

# 碳钢的激光冲击强化研究\*

任乃飞 高传玉

(江苏理工大学机械工程学院, 镇江, 212013)

**摘要:** 利用高功率密度( $\text{GW}/\text{cm}^2$ )短脉冲(ns)激光对 45 碳钢进行了激光冲击处理, 观察了激光冲击处理后 45 碳钢显微组织和结构的变化, 并用扫描电镜对疲劳断口形貌进行了分析。试验结果表明: 激光冲击强化能有效地阻止疲劳裂纹的萌生和扩展, 45 碳钢的疲劳寿命得到较大提高。

**关键词:** 激光应用 激光冲击处理 碳钢 疲劳寿命

## Study on laser shock strengthening of carbon steel

Ren Naifei, Gao Zhuanyu

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

**Abstract:** High-power density( $\text{GW}/\text{cm}^2$ ) short-pulse(ns) laser was used for laser shock processing (LSP) 45 carbon steel. The effect of LSP on the microstructure and structural changes of 45 carbon steel was studied. The fatigue fracture shapes of unshocked section and shocked section of the sample were examined with the scanning electron microscope(SEM). The experimental results show that laser shock processing can make the fatigue crack of 45 carbon steel not easy to initiate and propagate. The fatigue life of 45 carbon steel was significantly increased.

**Key words:** laser application laser shock processing(LSP) carbon steel fatigue life

## 引 言

高功率密度( $\text{GW}/\text{cm}^2$ )短脉冲(几十纳秒)强激光与金属材料相互作用, 会在材料表面形成一个高压应力波, 即激光诱导的冲击波。目前, 利用强激光产生的这种超高压已成为动高压技术的一种有效手段, 并已用于激光冲击处理(laser shock processing)这一材料表面改性技术中。激光冲击处理可用于改善金属材料的机械性能, 特别能有效地提高金属材料的抗疲劳断裂性能。据 Vaccari 报道, 激光冲击能处理碳钢、合金钢、球墨铸铁、铝合金等材料, 并认为在提高金属材料疲劳寿命方面, 激光冲击可取代喷丸处理<sup>[1]</sup>。国内外学者研究激光冲击铝合金等有色金属的较多<sup>[2~5]</sup>, 而对黑色金属研究得则较少。我们首次报道激光冲击处理 45 碳钢的研究工作, 结果表明, 激光冲击能提高碳钢的抗疲劳断裂性能。

## 1 试验方法

### 1.1 试验材料及其处理

试件材料为 45 碳钢, 其化学成分及机械性能见表 1。试样采用双联“狗骨型”疲劳试件<sup>[6]</sup>。试件一个孔作双面激光冲击处理, 另一个孔不作冲击, 以作对比试验。试件经激光冲

\* 国家教委博士点基金和机械部科技基金资助。

击后,以  $\varnothing 1\text{mm}$  中心孔为基准在精密坐标镗床上精镗出  $\varnothing 2\text{mm}$  的孔。

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of 45 carbon steel

element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
amount(wt. %)	0.42~ 0.5	0.17~ 0.37	0.5~ 0.8	$\leq 0.035$	$\leq 0.035$	$\leq 0.25$	$\leq 0.25$
mechanical properties	$\sigma_b$	$\sigma_s$	$\delta$	$\psi$	$a_k$	HBS	
	720MPa	520MPa	17%	40%	500kJ/m <sup>2</sup>	241~ 285	
heat treatment	hardening and tempering						

## 1.2 激光冲击处理试验

本实验是在中国科学技术大学强激光研究所的三级放大调 Q 钕玻璃激光装置上进行的,激光波长为  $1.06\mu\text{m}$ ,激光脉冲宽度为  $50\text{ns}$ 。冲击之前,在试件待冲击区涂一薄层黑色材料,然后再覆盖一层对激光透明的材料( $\varnothing 15\text{mm} \times 4.5\text{mm}$  的 K9 光学玻璃)。激光冲击在金属表面产生强应力波,当其峰压大于金属材料的动态屈服强度时,才能使金属表层发生塑性变形,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。本次试验共冲击 6 根试件,试件两表面依次各冲击一次,若冲击区的表面质量没有达到要求,则涂上涂层后再重新冲击一次。选择的激光参数见表 2。

Table 2 Laser shock processing parameters of 45 carbon steel specimens

specimen No.	energy (J)	coating thickness ( $\mu\text{m}$ )	duration (ns)	facula diameter (mm)	power density ( $\text{GW}/\text{cm}^2$ )	peak pressure (GPa)
1	44	65	50	7	2.29	3.41
	134	55	50	8	5.33	6.02
2	67	65	50	8	2.67	3.72
	89	50	50	8	3.54	4.58
3	70	85	50	8	2.79	3.90
	45	65	50	8	1.79	2.91
4	71	65	50	8	2.83	3.94
	78.4	80	50	8	3.12	4.21
5	74	70	50	8	2.95	4.05
	42	75	50	8	1.67	2.77
6	101	55	50	8	4.02	4.98
	43	75	50	8	1.71	2.83

## 1.3 疲劳试验

经激光冲击处理的试件,在南京航空航天大学 INST RON 1341 电液伺服疲劳试验机上

Table 3 The results of fatigue experiment of 45 carbon steel

specimen No.	load <sub>max</sub> (kN)	load <sub>min</sub> (kN)	stress ratio (R)	frequency (Hz)	unshocked specimen (cycles)	shocked specimen (cycles)	increase (%)
1	16	1.6	0.1	15	52500	110000	110
2	16	1.6	0.1	15	61600	77000	25
3	16	1.6	0.1	15	49800	104600	110
4	16	1.6	0.1	15	54000	61400	14
5	16	1.6	0.1	15	90000	99700	11
6	16	1.6	0.1	15	187400	359400	92

进行低频常幅拉伸疲劳试验,最大载荷为 16kN,应力比  $R$  为 0.1,精度为  $\pm 0.5\%$ ,试验频率为 15Hz。45 钢试件疲劳试验结果见表 3。

## 2 试验结果分析

### 2.1 激光冲击过程分析

激光冲击时,激光通过透明的 K9 光学玻璃后辐射到黑色涂层材料上,涂层吸收激光能量后迅速汽化,由于涂层表面上玻璃的约束作用,蒸气被限制在试件表面和玻璃约束层之间。蒸气继续吸收激光辐射的能量,发生爆炸和电离,体积急剧膨胀,形成由激光能量支持的强冲击波(爆轰波),冲击波在沿着激光束的方向被支持住向试件内部传播,约束层被击穿。在本次试验中冲击波的峰压值高达几个 GPa,这是试件表层得以强化的关键。

### 2.2 疲劳试验结果分析

根据表 2,激光冲击在试件表面所产生的冲击波峰压估算值为 2.77~6.02GPa,超过 45 钢的屈服强度(1.23GPa)。经观察检验,试件冲击区表面形成十分致密的微凹的光亮圈,这是材料在冲击波作用下发生塑性变形的结果。表 3 中 6 根试件经过激光冲击后,疲劳寿命平均提高 60% 左右。经过成对对比数据处理,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的 1.1~2.1 倍,但数据分散较大,需进一步优化试验,以获得最佳的激光冲击条件。

### 2.3 疲劳断口形貌分析

利用扫描电子显微镜对疲劳断口扫描发现,试件未冲击段的疲劳裂纹源起自表面及心部,在整个孔周的应力集中区都有裂纹产生及扩展(如图 1a 所示);试件冲击段的疲劳裂纹源只在试件的孔壁中间产生并且扩展,在孔的边界及表面并没有裂纹源(如图 1b 所示)。

由此可见,激光冲击处理能阻止试件的疲劳裂纹源在表面产生并扩展,对延缓疲劳裂纹的发生及扩展具有一定的作用,其主要原因在于激光冲击处理能在试件表面产生塑性变形,形成一硬化层,提高了表面层的强度,同时由于强化层的存在,使表层产生残余压应力,降低了交变载荷下表面层的拉应力,使疲劳裂纹不易产生或扩展,从而提高了疲劳抗力、延长了试件的疲劳寿命。



Fig. 1 The shape of fatigue section of 45 carbon steel specimen  
a—unshocked specimen b—laser-shocked specimen

## 3 结 论

激光冲击处理是一种不同于传统金属材料表面强化工艺的新技术,它是利用高功率短脉冲激光诱导的高峰值压力冲击波来提高金属材料抗疲劳断裂性能。在激光冲击区域,当冲击波的峰值压力超过金属材料的动态屈服强度时,就会使金属材料表层发生塑性变形,从而在表面产生冷硬层并形成表面残余压应力,微观上表现为在金属表面产生了高密度均匀稳定的位错及晶粒的细化作用等,这些因素的共同作用是提高金属材料疲劳寿命的关键。45 碳钢经激光冲击强化后疲劳寿命得到了提高,在 95% 置信度下,激光冲击强化试件的中值疲劳寿命是未冲击试件的 1.1~2.1 倍。激光冲击强化技术在汽车工业、机械工业等领域有着极其广泛的

## 激光清洗工艺的发展现状与展望\*

王泽敏 曾晓雁

黄维玲

(华中理工大学材料科学与工程学院, 武汉, 430074) (华中理工大学激光加工工程中心, 武汉, 430074)

摘要: 综述了激光清洗技术的作用机理和发展现状, 展望了该技术的应用前景。

关键词: 激光清洗 机理 应用状况

### Status and prospect of laser cleaning procedure

Wang Zemin, Zeng Xiaoyan, Huang Weiling

(School of Material Science and Engineering, HUST, Wuhan, 430074)

(State Engineering Research Center for Laser Processing, HUST, Wuhan, 430074)

**Abstract:** This paper presents a review of the mechanism, procedure characteristics and the status of laser cleaning procedure, as well as the prospect of laser cleaning applications. It was pointed out that the laser cleaning technology has many advantages, comparing to the liquid cleaning and the ultrasonic cleaning, such as dry cleaning, no damage of the cleaned surface, low cost etc. So the laser cleaning can be used many fields or some specialized fields.

**Key words:** laser cleaning mechanism application

## 引 言

清洗技术是工业生产等许多领域中的重要环节。传统的清洗方法包括机械清洗法、化学清洗法和超声波清洗法。它们在环境保护和高精度要求方面的应用受到很大的限制。激光清洗技术是近 10 年来飞速发展的新型清洗技术, 它以自身的许多优点在许多领域中逐步取代传统清洗工艺, 展示了广阔的发展前景。

\* 国家教育部归国留学人员基金资助。

## 应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 Vaccari J A. American Machinist, 1992; (7): 62~ 64
- 2 William F B. Laser shock processing of aluminum alloys. Applications of Laser in Materials Processing. American Society for Metals, 1979: 254~ 267
- 3 Fairand B P, Wilcox B A, Gallagher W J *et al.* Appl Phys, 1972; 43(9): 3893~ 3895
- 4 Peyre P, Fabbro R, Merrien P *et al.* Materials Science and Engineering, 1996; A210: 102~ 113
- 5 张永康, 张淑仪, 唐亚新 *et al.* 中国科学(E 辑), 1997; 27(1): 28~ 34
- 6 任乃飞, 杨继昌, 蔡 兰 *et al.* 激光技术, 1998; 22(4): 235~ 238

作者简介: 任乃飞, 男, 1964 年 8 月出生。博士研究生, 副教授。主要从事激光加工、计算机辅助设计与制造方面的研究工作。