研究, 分析了激光功率密度、覆盖率

收稿日期: 2015-07-01; 收到修改稿日期: 2015-08-11; 网络出版日期: 2015-10-25

作者简介: 曹子文(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事纳秒脉冲激光与金属材料相互作用机理及相关应用方面的研究。E-mail: svip@163.com

对不同厚度2024铝合金材料的一维弯曲变形、表面形貌和表面残余应力的影响规律。

## 2 实验材料和方法

2024铝合金是一种可热处理强化的铝-镁-铜系合金,是航空工业中应用最广泛的铝合金。2024铝合金试片长宽尺寸为76 mm×19 mm,试片厚度 $t=n+2$  mm( $n=0,1,2,3,\dots,13$ ),其表面加工至粗糙度 $Ra=0.8$ 。将已粘帖120  $\mu\text{m}$ 厚度铝箔胶带的试片固定在机械手上,并在试片表面喷去离子水,形成用于约束等离子体膨胀的厚度为1~2 mm的水膜。钕铝石榴石(YAG)纳秒脉冲激光器输出脉冲宽度为10 ns、重复频率为1 Hz的脉冲激光,经聚焦后透过去离子水膜,照射在铝箔胶带上并瞬间产生等离子体,形成高峰值压力冲击波,引起铝合金试片表面塑性变形。冲击路径和强化位置如图1所示,仅对试片一面进行冲击。激光光斑沿试片宽度方向行进,完成一排冲击后偏移行进路径进行下一排冲击,每排内的光斑间距和每排之间的间距均为 $d$ ,逐点逐排形成位于试片中部的19 mm×50 mm强化表面。激光功率密度 $I$ 选择7 GW/cm<sup>2</sup>和4 GW/cm<sup>2</sup>,覆盖率 $C$ 选择66%、128%、240%和357%。其中覆盖率的定义为

$$C = S \cdot N / A, \quad (1)$$

式中 $A$ 为受冲击总面积, $S$ 为单光斑面积, $N$ 为光斑总数量,处于冲击区域外的光斑部分不计入覆盖率。

图2所示为激光冲击后发生弯曲变形的2024铝合金试片(激光功率密度为7 GW/cm<sup>2</sup>、覆盖率为240%)。激光冲击实验后,去除粘帖的铝箔胶带并用酒精清洗强化表面,对2024铝合金试片进行如下测试:1) Almen弧高仪测量试片变形量;2) Veeco NT1100型白光干涉仪观测激光冲击表面形貌,扫描范围为4.9 mm×3.7 mm;3) Proto LXRD型X射线衍射仪测试残余应力,Cr靶,准直管直径为2 mm。

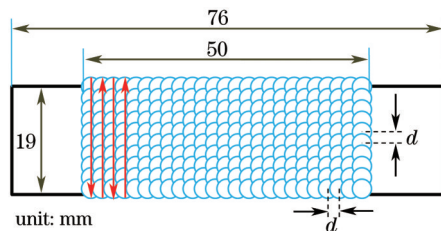


图1 试片尺寸和激光冲击路径

Fig.1 Specimen dimensions and laser shocked plan

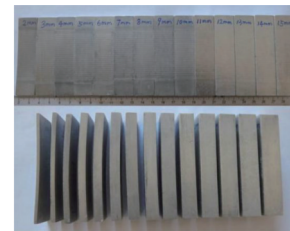


图2 激光冲击后的2024铝合金试片

Fig.2 Laser shocked specimens of 2024 aluminum alloy

## 3 实验结果与分析

图3所示为覆盖率分别为66%、128%、240%、357%的冲击区三维表面形貌,不同覆盖率的冲击区表面差异较大。覆盖率为66%的冲击表面离散分布着圆形塑性凹坑,由于激光束能量分布不均匀,塑形凹坑呈锅底形由底部向边缘平滑过渡,凹坑最大深度约20~25  $\mu\text{m}$ ;增加覆盖率,塑形凹坑开始相互搭接,单一完整的塑形凹坑消失;覆盖率为240%的冲击表面出现圆形凸起,这一凸起由其周围多个锅底形塑形凹坑搭接过程中相互挤压造成的。当覆盖率达到357%,各区域受到多次冲击而形成相对平整的强化表面。

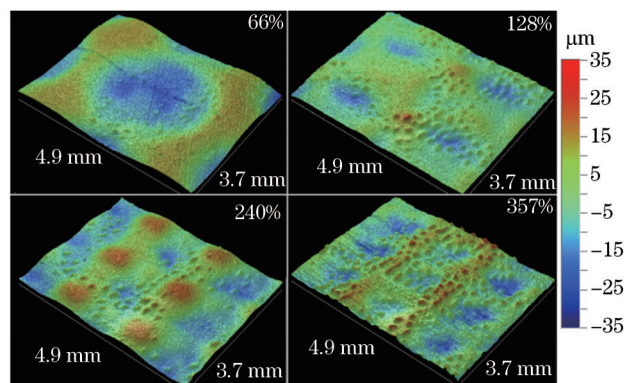


图3 激光冲击表面三维形貌

Fig.3 Three-dimensional topography of laser-shocked surfaces

图4(a)为不同激光冲击条件下弧高值随试片厚度 $T$ 的变化曲线,试片向激光束一侧凸起称为凸面弯曲(正弧高值),反之为凹面弯曲(负弧高值)。随试片厚度增加,弧高值先增大(或由负值变为正值)后逐渐减小,在试片厚度4~5 mm附近出现最大弧高值。仅在激光功率密度为 $7\text{ GW/cm}^2$ 条件下2 mm厚度试片产生凹面弯曲(其他试片均为凸面弯曲),且覆盖率越大凹面弯曲程度也越大;试片厚度为3 mm时,激光功率密度与弧高值负相关,而覆盖率与弧高值正相关;试片厚度大于等于4 mm时,激光功率密度和覆盖率均与弧高值正相关,但随着试片厚度增大,其对弧高值的影响越小。试片厚度( $T \geq 5\text{ mm}$ )与相应的曲率半径 $R$ 的关系见图4(b),其拟合曲线方程为一元二次方程,即确定冲击条件时,曲率半径与试片厚度的平方呈正比关系,随试片厚度增大,覆盖率对曲率半径的影响也越大。

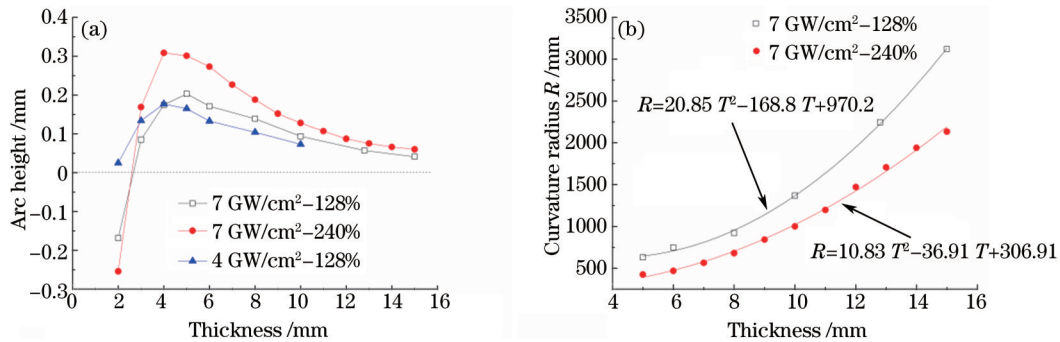


图4 不同厚度试片的弧高值和曲率半径变化曲线

Fig.4 Arc height and curvature radius of specimens versus thickness

激光诱导冲击波形成塑形凹坑的过程中,该塑形凹坑附近材料向周围膨胀延展,发生拉伸塑形应变<sup>[13]</sup>,从而产生驱动试片弯曲的弯矩<sup>[14]</sup>。 $x$ 方向的弯曲程度主要取决于 $x$ 方向的拉伸塑形应变,其弯矩 $M_x$ 和塑形应变 $\varepsilon_x$ 的对应关系为

$$M_x = E \int \varepsilon_x (z - h/2) dx dz, \quad (1)$$

式中 $z$ 为塑形应变 $\varepsilon_x$ 与试片受冲击表面的距离, $h$ 为试片厚度, $z=h/2$ 处为试片的中性面。激光诱导产生的冲击波在沿深度方向在铝合金试片内部传播并不断衰减,因此越深位置的塑形应变 $\varepsilon_x$ 越小,对弯矩的贡献也越小。从(1)式可以看出,中性面之上的塑形应变 $\varepsilon_x$ 产生驱动凸面弯曲的弯矩,其累积形成的弯矩 $M_1$ ( $M_1 < 0$ );中性面之下的塑形应变 $\varepsilon_x$ 产生驱动凹面弯曲的弯矩,其累积形成的弯矩 $M_2$ ( $M_2 > 0$ )。图5(a)所示试片厚度足够薄,激光冲击引入的塑形应变贯穿试片,由于下表面竖直方向缺乏约束,塑形变形区整体向下偏离<sup>[15]</sup>,导致 $|M_1| < |M_2|$ ,发生凹面弯曲变形。图5(b)所示试片厚度适中,激光冲击引入的塑形应变层超过中性面,但中性面至上的塑形应变及其分布范围更大,因此 $|M_1| > |M_2|$ ,仍发生凸面弯曲变形,但随着激光功率密度和覆盖率发生变化,试片弯曲程度可能增大也可能减小, $|M_1 + M_2|$ 的大小决定了弯曲程度;图5(c)所示试片厚度足够大,激光冲击引入的塑形应变层未超过中性面,此时激光功率密度和覆盖率越大,塑形影响层越深, $|M_1|$ 越大,凸面弯曲程度越大。因此,在确定的冲击条件下,试板厚度恰好为塑形影响层深度恰好为试板厚度的 $1/2$ ,该厚度试板产生最大弯曲变形。

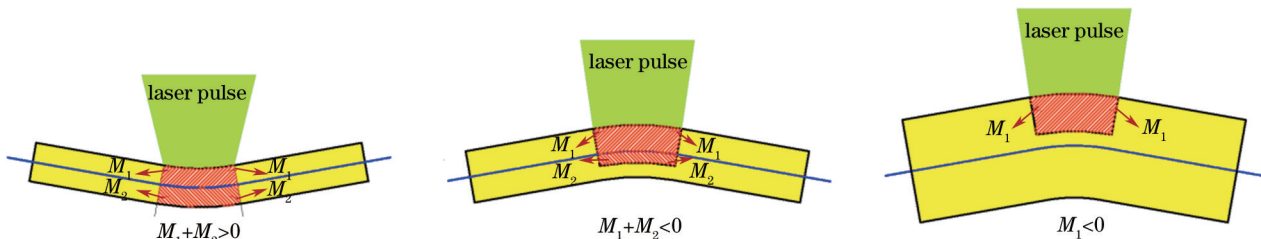


图5 冲击表层塑形应变分布及其产生的弯矩

Fig.5 Plastic-strain distributions and bending moments in laser shocked specimens

采用X射线衍射法分别对4、7、10、13 mm厚度试片(激光功率密度为 $7\text{ GW/cm}^2$ 、覆盖率为240%)进行残余应力测试,在试片冲击面及背面的中间位置分别测试两点,测试方向沿试片 $x$ 方向。图6测试结果显示,冲击面及背面均呈残余压应力分布,试片背面残余压应力值大于试片冲击面。冲击面的残余压应力值随试

片厚度增大而增大,主要是因为试片发生凸面弯曲而造成冲击区周围材料的反向膨胀效应被削弱,弯曲越大,削弱程度越大。试板发生凸面弯曲时,试板背表面受压缩而产生残余应力,4 mm 试片背面残余应力值约-20 MPa,其他厚度试片背面残余应力值为-130~-150 MPa,4 mm 试片背面残余应力值较低的原因可能是弯曲过程中背表面压应力水平超过材料的屈服强度产生压缩塑性应变所致。

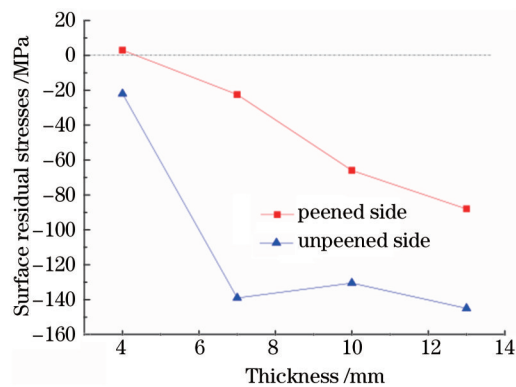


图6 不同厚度试片的表面残余应力

Fig.6 Surface residual stresses on specimens of different thickness

## 4 结 论

通过对激光冲击 2024-T351 铝合金试片的弯曲量变形及表面特性研究,在本次激光冲击实验条件下获得以下结论:

铝合金试片弯曲变形与激光冲击产生塑性应变大小及其分布深度密切相关,塑性应变大小由激光功率密度和覆盖率控制,而塑性应变分布深度主要由激光功率密度控制;

2)激光冲击条件确定时,厚度大于 4 mm 铝合金试板的曲率半径与试板厚度平方成正比;

3)激光冲击参数对试板的强化表面形貌及正/反面的表面压应力的影响较大,凸面弯曲试片的正/反面均呈残余压应力分布,试板弯曲对正面残余应力具有松弛作用。

## 参 考 文 献

- 1 L Hackel, F Harris. Contour Forming of Metals by Laser Peening[P]. US patent: 6410884B1, 2002-06-25.
- 2 Zhang Qinglai, Wang Rong, Hong Yanxin, *et al.*. Study on laser shock forming and fracture behavior of metal sheet[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0403010.  
张青来,王 荣,洪妍鑫,等. 金属板料激光冲击成形及其破裂行为研究[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0403010.
- 3 Wang Fei, Yao Zhenqiang. Numerical simulation research on laser shock forming[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2006, 40(9): 1465-1468.  
王 飞,姚振强. 激光冲击成形的仿真与实验研究[J]. 上海交通大学学报, 2006,40(9):1465-1468.
- 4 Ding Hua, Wang Yun, Cai Lan. Laser shock forming of aluminum sheet: Finite element analysis and experimental study[J]. Applied Surface Science, 2010(256): 1703-1707.
- 5 R Fabbro, P Peyre, L Berthe, *et al.*. Physics and applications of laser-shock processing[J]. Journal of laser applications, 1998, 10(6): 265-279.
- 6 Zeng Yuansong, Huang Xia, Li Zhiqiang. The application and development of advanced shot peen forming technologies[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2006, 13(3): 23-29.  
曾元松,黄 霞,李志强. 先进喷丸成形技术及其应用与发展[J]. 塑性工程学报, 2006, 13(3): 23-29.
- 7 Zheng Chao, Sun Sheng, Ji Zhong, *et al.*. Microscale laser peen forming of sheet metal and its research situation[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2009, 16(4): 59-67.  
郑 超,孙 胜,季 忠,等. 板材脉冲激光微激光冲击成形技术及研究现状[J]. 塑性工程学报, 2009, 16(4): 59-67.
- 8 M Morales, J A Porro, J J Garcia-ballesteros, *et al.*. Effect of plasma confinement on laser shock microforming of thin metal sheets[J]. Applied Surface Science, 2001, 257: 5408-5412.
- 9 Zhou Jianzhong, Zhang Yongkang, Zhou Ming, *et al.*. Theoretical analysis on deformation of sheet metal under one laser shot loading[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(1): 135-138.

- 周建忠, 张永康, 周 明, 等. 单次激光冲击下板料变形的理论分析[J]. 中国激光, 2005, 32(1): 135-138.
- 10 Xia Weiguang, Wu Xianqian, Wei Yanpeng, *et al.*. Mechanical properties of niti shape memory alloy processed by laser shock peening[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1103002.  
夏伟光, 吴先前, 魏延鹏, 等. 激光冲击强化对NiTi形状记忆合金力学性质的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1103002.
- 11 Wang Xiao, Qiu Tangbiao, Gu Yuxuan, *et al.*. Micro-forming properties of Ti foil under laser indirect shock[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(3): 632-637.  
王 霄, 邱唐标, 顾宇轩, 等. 激光间接冲击下钛箔的微成形特性[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(3): 632-637.
- 12 Y X Hu, R V Grandhi. Efficient numerical prediction of residual stress and deformation for large-scale laser shock processing using the eigenstrain methodology[J]. Surface & Coatings Technology, 2012, 206: 3374-3385.
- 13 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): 90-95.  
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): 90-95.
- 14 H Murakawa, D Deng, S Rashed, *et al.*. Prediction of distortion produced on welded structures during assembly using inherent deformation and interface element[J]. Trans JWRI, 2009, 38(2): 63-69.
- 15 Y Wang, Y Fan, S Vukelic, *et al.*. Energy-level effects on the deformation mechanism in microscale laser peen forming[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2007, 9(1): 1-12.

栏目编辑: 宋梅梅