

抗疲劳断裂的激光冲击强化技术研究

张永康 张淑仪

(南京大学声学研究所, 南京 210093)

唐亚新 张 宏 余承业

(南京航空航天大学机械工程系, 南京 210016)

吴鸿兴 郭大浩 王声波 夏小平 陈明松 戴宇生

(中国科学技术大学物理系, 合肥 230026)

摘要 描述了激光冲击产生强应力波的机制, 并用 PVDF 压电传感器对应力波进

关键词 激光冲击 钽玻璃激光装置 疲劳寿命 铝合金 应力波

高功率脉冲激光与金属材料相互作用所产生的高幅值应力波能用来改善金属材料的机械性能, 特别是能有效地改善金属材料的抗疲劳断裂性能. William 采用大型调 Q 钽玻璃激光装置对 7075T6 铝合金进行激光冲击强化处理, 拉-拉疲劳寿命提高近 2 倍^[1]. Clauer 等用 CEG VD-640 大型钽玻璃激光装置(6 级放大)进行激光冲击研究, 2024T3 等航空铝合金的抗疲劳裂性能获得较大改善^[2]. Vaccari 报道, 激光冲击能处理碳钢、合金钢、不锈钢、可锻铸铁、球墨铸铁、铝合金、镍基高温合金及粉末冶金等材料; 2024T3 经激光冲击强化后拉-拉疲劳寿命平均提高 4 倍; 并认为在提高金属材料疲劳寿命方面激光冲击能取代喷丸处理; WLT (Wagner Laser Technologies)正打算在美国俄亥俄州 Columbus 建造第 1 个激光冲击处理车间^[3]. 近年来, 法国等国家纷纷开展激光冲击强化技术的应用研究^[4~8].

1 激光冲击强化机制及应力波的测量

激光冲击(Laser shock-processing, LSP)是利用高功率密度(GW/cm^2 级)短脉冲(几十 ns)强激光冲击金属表面, 使金属表面部分涂层气化、电离, 形成向金属内部传播的强压缩应力波(也有学者称之为冲击波), 金属材料表层产生塑性变形, 形成强化区, 从而改善了金属材料的机械性能. 为了提高对激光能量的吸收并保护金属材料表面不受到热损伤, 需在工件待冲击表面涂一层不透光的材料, 即涂层. 然后再覆盖一层透明材料, 即约束层.

激光冲击强化处理是利用强脉冲激光与物质相互作用所产生的应力波来改善材料的性

能,即激光-力学效应,从而避免了有害的热影响区的产生.当应力波峰值大于金属材料的动态屈服强度时,金属发生塑性变形.因而,激光冲击诱导的应力波是材料强化的能量源,应力波的测量十分重要,它能够用来判别所选择的激光冲击参数是否恰当并能提供其它有用信息.

用 $50\ \mu\text{m}$ 厚的 PVDF 压电薄膜制成压电传感器.并用该传感器对 $50\ \text{ns}$ 脉冲宽度的激光所诱导的应力波进行了测量,测压原理见图 1. PVDF 压电传感器的两个电极均为 $0.1\ \text{mm}$ 厚的铝箔,电极两端接电阻 R ,并从电阻两端引出电压信号到示波器 PM3320A($250\ \text{MHz}$, 4 个 RAM, 双通道).由于单位面积上产生的电荷量与作用力大小成正比,故对记录到的电压波形进行积分转换就可得到厚 $0.1\ \text{mm}$ 铝箔背面的应力波波形.图 2 就是得到的脉冲激光(功率密度为 $5.7 \times 10^{12}\ \text{W}/\text{m}^2$, $\lambda = 1.06\ \mu\text{m}$, $\tau = 50\ \text{ns}$)冲击铝箔表面所产生的应力波波形,从图中可知,测得的应力波峰值为 $0.3\ \text{GPa}$,根据声阻抗匹配原理可推算得从铝箔表面传播至 $0.1\ \text{mm}$ 深处时应力波峰值 $0.8\ \text{GPa}$.

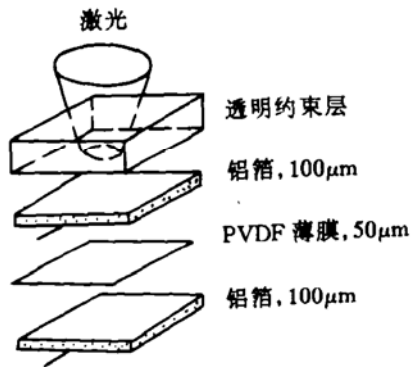


图1 PVDF传感结构及测压原理

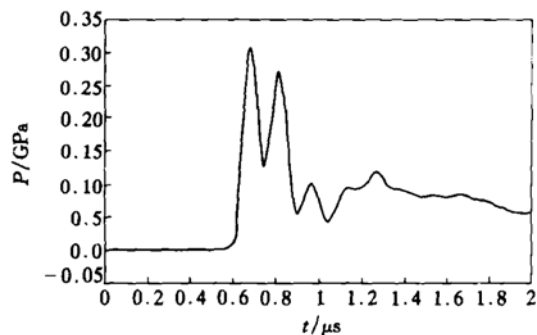


图2 激光功率密度 $I_0 = 5.7 \times 10^{12}\ \text{W}/\text{m}^2$ 时测得的应力波波形

2 激光冲击处理效果的直观检验及控制

金属材料在应力波高压作用下发生塑性变形而形成冲击强化区,其表面宏观特征为表面产生较大的残余压应力和较高的表面硬度,其内层显微特征为密集的位错及细化的晶粒.这几个因素共同作用使金属材料的疲劳寿命获得大幅度的提高,并可通过冲击区的表面粗糙度和微凹坑的大小及形状反映出来.表面粗糙度越低,则冲击效果越好;凹坑的大小、深浅(仅几个 μm 的微小变形量,可通过光线的反射观察到)及形状反应了位错密度、表面硬度及残余应力的大小及其分布情况.因此,可通过观察冲击区的表面粗糙及凹坑来判断冲击处理的效果.

经过对以往大量的试件进行分析及分类,将试件激光冲击区的表面质量分为 A, B, C, D 4 个等级,并建立了相应的实物样本. A 级真实地反映出激光冲击对疲劳寿命的贡献,表面特征:光斑均匀,冲击区表面粗糙度小于或等于未冲击区表面粗糙度,形成一个十分致密的微凹的光亮圈. B 级较大程度上反映了激光冲击对疲劳寿命的贡献,但有一部分疲劳寿命增益用于补偿表面质量下降所造成的疲劳寿命损失.表面特征:气化厚度均匀,有极少量气化斑点. C 级已不能反映出激光冲击对材料疲劳寿命的贡献,疲劳寿命增益与表面质量下降所造成的

损失几乎相等. 表面特征: 离散点状、蜂窝状气化, 气化区不均匀, 严重斑块状, 出现以孔为中心向外呈射线状沟槽. D 级已完全不能反映激光冲击对材料疲劳寿命的贡献, 疲劳寿命的增益已不足以补偿表面质量下降所造成的损失, 材料的疲劳寿命增益降为负. 表面特征: 气化强烈, 发生熔化, 晶粒粗大, 冲击区形成烧蚀坑, 表面粗糙, 有射线状沟槽. 实物样本照片见图 3. A 级避免了激光冲击产生的有害热损伤, 而 B 级, C 级及 D 级均存在不同程度的热损伤.

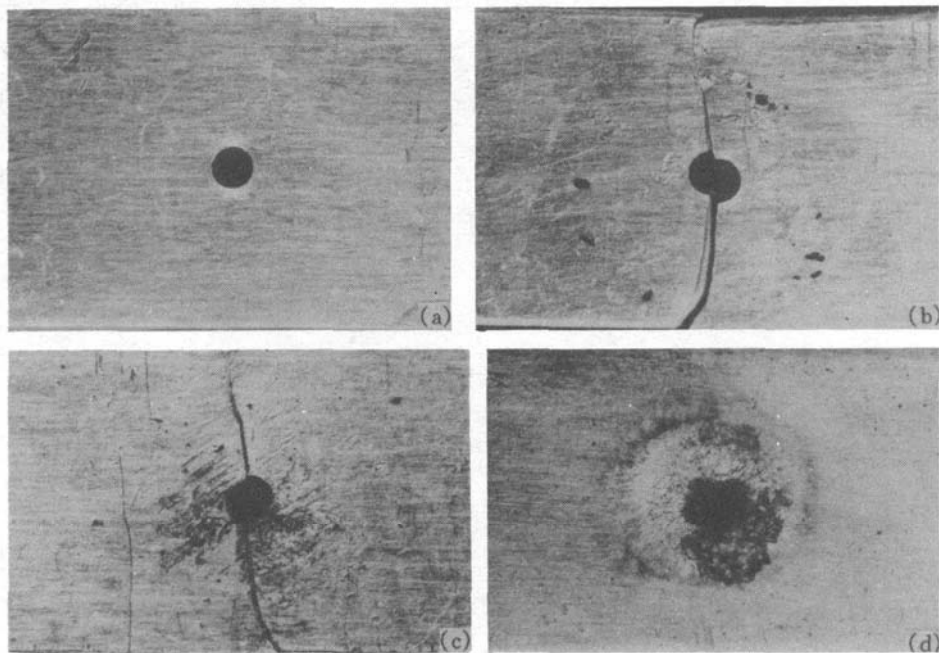


图 3 A, B, C, D 实物样本照片

(a) A 级, (b) B 级, (c) C 级, (d) D 级

在实际操作中, 首先通过加厚涂层的厚度及初选较小的激光参数进行冲击试验, 这样就绝对避免了出现 B, C, D 级的表面质量, 然后通过逐步调整激光参数及涂层厚度等工艺细节, 将激光冲击区的表面质量严格控制在 A 级, 即: 光斑均匀, 冲击区表面粗糙度小于或等于未冲击区表面粗糙度, 形成一个十分致密的微凹的光亮圈. 试验证明, 这种直观检验及控制方法十分实用有效, 易于推广, 解决了激光冲击强化技术工程应用的技术关键, 确保了激光冲击后的所有试件的疲劳寿命均获得较大幅度的提高.

3 激光冲击抗疲劳断裂对比试验

3.1 试件

采用图 4 所示的“狗骨型”双细节串联无传递载荷型疲劳试件作对比试验, 材料为 2024T62 铝合金, 试件的处理段和未处理段在精密坐标镗床 Hauser OP₂ 上各精镗出一个 $\varnothing 2$ mm 试验孔, 走刀量, 精镗次数均一致, 孔内壁粗糙度小于 0.1, 确保所有孔的一致性. 黑色涂料作涂层, K9 光学玻璃作约束层.

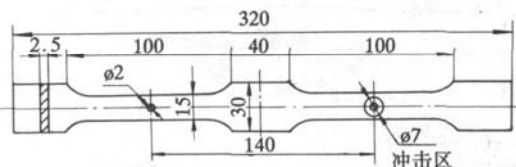


图 4 2024T62 铝合金双联疲劳试件

单位为 mm

3.2 小型激光冲击装置及参数选择

本次试验采用三级放大的调 Q 钕玻璃激光装置(波长 1.06 μm)即前置放大、三倍放大和后置放大. 采用 KD*P(磷酸二氘钾)为调制晶体, 激光脉宽为 30 ns, 用 7 834 Tek 贮存示波器(最小分辨率 1ns)对激光波形进行定时监测. 用取样板截取 8% 的能量至能量计 PT-1G 的探头, 实现能量在线控制.

本次试验共冲击 11 根试件, 试件表面依次各冲击 1 次. 若经检验, 冲击处的表面质量没有达到 A 级, 则涂上涂层后再重新冲击 1 次. 所采用的激光冲击处理参数见表 1, 产生应力波的峰压估算值约 1.2~2.2 GPa, 已大于 2024T62 的动态屈服强度(0.53 GPa), 故能形成不同程度的强化区.

表 1 2024T62 激光冲击强化参数

试件号	能量/J	脉宽/ns	光斑直径/mm	功率密度/GW·cm ⁻²	峰压估算/GPa	表面质量
1	14.1	30	7	1.22	1.75	A
	15.1	30	7	1.31	1.84	A
2 ^{a)}	18.07	30	7	1.57	2.08	A
	16.72	30	7	1.45	1.97	A
3	16.44	30	7	1.42	1.94	A
	19.03	30	7	1.65	2.15	A
4	16.85	30	7	1.46	1.98	A
	16.04	30	7	1.39	1.91	A
5	16.31	30	7	1.41	1.93	A
	15.63	30	7	1.35	1.88	A
6	16.44	30	7	1.42	1.94	A
	16.44	30	7	1.42	1.94	A
7	17.4	30	7	1.51	2.02	A
	16.99	30	7	1.47	1.99	A
8	18.35	30	7	1.59	2.09	A
	19.16	30	7	1.66	2.15	A
9 ^{b)}	20.2	30	7	1.75	2.23	A
	8.1	30	7	0.70	1.21	A
10 ^{c)}	14	30	7	1.21	1.74	A
	18.1	30	7	1.57	2.08	A
11	19.71	30	7	1.71	2.20	A
	19.30	30	7	1.67	2.16	A

a) 第 2 号试件在第 1 次冲击后(18.75 J, 18.07 J), 经检验没有达到 A 级, 第 2 次冲击后达到 A 级

b) 第 9 号试件第 2 面冲击 2 次, 第 1 次能量为 7.98 J, 第 2 次能量为 8.1 J

c) 第 10 号试件冲击区应力敏感方向有明显的机械划伤

3.3 疲劳试验

在 INSTRON1341 疲劳试验机上进行了低频拉-拉型疲劳试验, 最大载荷 4.2 kN, 最小载荷 0.42 kN, 应力比 0.1, 整个过程始终保持应力不变, 精度 ±0.5%, 试验频率 13 Hz. 疲劳试验结果见表 2. 其中 5 号试件的激光冲击强化孔没有出现可见裂纹, 而是在试件的圆角处断裂, 但仍以 523 080 作为冲击段的疲劳寿命.

经激光冲击处理后, 2024T62 的疲劳寿命提高 2.18~23.71 倍, 平均提高 6.9 倍. 经过成对对比数据处理后, 可得在 95% 置信度下, 激光冲击试件的中值疲劳寿命是未处理试件中值疲劳寿命的 4.5~9.8 倍.

表 2 2024T62 疲劳试验结果

试件号	最大载荷/kN	最小载荷/kN	应力比 R	试验频率/Hz	未强化段循环数 N_{a1}	强化段循环数 N_{b1}	提高差数 X_1	增益/%
1	4.2	0.42	0.1	13	96 580	356 930	260 350	269.6
2	4.2	0.42	0.1	13	77 710	755 870	678 160	872.7
3	4.2	0.42	0.1	13	73 850	297 750	223 900	303.2
4	4.2	0.42	0.1	13	88 630	719 640	631 010	711.9
5	4.2	0.42	0.1	13	93 580	>523 080	>429 500	>459
6	4.2	0.42	0.1	13	73 700	567 610	483 910	670.2
7	4.2	0.42	0.1	13	98 000	414 270	316 270	322.7
8	4.2	0.42	0.1	13	95 340	2 355 900	2 260 560	2 371
9	4.2	0.42	0.1	13	81 480	259 360	177 880	218.3
10	4.2	0.42	0.1	13	107 320	799 840	692 520	645.3
11	4.2	0.42	0.1	13	96 440	823 210	726 770	753.6
平均								690.8

4 试验结果分析

(1) 大幅度地提高了 2024T62 铝合金的疲劳寿命. 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 4.5~9.8 倍.

(2) 修复性好. 2 号与 9 号试件在第 1 次激光冲击后, 经直观检验, 冲击区的表面质量没有达到 A 级. 重新调整工艺参数, 涂上涂层后, 再进行第 2 次冲击, 达到 A 级. 这说明本实验所采用的激光冲击工艺方案不会损坏工件, 具有良好的修复性.

(3) 硬度提高. 激光冲击处理 2024T62 铝合金的显微硬度分布见图 5, 激光冲击参数: 27.5 J, 30 ns, $\phi 10$ mm, 1.12 GW/cm^2 . 黑色涂料作涂层, $\phi 20 \text{ mm} \times 4.5 \text{ mm}$ 的 K9 光学玻璃作约束层. 应力波峰压估算值约 1.8 GPa. 用 71 型显微硬度计测量显微硬度, 负荷 50 g, 保压 15 s. 在试件表面抛光后测量. 基体的显微硬度 72~93 HV, 冲击区硬度 98~137 HV. 由于激光能量分布不均性等因素, 造成冲击区显微硬度的不均匀. 总体而言, 冲击区中心的显微硬度高于冲击区边缘部分. 硬度的提高意味着位错密度的增加, 从而使得晶体不易产生滑移, 不易形成疲劳滑移带, 提高了疲劳寿命.

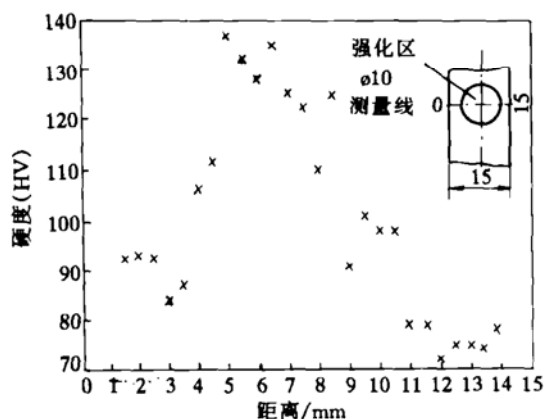


图 5 2024T62 冲击区表面显微硬度分布

高了疲劳寿命.

(4) 晶粒细化. 图 6 是试件激光冲击处理前后的金相照片. 参数: 24 J, 30 ns, $\phi 8 \text{ mm}$, 1.59 GW/cm^2 , 黑色涂层, K9 光学玻璃. 应力波峰压估算值约 2 GPa. 金相组织放大 300 倍, 比较两图, 冲击之前的晶粒粗大, 其尺寸明显大于激光冲击之后的晶粒尺寸. 可见, 激光冲击能够细化晶粒, 抑制了疲劳裂纹的成核, 提高了铝合金的疲劳寿命.

(5) 断口电子显微镜扫描. 通过对断口进行电子显微镜扫描发现: 1) 经激光冲击后, 试件

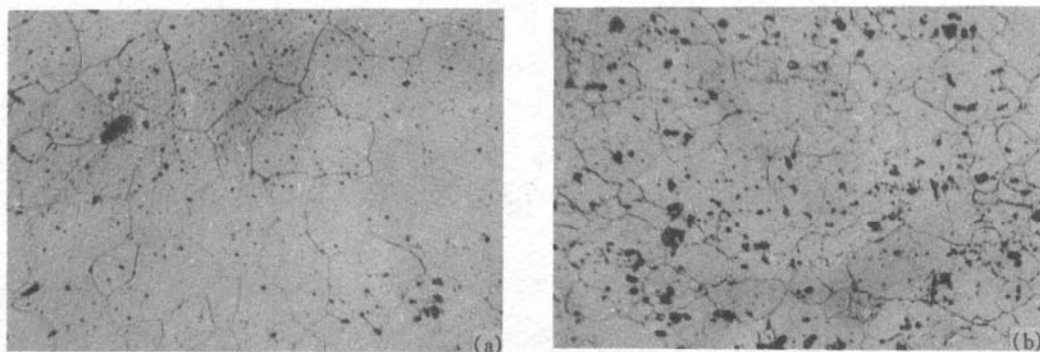


图 6 2024T62 铝合金激光冲击前后的晶粒比较

(a) 冲击前的金相照片, (b) 冲击后的金相照片; (a)、(b) 均为混合酸水溶液浸蚀

的疲劳断口没有明显的疲劳源, 有时其断口有几个疲劳区, 且通常在孔壁中间形成疲劳源; 有时在处理区的次表层形成疲劳源(图 7(a)). 未经激光冲击处理的疲劳断口有明显的疲劳源, 且通常在孔壁的尖角处形成(图 7(b)). 2) 经激光冲击处理后, 其断口的疲劳区比未经激光冲击处理的疲劳断口更光亮平整, 且很难找到典型的塑性疲劳条纹. 未经激光冲击的断口表面较粗糙, 有明显的疲劳条纹.

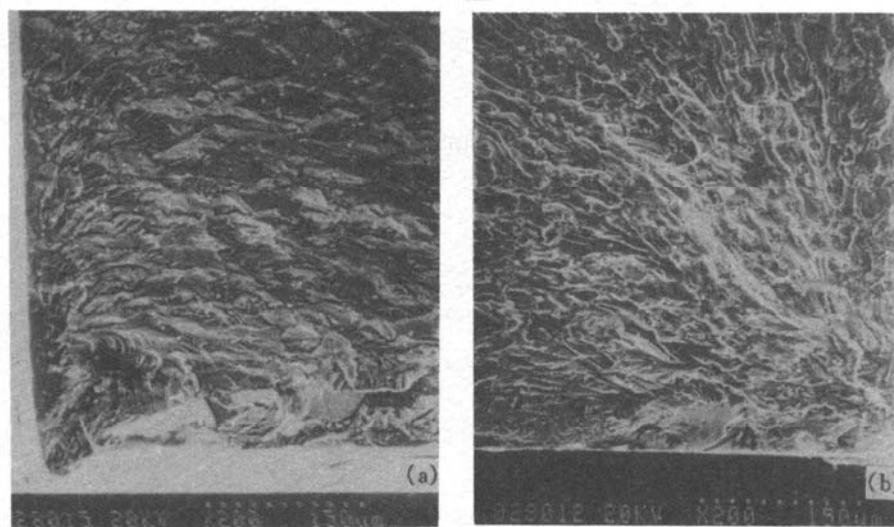


图 7 2024T62 疲劳断口形貌

(a) 激光冲击强化试件, (b) 未激光冲击强化试件

5 应用前景

激光冲击强化技术对飞机结构疲劳关键件的小孔、盲孔及无通路部位的孔的强化具有独到之处, 由于通路和可达性的困难, 是冷挤压强化和喷丸强化技术所不能代替的. 当结构重量比要求降至 27%, 即结构固有应力水平大大提高, 此时, 常规的强化技术将会失效. 而激光冲

击强化技术却能保证固有应力水平高的结构得以延长使用寿命和实现结构细节原始疲劳质量的控制。因此,激光冲击强化技术在现代飞机研制中提高结构抗疲劳断裂品质有重要的应用价值,并可在发动机、坦克、船舶及汽车等行业中广泛应用,具有潜在可观的经济效益与社会效益。我们得到如下结论:

(1) 采用小型激光装置进行激光冲击处理, 2024T62 铝合金的疲劳寿命得到大幅度地提高,在 95% 置信度下,激光冲击处理试件的中值疲劳寿命是未冲击试件中值疲劳寿命的 4.5~9.8 倍。

(2) 建立了根据激光冲击区的表面质量来判断激光冲击强化效果的直观检验方法,并通过调整激光参数及工艺细节控制激光冲击效果。解决了激光冲击处理技术工程应用的技术关键,但这方的工作需进一步量化。

(3) 激光冲击处理是一项不需改变零部件成分且不增加重量就能有效地提高使用寿命和可靠性高的高新技术,具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 1 William F B. Laser shock processing of aluminum alloys. In: Applications of Lasers in Materials Processing, American Society for Metals, 1979. 254~267
- 2 Meyers M A, Murr L E. Shock Waves and High-Strain-Rate Phenomena in Metals Concepts and Applications. New York: Plenum Press, 1981. 675~702
- 3 Vaccari J A. Laser shocking extends fatigue life. American Machinist, 1992, 7: 62~64
- 4 Peyre P, Merrien P, Lieurade H P, et al. Renforcement d'alliages d'aluminum moul'es par ondes de choclaser. Mat'eriaux & . Techniques, 1993, 6-7: 7~12
- 5 Grevey D, Maiffredy L, Vannes A B. Laser shock on a TRIP alloy: mechanical and metallurgical consequences. Journal of Materials Science, 1992, 27: 2 110~2 116
- 6 Puig T, Decamps B, Bourda C, et al. Deformation of a γ/γ' waspaloy after laser shock. Materials Science and Engineering, 1992, A 154: 183~191
- 7 Masses J E, Barreau G. Laser generation of stress waves in metal. Surface and Coatings Technology, 1995, 70: 231~234
- 8 Dubrjueaud B, Vardavoulas M, Jeandin M. Dry sliding wear behaviour of a P/M ferrous alloy superficially densified by laser shock processing. Surface and Coatings Technology, 1994, 67: 125~132