

文章编号: 1001-3806(2010)03-0303-03

## 激光冲击金属板料成形的残余应力分布研究

袁国定, 史德旗, 姜银方, 王永良, 王飞  
(江苏大学 机械工程学院, 镇江 212013)

**摘要:** 为了研究激光冲击成形后残余应力对板料性能的影响, 采用高功率 Nd:glass 激光器对金属薄板激光冲击成形, 使用 X 射线衍射法对激光冲击成形后的金属薄板的表面残余应力分布分析研究。薄板成形后的凹面分布存在较大的残余压应力, 而凸面边缘存在较小的残余拉应力; 残余应力随着激光能量的增加而增加, 但当到达一定值时, 凹面残余压应力达到最大值; 在冲击凹面中心点处的残余应力值最大, 周围处的残余应力以中心点为圆心向外呈非线性递减。在不同的凹模孔径下采用 8mm 光斑、30J 激光能量单次冲击, 发现存在一个凹模孔径阈值, 小于阈值时, 残余应力随着孔径的增大而增大; 大于阈值时, 随着孔径的增大而减小, 阈值大小大约为 20mm。结果表明, 该研究对进一步研究残余应力的控制有重要作用, 且对材料的抗疲劳性能、抗应力腐蚀、表面性能研究有很重要的理论和工程价值。

**关键词:** 激光技术; 激光冲击成形; 残余应力分布; X 射线衍射法; 金属薄板

**中图分类号:** TG665 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2010.03.005

### Study on residual stress distribution of laser shock forming metal-sheet

YUAN Guo-ding, SHI De-qi, JIANG Ying-fang, WANG Yong-liang, WANG Fei  
(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** In order to study the effect of residual stress on the laser shock forming metal sheet, a high power Nd:glass laser was used to form the metal-sheet and then the residual stress distribution on the surface of metal sheet was tested by means of X-ray diffraction method. It was found that there was large residual compress stress on the concave surface of metal-sheet, but low residual tensile stress on the fringe of convex surface. The residual stress increased with the increase of laser energy. When the laser energy came to a certain value, the residual compress stress reached its maximization. On the shock surface, the residual compress stress of shock point was maximal, the other compress stress decreased in a nonlinear way along the shock point and ultimately to zero. For laser shocking different aperture of mold with a laser beam in 8mm diameter, 30J energy, there was a threshold for the aperture of the mould. The residual stress increased with the increase of aperture when the aperture was smaller than the threshold. However, it decreased with the increase of aperture when the aperture was larger than the threshold. The threshold aperture was about 20mm. The results are very important for study of the distribution and control of residual compress stress, play an important theoretical and engineering role in studying the material fatigue, stress corrosion resistance and capability of the surface.

**Key words:** laser technique; laser shock forming; distribution of residual stress; X-ray diffraction; metal-sheet

### 引言

金属板料成形一般都是配合模具的冷冲压成形, 它适用于大批量生产零件的要求<sup>[1]</sup>。如果对于小批量, 特别是单件生产, 为之设计专门的模具则在本生产成本和周期上造成了很大的浪费。近年来在国内外出现了一种先进的成形技术——激光冲击成形。其特点在于高压、超快、高应变率的冷塑性成形, 特别是对那种传统方法

难以成形的材料, 具有无可比拟的优点<sup>[2]</sup>。激光冲击成形后的板料冲击表面比未冲击区域看上去光滑, 即粗糙度减小。而且在表面形成了很高的残余应力, 起到了对材料很好的强化效果<sup>[3]</sup>。对于激光表面残余应力的研究主要出现在激光喷丸成形和表面强化方面, 激光冲击方面主要是对冲击成形后板料的成形深度和影响因素作了大量的研究<sup>[4-6]</sup>。YANG<sup>[7]</sup>对 TA2 钛合金板在不同凸模顶圆半径  $R$  的变形与残余应力进行了研究。而影响冲击后残余应力的影响因素很多, 例如激光冲击次数、光波形状、激光能量、冲击时间、凹模孔径等。本文中在约束其它条件的情况下, 考虑在不同的激光能量、冲击次数和凹模孔径对铝合金板料 3003-H16 表面的残余应力分布的影响。残余应力的测量通常有盲孔法、应

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目 (BK2009203)

作者简介: 袁国定 (1948-), 女, 教授, 硕导, 主要从事塑料模和冲压模具的研究。

E-mail: ygd@ujs.edu.cn

收稿日期: 2009-03-23; 收到修改稿日期: 2009-07-20

力压痕法、X射线衍射法<sup>[8-9]</sup>,本文中采用X射线衍射法对冲击后的表面进行残余应力的测量。

## 1 激光冲击金属板料成形原理

激光冲击的原理如图1所示,板料完全浸在作为约束层的水中,当高功率、短脉冲的激光束通过凹透镜照射板料,激光通过透明的约束层到达吸收层,吸收层吸收激光能量气化电离,形成高温高压的等离子,等离子体诱发冲击波形成强度可达几个吉帕斯卡的冲击波,远远大于材料的动态屈服强度,从而使板料发生冷塑性变形。

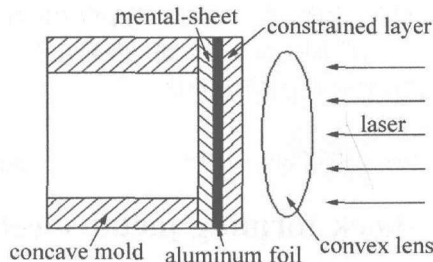


Fig. 1 The principle of laser shock forming

冲击后的铝合金板冲击后的典型形状如图2所示。

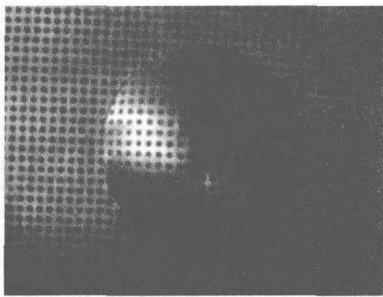


Fig. 2 The shape of Al-sheet metal after laser shock

冲击区域的板料成球冠状,这是因为激光束能量成高斯分布。且冲击波的作用时间大约为激光脉宽的2倍~3倍,则本实验中采用的激光脉宽为22ns,这样每次冲击加载的作用时间就大约为60ns。激光冲击波压力大小分布为Fabbro模型<sup>[10]</sup>,压力沿光斑径向的变化公式为:

$$p(r, t) = p(t) \exp\left(-\frac{r^2}{2r_0^2}\right) \quad (1)$$

式中, $r$ 为激光光斑内任何一点到光斑中心的距离; $r_0$ 为等离子体影响区域半径; $t$ 为冲击作用时间。

从公式中很容易看出,在中心点处的等效压力最大。

## 2 试验条件

实验中采用江苏大学强激光技术研究所的高功率钕玻璃激光器(Nd:glass)。主要技术参量如下:激光波长为 $1.06\mu\text{m}$ ,脉冲宽度为22ns~25ns,光斑直径为8mm,试验试样采用边长 $a=40\text{mm}$ 的3003-H16铝合金方形板,厚度为0.3mm,约束层为水,吸收层为铝箔,厚度为0.15mm。铝合金板的屈服强度172MPa,

弹性模量为69GPa,泊松比为0.33。

为了测量残余应力的分布,在铝合金板上先取如图3中的5个代表点进行测量,第1点和第4点分别是冲击顶点和冲击区与未冲击区的交点,第5点为未发生变形的点。同样在板料相对应的反面取5个点测量,记为6,7,8,9,10。相邻数字对应两点之间的长度是相等的(曲线为弧长,直线为距离,因为冲击后的锥角并不是定值,所以只能大致的估计在横坐标上的长度)。



Fig. 3 The distribution points for measuring residual stress

实验中分别用不同的激光能量、冲击次数和凹模孔径,考查对板料表面残余应力的影响。试样表面残余应力测试,采用邯郸爱斯特研究所研制的X-350型X射线应力测定仪,在江苏大学机械工程学院激光技术研究所进行。测量方法采用侧倾固定 $\Psi$ 交相关法定峰:辐射为 $\text{CrK}\alpha$ , $\Psi$ 角为 $0^\circ\sim 45^\circ$ , $2\theta$ 角为 $144^\circ\sim 137^\circ$ , $2\theta$ 角扫描步距 $0.10^\circ$ ,计数时间0.5s;X光管高压22kV,X光管电流6mA,准直管直径4mm。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 不同激光能量对表面残余应力的影响

采用激光能量分别为15J,20J,30J的能量单次冲击,凹模半径为20mm。铝合金表面的残余应力与不同激光能量之间的关系如图4所示,很显然,铝合金

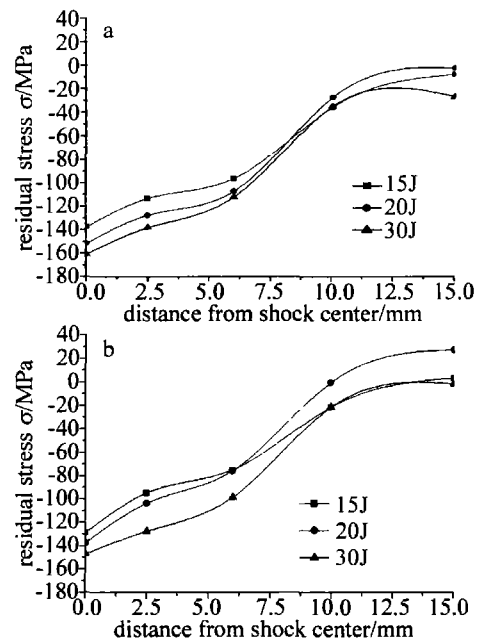


Fig. 4 The residual stress on both metal sheet surfaces varying with different laser energy

a—the distribution of residual stress on the concave surface of the metal-sheet  
b—the distribution of residual stress on the convex surface of the metal-sheet

板料表面的残余应力随着激光能量的增大而增大,但增大是非线性变化的。通过比较图 4a 和图 4b 发现,凹面的残余应力的大小比凸面要大,且凸面有时存在残余拉应力,这是由于随着激光能量的增加冲击波峰值压力也就越大,使铝合金板料变形越大,造成残余应力也就越大。当能量增大到一定的值时,板料在产生更大的残余应力之前已破裂,而凸面出现的拉应力可能跟残余应力洞有关系,所以,控制激光的能量对板料的成形起着很大的作用。

### 3.2 冲击次数对板料表面残余应力的影响

研究中发现,如果只是对板料实行单次冲击后的成形效果不是很理想,这就引申出小能量多次冲击<sup>[11]</sup>。该实验中采用激光能量为 20J 分别进行 1 次, 2 次, 3 次, 4 次冲击,冲击完后测量其表面残余应力,实验结果如图 5 所示。实验发现多次冲击板料,则表面的残余应力随着冲击次数的增多而增大。但增大的趋势会越来越小,并到一定的次数时,达到最大值。根据塑性变形理论可以知道这是由于晶体的滑移阻力即变形抵抗力逐渐加工,变形愈发展,应变强化加强,发生了加工硬化现象。由图中可以看出,多次冲击后的表面的残余应力比单次冲击的板料要大得多,且分布更加均匀。这也就为实现大面积冲击成形奠定了很好的基础,更好地在实际生产中得到应用。

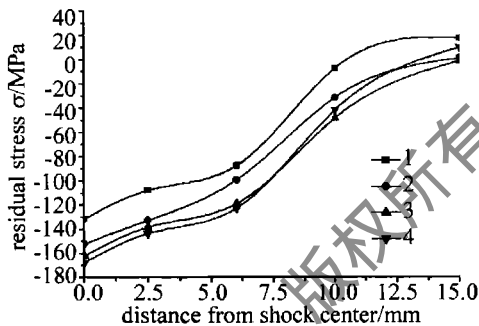


Fig. 5 The effect of shock numbers on residual stress

### 3.3 凹模孔径对表面残余应力的影响

如果在改变约束孔径的基础上对板料进行激光冲击成形,研究凹模孔径对残余应力的影响,激光能量为 30J 进行单次冲击,约束孔径分别为 15mm, 20mm, 30mm,实验结果见图 6 和图 7。结果表明,当凹模孔径在 20mm 时,表面中心点的残余应力最大;在小于 20mm 时,大致随着约束模孔径的增大而增大;当大于 20mm 时,反而随着约束孔径的增大而有一定程度的减小,后者是因为孔径越大参与流动的介质也就越多,则单位面积上得到的冲击能量也就越小,故造成残余应力降低。通过研究可知,这跟激光的等离子影响区域有关,如果凹模半径小于离子影响区则随着凹模半径的增大而增大,当凸模半径大于等离子影响区域时,

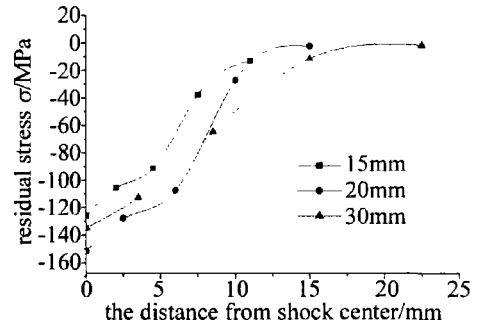


Fig. 6 The residual stress distribution of Al-sheet metal after different concave mould

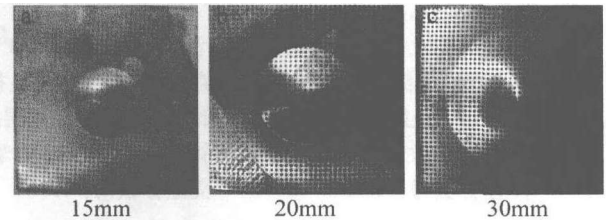


Fig. 7 The shape of Al-sheet metal after different concave mould

残余应力随着凸模半径的增大而减小。等离子影响区域比激光的光斑直径大,产生气化物压力的作用下发生变形,因受约束层的阻碍,等离子体无法沿激光入射方向散开,只能在变形后形成的空间内膨胀,并沿约束层和板料之间的微小缝隙横向扩散。

## 4 结论

不同激光能量对材料表面的残余应力分布有很大的影响,当增加到一定值时,表面的残余应力增大很小。当对同一点冲击时,也出现了相同的情况,凹模孔径对材料的分布有很大的关系,其中主要是跟激光直径造成的等离子作用区域有关。这样可以选取最优的激光能量和激光冲击次数来得到表面的最优残余应力,从而来提高材料表面的各种性能。

### 参 考 文 献

- [1] MOU L, HU J H. Stamping process and the design of mold [M]. Beijing: Peking University Press, 2006: 19-34 (in Chinese).
- [2] CHEN Y B, ZHOU J Z, SUN Y Q, et al. The research progress and application of laser technology on sheet-metal forming [J]. Machinery Design & Manufacture, 2007(9): 132-134 (in Chinese).
- [3] GOMEZ-ROSAS G, RUBIO-GONZALEZ C, OCANA J L, et al. High level compressive residual stresses produced in aluminum alloys by laser shock processing [J]. Applied Surface Science, 2005, 252(4): 883-887.
- [4] WANA G L, ZHOU J Z, ZHANG X Q. Application of laser-induced shock wave in surface modification and forming of sheet metal [J]. Agricultural Machinery Journal, 2005, 36(12): 148-151 (in Chinese).
- [5] LI X Y. The experimental research on the laser shock forming of the sheet-metal and finite Element Analysis [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2007: 14-31 (in Chinese).
- [6] GU Y Y. Theoretical study on laser shock forming of metal sheet [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2007: 64-68 (in Chinese).

(下转第 346 页)

随阶次的增大而越来越小。

图3a和图3b中分别给出了对应于图2的1阶和2阶光谱开关临界位置处的归一化谱强度分布。图3表明:对于近场同阶轴上光谱开关,相干长度越大谱开关的中心凹陷程度越深;1阶光谱开关(见图3a)的相对光谱宽度随相干长度的增加而变宽,而2阶光谱开关(见图3b)的相对光谱宽度几乎与相干长度无关。

图4中给出了多色GSM光束经杨氏双缝衍射后在远场( $1/F_{\omega_0} = 1000$ )轴外 $u$ 从0到1200区间内的归一化光谱移动,相干长度 $\sigma_0$ 分别为 $0.3w_0, 0.8w_0, \infty$ ,其它计算参量与图2相同。为便于对图4进行说明,定义光谱开关的阶次如下:离 $z$ 轴最近的为1阶光谱开关,以后顺次为2阶、3阶…… $n$ 阶开关。图4表明:相干长度较大( $\sigma_0$ 为 $0.8w_0, \infty$ )时,在 $u=0$ 到1200区间,出现了1阶和2阶光谱开关,而相干长度较小( $\sigma_0=0.3w_0$ )时,在 $u=0$ 到1200区间无光谱开关现象出现;相干长度对远场轴外光谱开关出现的临界位置 $u_c$ 和光谱跃变量都有影响,相干长度越大,出现光谱开关的临界位置离轴越近(即 $u_c$ 越小,比如1阶光谱开关,当 $\sigma_0=0.8w_0$ 时, $u_c=288.1$ ;当 $\sigma_0=\infty$ 时, $u_c=279.4$ ),光谱跃变量越大,但随着光谱开关阶次的增加,这种影响越来越小。

图5中给出了对应于图4的远场轴外1阶和2阶光谱开关位置处的归一化谱强度分布。图5表明:远场轴外光谱开关的相对光谱宽度和中心凹陷程度对相干长度的依赖关系与近场轴上的同阶光谱开关对相干长度的依赖关系相似,即同阶光谱开关的中心凹陷程度随相干长度的增大而增加。随着相干长度的增加,1阶光谱开关(见图5a)的相对光谱宽度将变宽,而2阶光谱开关(见图5b)的相对光谱宽度基本不变。

## 4 结 论

基于部分相干光通过ABCD光学系统的传输公

式,得到了多色GSM光束通过杨氏双缝和的ABCD光学系统后的谱强度解析表达式。说明了该公式是一普适式,利用它可统一地研究GSM光束在轴上和轴外的光谱移动,并且一些典型的光束(比如多色高斯光束,多色谢尔模型光束)通过杨氏双缝和ABCD光学系统后的谱强度公式都可作为它的特例导出。分析从普适式导出的多色GSM光束通过杨氏双缝和ABCD光学系统后的轴上谱强度公式,对多色GSM光束在传输过程中轴上光谱移动形成原因作了适当物理解释。作为该公式的一种应用,对多色GSM光束通过杨氏双缝和后面的自由空间后的光谱移动和光谱开关现象做了数值计算和分析。

## 参 考 文 献

- [1] WOLF E. Invariance of the spectrum of light on propagation[J]. Phys Rev Lett, 1986, 56(13):1370-1372.
- [2] PU J X, ZHANG H H, SHOJIRO N. Spectral shifts and spectral switches of partially coherent light passing through an aperture[J]. Opt Commun, 1999, 162(4):57-63.
- [3] PONOMARENKO S A, WOLF E. Spectral anomalies in a Fraunhofer diffraction pattern[J]. Opt Lett, 2002, 27(14):1211-1213.
- [4] PAN L Zh, LU B D. The spectral switch of partially coherent light in Young's experiment[J]. IEEE J Q E, 2001, 37(11):1377-1381.
- [5] JI X L, LU B D. Effect of turbulence on the spectral shift of partially coherent light[J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(4):506-510 (in Chinese).
- [6] ZHAO G P, LU B D. Influence of hard edge aperture on the spectral switch of polychromatic vector beams[J]. Laser Technology, 2006, 30(2):142-144 (in Chinese).
- [7] ZHAO G P, LU B D. Spectral switches and effect in singular optics with polychromatic light field[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(4):2229-2235 (in Chinese).
- [8] KANDPAL H C. Experimental observation of the phenomenon of spectral switch[J]. J Opt, 2001, A3(4):296-299.
- [9] PU J X. Propagation of high-spectrum-band gaussian schell-model beams through a thin hologram diffraction grating[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 1997, 14(5):442-446 (in Chinese).
- [10] MANDEL L, WOLF E. Optical coherence and quantum optics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1995:327.
- [7] YANG J Y. Study on deformation and residual stresses of titanium alloy sheet after laser shock forming[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2006:25-27 (in Chinese).
- [8] LIN L H, CHEN L G, GU M Y. The current situation of the measurement of residual stress and development trend[J]. Mechanical, 1998, 25(5):46-48 (in Chinese).
- [9] YANG J F, ZHOU J Z, FENG A X. Measure and analysis the residual stress of laser shock processing [J]. Applied Laser, 2006, 26(3):157-162 (in Chinese).
- [10] FABBRO R, PEYRE P, BERTHE L. Physics and applications of laser shock processing [J]. Journal of Laser Applications, 1998, 10(6):265-279.
- [11] CHEN Y B. Study on the laser compound forming of sheet metal based on finite element simulation and experiment [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2008:16-21 (in Chinese).

(上接第305页)