

斜激光冲击对航空发动机风扇轴弯曲疲劳性能的影响

沈晓骏, 汪 诚, 安志斌, 周留成, 赖志林, 王 冠

(空军工程大学 等离子体动力学重点实验室, 陕西 西安 710038)

摘 要: 采用激光斜入方法对航空发动机扇轴转接圆角部位进行激光冲击强化试验。分析了斜冲击机理及方法, 计算优化斜激光冲击强化试验参数, 对冲击前后试件的显微硬度、残余应力进行对比分析, 并进行旋转弯曲疲劳对比验证试验。其结果表明, 风扇轴经过激光斜冲击强化后, 表面显微硬度提高了 11%, 残余应力不均匀性得到改善, 旋转弯曲疲劳寿命提高了 160%; 断口观察分析可知, 激光冲击强化可以使疲劳源位置内移, 降低裂纹扩展速率, 从而提高试件的疲劳性能。

关键词: 风扇轴; 圆角; 激光斜冲击; 残余应力; 旋转弯曲疲劳试验

中图分类号: TG162.71; V232.2; V261.93 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)12-3548-06

Effects of oblique laser shock processing on rotary bending fatigue of aero-engine fan shaft

Shen Xiaojun, Wang Cheng, An Zhibin, Zhou Liucheng, Lai Zhilin, Wang Guan

(Science and Technology on Plasma Dynamics Laboratory, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: The circular bead of aero-engine fan shaft was obliquely shocked by laser shock processing (LSP). The shocking parameters were determined according to the analysis of the oblique laser shock model. After being obliquely laser shocked, the surface residual stress and micro-hardness of the aero-engine fan shaft were investigated and analyzed. Besides, the rotary bending fatigue tests and fracture analysis were also conducted. The experimental results show that the micro-hardness of the fan shaft increased about 11% by laser shock processing, which modified the inhomogeneity of the surface residual stress, and the rotary bending fatigue life of fan shaft increased by 160% after LSP. The fracture analysis show that the location of fatigue initiation migrated to a inner place of materials and the crack growth speed of fan shaft reduced by LSP, which is necessary for improving the fatigue life.

Key words: fan shaft; circular bead; oblique laser shock; residual stress; rotary bending fatigue test

收稿日期: 2015-04-09; 修订日期: 2015-05-11

基金项目: 国家自然科学基金(51205406)

作者简介: 沈晓骏(1990-), 男, 硕士生, 主要从事激光冲击强化表面改性技术研究。Email: s673864902@126.com

导师简介: 汪诚(1974-), 男, 副教授, 主要从事等离子体表面改性技术研究。Email: warrant_74@126.com

0 引言

航空发动机风扇轴的疲劳断裂,是研制和使用中的疑难问题。由于风扇轴不仅要承受离心负荷、弯扭负荷、温度负荷,还要受到振动、疲劳、接触挤压、微动磨损等方面的作用,表面易产生微裂纹,进而引发疲劳断裂,严重影响飞行的可靠性^[1]。

激光冲击强化技术(Laser Shock Peening, LSP)是利用激光冲击波对试件表层作用,可以显著提高其疲劳寿命和强度。目前,在文献报道中,对航空发动机叶片有大量研究,其研究对象以简单曲面和平板部件为主。但对于风扇轴等轴类零部件过渡圆角曲面强化,冲击加工时不能满足每次都为法向垂直冲击,冲击方向与轴表面存在一定的夹角,且冲击后易存在应力集中、强化后应力场分布不均匀等问题,因此,文中采用斜入式激光冲击的方法以满足特殊零部件的加工要求。2003年,张永康等人^[2]提出激光斜冲击实验与理论研究,发现激光入射角度越大,冲击后试样的最大变形点偏心依次增大,与此同时作用面积变大,能量密度减小,凹坑的深度(变形最大

点)越来越浅。此后,鲁金忠等人^[3]对曲轴进行斜激光冲击强化实验研究,受冲击区域显微硬度提高 65%,残余压应力提高 80%~100%,疲劳寿命提高 150%。澳大利亚 Chunhui Yang 等人^[4]采用三维有限元仿真,分析了 AA7050-T7451 铝合金弧形圆棒激光冲击强化的动态应力场和残余应力场,研究表明,几何形状和激光冲击强化参数对曲面强化残余应力场有很大的影响。L.Dulaney 等人^[5]介绍了激光斜冲击的模型、应用,但没有对激光斜冲击的作用过程进行描述。

文中以航空发动机风扇轴为研究对象,进行斜冲击研究,分析了其机理与可行性,并对冲击区域的显微硬度、残余应力、弯曲疲劳强度和疲劳断口进行分析验证。

1 试验材料与方法

风扇轴材料为 1Cr11Ni2W2MoV 马氏体不锈钢,具有较高的室温拉伸强度、持久强度及蠕变极限、良好的抗氧化性和韧性。在航空发动机上用于制造压气机盘、压气机风扇轴、涡轮轴等重要部件,其化学成分见表 1。

表 1 材料化学成分 (wt%)

Tab.1 Chemical composition (wt%)

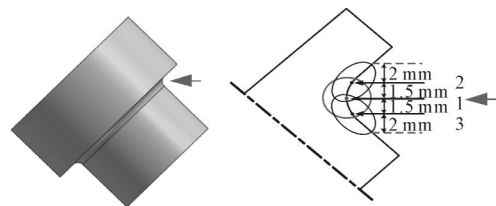
	C	Cr	Ni	W	Mo	V	Mn	Si	P	S
1Cr11Ni2W2MoV	0.1-0.16	10.5-12.0	1.4-1.8	1.5-2.0	0.35-0.5	0.18-0.30	<0.6	<0.6	<0.03	<0.02

激光冲击强化在 YD-60-M165 激光冲击强化设备上进行了试验。选择激光能量为 7.24~11.3 J,光斑直径为 2~4 mm,脉宽为 20 ns,脉冲频率为 2 Hz。

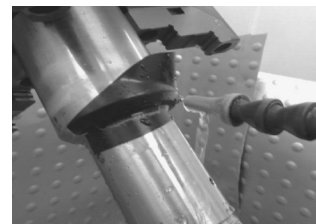
对于应力集中程度大的圆弧中心采用垂直冲击,对于应力集中程度较低的圆弧与小轴和凸台过渡区采用斜冲击,激光束与轴成 45° 夹角,光斑搭接如图 1(a)所示。

斜冲击时,光斑投影为椭圆,功率密度降低,由于圆角截面曲率较大,吸收保护层采用塑性和韧性较好的黑色胶带。夹具采用 6 自由度机器人,能够满足复杂形状部件的激光冲击强化,如图 1(b)所示。

残余应力测试采用芬兰 Xstress3000 XRD 应力测试仪。测试方法为:沿风扇轴过渡圆角每隔 1 mm 的弧长取一个点,共选择 7 个点,如图 2 所示。测量方法采用侧倾固定 Ψ 角法,其管电压为 25 kV,管电流为 7 mA, $CrK\alpha$ 辐射,准直管直径为 1 mm,阶梯扫



(a) 激光束入射方向和光斑搭接示意图
(a) Incident direction and spot overlapping



(b) 风扇轴激光斜冲击
(b) Oblique LSP

图 1 风扇轴激光冲击强化示意图

Fig.1 Schematic diagram of laser shock processing

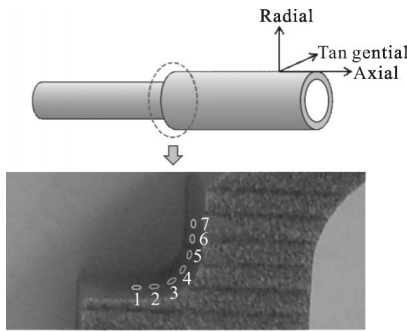


图 2 残余应力测试点示意图

Fig.2 Residual stress testing point

描步进角为 0.1° , 时间常数为 0.5 s , 扫描起始角及终止角分别为 164° 和 145° , 侧倾 Ψ 角取 $0^\circ\sim 45^\circ$, 衍射晶面为 (211), 应力常数 $K_1 = -318\text{ MPa}/^\circ$ 。在围绕风扇轴一圈平均选取 10 个位置, 测得 10 组数据求平均值。得到残余应力分布曲线。

采用 Duramin-10 型全自动显微硬度计测量显微硬度, 将试验后的风扇轴切割制备显微硬度试样, 测量试件自外边缘至轴心部的显微硬度, 载荷为 200 g , 加载时间为 15 s 。

2 斜冲击模型

斜冲击激光诱导等离子冲击波形成过程与垂直冲击一样, 在短脉冲(几十纳秒)、高功率密度 ($>109\text{ W}/\text{cm}^2$) 的激光辐照下, 金属表面涂覆的吸收保护层吸收激光能量并发生爆炸性气化蒸发, 产生高温 ($>107\text{ K}$)、高压 ($>1\text{ GPa}$) 的等离子体, 而由于离子体的迎光性, 其膨胀方向是由密度、速度大的位置向密度、速度小的位置传播。由于激光入射角与工件表面法线成一定角度(如图 3 所示), 同时, 等离子相应地倾斜、反激光方向膨胀, 施与靶面一动量脉冲, 产生一高压冲击波传向工件内部^[6-7], 利用冲击波的力

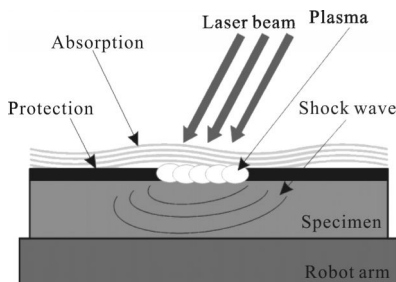


图 3 斜激光冲击模型

Fig.3 Oblique LSP model

学效应在材料表层产生塑性变形, 使表层材料微观组织发生变化, 并在较深的厚度上残留压应力, 从而显著提高金属疲劳寿命。

激光斜冲击过程中, 由于材料表面约束层的反射与折射作用, 导致激光光斑投影到试件表面的形状由圆形变成椭圆形, 投影面积发生变化。而又由于激光能量守恒, 造成激光能量密度发生变化。这种变化根据布格—拉姆别尔定律变化公式可得^[8]:

$$I(x) = I_1 A e^{-\int_0^x \beta(x) dx} \quad (1)$$

式中: I_1 为斜入射到材料表面的激光能量密度; A 为材料的吸收能力, $A = 1 - R$ (R 为反射率); $\beta(x)$ 为激光在介质中的吸收系数 (x : 从材料表面向内为正)。

其中 $I_1 = \frac{I_0 \pi R^2}{\pi ab}$, R 为激光光斑的半径, a 、 b 为激光光斑投射到冲击面时的椭圆光斑的长轴和短轴, I_0 为垂直入射到材料表面的激光能量密度。

当激光诱导等离子体冲击波大于靶材许贡纽弹性极限 (HEL) 时, 材料表面发生塑形变形。根据 Johnson^[9] 给出的许贡纽弹性极限计算公式:

$$HEL = \frac{(1-\nu)\sigma_Y^{dyn}}{(1-2\nu)} \quad (2)$$

式中: ν 为材料泊松比; σ_Y^{dyn} 为材料高应变率下的动态压缩屈服强度。而钢材的动态屈服强度可由公式(3)所得:

$$\frac{\sigma_Y^{dyn}}{\sigma_Y^s} = 8.84 - 2.42 \lg \sigma_Y^s \quad (\text{MPa}) \quad (3)$$

经计算可到 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢的动态屈服强度为 1.5 GPa , 许贡纽弹性极限 (HEL) 弹性极限约为 2.3 GPa 。根据 Fabbro 等人^[10] 提出的激光功率密度与等离子体冲击波压力峰关系式, 确定材料的激光功率密度范围。

$$P(\text{GPa}) = 0.01 \sqrt{\frac{a}{2a+3}} \sqrt{Z} \sqrt{I_0} \quad (4)$$

通过计算可得材料冲击波阈值为 $2.5\text{ GW}/\text{cm}^2$, 考虑到约束层的光学击穿, 确定激光功率密度范围为 $2.5\sim 10\text{ GW}/\text{cm}^2$, 相应的激光能量为 $6.28\sim 11.3\text{ J}$ 。

选择激光能量为 8 J , 光斑直径为 4 mm , 脉宽为 20 ns , 脉冲频率为 2 Hz 。激光功率密度为 $3.2\text{ GW}/\text{cm}^2$ 。

3 试验结果与分析

3.1 残余应力

经过激光强化处理后,材料表面具有残余应力影响层,通过降低裂纹扩展平均速率提高疲劳性能。试验试件的残余应力测试点与应力测试所得数据如图 2、4 所示。在激光斜冲击后,由于激光诱导等离子体冲击波作用于下冲击波作用下,产生单轴压应力,和平行于材料表面的平面内的拉应力。同时,受冲击的体积产生塑性应变并受到体积周围金属材料的“挤压”,为了反抗由此应变产生的体积变化,会在平行于冲击表面的平面内产生双轴压应力场。

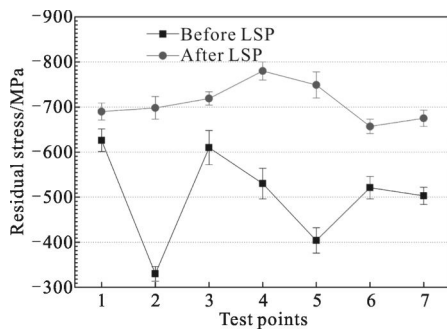


图 4 冲击前后应力测试结果
Fig.4 Stress test before and after LSP

由图可知,圆角中心区域(3、4、5 点,即应力集中区)残余压应力提高较大,达到 700~800 MPa;过渡圆角附近的应力场变得均匀,为 650~700 MPa。激光冲击后残余应力改变有两方面:一是改善了未处理圆角应力分布的不均匀性,二是相对于未冲击区域,残余压应力得到了提高,而残余压应力的提高对于提高材料的抗磨损能力、疲劳寿命等力学性能都是有利的。因此激光冲击强化后的残余压应力分布,能够较好地抵消风扇轴工作过程中在圆角区域产生的应力集中,提高风扇轴最薄弱处的疲劳抗力。

3.2 显微硬度

硬度是材料的一个综合物理量,表示金属材料在一个小的体积范围内抵抗弹性变形、塑性变形或破断的能力。对风扇轴材料试样进行显微硬度测试结果如图 5 所示。由图可知,激光冲击强化的影响深度超过 0.7 mm,在试件表层的显微硬度相对于未强试件,提高了近 11%。但是,当深度超过 0.7 mm 后硬度的提高并不明显。这是由于激光诱导等离子体

冲击波直接作用于材料最外层,材料表面以超高应变率(10^7s^{-1})发生塑形变形,产生高密度位错运动,晶体逐步细化产生硬度影响层。随着冲击波的逐步减弱,材料深部的塑性变形减小,相应地硬度变化不明显。显微硬度的提高说明了部件内部晶体结构发生变化,位错密度增加,从而减少晶体滑移的产生,改善材料性能,提高疲劳性能^[1]。

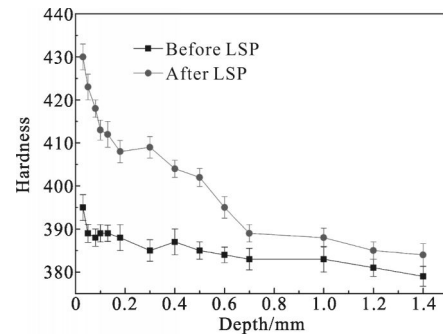


图 5 冲击前后材料截面显微硬度变化曲线
Fig.5 Micro-hardness as function of depth before and after LSP

3.3 旋转弯曲疲劳试验和断口分析

3.3.1 疲劳试验

旋转弯曲疲劳试验采用悬臂式弯曲疲劳试验机,依据“GB/T4337-2008”标准,在室温空气介质环境下进行旋弯疲劳实验,转速为 3 500 n/min,载荷 700 MPa,应力比为-1。检测执行 HB5152-96 标准。疲劳弯曲试验取三组试验件对比,并取平均值进行比较,试验结果如图 6 所示。

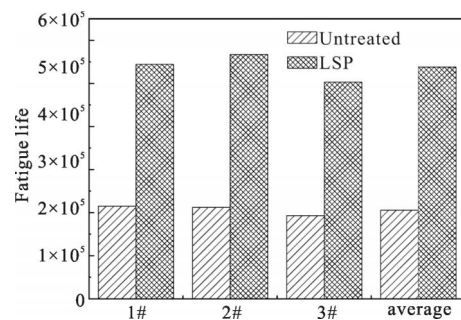
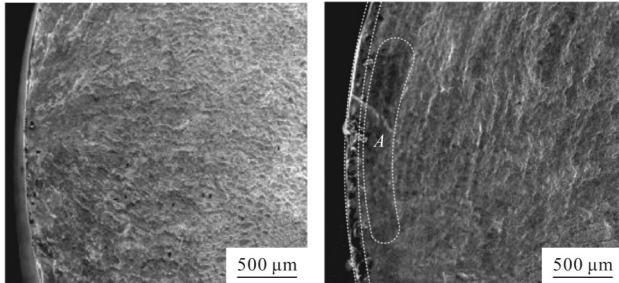


图 6 旋转弯曲疲劳试验数据
Fig.6 Rotary bending fatigue experiment results

由图 6 所知,原始状态平均循环次数为 2.06×10^5 ,激光冲击强化试样的平均循环次数是 5.38×10^5 ,激光冲击强化将风扇轴的旋转弯曲疲劳寿命提高了 160%,验证了激光冲击强化能有效提高风扇轴疲劳特性。

3.3.2 断口分析

采用 JSM-7001F 型热场发射扫描电子显微镜对断口进行扫描分析, 激光冲击强化前后疲劳裂纹源区和扩展区如图 7 所示。

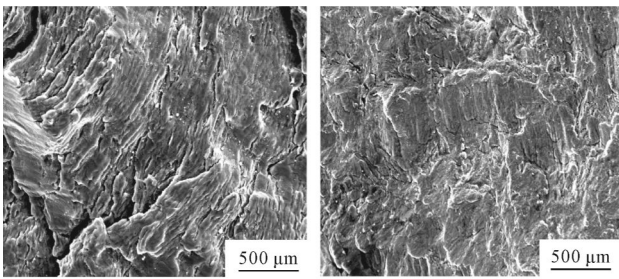


(a) 未激光冲击强化试样 (a) Untreated sample
(b) 激光冲击强化试样 (b) Sample after LSP

图 7 断口疲劳裂纹源区和扩展区

Fig.7 Fracture fatigue crack source area and the expansion area

激光冲击强化前后疲劳试样断裂源如图 8 所示, 原始试样疲劳断裂纹由试样的表面产生。疲劳裂纹均萌生于光滑试样表面或者表面的铸造缺陷处。从图 8 可知, 从裂纹源到瞬断区, 疲劳裂纹条纹花样可以看出裂纹扩展路径没有任何阻碍。激光冲击强化试样在扩展区的疲劳条纹较多, 使得疲劳裂纹扩展需要消耗更多的能量, 裂纹扩展时间更长。



(a) 未激光冲击强化试样 (a) Untreated sample
(b) 激光冲击强化试样 (b) Sample after LSP

图 8 扩展区疲劳条纹

Fig.8 Expansion fatigue crack source area

与原始试样相比, 经激光冲击处理后的疲劳源由试样表面转移到次表面层, 如图 8(b) 所示, 在裂纹扩展开始阶段, 有一个衬度较深的光滑区域(如图 8b 中的 A 区所示), 说明裂纹在该区域扩展缓慢。由于裂纹扩展过程中, 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。因此在激光冲击处理过的试件残余压应力

层存在载荷, 大大降低了裂纹扩展速率, 提高了疲劳性能。

4 结论

文中针对航空发动机风扇轴断裂故障, 对风扇轴转接圆角应力集中处进行了激光斜冲击试验研究, 结论如下:

(1) 激光冲击强化处理风扇轴材料 1Cr11Ni2W2MoV 试件, 在材料表面 0.7 mm 深度内, 显微硬度提高了 11%; 冲击处理后, 应力集中区的残余压应力为 700~800 MPa, 过渡圆角附近的应力场变得均匀, 为 650~700 MPa, 有效改善了残余应力分布不均匀性。

(2) 旋转弯曲试验结果表明激光冲击强化处理过后的试件较原始试件旋转弯曲疲劳寿命提高了 160%。激光冲击强化后形成的残余压应力层, 降低了裂纹的扩展速率, 特别是材料表层的裂纹扩展速率, 断口形貌中表层衬度较深的裂纹扩展缓慢区域与表层残余压应力有关, 残余压应力对旋转弯曲疲劳寿命的提高有重要作用。

参考文献:

- [1] Li Jing, Li Jun, He Weifeng, et al. Microstructure and mechanical properties of TC17 titanium alloy by laser shock peening with different impacts [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 2889-2895. (in Chinese)
李靖, 李军, 何卫峰, 等. TC17 钛合金激光多次冲击强化后组织和力学性能研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(9): 2889-2895.
- [2] Zhang Yongkang, Zhang Leihong, Zhou Jianzhong, et al. Oblique angle laser shock experiment and theoretic analyse[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(10): 1437-1440. (in Chinese)
张永康, 张雷洪, 周建忠, 等. 激光斜冲击实验与理论研究[J]. 中国激光, 2005, 32(10): 1437-1440.
- [3] Lu Jinzhong, Sun Yifei, Zhang Leihong, et al. Effect of oblique laser shock processing on fatigue strength of S1100 crankshaft [J]. *Journal of Agriculture Mechanics*, 2007, 38(11): 167-169. (in Chinese)
鲁金忠, 孙益飞, 张雷洪, 等. 激光斜冲击对 S1100 型曲轴疲劳强度的影响[J]. 农业机械学报, 2007, 38(11): 167-169.
- [4] Yang Chunhui, Peter Damian Hodgson, Liu Qianchu, et al.

- Geometrical effects on residual stresses in 7050-T7451 aluminum alloy rods subject to laser shock peening [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 201: 303-309.
- [5] Jeffrey L D, Allan H C, Steven M T. Oblique angle laser shock processing: US, EP0861917[P]. 1998-07-16.
- [6] Ren Xudong, Zhang Tian, Jiang Dawei, et al. Effects of laser shock processing and aluminizing on microstructure and properties of 12CrMoV alloy [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(2): 241-244. (in Chinese)
任旭东, 张田, 姜大伟, 等. 激光冲击与渗铝复合对 12CrMoV 组织性能的影响 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40 (2): 241-244.
- [7] Wang Lili. Advanced on Shock Dynamic[M]. Hefei: Press of National University Defense Technology, 1985, 5: 277-300. (in Chinese)
王礼立. 冲击动力学进展[M]. 合肥: 国防科学技术大学出版社, 1985, 5: 277-300.
- [8] Zhou Jianzhong. Study on the characteristics and deformation mechanism of sheet metal by laser shock forming loading [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2003.
周建忠. 金属板料激光冲击成型加载机制及变形特性研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2003.
- [9] Johnson J N, Rohde R W. Dynamic deformation twinning in shock-loaded iron[J]. *Journal of Applied Physics*, 1971, 42: 4171.
- [10] Fabbro R, Fournier J, Ballard P, et al. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry [J]. *Journal of Applied Physics*, 1990, 68: 775-784.
- [11] Kong Dejun, Zhou Chaozheng, Wu Yongzhong. Mechanism on residual stress of 304 stainless steel by laser shock processing[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(4): 736-740. (in Chinese)
孔德军, 周朝政, 吴永忠. 304 不锈钢激光冲击处理后的残余应力产生机理 [J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(4): 736-740.