

激光冲击抗金属疲劳断裂的激光 参数优化试验研究*

蔡 兰

(江苏理工大学, 镇江 212013)

张永康

(南京大学声学所, 南京 210093)

摘要 描述了激光冲击参数对 2024-T62 铝合金疲劳寿命的影响。当激光脉宽为 50 ns 时, 试件表面产生有害的热损伤, 疲劳寿命无显著性差别。当激光脉宽为 13 ns 时, 试件表面未产生足够的塑性变形, 疲劳寿命提高幅度不大。当激光脉宽为 30 ns 时, 试件表面形成微凹致密的光亮冲击区, 疲劳寿命获得大幅度提高, 在 95% 的置信度下, 激光冲击试件的中值疲劳寿命是未冲击试件的 4.2~8.1 倍。

关键词 激光冲击处理, 疲劳寿命, 激光参数

1 引 言

激光冲击是利用高功率密度短脉冲激光辐照金属表面所产生的强应力波来改善材料的抗疲劳断裂性能, 即利用激光与物质相互作用所产生的力学效应。1992 年, 法国 Banas^[1] 用激光冲击强化 18Ni 高镍合金钢, 使试件的疲劳寿命提高了 17%。1993 年, 法国 Peyre 等人^[2] 用激光冲击来改善铸铝 ASTG03 及 ASI2UNG 的抗弯曲疲劳性能, ASTG03T6 经激光冲击处理后的弯曲疲劳寿命提高了 40%。由于激光冲击处理工艺涉及激光参数、涂层及约束层等具体工艺细节, 但对疲劳寿命影响最大的是激光参数。因此, 必须在确定的涂层及约束层条件下, 进行激光参数优化试验, 获得可供工程应用的最佳的激光冲击条件。

2 优化试验 I

2.1 试件材料及其处理

试件材料为 2024-T62 航空铝合金, 其化学成分及机械性能见本期第 1113 页的表 1。采用双联“狗骨型”典型紧固孔疲劳试件, 其尺寸见本期第 1113 页的图 1。涂层采用黑色涂料, 约束层为 $\phi 20 \times 4.5 \text{ mm}^2$ 的 K9 光学玻璃。其中一个孔作双面激光冲击强化, 另一个孔未作冲击, 以作对比试验。试件经激光冲击后, 以冲击区的 $\phi 1 \text{ mm}$ 中心孔为基准在 Hauser OP₂ 精密座标镗床上精镗出 $\phi 2 \text{ mm}$ 的孔, 孔内壁表面粗糙度小于 $0.1 \mu\text{m}$ 。经激光冲击处理的试件, 在

* 机械工业部教育司科技基金资助项目(96250913)。

收稿日期: 1996 年 4 月 17 日; 收到修改稿日期: 1996 年 6 月 6 日

INSTRON1341 疲劳试验机上进行低频常幅拉伸疲劳试验,最大载荷为 4.2 kN, 应力比 $R = 0.1$, 精度为 $\pm 0.5\%$, 试验频率为 13 Hz。

2.2 激光装置

采用染料调 Q 一级放大的钕玻璃激光装置, 激光波长为 $1.06 \mu\text{m}$, 谐振腔长为 1200 mm, 钕玻璃棒为 $\phi 20 \times 520 \text{ mm}$, 有效长度为 450 mm。用 PT-1G 能量计进行在线能量监测, 用贮存示波器定时检测激光波形及脉宽。结果表明, 调 Q 后激光的脉冲宽度稳定性较好, 能稳定在 50 ns 水平, 但单脉冲能量变化幅度较大。

2.3 激光冲击参数的选择及疲劳试验结果

激光冲击在金属中产生强应力波, 当其峰压大于金属的动态屈服强度时, 才能使金属发生塑性变形, 形成冲击强化区。因此, 在选择激光冲击参数时必须考虑到这一点。本次试验所选择的激光参数见表 1, 峰压估算值约 1.1~2.2 GPa, 大于 2024-T62 的动态屈服强度 (0.53 GPa), 能产生塑性变形。本次共冲击 5 根试件, 疲劳试验结果见表 1。

Table 1 Laser shock-processing parameters and fatigue test results for experiment I

Specimen No	Laser shocking parameters				Fatigue test results			
	Energy (J)		Duration (ns)	Power density (GW/cm ²)		Unshocked specimen (cycles)	Laser-shocked (cycles)	Increase (%)
I-1	18.3	17	50	1.3	1.2	94210	104840	11.3
I-2	25.4	17	50	1.8	1.2	88610	144540	64
I-3	13	7.6	50	1.2	0.92	71030	79360	11.7
I-4	18.2	13.2	50	1.3	0.94	106750	158660	48.6
I-5	16.7	18.2	50	1.2	1.3	53220	184820	247.3

3 优化试验 II

本次试验所采用的试件材料, 疲劳试件尺寸、涂层、约束层及疲劳试验条件均与试验 I 相同, 但采用的激光脉冲能量、脉冲宽度及激光装置与试验 I 不同。

以 $\phi 6 \times 80 \text{ mm}$ 的 YAG 作谐振腔激光棒, 一级前放大, 一级主放。选用电光调 Q 方式。采用的激光参数及激光冲击试件的疲劳试验结果见表 2。

Table 2 Laser shock-processing parameters and fatigue test results for experiment II

Specimen No	Laser shocking parameters				Fatigue test results			
	Energy (J)		Duration (ns)	Power density (GW/cm ²)		Unshocked specimen (cycles)	Laser-shocked (cycles)	Increase (%)
I-1	10.8	8.8	13	1.05	0.86	77570	83250	7.3
I-2	8.1	8	13	0.8	0.78	46850	100720	115.0
I-3	9	8	13	0.88	0.78	72560	131560	81.3
I-4	9.5	8.5	13	0.93	0.85	73640	145260	97.3
I-5	10.1	9.1	13	0.98	0.89	68190	115770	69.8
I-6	10.5	10.2	13	1.02	0.99	70850	126510	78.6

4 优化试验 III

试验 III 所用试件材料、试件尺寸、涂层、约束层、冲击方式及疲劳试验条件等均与前二次试

验相同。但是,激光装置不同。钕玻璃激光装置的整个光路系统,由前置放大、三倍放大和后置放大组成,采用KD*P(磷酸二氘钾)晶体为调制晶体。激光波长为 $1.06\ \mu\text{m}$,脉冲宽度为 $30\ \text{ns}$ 。用贮存示波器对激光波形进行定时监测,用PT-1G型能量计进行在线能量控制。若发现能量波动太大,或出现异常情况,则检查光路系统,调整各级氙灯电压。

采用的激光冲击参数见表3,作用在试件表面的应力波峰压估算值约 $1.2\sim 2.2\ \text{GPa}$ 。共冲击处理9根试件,其疲劳试验结果见表3。

Table 3 Laser shock-processing parameters and fatigue test results for experiment III

Specimen No	Laser shocking parameters				Fatigue test results			
	Energy (J)		Duration (ns)	Power density (GW/cm^2)		Unshocked specimen (cycles)	Laser-shocked (cycles)	Increase (%)
III-1	14.1	15.1	30	1.2	1.3	96580	356930	269.6
III-2	18.1	16.7	30	1.6	1.5	77710	755870	872.7
III-3	16.4	19.0	30	1.4	1.7	73850	297750	303.2
III-4	16.9	16.0	30	1.5	1.4	88630	719640	711.9
III-5	16.4	16.4	30	1.4	1.4	73700	567610	670.2
III-6	17.4	17.0	30	1.5	1.5	98000	414270	322.7
III-7	20.2	8.1	30	1.8	0.7	81480	259360	218.3
III-8	14.0	18.1	30	1.2	1.6	107320	799840	645.3
III-9	19.7	19.3	30	1.7	1.7	96440	823210	754.6

5 试验结果分析

5.1 疲劳试验结果分析

试验 I 中的 5 根试件经激光冲击后,疲劳寿命平均提高 76%。但是,数据分散性大,I-1 与 I-3 两根试件仅提高 11%左右,效果不明显,而 I-5 却提高 2 倍多。当置信度为 95%时,试件经激光冲击处理后的疲劳寿命提高值是一 $0.11\sim 2.11$ 倍,置信区间跨零,说明无显著性差别,可靠性差。可见,试验 I 所采用的激光参数、工艺方案及激光装置有待进一步改进。

试验 II 中的 6 根试件经激光冲击后,疲劳寿命平均提高 75%,在 95%置信度下,激光冲击试件的中值疲劳寿命是激光未冲击试件中值疲劳寿命的 $1.5\sim 2.0$ 倍,数据分散性小,具有良好的可重复性与可靠性。但是,疲劳寿命提高幅度不大。

试验 III 中的 9 根试件经激光冲击后,疲劳寿命平均提高 555%,在 95%置信度下,激光冲击试件的中值疲劳寿命是未冲击试件中值疲劳寿命的 $4.2\sim 8.1$ 倍,数据分散小,可靠性高,具备了在实际生产中推广应用的价值。

5.2 激光冲击参数分析

试验 I 采用的激光参数:脉宽为 $50\ \text{ns}$,能量为 $7.6\sim 25.4\ \text{J}$ 。由于激光持续时间长,气化层深度达 $20\ \mu\text{m}$,不仅使得较薄的涂层全部气化掉,而且还气化掉部分铝,使试件表面变粗糙,造成了有害的热损伤。

试验 II 采用的激光参数:脉宽为 $13\ \text{ns}$,能量为 $8\sim 10.5\ \text{J}$,每面冲击的平均能量为 $9.2\ \text{J}$ 。由于脉宽短,气化层厚度仅为 $4\ \mu\text{m}$ 左右,仅仅是气化掉部分涂层。但是,由于作用时间太短,形成的应力波波形太窄,应力波衰减较快,作用在试件表面的有效压力小,塑性变形小,故效果比试验 III 差。

试验 III 采用的激光参数:脉宽为 $30\ \text{ns}$,能量为 $8.1\sim 19.3\ \text{J}$ 。平均每面冲击能量为 $16.6\ \text{J}$ 。

气化层厚度约 6~14 μm 。由于采用了较理想的涂层及合适的脉宽,有效地保护了试件表面,且产生了明显的塑性变形,从而显著地改善了材料的抗疲劳断裂性能。

6 结 论

激光冲击处理不能选择太长的激光脉冲宽度(FWHM),单脉冲的能量也不宜太大,否则会使激光冲击区的表面质量严重下降,造成有害的烧蚀等热损伤现象。但是,若选用的激光冲击脉冲宽度及能量太小,则产生的应力波持续时间太短,衰减过快,就不能形成有效的激光冲击强化区,强化效果较差。用脉冲宽度为 30 ns,能量为 16 J 左右的钽玻璃激光装置对 2024-T62 铝合金进行激光冲击强化处理(黑色涂料作涂层,K9 光学玻璃作约束层),获得了非常好的激光冲击强化效果,在 95% 的置信度下,激光冲击试件的中值疲劳寿命是未冲击试件中值疲劳寿命的 4.2~8.1 倍。

参 考 文 献

- 1 Banas G., Elsayed-Ali H. E. . Laser shock Induced Mechanical and Microstructural Modification of Welded Marging Steel. *J. Appl. Phys.*, 1990, 67(5): 2380~2384
- 2 Peyre P., Merrien P., Lieurade H. P. et al. . Renforcement D' alliages D' aluminium Moule's Par Ondes de cloclaser. *Materiaux & Techniques*, 1993, 6~7: 7~12

Study of Laser Parameters Optimum of Laser Shocking Against Fatigue and Fracture of Metal

Cai Lan

(*Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212013*)

Zhang Yongkang

(*Institute of Acoustics and Lab of Modern Acoustics, Nanjing University, Nanjing 210093*)

Abstract The influence of laser shock-processing (LSP) parameters on the fatigue life of aluminum alloy 2024-T62 is described. If the duration of a laser is 50 ns, there is a heat damage on the LSP area of the specimen surface, and there is no improvemet on the fatigue life of metal. If the duration is 13 ns, there is no apparent plastic deformation, and there is a little improvement on the fatigue life. If the duration is 30 ns, on the surface of the specimen there is a densified hollow LSP area that is very shiny, and the fatigue life is increased greatly. With 95% confidence, the fatigue life of LSP specimen is 4.2~8.1 times larger than the unprocessed specimen

Key words Laser shock-processing (LSP), fatigue life, laser parameter