

激光冲击强化效果的直观判别 与控制方法研究

张永康

(南京大学声学所, 南京 210093)

提要 创立了激光冲击强化效果的直观检验与控制方法, 通过调整激光参数及工艺细节以控制激光冲击区表面质量, 并根据表面质量判断激光冲击强化效果, 解决了激光冲击强化技术工程应用的技术关键。从而确保了激光冲击后的所有试件的疲劳寿命皆获得较大幅度的提高。

关键词 激光冲击强化, 直观检验, 控制方法, 疲劳寿命

激光冲击强化是利用强脉冲激光与物质相互作用所产生的强应力波来改善材料的机械性能, 特别是能有效地延长金属材料的疲劳寿命。1992 年美国 Vaccari^[1]报道: 激光冲击能有效地强化碳钢、合金钢、不锈钢、可锻铸铁、球墨铸铁、铝合金、钛合金、镍基高温合金等材料, 2024T3 铝合金经激光冲击强化后疲劳寿命提高 4 倍。1995 年法国 Basse^[2]等人用激光冲击处理中碳钢(0.55wt-%C), 获得深达 1 mm 的残余压应力层。但是, 由激光冲击处理后的实际工件及构件不可能进行破坏性疲劳试验, 因而, 欲使激光冲击强化技术在实际生产中应用及推广, 必须具备激光冲击强化效果的无损检验手段。本文对激光冲击强化效果的直观判别与控制方法进行了研究。

1 直观检验的理论依据

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。如用脉宽为 30 ns 的强激光冲击, 可在工件表面形成几 GPa 的高压, 这种冲击波高压的一部分传入工件内部, 形成压缩应力波, 使得表面下一定深度范围内的材料产生塑性变形, 这种塑性变形引起工件表层发生冷作硬化, 且产生均匀的残余压应力及微观显微组织的改变, 从而提高工件的疲劳寿命。激光冲击区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, 其内层显微特征是密集的位错及细化的晶粒。激光冲击区的表面质量是这几个因素的综合反映, 因此, 可通过表面质量的优劣来直观地判别或检验激光冲击强化效果。若冲击区的表面粗糙度越低, 则冲击效果越好。应力波在冲击区所形成的微凹坑的大小、深浅及形状, 可通过光线的反射进行观察与分析。一般情况下, 微凹坑仅是几个 μm 至二十几 μm 数值的深度。微凹坑的深度是塑性变形的结果, 反映了残余压应力的大小及表面硬度的高低。微凹坑的形貌反映了残余压应力与硬度的分

布情况。所以,激光冲击区表面质量可用表面粗糙度与微凹坑这两个指标来表示,通过对表面粗糙度与微凹坑进行直观地观察与分析,就可以判别激光冲击强化效果的好坏,从而达到无损检验的目的。

2 激光冲击区表面质量分类

根据对大量的激光冲击试件进行分析的结果,可将激光冲击区的表面质量分成 A, B, C, D 四个等级。

2.1 A 级

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,形成一层十分致密的光亮圈,微凹。A 级真实地反映了激光冲击强化对疲劳寿命的贡献。实例见表 1。

表 1 A 级表面质量实例

Table 1 Examples of A grade surface quality

Material	Laser shocking parameters			Peak pressure (GPa)	Coating	Overlay	Increase of fatigue life (%)
	energy (J)	duration (ns)	power density (GW/cm ²)				
2024T 62	16.72	30	1.45	1.97	black paint	K9 glass	872.7
	18.07	30	1.57	2.08			
2024T 62	16.85	30	1.46	1.98	black paint	K9 glass	711.9
	16.04	30	1.39	1.91			

2.2 B 级

表面特征:光斑较均匀,表面粗糙度稍增大,气化层厚度均匀,有极少量气化斑点。

B 级较大程度上反映了激光冲击强化对疲劳寿命的贡献,但有一小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。实例如表 2 所示。

表 2 B 级表面质量实例

Table 2 Examples of B grade surface quality

Material	Laser shocking parameters			Peak pressure (GPa)	Coating	Overlay	Increase of fatigue life (%)
	energy (J)	duration (ns)	power density (GW/cm ²)				
2024T 62	25.4	50	1.8	2.27	black paint	K9 glass	64
	17	50	1.2	1.71			
2024T 62	18.2	50	1.29	2.06	black paint	K9 glass	48.6
	13.2	50	0.94	1.66			

2.3 C 级

表面特征:离散点状、蜂窝状、大斑块状气化,气化区不均匀,出现以孔为中心向外呈射线状的沟槽。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。实例如表 3 所示。

2.4 D 级

表面特征:气化强烈,发生熔化,晶粒粗大,形成气化凹坑,表面粗糙,有射线状沟槽。

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。实例见表 4 所示。

表 3 C 级表面质量实例

Table 3 Examples of C grade surface quality

Material	Laser shocking parameters			Peak pressure (GPa)	Coating	Overlay	Increase of fatigue life (%)
	energy (J)	duration (ns)	power density (GW/cm ²)				
2024T 62	37.9	50	1.19	1.73	black paint	K9 glass	- 7.3
	34.4	50	1.08	1.62			
2024T 62	32.9	50	1.03	1.57	black paint	K9 glass	7
	20	50	0.63	1.13			

表 4 D 级表面质量实例

Table 4 Examples of D grade surface quality

Material	Laser shocking parameters			Peak pressure (GPa)	Coating	Overlay	Increase of fatigue life (%)
	energy (J)	duration (ns)	power density (GW/cm ²)				
2024T 62	25.4	40	1.65	2.15	black paint	K9 glass	
	29.4	40	1.91	2.23			
2024T 62	26	40	1.61	2.18	black paint	K9 glass	
	28.6	40	1.87	2.33			

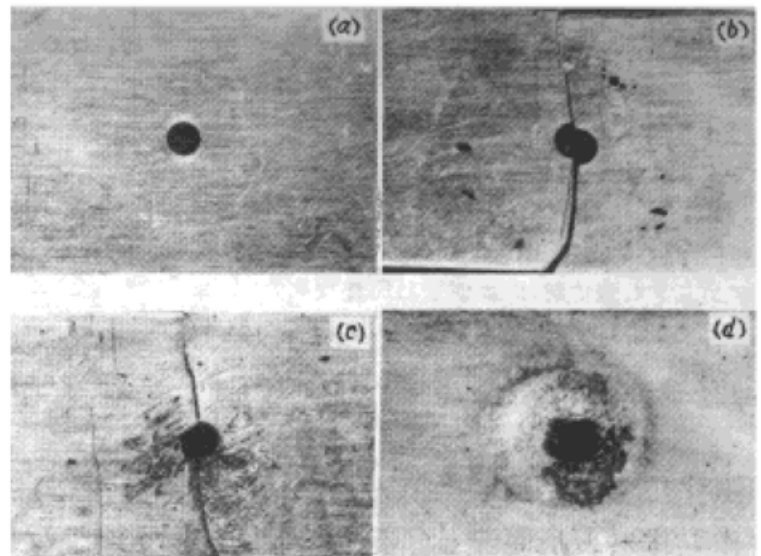
A, B, C, D 级实物照片如图 1 所示。

图 1 A, B, C 及 D 级表面质量实物照片

(a) A 级表面质量; (b) B 级表面质量;
(c) C 级表面质量; (d) D 级表面质量

Fig. 1 Photographs show the surface qualities of LPS specimens of different grades A, B, C and D

(a) photograph of an A grade LPS specimen;
(b) photograph of a B grade LPS specimen;
(c) photograph of a C grade LPS specimen;
(d) photograph of a D grade LPS specimen



3 激光冲击强化效果的控制方法

通过控制激光冲击区的表面质量就能有效地控制激光冲击的强化效果, 主要方法如下。

3.1 优化激光参数

在保证激光冲击参数所产生的表面峰压大于试件的动态屈服强度的前提下, 根据冲击区表面质量来逐步调整激光参数。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处理, 这样就绝对避免了出现 B, C, D 级的表面质量。然后通过逐渐调整激光参数等工艺细节, 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,形成一层十分致密的微凹的光亮圈。

3.2 优化涂层及约束层

通过对涂层及约束层的优化,获得最佳的效果。但是,由于涂层厚度、均匀性及材料性质不尽相同,可能在每种约束层与涂层的具体条件下所调整出的最佳激光冲击参数也不一样。因此,必须进行大量的试验工作,规范约束层与涂层的具体操作与条件。将从自由表面反射的拉伸应力波峰压控制在临界极限以内。

3.3 增加保护层及强化层

如图 2 所示,在试件表面增加保护层,在试件后面增加强化层。在保护层与强化层及试件三者之间的接触面上涂极薄的矿物油。

保护层采用与试件材料声阻抗相匹配的材料,以冲击铝为例,则采用铝箔作保护层。若用 1 GW/cm^2 功率密度的激光 ($\tau = 30 \text{ ns}$) 进行冲击,表面气化层厚度达 $23 \mu\text{m}$,故可取铝箔的厚度约 $50 \sim 60 \mu\text{m}$ 。铝箔强烈气化,产生高幅值冲击波。由于铝箔与试件的声阻抗相同,故当强应力波从保护层传向试件时,无反射波(但实际上应力波峰压可能下降 2% ^[3])。采用保护层既产生了强化试件所需的高幅值应力波,又保护了试件表面不受到有害的热损伤。

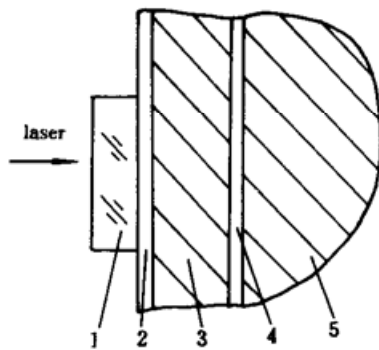


图 2 激光冲击示意图

- 1: 约束层(玻璃); 2: 保护层(即牺牲层); 3: 试件;
4: 强化层(即反射层); 5: 垫块

Fig. 2 Schematic diagram of laser shock processing

- 1: overlay (glass); 2: sacrificial object; 3: specimen;
4: reflection object; 5: pad

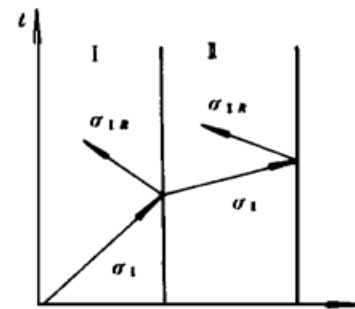


图 3 应力波传播示意图

Fig. 3 Schematic diagram of stress wave propagation

强化层选择声阻抗比试件大的材料,以冲击铝合金试件为例,则选择厚度为 0.25 mm 的铜片作强化层。从而起到了消除反射拉应力,增加反射压应力的作用。其理由如下:假设应力波为一维,且不考虑波的衰减,则两界面发生反射与透射(见图 3)。则有

$$\sigma_{IR} = \frac{Z_{II} - Z_I}{Z_I + Z_{II}} \sigma_I \quad (1)$$

$$\sigma_{II} = \frac{2Z_{II}}{Z_I + Z_{II}} \sigma_I \quad (2)$$

式中, I 表示铝试件, II 表示铜强化层, σ_I 为入射压缩波压力, σ_{II} 为透射压缩波压力, σ_{IR} 为反射波压力,单位为 Pa , Z_I 为铝的声阻抗 ($1.41 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), Z_{II} 为铜的声阻抗 ($3.35 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。由于铜的声阻抗大于铝的声阻抗,则反射波 $\sigma_{IR} = 0.41\sigma_I$ 为压缩波,从而对试件产生二次反射强化。透射波 $\sigma_{II} = 1.45\sigma_I$ 同样为压缩波,当其传播至铜的另一自由端面,发生反

射, 形成同样强度的拉伸波 $\sigma_{IR} = -1.4\sigma_l$ 。

当其传播至铝试件背面时, 同样发生透射和反射, 传播时间为 133 ns, 此时冲击过程早已结束, 铜片与铝试件脱开, 不能发生透射。采用这种方法具有两个优点: 第一, 保护了试件表面; 第二, 将反射拉应力变成压应力, 发生二次反射强化, 使得单面冲击具有双面冲击的强化效果。但是, 这种方法使得工件的安装变得比较复杂。

4 实验验证

试件材料为 2024T62 航空铝合金, 采用双联“狗骨型”典型紧固件。涂层采用黑色涂料, 约束层为 $\phi 20 \text{ mm} \times 4.5 \text{ mm}$ 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 $0.1 \mu\text{m}$ 。试件经激光冲击处理后, 在 INSTRON 1341 疲劳试验机上进行低频常幅拉-拉疲劳试验, 最大载荷 4.2 kN, 应力比 $R = 0.1$, 精度 $\pm 0.5\%$, 试验频率 13 Hz。

本次试验共激光冲击处理 9 根试件, 激光冲击后随即对冲击区的表面质量进行直观检验, 若达不到 A 级, 则重新涂上涂层后进行第二次冲击。9 根试件冲击区的表面质量都是 A 级, 疲劳试验结果表明, 这批试件疲劳寿命的提高幅度为 218.3% ~ 872.7%, 平均提高 530%。其中, 第 2 根试件在第一次激光冲击后, 经检验, 激光冲击区的表面质量没有达到 A 级, 调整工艺参数后进行第二次激光冲击处理, 经检验达到 A 级, 其疲劳寿命提高 872.7%。第 7 号试件也经过两次冲击强化, 其疲劳寿命提高 218.3%。在 95% 置信度下, 这批试件的中值疲劳寿命是未冲击试件的 4.2~ 8.1 倍。

参 考 文 献

- 1 Vaccari J. A. . Laser shocking extends fatigue life. *American Machinist*, 1992, 7 : 62~ 64
- 2 Peyre P. , Merrien P. , Lieurade H. P. *et al.* . Renforcement d'alliages d'aluminium Moule's par ondes de choc laser. *Materiaux & Techniques*, 1993, (6~ 7) : 7~ 12
- 3 Yang L. C. . Stress waves generated in thin metallic films by a Q-switched ruby laser. *J. Appl. Phys.* , 1974, 45(6) : 2801~ 2808

Study on Visual Inspection and Control Methods of Effectiveness of Laser Shock-processing

Zhang Yongkang

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

Abstract Visual inspection and control methods of effectiveness of laser shock-processing (LSP) were put forward. By means of regulation of laser shocking parameters and process details, surface qualities of LSP areas were controlled, and the effectiveness of LPS was evaluated based on the examination of the surface qualities. The difficult technical problems of LSP engineering applications were solved, thus, the fatigue life of all LSP specimens will be increased greatly.

Key words laser shock-processing (LSP), visual inspection, control method, fatigue life