

文章编号: 0258-7025(2007)Supplement-0082-04

激光喷丸成形中的残余应力

曹向广, 周建忠, 张兴权, 杨超君, 袁国定, 杜建钧, 倪敏雄

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 通过对激光喷丸成形(LPF)中残余应力场分布的研究,找出单点喷丸残余应力分布形式,以及单点多次、多点不同路径喷丸中后续冲击对前次冲击残余应力分布的影响规律。对准确控制残余应力分布,获得激光喷丸后所需的板料形状具有指导意义。利用钕玻璃高功率脉冲激光对厚度为 1.2 mm 的 LY12CZ 硬铝合金进行了单点激光喷丸,用 X 衍射应力测定仪考察了单点冲击后材料表面及深度方向的残余应力,用厚度为 2 mm 的 6061-T6 铝合金板料进行三列窄条激光喷丸变形实验。以 ANSYS/LS-DYNA 有限元分析软件为平台,建立了具有一定精度的激光喷丸过程中冲击波压力的加载模型,对板料的变形过程进行了数值模拟,分别考察了不同激光能量,板料尺寸,冲击路径等工艺参数对残余应力场分布的影响。实验结合数值模拟探索激光喷丸的主要参数和残余应力场之间的相互关系。

关键词 激光技术; 激光喷丸成形; 冲击波; 残余应力; 数值模拟

中图分类号 TN249; TG386 **文献标识码** A

Residual Stress in Laser Peening Forming

CAO Xiang-guang, ZHOU Jian-zhong, ZHANG Xing-quan, YANG Chao-jun,

YUAN Guo-ding, DU Jian-jun, NI Min-xiong

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract The value and distributing form of the residual stress in laser peening forming (LPF) decide the final sheet contour and deformation shape. To accurately control the distributing of the residual stress and shape the sheet in desiration, it was significant to invest the distributing form among single peen, multiply peen in the same spot and different spots. The experiment of 2mm thick AL6061-T6 and LY12CZ sheet with thickness of 1.2mm was carried out with Nd:Glass high power pulsed laser. The residual stress of peened target was measured by the X-350A stress analytical facilities. The influence of process parameters, such as laser energy, sheet size, peening path to the residual stress distributing was investigated deeply. The mathematical modeling of shock wave load based on laser peening was established, and a finite-element analysis method based on the ANSYS/LS-DYNA software is applied to simulate the sheet deformation process.

Key words laser technique; laser peening forming; shock wave; residual stress; numeral simulation

1 引言

激光喷丸成形(LPF)是利用超短脉冲激光束替代有质弹丸,按一定路径对金属板料进行冲击的技术。由此在板料整个表面及厚度方向得到一定分布的应力场,适度的应力场分布形态对应着一定曲率的板材形状,通过控制应力场分布形式,实现板材的

精密弯曲成形^[1]。其本质是残余应力释放成形,因此残余应力的大小和形态决定了激光喷丸后板料的应力状态和变形。

激光喷丸成形中利用 GW/cm^2 和 ns 量级的脉冲激光冲击材料,在材料表面产生的冲击波峰值压力达 GPa 量级,作用时间为 0~100 ns。随着冲击

基金项目: 国家自然科学基金(50675090,50475127)和江苏省自然科学基金(BK2004063)资助课题。

作者简介: 曹向广(1982—),男,河南南阳人,硕士研究生,主要从事激光板料成形方面的研究。

E-mail: cxg114@126.com

导师简介: 周建忠(1964—),男,江苏无锡人,教授,博士生导师,主要从事激光加工原理及应用方面的研究。

E-mail: zhoujz@ujs.edu.cn

波在材料中向深度方向传播,冲击波峰值压力逐渐衰减。冲击波传播方向上的材料最高弹性应力被定义为 Hugoniot Elastic Limit (HEL),当峰值压力超过 HEL 时,材料会发生塑性变形^[2]。峰值应力在 HEL 以下时,只发生弹性变形。材料内在冲击波传播过的区域不均匀的弹塑性变形导致残余应力场的形成。

2 实验装备及方法

激光喷丸成形冲击波形成原理及板料变形示意图如图 1,2 所示。实验在江苏大学激光技术研究所的重复频率千瓦兆钕玻璃强激光实验装置上进行。装置包括激光器和一五轴联动的工作台。激光器的激光脉冲波长为 $1.06 \mu\text{m}$,脉宽为 23 ns,有效光斑直径为 5~13 mm,功率密度为 $10^8 \sim 10^9 \text{ W/cm}^2$,其他性能指标有:

- 1) 输出激光脉冲能量起伏 $\leq \pm 4\%$,功率密度起伏 $\leq \pm 5\%$;
- 2) 激光输出光场均匀稳定;
- 3) 系统自发辐射能量 $\text{ASM} \approx 15 \text{ mJ}$;
- 4) 工作重复频率 0.5 Hz。

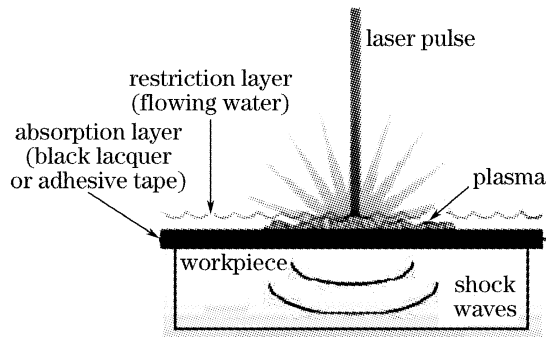


图 1 激光诱导产生的冲击波

Fig. 1 Shock waves induced by laser

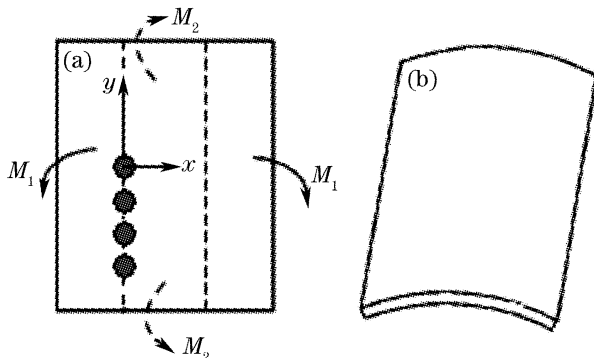


图 2 喷丸冲击轨迹与板料变形

Fig. 2 Peened trace and deformation shape

试样为厚 1.2 mm 的 LY12CZ 硬铝合金和 2 mm 厚的 6061-T6 铝合金板料。板料表面均匀涂

上特制的黑漆作为吸收层。涂前用乙醇清洗板料,避免污渍影响铝合金和黑漆的结合强度。利用能量为 29 J,光斑直径为 7 mm 的激光对 LY12CZ 硬铝合金进行单点及多次冲击,用 X-350A 型 X 射线应力测定仪对其表面及深度方向的应力进行测量。用同样的激光参数对长条状的 6061-T6 板料进行重复冲击两次的三列窄条喷丸,观察激光喷丸成形板料的变形效果。试样尺寸及材料参数见表 1。

表 1 试样尺寸及材料参数

Table 1 Dimension and parameter of the specimen

Materials	LY12CZ	6061-T6
Dimension /mm	25×25×1.2	100×30×2
Density $\rho /(\text{kg}/\text{m}^3)$	2770	2700
Poisson ratio E_x	0.28	0.35
Elastic rate E / GPa	65.4	68.9
Yield limit σ_s / MPa	374	310
Heat capacity rate $c /[\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})]$	875	896

3 残余应力场的有限元模拟

有限元模拟以 ANSYS/LS-DYNA 为平台建立了冲击波加载模型。模拟分两部分完成,首先用 ANSYS 完成模型的前处理(建模,分网,施加载荷和边界条件),并将生成 LS-DYNA 格式的关键字 K 文件提交给 LS-DYNA 求解器进行显示动态求解。再通过 LS-DYNA 和 ANSYS 之间的显隐转换接口,将单元模型由显示转为隐式,同时将显式分析的变形和应力结果输入到隐式模型中,通过给定新的边界条件在 ANSYS 中进行后续静态分析求解,以模拟卸载后板料内部应力释放达到静态平衡的过程^[3]。

由于激光喷丸成形过程涉及能量吸收层吸收激光能量、等离子体的产生和爆炸、冲击压力波的传播以及金属板料的弯曲变形等,因此对整个过程进行模拟具有较大难度。为了简化模型并不失准确性,在数值分析时并不模拟等离子体爆炸的过程,而是根据有关冲击波理论和已有的研究,将激光诱导的冲击波简化为作用在冲击区域内随时间变化压力载荷,然后将其作为载荷直接作用在金属板料表面。

关于冲击波压力的加载方法,根据文献[4],冲击波的压力载荷曲线和激光脉冲波形曲线基本一致,因此可以通过激光脉冲的作用时间和实验记录的脉冲信号,将激光诱导的冲击波载荷按照激光脉冲信号的分布,采取分段逐次逼近的办法来实现激光脉冲载荷的加载。冲击波峰值压力 p_{max} 可计算

为^[5]

$$p_{\max} = \sqrt{\frac{A(\gamma-1)I_0 Z_{t0} Z_{c0} \rho}{(2\gamma-1)(K_a Z_{c0} + K_c Z_{t0})}}$$

式中 A 为吸收系数,在 $0.80 \sim 0.95$ 之间, γ 为等离子体的绝热指数,取 1.67 , Z_{t0} , Z_{c0} 分别为靶材和约束层材料的声阻抗, K_a , K_c 分别为与能量吸收层和约束层密度有关的参量, ρ 为等离子体的密度, I_0 为激光功率密度。冲击波压力的作用时间约为脉冲宽度的 3 倍^[6]。冲击波载荷曲线如图 3 所示。

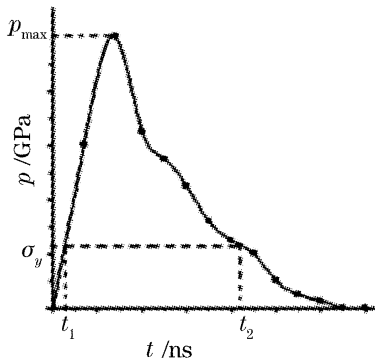


图 3 冲击波加载曲线

Fig. 3 Load curve of the shock waves

4 结果分析

4.1 实验结果

对方形 LY12CZ 硬铝合金板料进行激光单点喷丸后,用酸液对板料表面进行逐层抛光,利用 X 射线应力测定仪测得残余应力在厚度方向上分布的曲线如图 4 所示。冲击区域表面残余应力为压应力,范围在 $150 \sim 200$ MPa,随着深度的增加,应力值逐渐减小,直到变为拉应力,随后变化趋势减缓。

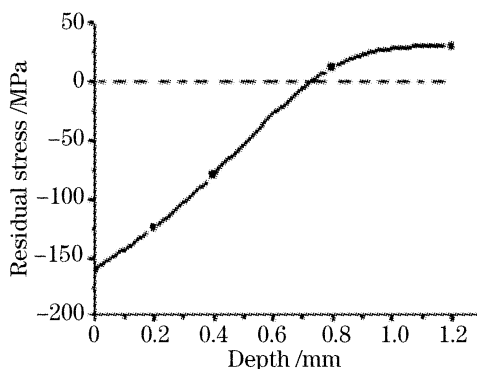


图 4 厚度方向残余应力分布曲线

Fig. 4 Residual stress curve in deep direction

对长条形的 6061-T6 铝合金板料进行了三列窄条激光喷丸,条间距为 20 mm。在相同的轨迹上冲击两次,喷丸后板料成形如图 5 所示。

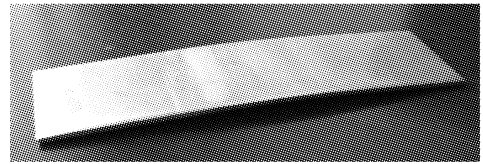


图 5 三列窄条激光喷丸后板料变形

Fig. 5 Deformation of 6061-T6 sheet after three strip peening

4.2 有限元模拟结果

模拟中用弹塑性本构模型,材料的屈服强度使用动态屈服极限代替,以此来考虑应变率强化效应。铝合金材料静态屈服强度 σ_{yc}^s 和动态屈服强度 σ_{yc}^D 之间满足关系^[7]

$$\frac{\sigma_{yc}^D}{\sigma_{yc}^s} = 0.67 - 1.8911g\sigma_{yc}^s,$$

LY12CZ 铝合金的静态屈服强度 $\sigma_{yc}^s = \sigma_{0.2} = 0.374$ GPa,从而得到铝合金的动态屈服强度为: $\sigma_{yc}^D = 0.514$ GPa。

模拟采用的板料尺寸为 $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 1.2 \text{ mm}$,利用上述加载模型和本构关系,模拟出板料冲击区域厚度方向残余应力分布曲线如图 6 所示。由图可见,

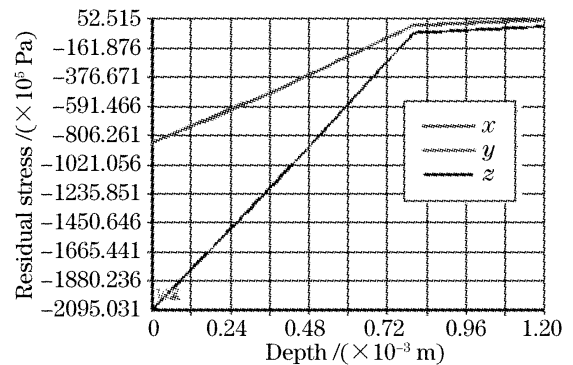


图 6 有限元模拟板料厚度方向应力分布

Fig. 6 Residual stress curve in deep direction by FEM

由于施加载荷的对称性, x , y 向应力(长、宽方

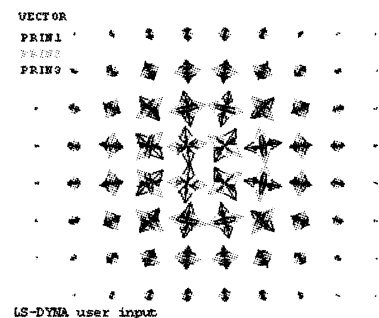


图 7 板料表面单点冲击区域三向主应力分布矢量图
Fig. 7 Vectograph of three principal stress in the single peened zone by FEM

向)分布曲线重合,这与理论一致。 z 向应力和图4实验测定应力具有相同量值,最大为209.5 MPa,位于板料冲击区表面,并且深度方向残余应力变化趋势一致,在厚度为0.8 mm附近应力变化梯度较大,也与实验一致。图7所示为单次冲击后板料表面冲击区域(圆形光斑)三向主应力矢量图。压应力最大值为第三主应力,在冲击区和 z 向(厚度方向)应力方向一致。整个表面应力呈轴对称分布,从冲击区中心到边缘应力逐渐减小。

在100 mm×30 mm×2 mm的LY12CZ板料上进行激光单列直线喷丸,冲击波峰值压力为3.8 GPa时,加载进行显示运算分析,之后用隐式分析后模拟板料弹性卸载,得到板料变形及释放后的 z 向应力分布如图8所示。冲击区均为压应力,从冲击区到未冲击区逐渐过渡为拉应力。激光喷丸只在冲击区域附近对板料残余应力具有较大影响。图9所示为矩形板十字轨迹喷丸加载分析后材料应力及

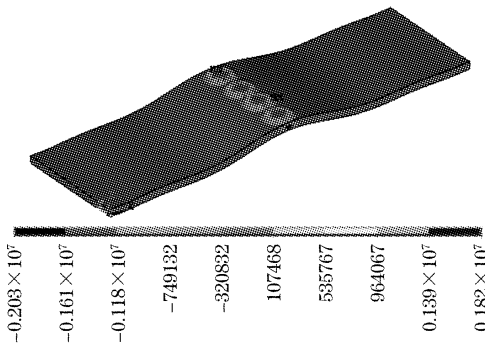


图8 激光单列喷丸后板料残余应力及变形 z 向应力形状。
Fig. 8 z direction stress stress and sheet deformation in peened by laser in one line

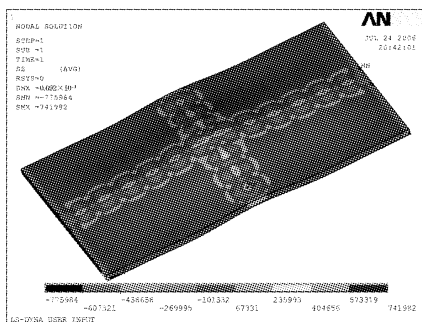


图9 十字轨迹激光喷丸模拟弹性卸载后板料变形形状
Fig. 9 Sheet deformation in peened by laser in cross line after inexplicit FEM analysis

变形状况。

5 结 论

激光喷丸成形中,板料受冲击表面形成较大的残余压应力,量值在几百兆帕量级,而在未冲击区域应力状态有拉有压。

单点激光喷丸后板料表面残余应力呈轴对称分布,从中心到边缘逐渐减小,并且冲击区第三主应力方向与材料 z 向(厚度方向)应力一致。考察材料内最大压应力,只要考察冲击区 z 向应力即可。

在相同激光脉冲参数下,激光喷丸次数对材料内残余应力具有较大影响。喷丸轨迹对残余应力大小的影响相对较小,只影响了残余应力的分布,从而影响最终的板料变形。

以实验数据为依据,结合激光喷丸成形机制和有限元理论,不断改进有限元模拟方法,用具有一定精度的有限元模型进行进一步的研究,是分析激光喷丸成形板料残余应力的较好方法。

参 考 文 献

- 1 Zhou Jianzhong, Liu Huixia, Feng Aixing *et al.*. Advances on the application of laser-induced shock wave in metal processing [J]. *Applied Laser*, 2005, **25**(1): 27~31
周建忠,刘会霞,冯爱新等. 激光冲击波技术用于材料加工的研究进展 [J]. *应用激光*, 2005, **25**(1): 27~31
- 2 Z. Rosenberg, Y. Parton, Y. Yeshurun. Determination of the Hugoniot elastic limits of differently treated 2024 Al specimens [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1982, **15**(7): 1137~1142
- 3 Y. Fan, Y. Wang, S. Vukelic *et al.*. Wave-solid interactions in laser-shock-induced deformation processes [J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **98**(10): 104904-1~104904-11
- 4 D. Batani, V. I. Vovchenko, G. I. Kanel *et al.*. Mechanical properties of a material at ultrahigh strain rates induced by a laser shock wave [J]. *Doklady Physics*, 2003, **48**(3): 123~125
- 5 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
- 6 P. Peyre, R. Fabbro. Laser shock processing; a review of the physics and applications [J]. *Opt. Quantum Electron.*, 1995, **27**(12): 1213~1229
- 7 Qian Weichang. *Mechanics of Armor-Piercing* [M]. Beijing: Defence Industry Publishing Company, 1984
钱伟长. *穿甲力学* [M]. 北京: 国防工业出版社, 1984