

文章编号: 0253-2239(2005)10-1352-5

强激光冲击铝合金改性处理研究

吴 边¹ 王声波² 郭大浩² 吴鸿兴²

(¹ 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)
(² 中国科学技术大学强激光技术研究所, 合肥 230026)

摘要: 利用新型聚偏 1,1-二氟乙烯(PVDF)压电传感器,实现了对激光引发的冲击波压力的实时测量,得到激光引发的冲击波峰压在铝中成指数型的衰减规律;观测了不同约束层材料在铝靶表面产生的激光冲击波,研究了不同约束层对冲击效果的影响;最后用激光冲击强化装置对 7050-T7451 航空铝合金结构材料进行了冲击强化处理,对试件激光冲击区存在的残余压应力及位错密度进行了测量。结果显示经激光冲击处理的试件表面具有极高的残余压应力,可达 -200 MPa 以上。激光冲击处理后铝合金的位错密度得到显著的提高,疲劳寿命提高到 175%~428%。这些重要结果对激光冲击改性处理技术的实际应用具有指导性作用。

关键词: 激光光学; 激光冲击波; 激光冲击强化处理; 残余压应力; 位错密度; 疲劳寿命

中图分类号: TN246 文献标识码: A

Research of Material Modification Induced by Laser Shock Processing on Aluminum Alloy

Wu Bian¹ Wang Shengbo² Guo Dahao² Wu Hongxing²

(¹ *Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031*)
(² *Institute of High-Power Laser Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026*)

Abstract: Using a new poly(vinylidene fluoride) (PVDF) piezoelectricity gauge, the real-time measurement of pressure of the laser-induced shock wave is realized. The attenuation of peak pressure of the laser-induced shock wave in aluminum is an exponential function. Laser-induced shock waves on surface of aluminum targets different in confining materials are observed, and the effects of different confining materials are studied. At last, the 7050-T7451 aerial aluminum alloy material is shock-strengthened by laser shock-strengthening processing (LSP) technique with the device which is developed by authors, and the residual compressive stress and dislocation density of LSP area are tested, the test results show that test piece will have very high residual compressive stress after LSP, the residual compressive stress can exceed -200 MPa. There is a distinct increase in the dislocation density of aluminum alloy, the fatigue life is improved by 175%~428%. These experiments have guide meaning to the practical engineering applications of LSP technique.

Key words: laser optics; laser-induced shock wave; laser shock processing (LSP); residual compressive stress; dislocation density; fatigue life

1 引 言

激光冲击材料改性处理是利用高功率脉冲激光辐照金属材料表面所产生的高温高密度等离子体的喷射爆炸所形成的冲击应力波来改善材料的抗疲劳寿命等多种性能的一项新技术^[1~4]。与已有的激光热处理等技术相比,其具有如下几个重要特点:1)

所要求的是激光脉冲的峰值功率而非平均功率。激光系统所需脉冲宽度为 10^{-8} s 量级、脉冲峰值功率为 10^9 W 量级以上的高功率短脉冲激光系统。2) 依据的是由高功率脉冲激光驱动的高压冲击波。基于激光冲击波效应(光力学效应)而非普通热效应(光热效应)。3) 其机理主要在于金属材料处理层

作者简介: 吴 边(1972~),男,江苏无锡人,中国科学院安徽光学精密机械研究所博士研究生,主要从事固体激光器件及其在工业与医疗中的应用。E-mail: bianwu@vip.sina.com

收稿日期: 2005-01-20; 收到修改稿日期: 2005-04-13

中位错密度的提高与残余应力的产生。4) 原则上可对所有的金属材料,包括对一些热处理效果不明显的材料进行有效的硬化(强化)处理。5) 依据的是非热效应,故不存在“热影响区”。可进行任意的对接处理,乃至进行叠加处理。

利用激光冲击波技术可达到 10 TPa 量级的极高冲击压力。这与核爆中心的压力相当,是目前在实验室条件下可达到的最高冲击压力。激光冲击波技术在材料的冲击改性处理(特别是金属的冲击强化处理)和材料的冲击精密成型等领域得到广泛的应用。

2 强激光驱动冲击波特性实验研究

2.1 实验测量装置

实验采用钕玻璃高功率脉冲激光装置。激光工作波长 1.06 μm,脉宽 35 ns,激光单脉冲能量为 12 J。输出激光由焦距为 100 cm 的透镜聚焦,打在靶体的光斑直径为 φ6 mm。由于激光冲击波持续时间短、压力高,在测量上有一定难度,实验中采用中国科技大学现代力学系研制的聚偏 1,1-二氟乙烯(PVDF)新型压电传感器^[5]及 PHILIPS PM3320A 型数字示波器记录激光冲击波压力和电压波形。测量系统结构如图 1 所示。靶具由靶件、吸收涂层、约束层和固定件组成。靶件为普通铝材料(表面抛光),约束层为 K9 玻璃。在聚偏 1,1-二氟乙烯压电传感器背面固定一有机玻璃垫块,使其同聚偏 1,1-二氟乙烯压电膜声阻抗基本匹配以减少激光冲击波的反射。

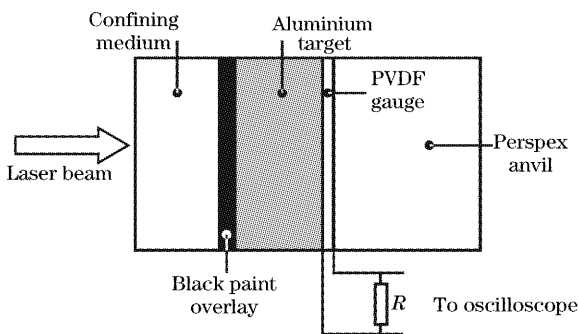


图 1 靶体结构图

Fig. 1 Configuration of target system

2.2 激光冲击波特性测量结果

使用聚偏 1,1-二氟乙烯压电传感器测得的电压信号 $V(t)$ 与冲击波压力 $P(t)$ 之间满足以下关系^[6,7]:

$$P(t) = \frac{K}{A} \int_0^t \frac{V(t)}{R} dt,$$

式中 t 为时间, R 为与聚偏 1,1-二氟乙烯压电传感器并联的电阻(25 Ω), A 为作用区面积, K 为动态定标系数 ($6.6 \times 10^8 \text{ Pa} \cdot \text{cm}^2 / \mu\text{s}$)。于是便可通过测量的冲击波电压波形得到冲击波压力波形(见图 2 所示)。

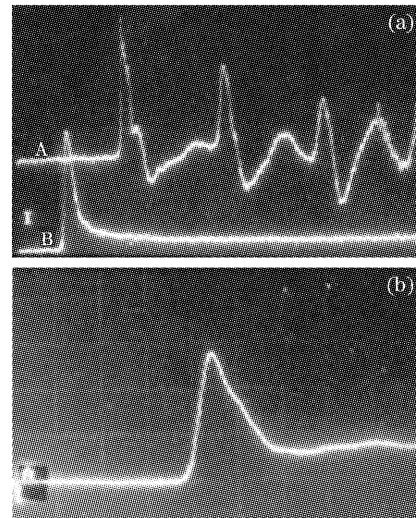


图 2 (a)激光脉冲(B通道)和压电脉冲(A通道)波形, (b)冲击波压力波形

Fig. 2 (a) Laser pulse (channel B) and piezoelectrical (channel A) wave form, (b) shock pressure wave form

压电波形中第二、三个脉冲为激光冲击波在铝靶前后表面多次反射在聚偏 1,1-二氟乙烯压电膜上产生的电压脉冲。由此波形可得冲击波在靶体中的传播速度,已知铝靶厚度为 d ,测量相邻两电压脉冲之间的时间间隔为 t_s ,可得到冲击波在铝中的传播速度 $v_s = 2d/t_s$,经计算得到冲击波在铝靶中的平均速度 v_s 为 $6.38 \times 10^3 \text{ m/s}$ 。

根据文献[8],可知激光冲击波压力峰值 P_{\max} 与激光脉冲功率密度 I_0 之间的关系为

$$P_{\max} \propto I_0^{3/4}.$$

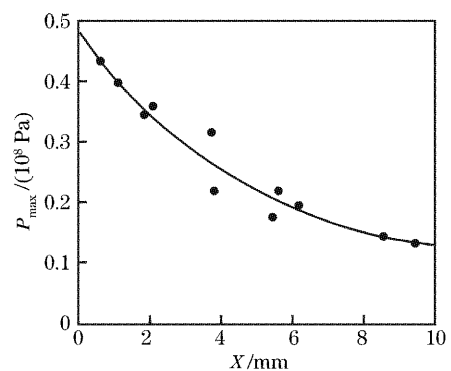


图 3 激光冲击波峰值 P_{\max} 随传播距离 X 的衰减曲线

Fig. 3 P_{\max} - X attenuation curve of the laser-induced shock wave

激光冲击波在铝靶中的衰减规律:

$$P_{\max} = 0.48\exp(-0.14X),$$

将不同激光脉冲能量下的激光冲击波峰压 P_{\max} 进行归一化处理,得到激光冲击波峰压在铝靶中随传播距离衰减的曲线见图 3 所示。从图中可以看出其衰减规律呈指数型,由此说明冲击波的衰减比较均匀,冲击波峰压的减小率与传播距离的增加成线性关系。

2.3 不同约束层材料的比较

在靶材表面加约束层能限制等离子体的膨胀。

表 1 不同材料约束层的冲击效果

Table 1 Shock effects of different confining medium

Confining medium	Acoustic impedance / [$10^6 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$]	Laser intensity / ($10^9 \text{ W}/\text{cm}^2$)	β	Experimental $P_{\max}/$ (10^9 Pa)	Standard $P_{\max}/$ (10^9 Pa)
PMMA	0.32	0.74	1.1	1.13	1.11
Silicon rubber	0.47	0.74	1.2	1.38	1.35
K9 glass	1.14	0.68	3.7	1.59	1.66
Quartz glass	1.31	0.76	2.8	1.72	1.66
Pb glass	1.54	0.90	3.1	2.28	1.93
H ₂ O	0.25	1.14	3.5	0.63	0.52

以上这些实验结果,对使用激光冲击强化航空铝合金结构材料所需表面处理工艺参量的选择提供了重要的依据。激光冲击在金属中产生强应力波,其峰压应大于金属的动态屈服强度,才会使金属发生塑性形变,形成冲击强化区。所以对于激光冲击强化航空铝合金结构材料,实验选择的激光冲击功率密度为 $P=(1.6\sim 2.0) \text{ GW}/\text{cm}^2$ 。对于约束层的选择是最好使其在冲击中不会完全破碎,而且应具有较大的声阻抗。从表 1 中可以看出,K9 玻璃的声阻抗较大,能产生较强的冲击波。因此选用 K9 玻璃作为约束层可得到较好的冲击效果。

3 航空铝合金结构材料的激光冲击强化实验研究

激光冲击强化特别适合于处理有应力集中的局部重点疲劳部件,如各种紧固孔、槽、圆角与焊缝等。对提高这些部件的疲劳寿命起着重要的作用。

3.1 实验装置及铝合金结构材料试件

实验用激光装置采用中国科技大学强激光技术研究所研制的钽玻璃激光冲击强化装置。装置的主要性能如下:

- 1) 激光脉冲宽度: $\leq 25 \text{ ns}$;
- 2) 激光束发散角: $\leq 1.7 \text{ mrad}$;
- 3) 激光输出稳定性:能量起伏 $\leq \pm 4\%$;功率起伏 $\leq \pm 5\%$;

并且能增大激光冲击波的峰压,增宽激光冲击波的脉宽。作用在靶上的冲击波脉宽与靶的冲击强化深度成线性关系,后者为改善材料疲劳寿命的关键参量。以 β 表示激光冲击波脉宽与激光脉冲宽度的比值。在约束层的作用下,冲击波的脉宽展宽为激光脉冲宽度的 1~4 倍。约束层材料声阻抗的大小也直接影响着激光冲击波的峰压值^[9],声阻抗越大,激光冲击波的峰压值就越大。不同约束层下激光冲击波作用靶体的实验结果比较见表 1 所示。

4) 激光脉冲能量: $\geq 25 \text{ J}$;

5) 激光峰值功率: $\geq 1 \times 10^9 \text{ W}$;整个实验系统由激光器、试件和夹具等组成。试件采用 7050-T7451(板材)双联航空铝合金材料试件(如图 4 所示,单位为 mm)。

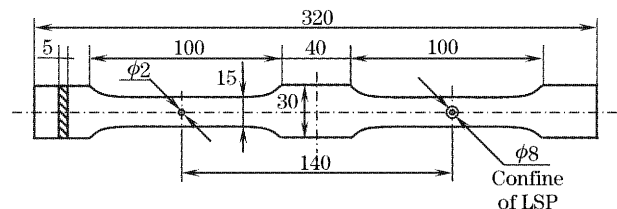


图 4 双联试件(7050-T7451)

Fig. 4 Two-gang testpiece (7050-T7451)

试件厚为 5 mm,疲劳小孔直径为 2 mm。试件上共有两个小孔,一个小孔进行激光冲击处理,另一个小孔不做处理用作对比研究。有效试件数为 9 件。

3.2 疲劳实验结果

疲劳实验在中国飞机强度研究所进行。对于 $\delta=5 \text{ mm}$ 的 T7451 试件进行双面、两次叠加激光冲击处理后,采用 Instron 1332 型材料实验机进行疲劳寿命的对比实验。在等幅谱下,不同加载水平与疲劳寿命($\sigma_m \sim N$)之间的实验结果关系见图 5 所示。

实验结果表明对 T7451 试件,当平均加载应力值 σ_m 在 106.6~67.3 MPa 之间变化时,经激光冲击处理后试件疲劳寿命平均值是未经冲击处理试件疲劳寿命的 175%~428%。

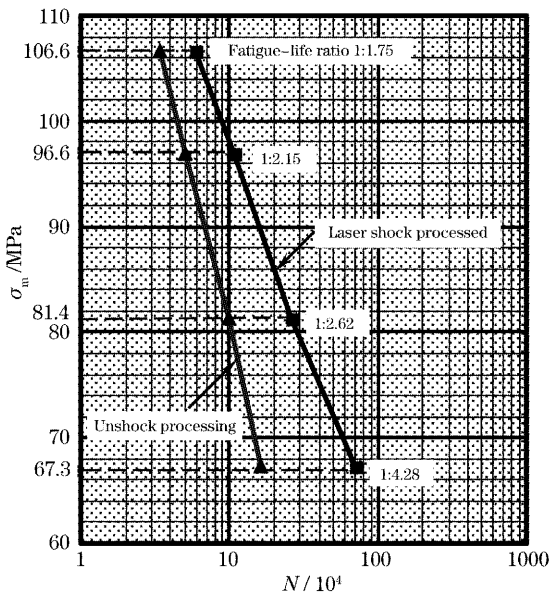


图 5 T7451 试件疲劳对比实验结果($\sigma_m \sim N$ 曲线)
Fig. 5 Results of fatigue contrast experiment on T7451 testpiece ($\sigma_m \sim N$)

4 铝合金材料经激光冲击强化后的结构分析

4.1 应力分析

表面残余应力状态对材料的疲劳抗力有显著影响,它在疲劳载荷中起着平均应力的等效作用。1992年,法国的 Grevery 等在真空腔中测量到冲击区存在表面残余拉应力^[10]。残余拉应力相当于正平均应力,它降低疲劳强度。而残余压应力相当于负平均应力,由它延缓疲劳裂纹的萌生,提高材料的疲劳强度^[3,11]。因此,冲击处理后由于压应力的存在,使材料的抗疲劳寿命得以延长。

实验将试件进行激光冲击强化处理后的残余压应力水平进行对比分析,使用美国 AST 公司的 X 射线应力分析仪(X-ray stress Analysis),采用平均取点法对冲击区进行了残余压应力的测量。经激光冲击处理后的 7050-T7451 航空铝合金试件冲击区的残余压应力和激光冲击处理参量的测量结果见表 2。

表 2 T7451 铝合金经激光冲击后的残余压应力

Table 2 Residual compressive stress induced by LSP on T7451

(Material: T7451, $\delta=5$ mm; Confine of LSP: $\phi 8$ mm; X-ray transmitter aperture: $\phi 3$ mm)

Mode of LSP	Serial number of facular	Confining medium (K9 glass) /mm	Pulse width of laser (FWHM) /ns	Laser intensity / (GW/cm ²)	Residual stress (obverse) /MPa	Residual stress (inverse) /MPa
Unshock Processing	Matrix 1	Nothing	Nothing	0	-8.9±0.0	0
Dihedron in twice	Obverse 1-1 Inverse 1-1F	$\phi 20 \times 12$	20	1.74~2.26	-226.9±56.4	-66.7±11.3

根据表中结果可以看出:7050-T7451 试件经激光冲击处理后,冲击区的残余压应力与未冲击区存在的残余压应力相比有了极大的提高。试件经两次叠加处理后比单次处理后的残余压应力提高了近一倍,两次叠加冲击处理极大提高了对材料的冲击效果。

从实验结果中还可以得到至关重要的一点是,试件经激光双面依次冲击处理后,其首先经激光冲击处理的一面(正面)存在的残余压应力远大于后经激光冲击处理面(反面)的残余压应力。双面依次冲击的效果主要体现在首先冲击的一面上,在另一面的冲击的处理对材料性能的提高贡献不大。

实验还对试件进行了单面两次叠加冲击处理,其冲击区的残余压应力与经相当功率密度激光双面依次进行两次叠加处理试件正面(首先冲击面)存在的残余压应力相当,单面冲击效果并不比双面冲击差。可见对单面进行叠加冲击处理既能有效地提高材料结构性能又比较适合实际应用。

4.2 位错密度分析

为了进一步研究激光冲击强化处理对材料性能改善的效果,对 7050-T7451 试件进行了表层结构分

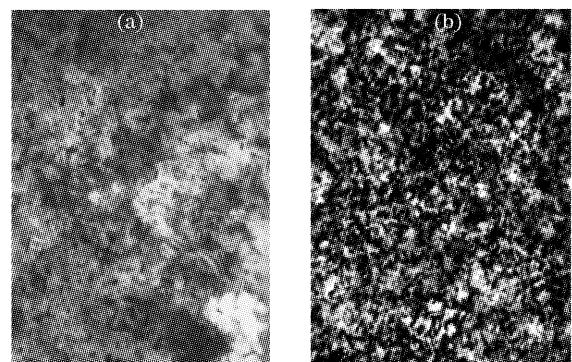


图 6 7050-T7451 铝合金激光冲击后的位错密度照片。

(a)未冲击,(b)激光冲击两次

Fig. 6 Dislocation density picture by LSP on 7050T7451.
(a) Unshock processing, (b) laser shock processing in twice

析。位错密度的测量采用透射式扫描电镜,在电镜放大倍率为 1:50000 的条件下的测量结果照片如图 6 所示。

测量结果表明:经激光冲击处理后的材料,在冲击区的位错密度比未经冲击处理区的位错密度有了大幅度的提高,并出现了缠结结构,若材料的屈服强度为 σ ,位错密度为 ρ ,根据文献[11]可知 $\sigma \propto \rho^{1/2}$,位错密度 ρ 的提高使材料的屈服强度提高,这必然导致材料抗疲劳寿命等性能的提高。由此可说明材料的激光冲击强化处理取得了较理想的效果。

5 结 论

利用激光冲击技术对 7050-T7451 航空铝合金试件进行强化处理,通过对处理后材料的疲劳寿命和残余压应力的测试,得到了一系列重要结论:

1) 经过激光冲击处理后,材料的位错密度及疲劳寿命得到显著的提高,疲劳寿命达到未经处理的 175%~428% 左右。

2) 经过激光冲击处理后,冲击强化区的残余压应力有了极大的提高,可达 -200 MPa 以上。

3) 经过两次叠加冲击处理比单次处理对材料的残余压应力水平有极为明显的提高,可达到一倍以上。

4) 双面依次冲击效果主要体现在先冲击的一面上,且单面冲击效果与双面(先冲击一面)冲击效果相当。

以上结论对激光冲击强化处理技术的深入研究和实际工程应用都具有极其重要的现实指导意义。

参 考 文 献

- 1 B. P. Fairand, A. H. Clauer. Laser generation of high-amplitude stress waves in materials[J]. *J. Appl. Phys.*, 1979, **50**(3): 1497~1502
- 2 P. Peyre, R. Fabbro. Laser shock processing: a review of the physics and applications[J]. *Optical and Quant. Electron.*, 1995, **27**(12): 1213~1229
- 3 Zhang Yongkang, Zhang Shuyi, Tang Yaxing *et al.*. Study of anti-fatigue fracture laser shock processing technology [J]. *Science in China (Series E)*, 1997, **27**(1): 28~34 (in Chinese)
张永康,张淑仪,唐亚新等. 抗疲劳断裂的激光冲击强化技术研究[J]. 中国科学(E辑), 1997, **27**(1): 28~34
- 4 Wang Shengbo, Fan Yong, Wu Hongxing *et al.*. Research of strengthening 7050 aerial aluminum alloy structural material with laser shock processing[J]. *Chin. J. Laser*, 2004, **31**(1): 125~128 (in Chinese)
王声波,范 勇,吴鸿兴等. 7050 航空铝合金结构材料激光冲击[J]. 中国激光, 2004, **31**(1): 125~128
- 5 Li Xinzeng, Tang Zhiping, Yu Jilin. Piezoelectricity gauge of insulation film and combined high polymer[P]. Chinese Patent, No. 92242887.5 (in Chinese)
李欣增,唐志平,虞吉林. 绝缘膜组合式高聚物压电传感器[P]. 中国专利,专利号:92242887.5
- 6 J. P. Romain, F. Bauer, D. Zagouri *et al.*. Measurements of laser induced shock pressures using PVDF gauges[C]. In S. C. Schmidt eds., *High-pressure Science and Technology-1993*, American Institute of Physics, 1994. 1915~1919
- 7 Wang Shengbo, Fanyong, Wu Hongxing *et al.*. Property of laser-induced shock wave with confinement [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(8): 981~984 (in Chinese)
王声波,范 勇,吴鸿兴等. 约束结构下激光冲击波特性实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2004, **16**(8): 981~984
- 8 Hong Xin, Wang Shengbo, Guo Dahao *et al.*. Study of the properties of the shock wave induced by high-power laser [J]. *Chin. J. Laser*, 1998, **A25**(8): 743~747 (in Chinese)
洪 昕,王声波,郭大浩等. 强激光驱动高压冲击波特性研究 [J]. 中国激光, 1998, **A25**(8): 743~747
- 9 R. Fabbro, J. Fournier, P. Ballard *et al.*. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry [J]. *J. Appl. Phys.*, 1990, **68**(2): 775~784
- 10 Grevey D, Maiffredy L, Vannes A B. Laser shock on a TRIP alloy: mechanical and metallurgical consequences [J]. *J. Materials Science*, 1992, **27**: 2110~2116
- 11 Guo Dahao, Wu Hongxing, Wang Shengbo *et al.*. Study of mechanism of strengthening materials with laser shock processing [J]. *Science in China (Series E)*, 1999, **29**(3): 222~226 (in Chinese)
郭大浩,吴鸿兴,王声波等. 激光冲击强化机理研究[J]. 中国科学(E辑), 1999, **29**(3): 222~226

1 B. P. Fairand, A. H. Clauer. Laser generation of high-amplitude stress waves in materials[J]. *J. Appl. Phys.*, 1979,