

文章编号: 1001-3806(2003)04-0273-03

航空铝合金材料激光冲击强化实验研究

范 勇 王声波 吴鸿兴 郭大浩 戴宇生 夏小平

(中国科技大学强激光技术研究所,合肥,230026)

摘要: 用自行研制的激光冲击强化处理装置对 7050 航空铝合金两种状态的材料 T7451, T7452 进行了冲击强化试验,对试件进行了表面压应力测试和结构分析,结果显示,试件表面具有较大的残余压应力,材料内部有较高的位错密度。并进行了疲劳强度测试,测试结果的 *S-N* 曲线表明,在中等的加载强度下,试件的疲劳强度提高到 2 倍以上。

关键词: 激光;冲击强化处理;铝合金;疲劳强度

中图分类号: TG156.99;TG142.41 **文献标识码:** A

Experimental research of laser shock processing on aerial aluminum alloy

Fan Yong, Wang Shengbo, Wu Hongxing, Guo Dahao, Dai Yusheng, Xia Xiaoping

(Institute of High Power Laser, University of Science and Technology of China, Hefei, 230026)

Abstract: After strengthening two states of 7050, one kind of aerial aluminum alloy, T7451 and T7452 with laser shock processing device developed by ourselves, the alloys' surface stress and structure are measured. Test results show that there is large residual compressive stress on the surface and internal dislocation density. However *S-N* curve in fatigue test shows that the fatigue strength is increased more than two times under the condition of moderate load strengthening.

Key words: laser; laser shock processing (LSP); aluminum alloy; fatigue strength

引 言

随着激光技术的发展,利用激光对材料进行改性处理从而提高,改善材料本身性能越来越受到重视^[1,2]。利用激光冲击波对航空材料进行强化处理就是其中很重要的一个研究领域。

激光冲击强化技术 (laser shock processing, LSP) 是一种新型的材料表面改性处理技术,它利用高功率脉冲激光与金属材料相互作用过程中产生的高压冲击应力波,使冲击后的材料具有残余压应力和高的位错密度,从而大大提高材料的表面硬度和抗疲劳寿命等性能^[3-5]。

利用激光冲击处理技术对航空铝合金材料进行了强化处理,将材料的抗疲劳寿命提高了 2 倍以上,表面残余压应力有明显提高并获得了显著的位错结构。研究还表明,利用激光叠加冲击处理能获得比单次冲击更为明显的效果。

1 激光冲击强化实验

实验所采用的是由笔者自行研制的激光冲击强化装置输出的激光束,其激光脉宽为 30ns,峰值功率为 GW 量级 (~1GW)。整个实验装置由激光系统、试件和夹具等组成。为了增强冲击强化的效果,在试件表面覆有黑色涂层和 K9 玻璃约束层^[6-8],然后进行激光冲击实验。

整个实验系统的光路构成如图 1 所示。

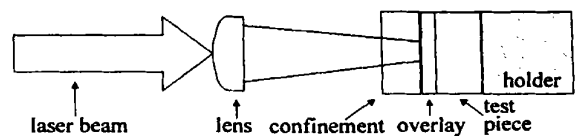


Fig. 1 The device structure view of laser shock processing experiment

为了有效测试激光冲击强化对航空铝合金材料性能的改善,采用了 7050 T7451 (板材)、7050 T7452 (锻件) 两种试件。试件采用双联形式 (如图 2 所示),其中,疲劳孔的孔径为 $\varnothing.5\text{mm}$ 。

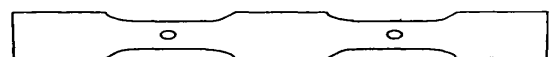


Fig. 2 Duplex test piece

作者简介:范 勇,男,1978 年 3 月出生。硕士研究生。主要研究方向是强激光系统及其应用。

收稿日期:2002-10-03;收到修改稿日期:2002-11-26

2 试件经激光冲击处理后残余压应力的研究

为更好研究激光冲击强化处理对航空铝合金材料性能的改善,对经过激光冲击强化处理后的两种

试件进行残余压应力的研究。残余压应力的测试采用美国的 AST X-ray stress Analysis 进行。

对经激光冲击处理后 7050 T7451, 7050 T7452 试件冲击区的残余压应力进行测试,激光冲击处理参数及测量结果分别由表 1 和表 2 给出。

Table 1 Experiment result of 7050 T7451 $r = 5\text{mm}$; size of LSP area: $\varnothing 8\text{mm}$; size of X-ray transmitting aperture: $\varnothing 8\text{mm}$

LSP	K9 glass confinement / mm	width of laser pulse FWHM/ ns	power density of laser/ (GW cm^{-2})	residual stress of front side/ MPa	residual stress of back side/ MPa
unprocessed				- 8.9 ± 0.0	
superposed processed on both sides	$\varnothing 20 \times 12$	~ 20	1.74 ~ 2.26	- 226.9 ± 56.4	- 66.7 ± 11.3

Table 2 Experiment result of 7050 T7452 $r = 5\text{mm}$; size of LSP area: $\varnothing 8\text{mm}$; size of X-ray transmitting aperture: $\varnothing 8\text{mm}$

LSP	K9 glass confinement / mm	width of laser pulse FWHM/ ns	power density of laser/ (GW cm^{-2})	residual stress of front side/ MPa	residual stress of back side/ MPa
unprocessed				- 6.5 ± 0.0	
processing on both sides	$\varnothing 20 \times 12$	~ 20	1.65 ~ 2.29	- 147.4 ± 21.6	
superposed processing on both sides	$\varnothing 20 \times 12$	~ 20	1.96 ~ 2.29	- 237.6 ± 30.5	79.5 ± 6.2
superposed processing on front side	$\varnothing 20 \times 12$	~ 20	2.17 ~ 2.22	- 235.8 ± 23.2	- 162.3 ± 32.2

以上的测量结果表明:(1) 7050 T7451, 7050 T7452 试件经激光冲击处理后,冲击区的残余压应力与未经冲击处理区存在的残余压应力相比,都有了极大的提高;(2) 经两次叠加冲击处理后,试件冲击区的残余压应力与单次冲击处理区的残余压应力相比,提高了近 1 倍;(3) 经激光双面冲击处理的试件,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的面(反面)的残余压应力;(4) 经激光单面、两次叠加冲击处理后试件正面(冲击面)冲击区的残余压应力,与经相当功率密度激光双面、两次叠加冲击处理试件正面(首先冲击面)存在的残余压应力相当。但叠加冲击处理与单次冲击处理相比,冲击区残余压应力有明显提高。

3 试件经激光冲击处理后结构分析研究

为进一步研究经过激光冲击强化处理后两种材料显微结构的改变,对 7050 T7451, 7050 T7452 进行了位错密度的测量研究。

位错密度的测量是采用透射式扫描电镜在 50000 倍放大下进行测量。结果由图 3、图 4 给出。

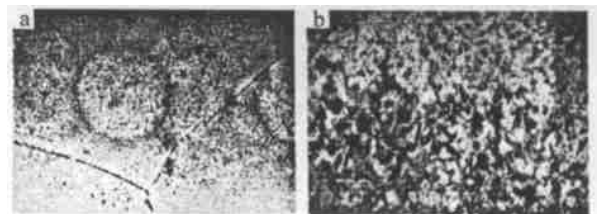


Fig. 3 Experiment result of 7050 T7451
a—T7451 parent material b—T7451 processed by superposed LSP

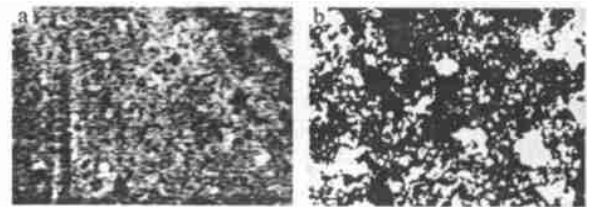


Fig. 4 Experiment result of 7050 T7452
a—T7452 parent material b—T7452 processed by superposed LSP

测量结果表明:7050 T7451, 7050 T7452 两种试件经激光冲击处理后,冲击区的位错密度与未经冲击处理区的位错密度相比,都有了极为显著的提高。说明激光冲击强化取得了较为理想的效果。

4 航空铝合金材料抗疲劳实验结果

采用如上激光冲击强化系统对两种试件进行了不同应力条件下的激光冲击强化处理,并对其冲击强化效果进行测试、分析结果如下。

4.1 7050T7451 试件

7050 T7451 试件是航空铝合金板材试件,加工成如图 2 所示的双联形式,厚度为 5mm,用前述激光系统以 $P = (1.6 \sim 2.0) \text{ GW/cm}^2$ 的激光冲击功率密度对其进行双面、各两次叠加冲击处理。对疲劳强度的测试用 Instron 1332 型材料试验机,在等幅谱条件下,对加载水平与疲劳寿命之间的关系 ($\sigma_m - N$) 进行试验研究,不同加载水平下等幅拉-拉疲劳试验结果由表 3 给出 (σ_m 为平均应力)。

Table 3 Pull-pull experiment result of 7050T7451 under the condition of constant equation stress

σ_m / MPa	106.6	96.6	81.4	67.3
fatigue life of unprocessed area $N_u / \text{circle numbers}$	33533	49867	101210	16370
fatigue life of processed area $N_p / \text{circle numbers}$	58567	107267	264950	> 699900
N_p / N_u	1.75	2.15	3.22	> 4.35

为有效表现激光冲击强化对材料疲劳寿命的改善,采用 $S-N$ 曲线(应力-寿命曲线),它反映了疲劳应力水平与寿命之间的对应关系,是估算结构件疲劳寿命的基本数据。 $S-N$ 曲线在双对数坐标系里近似为一条直线(N 在 $10^4 \sim 10^6$ 循环次数范围内),其数学表达式为: $\lg N = A + B \lg S$, 式中, A 和 B 都是数据拟合系数,由最小二乘法拟合得到。 $S-N$ 曲线是判断“无损伤”载荷的依据,也是等损伤折算的数据依据。

试验结果表明,对 7050 T7451 试件,当平均加载应力值 σ_m 在 106.6MPa 到 67.3MPa 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% ~ 435%。

4.2 7050T7452 试件

7050 T7452 试件是航空铝合金锻件试件,加工成如图 2 所示的双联形式,厚度为 5mm,用前述激光冲击强化处理系统以 $P = (1.8 \sim 2.0) \text{ GW/cm}^2$ 的激光冲击功率密度对其进行双面、各两次叠加冲击处理。在等幅谱条件下,对加载水平与疲劳寿命之间的关系 ($\sigma_m - N$) 进行试验研究,不同加载水平下等幅拉-拉疲劳试验结果由表 4 给出 (σ_m 为平均应力)。

Table 4 Experiment result of 7050T7452 under the condition of constant amplitude

σ_m / MPa	96.9	81.4
fatigue life of unprocessed area $N_u / \text{circle numbers}$	40600	86400
fatigue life of processed area $N_p / \text{circle numbers}$	113500	447800
N_p / N_u	2.80	5.18

试验结果表明,对于 7050 T7452 试件,当平均加载应力值 σ_m 在 96.9MPa 到 81.4MPa 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 280% ~ 518%。

5 结 论

利用激光冲击处理技术对 7050 T7451, 7050 T7452 两种状态的航空铝合金材料进行强化处理,在 GW 级脉冲功率,30ns 脉宽的激光冲击处理后,通过对处理后材料的残余压应力测试,可知冲击强化区的残余压应力有较大提高,同时,经过叠加处理的材料比单次处理有更为明显的提高。试验还表明,通过激光冲击强化处理,可以极为显著地提高冲击区的位错密度,说明冲击强化的效果较为理想。而作为这些因素的综合作用,在中等负载强度的等幅谱拉-拉疲劳试验条件下,材料的抗疲劳寿命提高到 2 倍以上。

综上所述,利用激光冲击强化处理技术可以非常明显地增加航空铝合金材料的位错密度,并使试件表面获得较大的残余压应力,从而显著提高材料的抗疲劳寿命等性能。这充分说明,激光冲击强化处理技术具有很好的研究和应用前景。

参 考 文 献

- [1] Peyre P, Fabbro R. Opt & Quantum Electron, 1995, 27: 1213 ~ 1229.
- [2] 郭大浩, 吴鸿兴, 王声波 *et al.* 中国科学 E 辑, 1999, 29(6): 222 ~ 226.
- [3] Fairand B P, Clauer A H, J A P, 1979, 50(3): 1497 ~ 1502.
- [4] 张永康, 张淑仪, 唐亚新 *et al.* 中国科学 E 辑, 1997, 27(1): 28 ~ 34.
- [5] 刘 锁. 金属材料的疲劳性能与喷丸强化工艺. 北京: 国防工业出版社, 1977.
- [6] 段志勇, 王声波, 吴鸿兴 *et al.* 激光杂志, 2000, 21(2): 30 ~ 34.
- [7] 李志勇, 朱文辉, 周光泉 *et al.* 中国激光, 1997, A24(2): 118 ~ 122.
- [8] 周建忠, 周 明, 肖爱民 *et al.* 应用激光, 2002, 22(1): 7 ~ 9.