

文章编号: 0258-7025(2008)02-0316-05

激光冲击处理 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢

曹子文¹ 邹世坤¹ 刘方军¹ 樊国福² 刘元春²

(¹ 北京航空制造工程研究所高能束流国防科技重点实验室, 北京 100024; ² 贵州黎阳航空发动机公司, 贵州 贵阳 561102)

摘要 对 1Cr11Ni2W2MoV 马氏体不锈钢进行了激光冲击处理(LSP)的基础性研究。激光器最大输出能量为 50 J, 激光功率密度 3.7~7.5 GW/cm²。吸收层和约束层分别选取 Al 箔和均匀流水层, 激光束采用倾斜入射方式, 实验对单光斑试样、搭接光斑试样、疲劳试样分别进行冲击。通过表面形貌、显微硬度和残余应力等检测, 验证了激光功率密度对冲击区性能的影响。三组疲劳试件进行对比表明, 先冲击后打孔试件的疲劳性能最好, 其表面高幅值的残余压应力层能很好地抑制疲劳裂纹的萌生和延长裂纹扩展的速率。实验证明激光冲击处理可以有效提高马氏体不锈钢的疲劳性能。

关键词 激光技术; 激光冲击处理; 马氏体不锈钢; 疲劳性能

中图分类号 TN 249; TG 156.99 **文献标识码** A

Laser Shock Processing on 1Cr11Ni2W2MoV Martensite Steel

Cao Ziwen¹ Zou Shikun¹ Liu Fangjun¹ Fan Guofu² Liu Yuanchun²

¹ National Key Laboratory of High Energy Density Beam Processing Technology,
Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China
² Guizhou Liyang Aero-Engine Corporation, Guiyang, Guizhou 561102, China

Abstract The foundational study of laser shock processing (LSP) for 1Cr11Ni2W2MoV martensite stainless steel is presented in this paper. Capability of the laser system is 50 J per pulse, LSP experiment under water confinement regime perform at laser power density of 3.7~7.5 GW/cm². Aluminum film is used as the absorption layer and restriction layer, and uniform water flow. The laser beam is incidence by oblique way. Different samples are shocked for the following study. The measurement for laser shocked zone include surface profile, micro-hardness and residual stress, and the result confirm that laser power density has influence on the performance of laser shocked zone. Comparing the fatigue result of three types sample, the sample with drilling after shock show the best fatigue performance, because the intense compressive residual stress that around the surface of hole can restrain the initiation of the fatigue crack and retard the propagation of fatigue crack. Laser shock processing is a available method for enhancing the high cycle fatigue of martensite stainless steel via this investigation.

Key words laser technique; laser shock processing; martensite steel; fatigue property

1 引 言

激光冲击处理(LSP)(又称激光喷丸)是一项新兴的材料表面改型技术, 利用纳秒量级短脉冲大能量的激光束辐照在材料表面, 产生吉帕量级的向材料内部传播的冲击波。大于材料弹性极限(HEL)值的塑性波和小于弹性极限值的弹性波共同作用于材料表层, 冲击波加载结束, 激光冲击区材料受到周

围材料的“排挤”, 从而产生残余压应力表层, 能够大大提高材料的抗疲劳性能和抗应力腐蚀性能^[1,2]。与传统机械喷丸和冷挤压工艺相比, 激光冲击处理产生的材料应变率高(10⁶~10⁷ s⁻¹)、残余压应力层深、激光束可达性好以及工艺参数易精确控制等诸多优点^[3], 所以备受航空工业和核工业的青睐。目前, 美国将激光冲击处理技术应用于航空发动机叶

收稿日期: 2007-05-31; 收到修改稿日期: 2007-09-25

基金项目: 国防基础科研项目(2006091)资助课题。

作者简介: 曹子文(1980—), 男, 黑龙江人, 硕士研究生, 主要从事激光冲击处理工艺及设备方面的研究。

E-mail: svip@163.com

导师简介: 邹世坤(1974—), 男, 湖北人, 高级工程师, 主要从事激光冲击处理技术方面的研究。E-mail: zousk@sina.com

片,大大提高了飞机的安全性。据报道,由于激光器改进和激光冲击处理工艺的完善,美国的激光冲击处理成本每个叶片从 100 美元降至 20 美元。

本文针对 1Cr11Ni2W2MoV 马氏体不锈钢材料进行激光冲击处理研究,用激光冲击处理的方法提高某型号航空发动机的马氏体不锈钢压气机叶片的抗开裂能力。

2 实验材料及实验装置

1Cr11Ni2W2MoV 马氏体不锈钢压气机叶片是重要的二级锻件,其化学成分见表 1,经过特定热处理工艺后的马氏体不锈钢的屈服强度为 932~1008 MPa,洛氏硬度(HRC)为 34~36,杨氏模量为 196 GPa。线切割后试样的尺寸为 20 mm×20 mm×3 mm,表面进行抛光处理。激光冲击处理实验前,试样进行去应力退火,去除表面加工应力。

表 1 1Cr11Ni2W2MoV 马氏体不锈钢化学成分
(质量分数,%)

Table 1 Chemical ingredient of 1Cr11Ni2W2MoV
(mass fraction, %)

C	Mn	Si	S	P
0.10~0.16	<0.6	<0.6	<0.025	<0.03
Cr	Ni	W	Mo	V
10.5~12.0	1.4~1.8	1.5~2.0	0.35~0.5	0.18~0.3

激光冲击实验在北京航空制造工程研究所高能束流加工技术国防科技重点实验室进行,激光冲击处理系统由激光器、光路调整平台、工件运动系统及送水装置四部分组成。激光器的主要技术指标为:波长 1064 nm;波形介于高斯波形和短上升沿波形之间;脉宽 30 ns(机械转镜可调);单脉冲最大输出能量可达 50 J。

3 实验工艺

3.1 吸收层和约束层

吸收层作用是保护材料表面不被激光烧蚀,并有利于等离子体产生和逆韧致吸收。本次实验的吸收层为柔性铝箔胶带,厚度为 150 μm ,铝的电离势低,有利于等离子体产生。此外,与黑漆等非金属材料相比,铝箔和马氏体不锈钢的声阻抗值更加接近,减少冲击波在吸收层和基体表面冲击波的反射;约束层可以提高等离子体压力和冲击波半峰全宽,从而大幅度地提升冲击波的冲量。本次实验的约束层为均匀流水层,厚度约 2~3 mm,对 1064 nm 波长激光吸收率约为 10%。柔性介质的流水具有廉价、

快捷、清洁等特点,是工程化应用的首选介质。

3.2 激光冲击

实验前,先将铝箔吸收层粘贴于试样表面,通过喷水管出水实现均匀的流水约束层,图 1 为激光冲击示意图。激光束以倾斜一定角度辐照在试样表面,倾斜光束直接将圆形光斑转化成椭圆形光斑,从而避免了圆形光斑冲击区中心发生应力下降现象。吸收层可选用与基体相同的材料,防止背面层裂现象发生。

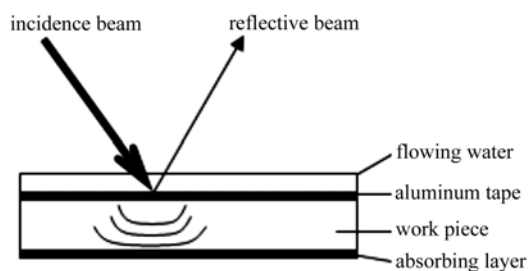


图 1 倾斜光束激光冲击

Fig. 1 Laser shock beam with oblique angle

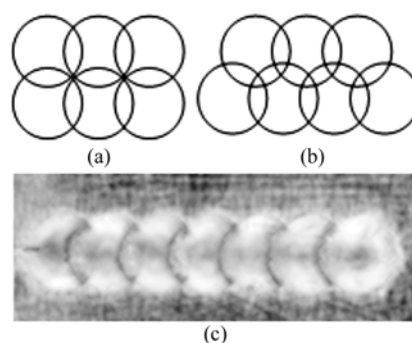


图 2 光斑搭接形式

Fig. 2 Overlap type of laser spot

首先进行单光斑激光冲击实验,一共对 13 个点进行了激光冲击,激光脉冲能量分布在 30~40 J 之间,其椭圆光斑面积近似于 $\phi 4 \sim 6$ mm 的圆形光斑^[4],激光的功率密度在 3.7~7.5 GW/cm^2 之间。1064 nm 波长激光在水约束层击穿阈值约为 10 GW/cm^2 ,因此本次实验不会发生水约束层击穿现象。通过图 2(b)的光斑搭接形式,还进行了马氏体不锈钢的光斑搭接冲击实验,光斑直径为 $\phi 5$ mm,激光能量仍为 30~40 J,搭接率约为 30%,采用 SC100 型步进电机驱动工件运动方式实现光斑相对移动。选用图 2(b)搭接形式的原因(b)方案的铝箔最多承受三次激光冲击,小于(a)的四次冲击,所以(b)方案可以减少铝箔被冲击坏而烧蚀试件的情况,美国专利对叶片边缘的强化也采用这种光斑的搭接形式^[5]。图 2(c)为激光冲击后取下的铝箔吸

收层的表面状况。

4 实验结果与分析

4.1 冲击区表面轮廓

图 3(a)为离散的冲击点,图 3(b)为 48 个光斑搭接形成的大面积冲击区,从图 3(a),(b)中可以清晰地看到冲击后马氏体不锈钢表面的椭圆形冲击轮廓,说明本次实验产生的激光冲击波均大于马氏体不锈钢材料的弹性极限

$$HEL = \frac{1-\nu}{1-2\nu} \cdot \sigma_Y^{dyn},$$

式中 σ_Y^{dyn} 是应变率为 10^6 s^{-1} 下的动态屈服强度, ν 为材料的各项异性系数。在激光冲击波高速加载下的材料可以理解为流体模型和弹塑性模型两种力学行为。实验所用马氏体不锈钢材料的应变速率敏感系数较低,其值约为 0.025,计算得到弹性极限值为 2300 MPa。

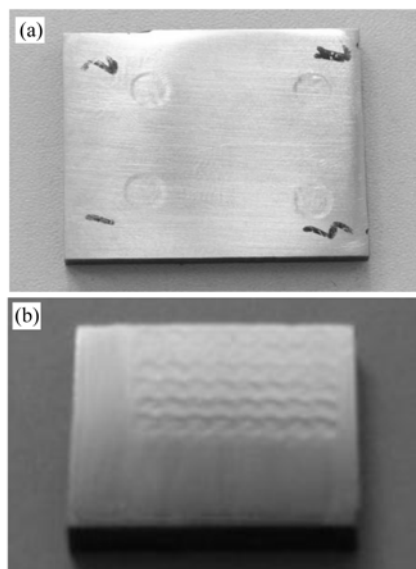


图 3 激光冲击区表面轮廓
(a) 单光斑冲击区;(b) 搭接光斑冲击区

Fig. 3 Profile of laser shock zone

(a) single shock zone; (b) overlap shock zone

冲击区深度测量采用 WYKO NT-1100 型光学形貌仪,图 4 为采集后生成的模拟结果。激光输入功率密度为 5.40 GW/cm^2 的冲击区记作 A 点,激光输入功率密度为 3.78 GW/cm^2 的冲击区记作 B 点。高斯空间能量分布的激光冲击产生的冲击区呈“锅底”状,曲线 1,2,3 分别代表冲击区的不同截面的塑性变形深度的变化。A 点最大塑性变形深度为 $9 \mu\text{m}$,B 点最大塑性变形深度为 $7 \mu\text{m}$,可见,随着激光功率密度增加,等离子体爆炸的冲击波压力也增

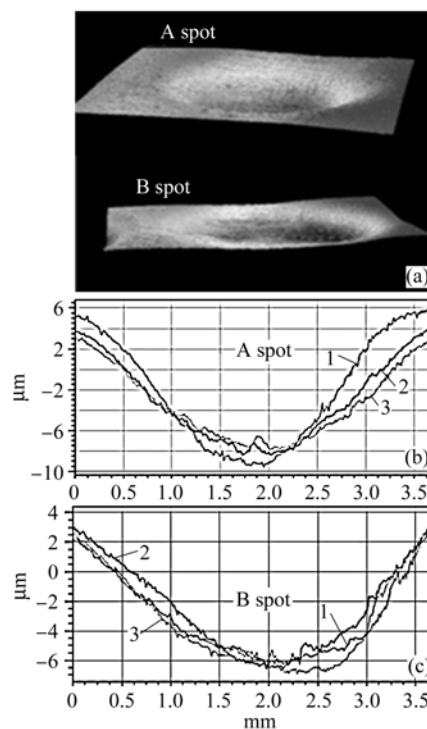


图 4 激光冲击区三维形貌和深度

Fig. 4 Three-dimensional morphology and depth of laser shock zone

加,冲击坑的塑性变形程度增大。但是,激光功率密度的平方根和冲击波压力成正比例关系,所以塑性变形程度变化幅度没有激光功率密度明显。

4.2 显微硬度检测

显微硬度测试的实验载荷为 1 kg,加载时间为 10 s,对 A 点椭圆形冲击区的长轴方向每隔 0.5 mm 测试一点,结果如图 5 所示。冲击区内的硬度高于冲击区外边缘,且冲击区内硬度值随塑性变形的深度增加而增大,A 点冲击区内平均硬度值为 HV376.3,冲击区外平均为 HV343.5。马氏体不锈钢冲击区硬度提高幅度为 9.5%。高强度的冲击波作用下,马氏体不锈钢中点缺陷浓度增大,点缺陷的迁

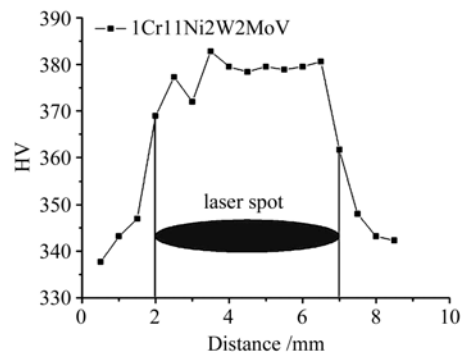


图 5 A 点冲击区显微硬度

Fig. 5 Micro-hardness of A spot

移和复合有利于大量位错形成,此外会造成晶格畸变,这些都是提高该材料抵抗塑性变形能力的主要原因。显微硬度越高,其抗气蚀和抗空蚀磨损能力越强。

4.3 冲击区内残余应力状态

对 4.82 GW/cm², 5.40 GW/cm², 5.70 GW/cm² 三个直径 5 mm 的单光斑冲击区进行残余应力检测,检测方式为 X 射线衍射,射线光斑为 4 mm×4 mm,对三个冲击区进行 *x*, *y* 两个垂直方向的测试^[6]。表 2 结果显示,冲击区内均为压应力状态,而且随激光功率密度的增加,相应冲击区内的残余应力值增大。

表 2 单光斑冲击区表面残余应力

Table 2 Residual compressive stress at single shock zone

Power/(GW/cm ²)	<i>x</i> direction/MPa	<i>y</i> direction/MPa
4.82	-253	-282
5.40	-259	-345
5.70	-300	-345

图 3(b)的大面积冲击区局部残余应力测量在清华大学破坏力学重点实验室进行,测量方法为云纹干涉法^[7],通过确定钻小孔后的云纹的级数,计算出小孔周围残余应变。图 6 为云纹干涉法测量时,小孔周围的云纹图(a)及小孔周围的残余应变情况(b)。小孔边缘两个对称点的残余应力值取平均值,即估算出小孔中心原来的残余应力,计算结果为 -570 MPa。

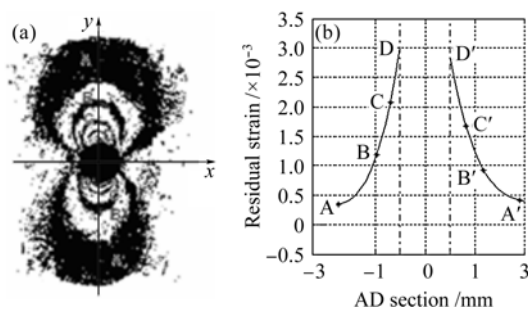


图 6 云纹干涉法测残余应力

Fig. 6 Residual stress measurement with moire interferometry

5 疲劳实验及断口分析

5.1 疲劳试件及载荷条件

疲劳试件如图 7 所示,其最大应力截面面积 20 mm²,应力集中系数 $K_t = 2.5$,孔角边缘导角半径为 0.2 mm。实验采用拉-拉载荷,轴向拉伸,最大载荷为 9000 N,应力比为 0.1,应力循环频率为

20 Hz。共准备三组疲劳试件^[8],A 组未经过激光冲击,B 组对小孔进行同心冲击强化,C 组对未打孔的试件进行冲击强化后再进行打孔。B, C 组试件的激光冲击参数与单光斑冲击实验相同,分别对试件小孔的两侧进行强化处理。

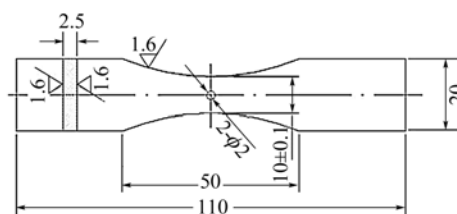


图 7 疲劳试件

Fig. 7 Fatigue sample

5.2 疲劳实验结果

三组疲劳试件均从最大应力截面处断裂,疲劳循环寿命如表 3 所示,A 组平均 119348 次,记为 100%,B 组平均 128110 次,记为 107%,C 组平均 260801 次,记为 219%。

表 3 疲劳试件的循环周数

Table 3 Cycles of fatigue testing

	102438	103478	121865	149612
A set	102438	103478	121865	149612
B set	92411	147659	149096	123273
C set	230235	327172	248259	237541

5.3 疲劳断口分析

疲劳断口的观察,可以从 A 组原始试件发生在孔角处的疲劳源看出,如图 8 所示。因为小孔的应力集中最大,而且表面晶粒不受约束,易于发生滑移的累积,这为疲劳裂纹产生提供了优越条件。图 8 中从裂纹源到瞬断区,疲劳花样可看出裂纹扩展路径没有受到任何阻碍。

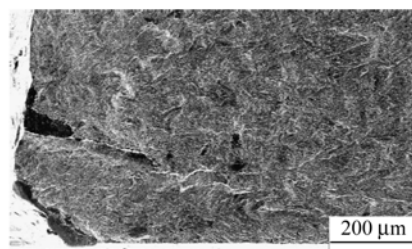


图 8 A 组疲劳试件孔角

Fig. 8 Hole's corner of A fatigue sample

B 组疲劳试件的疲劳结果与未冲击试样相差不多,其原因是冲击波的作用使孔角处发生一定的变形,对疲劳性能产生负面影响,这与孔角处残余应力产生的疲劳增益相互抵消。另一个原因是当冲击波加载结束以后,冲击区受到周围材料的“排挤”,而 B 组试件的孔边缘冲击区没有受到来自孔内方向的排

挤约束,与四周都受到约束的冲击区相比,残余应力幅值和位错密度较小。

C组疲劳试件的疲劳结果最优,也与本次实验之前的推测结果吻合,从疲劳断口分析总结出3个产生疲劳增益的因素:

1) 裂纹萌生时间延长

疲劳裂纹在何处生核和孕育期的长短直接影响着材料的疲劳性能,激光冲击处理对试件小孔表层进行了强化处理,小孔表层的残余压应力层束缚了晶粒,减少了表层的挤入挤出效应,因为小孔表层受到保护,裂纹源发生了转移,在小孔的次表层产生裂纹源,如图9(a)所示。

2) 裂纹扩展延缓

裂纹扩展过程中,裂纹尖端塑性存在裂纹闭合效应,而残余压应力加剧了裂纹闭合倾向,外载需要克服裂纹尖端的压应力才能完全张开。所以在C组试件残余压应力层存在负载荷,大大降低了裂纹扩展速率。此外,从图9(b)中可以看到,裂纹绕过压应力区而转向易扩展方向,裂纹扩展路径的曲折也从某种意义上减小了裂纹扩展速率。

3) 次生裂纹

图9(c)中所示,在小孔表层附近观察到,在垂直于主裂纹的方向产生大量的次生裂纹。原因是主

裂纹方向的残余压应力层使裂纹扩展阻力增大,这些次生裂纹消耗了一定量的载荷,而且产生了新的表面,从而降低主裂纹的载荷,所以这种次生裂纹的出现对疲劳结果是有益的。

6 结 论

1) 激光冲击处理1Cr11Ni2W2MoV型马氏体不锈钢材的实验表面,在3~6 GW/cm²激光功率密度下,冲击区的凹坑最大深度为6~9 μm,高斯分布的激光冲击区内塑性变化不均匀,需要通过后续的搭接光斑研究提高冲击区的表面质量。

2) 冲击区的硬度值较基体有提高,从基材平均HV343.5到冲击区HV376.3;搭接冲击表面的残余应力值可达-570 MPa。

3) 疲劳实验结果表明,先冲击后钻孔方案的疲劳结果最优,较未处理试件疲劳寿命提高119%。残余应力层能够抑制疲劳裂纹的萌生和增加裂纹扩展的阻力,而且在主裂纹垂直方向产生了次生裂纹。

参 考 文 献

- 1 R. Fabbro, P. Peyre, L. Berthe *et al.*. Physics and applications of laser-shock processing [J]. *J. Laser Application*, 1998, **10**(6):265~279
- 2 Zou Shikun, Tan Yongshen, Guo Dahao *et al.*. Effect of laser shock processing on mechanical properties of Al-Li alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(3):371~373
邹世坤,谭永生,郭大浩等. 激光冲击处理对铝锂合金力学性能的影响[J]. *中国激光*, 2004, **31**(3):371~373
- 3 Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review [J]. *International J. Fatigue*, 2002, (24):1021~1036
- 4 Cai Lan, Zhang Yongkang. Study of laser parameters optimum of laser shocking against fatigue and fracture of metal [J]. *Chinese J. Lasers*, 1996, **A23**(12):1117~1120
蔡兰,张永康. 激光冲击抗金属疲劳断裂的激光参数优化试验研究[J]. *中国激光*, 1996, **A23**(12):1117~1120
- 5 S. J. Ferrigno, W. D. Cowie, S. Mannava. Laser shock peening for gas turbine engine weld repair [P]. US5846057, 1998. 12. 8
- 6 Chen Ruifang, Hua Yinqun, Cai Lan. Estimate of residual stress of steel materials induced by laser shock wave [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(2):278~282
陈瑞芳,花银群,蔡兰. 激光冲击波诱发的钢材料残余应力的估算[J]. *中国激光*, 2006, **33**(2):278~282
- 7 Xie Huimin, Bi Bo, Liu Zhanwei *et al.*. Advanced moire techniques and its application [J]. *Structure & Environment Engineering*, 2006, **33**(1):45~51
谢惠民,毕博,刘占伟等. 先进云纹测量技术及应用[J]. *强度与环境*, 2006, **33**(1):45~51
- 8 Zhang Hong, Tang Yaxin, Yu Chengye *et al.*. Effects of laser shock processing on the fatigue life of fastener holes [J]. *Chinese J. Lasers*, 1996, **A23**(12):1112~1116
张宏,唐亚新,余承业等. 激光冲击处理对紧固孔疲劳寿命的影响[J]. *中国激光*, 1996, **A23**(12):1112~1116

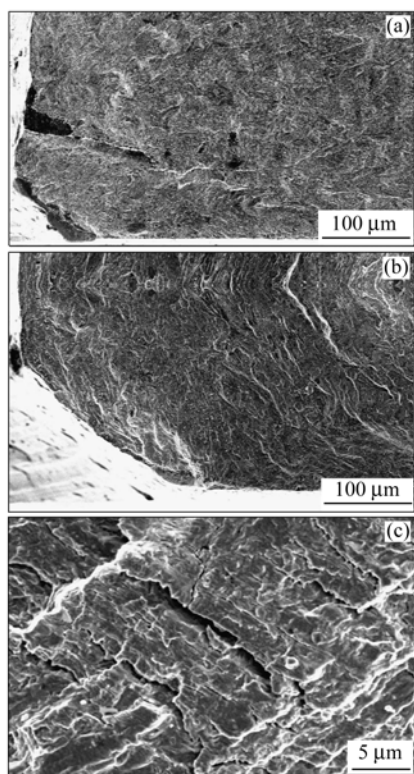


图9 C组疲劳断口形貌

Fig. 9 Fracture morphologies of C fatigue sample