

强短脉冲激光冲击薄板高速变形的实验研究

佟艳群 姚红兵 张永康 陈明阳 袁 蓓 孟春梅

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 强短脉冲激光冲击材料成形是一种高应变率的过程。很多已有测试手段由于响应带宽不够而无法进行有效测量。常用的任意面速度干涉仪(VISAR)价格昂贵、测试方法复杂,且存在条纹缺失。采用一种简单的光电测试系统探测出铝薄板在强短脉冲激光冲击下的高速变形过程。通过标定输出电压与变形量的关系,分析出薄板被冲击中心点的位移和速度,与文献仿真结果规律一致,计算出在 8 J 激光能量冲击时间内平均变形速度为 8.49×10^4 m/s。并由阻尼振动和弹性形变叠加的模型拟合出激光冲击薄板的形变过程,根据拟合系数计算出薄板的振动速度和塑性变形值,为分析和控制激光冲击变形工艺提供了依据。

关键词 激光技术;激光冲击波;光电测试系统;薄板

中图分类号 TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.0203007

Experimental Research of High-Speed Plate Deformation Process Shocked by Strong and Short Pulsed Laser

Tong Yanqun Yao Hongbing Zhang Yongkang Chen Mingyang Yuan Bei Meng Chunmei

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

Abstract The deformation process of material shocked by strong and short pulsed laser has high strain rate. Response bandwidths of many testing instruments are not wide enough to effectively measure the deformation process. The velocity interferometer system for any reflector (VISAR) commonly used to test dynamic deformation is complex and expensive. Especially it has the drawback of lacking stripes. A simple and novel optoelectronic measurement system is applied to measure the deformation. With the calibration of ratio of the output voltage and the deformation, the displacement and velocity of shock center can be worked out. The displacement and velocity law are similar with the simulation result reported. The average deformation velocity in shock period is calculated as 8.49×10^4 m/s. The analysis of the data, based on the fitting curve, shows that the deformation is superimposed the movement of damped oscillations and elastic deformation. Meanwhile, the vibration velocity and the plastic deformation of plate can be obtained through the fitting coefficient. These results provide a basis platform for the analysis and control laser shock deformation process.

Key words laser technique; laser-induced shockwave; optoelectronic measurement system; plate

OCIS codes 140.3440; 120.4630; 040.1880; 070.4340

1 引 言

激光冲击成形技术是一种崭新的成形工艺。与传统的板料成形工艺相比,它具有无需模具、易于控

制、加工柔性高、成形后材料性能好、无污染等优点^[1,2],在航空航天和军事等领域的关键部件成形制造中具有广阔的应用前景。

收稿日期: 2010-06-10; 收到修改稿日期: 2010-08-12

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50735001)、国家自然科学基金(10804037)和江苏省博士研究生创新基金(CX09B_190Z)资助课题。

作者简介: 佟艳群(1981—),女,讲师,博士研究生,主要从事激光和光电检测技术方面的研究。

E-mail: tongyanqun@ujs.edu.cn

导师简介: 张永康(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事激光先进制造与检测技术方面的研究。

E-mail: ykzhang@ujs.edu.cn

激光冲击变形技术利用高功率密度和短脉冲的激光辐射金属材料表面,激光的高能量被材料吸收,在极短的时间内电离形成高温高压的等离子体,在约束层的限制下,等离子体膨胀爆炸并产生向金属内部传播的强冲击波,导致材料具有高应变率的动态响应过程,最终改变微观组织和力学性能等参数,发生塑性形变^[3]。在强短激光辐照下材料变形的动态响应过程是激光冲击成形技术研究的关键问题之一。由于激光加载时间短,材料应变率高,变形过程是一个复杂的瞬态过程,目前大多采用样品回收和介观结构分析相结合的方法,测试激光冲击后的变形量,建立最终变形的数学模型^[4~6]。为分析和控制激光冲击变形工艺,早期研究动态变形过程主要借助于 Hopkinson 压杆和 Taylor 冲击装置^[7,8]。由于响应带宽不够,难以对材料瞬时发生的动态响应进行有效测量。近 20 年来,在冲击领域广泛使用的任意面速度干涉仪(VISAR)技术开始被应用于激光加载领域的测量。如 Meyers Ma 等^[9,10]将 VISAR 技术和 X 射线衍射技术相结合计算出激光冲击压力;中国工程物理研究院流体物理研究所的王永刚等^[11,12]也采用 VISAR 测试技术,反映了材料的损伤演化过程及损伤对材料的动态响应。由于 VISAR 技术采用复杂的光电仪器,装置庞大且昂贵,安装、调试和维护也比较困难,同时受探测仪器响应速度的限制,在被测目标开始运动的瞬间,无法分辨移过的条纹数,不可避免地存在反射条纹缺失。为了探讨激光冲击变形的动态响应规律,上海交通大学的王飞^[13]采用仿真和理论的分析,初步建立了冲击变形初速度的模型。本文设计和应用了一种简单新颖的光电测试系统,测试铝薄板受强短激光冲击下的动态高速成形过程,建立了与理论分析和实验数据相符的数学模型。

2 实验装置及原理

实验系统如图 1 所示。冲击光源采用中国科技大学和江苏大学联合研制的调 Q 高功率钕玻璃固体激光器 1。其基本参数为:激光波长 1064 nm,脉冲宽度 23 ns,激光的光斑直径为 8 mm,脉冲重复频率为 0.5 Hz。抽运电压不同,激光能量输出不同,则冲击波载荷强度不同。冲击激光通过透镜 3 聚焦于样品 4 上。由于样品的变形量与板材的厚度成反比,板材厚度过大时,变形量小。参考测量薄片的厚

度在 100~250 μm 之间动态变形较明显^[14],实验选用厚度为 150 μm 的 L2 铝薄板(密度为 2.7 g/cm^3 ,弹性模量为 68900 MPa,泊松比为 0.33),加工成 80 mm \times 80 mm 的正方形试样。为了取得较好的实验效果,样品表面用乙醇擦洗干净,并将 K9 玻璃用硅胶固定在样品冲击部位,形成约束层以增加冲击压力和延长冲击作用时间^[15]。采用压板固定样品,保证不发生移动。设置波长为 632.8 nm 氦氖激光器,输出光路与冲击激光的输出光路重合,这样方便调节样品和冲击方向垂直。

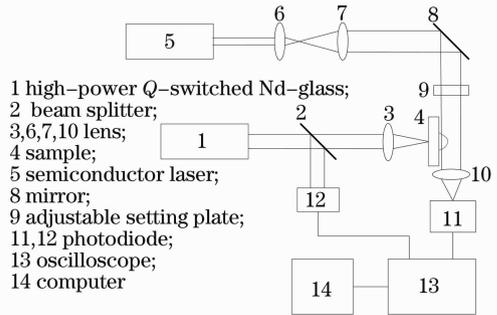


图 1 实验系统图

Fig. 1 System diagram of experiment

测试光源采用波长为 532 nm,功率为 20 mW 的半导体激光器 5。凸透镜 6 和 7 将探测光扩束后形成准直光束。反射镜 8 改变光束方向,保证测试光束方向与铝薄板的表面平行。定形夹缝可调板 9 将探测光束的边缘锁定,形成一条长为 25 mm,宽度小于 0.5 mm 的测量激光片,在光束范围内强度分布均匀。可以设置多个定形夹缝以获得不同部位的变形。安装夹缝与样品表面垂直,保证了激光片与样品的变形方向的垂直。且夹缝安装在专门设计的支柱上,可方便调节位置,便于获得最大的测量范围。当激光辐射到薄板后,强冲击波导致样品背面发生凸起形变,遮挡住测试的光束,动态变形量被加载到激光片的光量中,通过透镜 10 聚焦后由 PIN 光电二极管 11 接收。该二极管可以在两个方向上调节,可以判断样品被冲击的中心是否位于激光片上,可以将接收的光量位于器件中心。当冲击激光束由分束器 2 分束后,小部分光量由光电二极管 12 接收,触发示波器 13 开始工作。示波器采用美国 Tektronix 公司的数字荧光示波器,型号为 TDS3054C,响应带宽为 500 MHz。光电二极管的响应速度为 0.1 ns。测试系统的灵敏度由光电二极管和示波器的响应速度决定,可达纳秒量级。

3 实验结果与分析

实验测得的电压曲线如图 2 所示。考虑冲击中心点的变形量最大,采集薄板被冲击的中心点位移导致的电压变化曲线。其中实线表示激光能量为 8 J,虚线表示激光能量为 6 J。不同能量冲击动态电压曲线相似,激光能量大,则同一点的变形导致的电压输出变化大。由于激光加载时间极短,远小于成形时间,可以把激光冲击压力加载等效为初速度瞬时加载^[13]。薄板在冲击波产生瞬时开始发生变形,在 80 ns 时,电压值测得最小,说明此时遮光量最大,薄板发生变形最大。加载完成后,薄板产生机械振动,随着时间的增加,动能逐渐被结构耗散,振动幅度衰减,类似阻尼振动。由于金属铝材料本身具有一定的延展性,弹性形变叠加在阻尼振动中。由图中曲线也可看出强短脉冲激光冲击瞬时加载完成后,薄板的变形为阻尼振动和弹性形变的叠加。最终运动停止后,薄板发生塑性变形,在样品冲击背面上出现一个类似于指数曲线的凸起^[4],如图 3 所示。

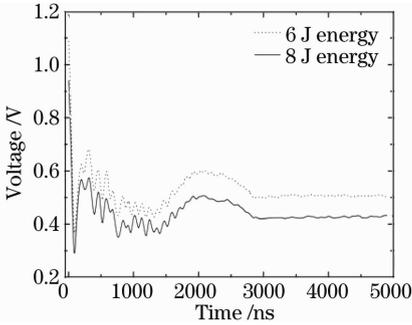


图 2 动态电压曲线

Fig. 2 Curves of dynamic voltage



图 3 铝薄板背面变形

Fig. 3 Back deformation of aluminum sheet

3.1 激光冲击变形速度

设激光片的长度为 L ,初始光通量为 Φ_0 ,探测器的响应度为 R ,则初始电压值为

$$U_0 = \Phi_0 R. \quad (1)$$

当测试点发生变形量 x ,则部分光量被遮挡,被

遮挡的光通量可以记为 $\Phi_x = (\Phi_0/L)x$,此时电压值为

$$U_x = (\Phi_0 - \Phi_x)R = U_0 - \frac{\Phi_0}{L}Rx = U_0 - \alpha x. \quad (2)$$

计算出变形量

$$x = (U_0 - U_x)/\alpha, \quad (3)$$

式中 $\alpha = \Phi_0 R/L$,表示输出电压和变形量之间的关系。在实验装置安装完成后, α 保持不变,可以采用简单方法标定。如图 4 所示,制作一个阶梯圆柱,每阶以 $500 \mu\text{m}$ 的幅度平移进入激光片,则被遮挡的光量等量增加,输出电压按照阶梯变化。记录电压数据,拟合电压曲线,斜率的值即为 α 的取值。图 5 为采集变形量和电压差的关系曲线,测得的 $1/\alpha = 8.205 \text{ mm/V}$ 。

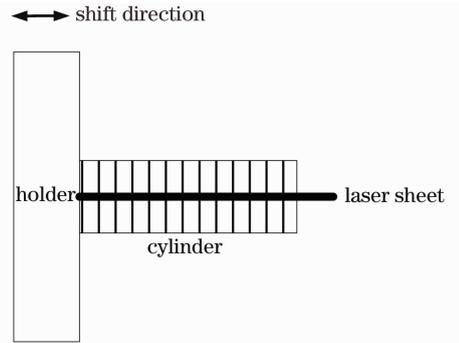


图 4 标定示意图

Fig. 4 Schematic diagram of calibration

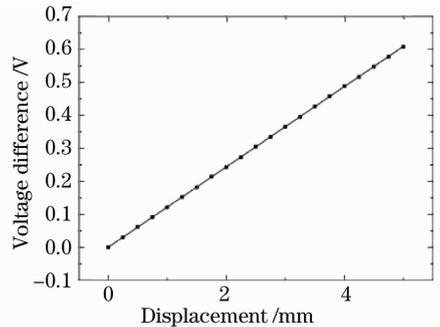


图 5 变形量和电压差的关系曲线

Fig. 5 Curve of deformation and voltage difference

根据采集的电压数据(图 2)和(2)式计算出激光冲击薄板中心点的变形曲线,如图 6 所示。该变形曲线和电压曲线规律一致。变形速度 $\bar{v} = \Delta S/\Delta t$ (如图 7 所示),式中 ΔS 为相对位移值, Δt 为采集时间周期(实验为 40 ns)。从图 7 中可以看出变形速度类似于一个阻尼振动。在冲击时间内,冲击变形逐渐增大,此时的速度也最大,计算冲击时间内的平均变形速度为 $8.49 \times 10^4 \text{ m/s}$ 。

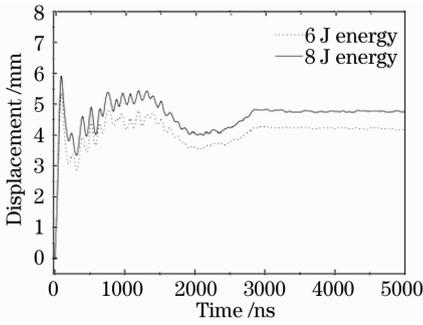


图 6 动态变形曲线

Fig. 6 Curves of dynamic deformation

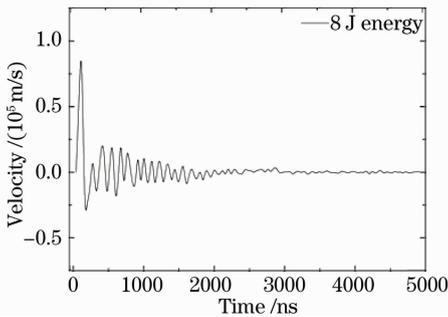


图 7 变形速度曲线

Fig. 7 Velocity curve of deformation

3.2 激光冲击变形过程

激光加载完成后,薄板发生阻尼振动和弹性形变的叠加运动。假设拟合公式为

$$y = A_0 \exp\left(-\frac{x}{t_0}\right) \cdot \sin(2\pi f_0 x + \varphi_0) + A_1 \cdot \sin(2\pi f_1 x + \varphi_1) + y_0, \quad (4)$$

式中加号的前半部分表示为板材的阻尼振动, A_0 表示振动的初始幅度, 振幅按指数规律衰减, 衰减的快慢取决于系数 t_0 , 频率和初相位由系数 f_0 和 φ_0 表示。加号的后半部分表示由金属铝延展性引起动态弹塑性形变过程, A_1 表示形变幅度, f_1 和 φ_1 分别表示频率和初相位, y_0 表示最终的塑性变形值。具体拟合效果如图 8 所示。由于薄板的厚度为 0.15 mm, 根据拟合系数 $f_0 = 0.0152557$, 可求得薄板的振动速

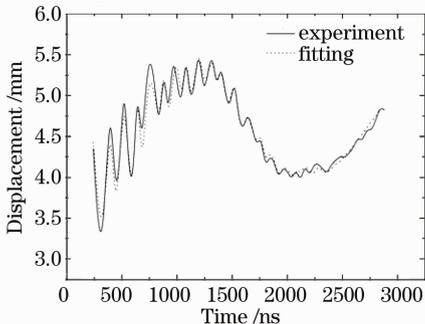


图 8 变形拟合图

Fig. 8 Fitting diagram of deformation

度为: $v = 2d/T = 2d f_0 = 4.577 \times 10^3$ (m/s)。拟合系数 $y_0 = 4.60584$ mm 与图 6 中的最终塑性变形值相同。

4 结 论

激光冲击是一个复杂的瞬态过程。测量了强短脉冲激光冲击薄板的高速变形过程, 探测出薄板在激光加载时间内的平均变形速度为 8.49×10^4 m/s, 通过理论和数据分析, 采用阻尼振动和弹性形变的叠加拟合形变过程, 计算出加载完成后薄板的振动速度为 4.577×10^3 m/s, 最终的塑性变形值也可由拟合数据计算出。该方法对有效控制板材变形过程, 合理优化加工过程具有一定的意义。

参 考 文 献

- Ji Zhong, Liu Ren, Sun Sheng. Advances in laser peen forming [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(6): 8~22
季忠, 刘韧, 孙胜. 激光冲击成形研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(6): 8~22
- Yang Jichang, Zhou Jianzhong, Zhang Yongkang *et al.*. A study on sheet metal forming by using laser shock wave[J]. *J. Jiangsu University(Natural Science)*, 2002, **23**(1): 1~4
杨继昌, 周建忠, 张永康等. 激光冲压金属板料成形的研究[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2002, **23**(1): 1~4
- Wang Fei, Yao Zhenqiang. Numerical simulation research on laser shock forming[J]. *J. 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
- 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
- Ren Aiguo, Zhang Yongkang, Jiang Yinfang *et al.*. Numerical simulation of metal sheet velocity by laser shock forming with semi-die[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1368~1374
任爱国, 张永康, 姜银方等. 激光冲击半模成形板料运动速度的数值模拟[J]. 中国激光, 2010, **37**(5): 1368~1374
- Yin Sumin, Qi Shandong. Study on sheet metal deformation under laser shock forming based on neural network[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 284~290
殷苏民, 齐善东. 基于神经网络的激光冲击金属板料变形量研究[J]. 中国激光, 2010, **37**(1): 284~290
- Li Yulong, K. T. Ramesh. An optical technique for measurement of material properties in the tension kolsky bar[J]. *International J. Impact Engineering*, 2007, **34**(4): 784~798
- W. Chen, B. Song, D. J. Frew *et al.*. Dynamic small strain measurements of a metal specimen with a split hopkinson pressure bar[J]. *Experimental Mechanics*, 2003, **43**(1): 20~23
- Meyers Ma, Schneider Ms, H. Jarmakani. Deformation substructures and their transitions in laser shock-compressed copper-aluminum alloys [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 2008, **39**(2): 304~321
- S. Matthew, Schneiderbimal, Kaddaniel *et al.*. Laser shock compression of copper and copper-aluminum alloys [J].

- International J. Impact Engineering*, 2005, **32**(1): 473~507
- 11 Y. Wang, H. He, L. Wang *et al.*. Time-resolved dynamic tensile spall of pure aluminum under laser irradiation [J]. *J. Appl. Phys.*, 2006, **100**(3): 945~956
- 12 Wang Yonggang, M. Boustie, He Hongliang *et al.*. Experimental study on mechanical behavior and tensile spallation of pure aluminium under laser shock loading [J]. *High Power Laser and Particl Beams*, 2005, **17**(7): 966~970
王永刚, M. Boustie, 贺红亮 等. 强激光辐照下纯铝的力学响应和层裂的实验测量与分析 [J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(7): 966~970
- 13 Wang Fei. Theoretical and Experimental Research on Laser Shock Forming [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008, 41~62
王 飞. 脉冲激光冲击成形的理论与实验研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2008, 41~62
- 14 T. De Resseguier, H. He, P. Berterretche. Use of laser-accelerated foils for impact study of dynamic material behaviour [J]. *International J. Impact Engineering*, 2005, **31**(8): 945~956
- 15 Gu Yongyu, Zhang Yongkang, Zhang Xingquan *et al.*. Theoretical study on the influence of the overlay on the pressure of laser shock wave in photomechanics [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(11): 5885~5891
顾永玉, 张永康, 张兴权 等. 约束层对激光驱动冲击波压力影响机理的理论研究 [J]. *物理学报*, 2006, **55**(11): 5885~5891