

文章编号: 0258-7025(2010)07-1898-05

# 涡轮叶片榫槽部位激光冲击强化试验研究

何卫锋 李应红 李启鹏 李伟 周磊

(空军工程大学工程学院, 陕西 西安 710038)

**摘要** 为了实现某镍基高温合金涡轮叶片榫槽结构复杂部位的激光冲击强化(LSP),进行了不同激光脉冲能量下某涡轮叶片材料 K417 的激光冲击强化试验,分析了强化参数对材料表面粗糙度、显微硬度和微观组织的变化规律,确定了该材料激光冲击强化工艺参数;并通过振动疲劳对比试验研究了激光冲击强化对材料模拟试件疲劳性能的影响。结果表明,激光冲击强化对材料表面粗糙度影响不大,能提高表层材料显微硬度,影响深度达 0.7 mm 以上;强化后表层材料的 X 射线衍射峰宽化明显,位错密度增加,激光冲击强化提高榫槽模拟试件疲劳寿命达 67%。

**关键词** 激光技术;激光冲击强化;振动疲劳;显微组织

**中图分类号** TG665;V216.3

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL20103707.1898

## Experimental Research on Laser Shock Peening of Ni-Based Superalloy

He Weifeng Li Yinghong Li Qipeng Li Wei Zhou Lei

(Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China)

**Abstract** In order to improve the fatigue strength of the blade, the Ni-based superalloy laser shock peening (LSP) parameters and method are researched. After laser shock peening on the Ni-based superalloy (K417), the surface roughness, micro-hardness, and microscopic structure are analyzed, and the parameters are determined for LSP. Then the fatigue performance is tested by means of vibration fatigue test adopting the samples with the same groove in a turbine blade. The results indicate that LSP changes the surface roughness lightly, but increases the micro hardness evidently and the depth affected by LSP is up to 0.7 mm. The breadth at half height of the X-ray diffraction peak after LSP indicates that the plastic deformation occurs in the LSP part, and the dislocation density and micro-residual stress increase, which are advantageous to the fatigue performance. The vibration fatigue tests prove that the fatigue life with LSP is 1.67 times longer than that without LSP.

**Key words** laser technique; laser shock peening; vibration fatigue; microscopic structure

## 1 引 言

激光冲击强化(LSP)是一种金属材料表面强化技术,通过激光诱导的冲击波在材料表面引起塑性变形,残留较大的压应力,同时微观组织发生变化,显著提高材料的抗疲劳、耐磨损和防应力腐蚀等性能<sup>[1~3]</sup>。美国对激光冲击强化技术进行了多年的研究,已经在航空航天等领域得到了工业应用,如对 F101, F110, F119 等发动机叶片的激光冲击强化,产生了很大的经济效益。美国激光冲击强化多采用钜玻璃激光器,其脉冲能量很大,对设备要求较高。国内研制的激光冲击强化系统也都是基于钜玻璃的大功率脉冲激光器,对铝合金、不锈钢等金属材料进行了相关研究<sup>[4~7]</sup>,脉冲能量最高达到 50 J,但是其

能量稳定性差,重复频率较低,工作效率低下<sup>[8]</sup>。且这些设备的光斑直径在 3 mm 以上,对于一些尺寸很小(1 mm 量级)、曲率变化较大的疲劳薄弱部位(如发动机叶片榫槽等),都难于处理。空军工程大学针对叶片榫槽等复杂结构,提出采用技术成熟的 Nd:YAG 激光器对尺寸小的部位进行强化<sup>[9]</sup>,重点考虑小光斑搭接冲击与过渡区的布置,以及强化效果考核等。

K417 材料是一种铸造镍基高温合金,常用于航空发动机涡轮叶片,针对其榫槽部位由于高频疲劳容易出现的裂纹故障,本文采用电光调 Q 脉冲 Nd:YAG 固体激光器对 K417 材料进行激光冲击强化,首先通过试验研究了低能量、小光斑激光冲击强化

收稿日期:2009-10-15;收到修改稿日期:2009-11-06

基金项目:国防预研基金(5132701)资助课题。

作者简介:何卫锋(1977—),男,博士,讲师,主要从事激光冲击强化技术及其应用的研究。E-mail:hehe\_coco@163.com

对 K417 材料表面粗糙度、显微硬度、微观组织的影响,确定了合适的激光冲击强化参数;其次对叶片榫槽部位强化激光能量及其搭接方式进行了合理布置;在叶片榫槽模拟试件上进行了激光冲击强化,并对该模拟试件进行了振动疲劳试验,实现了叶片榫槽部位的激光冲击强化。

## 2 激光冲击强化参数

当高能脉冲激光照射金属材料表面时,吸收保护层吸收激光能量,形成高强度的冲击波作用在材料表面,通过波的力学效应改善材料的性能。因此,激光诱导冲击波峰值压力和持续时间对强化效果有决定性作用。根据激光诱导冲击波峰值压力模型,计算了 K417 材料所需的激光能量阈值。

R. Fabbro 等<sup>[10,11]</sup>通过研究提出了激光冲击强化过程中激光与材料的相互作用、残余应力产生机理和一维冲击波传播模型,激光诱导等离子体厚度和冲击波压力的简化模型为

$$P = 10^{-2} [\alpha Z I_0 / (2\alpha + 3)]^{1/2}, \quad (1)$$

$$L = 2 \times 10^5 P \tau Z^{-1}, \quad (2)$$

式中  $Z = 2 / (1/Z_1 + 1/Z_2)$  为由约束层材料 ( $Z_1$ ) 和靶材 ( $Z_2$ ) 形成的系统声阻抗,  $\alpha$  为等离子体热能和内能的比值,  $P$  为冲击波压力,  $L$  为等离子体厚度,  $I_0$  和  $\tau$  分别为激光功率密度和脉冲宽度。

冲击波引起材料的高应变率变形,在材料表层引起微观组织变化,残留较大的压应力,从而提高材料的硬度和抗疲劳等机械性能,当冲击波压力大于金属材料的 Hugoniot 弹性极限,且满足  $P = 2 \sim 2.5H$  的关系条件时,冲击强化效果较好<sup>[12]</sup>,  $H = (1-\nu)/(1-2\nu)\sigma_y$  为材料的 Hugoniot 弹性极限,其中  $\nu$  为材料泊松比,  $\sigma_y$  为材料静态屈服强度。

研究表明,当 532 nm 激光的功率密度为 6 GW/cm<sup>2</sup> 时,在水中产生的峰值冲击波压力可达 5 GPa<sup>[13]</sup>,且波长为 532 nm 的激光在水中具有比 1064 nm 激光更低的吸收率,可以满足 K417 材料激光冲击强化要求。因此,采用波长为 532 nm 的 Nd:YAG 激光器对 K417 材料进行强化,其脉冲能量可调,最大为 2.5 J,脉宽 10 ns,根据榫槽结构确定光斑直径  $\phi 1.5$  mm。K417 材料的静态屈服强度  $\sigma_y$  为 760 MPa,计算确定强化所需激光能量阈值为 0.54 J。因此,在 0.5~2.5 J 能量范围内对材料进行试验,研究不同能量对表面粗糙度、显微硬度和微观组织的影响,最终确定其强化参数。

## 3 材料试验研究

试验装置如图 1 所示。待强化试件厚度为 5 mm,长度和宽度均为 30 mm,试样表面进行了机械抛光处理,并固定在三轴工作平台上(运动速度 0.01~10 mm/s,重复定位精度为 0.05 mm),通过改变  $z$  方向激光器与试件的距离来调节光束的聚焦。设定试件待处理表面为 ( $x$ - $y$ ) 平面内 20 mm × 20 mm 的区域,其中 15 mm × 15 mm 区域作为主能量区进行强化,周围 5 mm 的区域为过渡区,采用能量逐步降低 (30%~50% 主能量) 的方法进行处理,如图 2 所示。

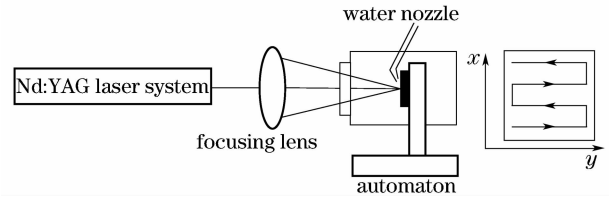


图 1 激光冲击强化试验装置

Fig. 1 Experimental sets for LSP

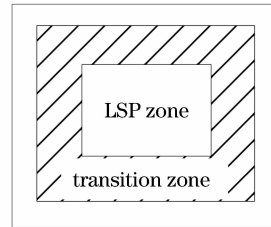


图 2 强化区与过渡区设置

Fig. 2 Laser peening zone and transition zone

试验采用波长为 532 nm 的低能量调 Q 脉冲 Nd:YAG 激光器,重复频率为 1 Hz,激光脉冲能量可以从 0.5~2.5 J 进行调节。在强化过程中,试件在 ( $x$ - $y$ ) 平面内以 0.4 mm/s 运动,使激光光斑的搭接率为光斑直径的 75%。

### 3.1 粗糙度

激光诱导爆轰波作用在材料表面时,激光冲击部位将会发生塑性变形,产生微小的凹坑,不同的激光脉冲能量,对材料表面粗糙度有不同的影响。调节脉冲激光器能量,依次设为 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 和 2.5 J,对 K417 材料表面进行激光冲击强化,测量其粗糙度并和未强化表面进行对比,不同能量下粗糙度的最大和最小值如图 3 所示。实验表明脉冲能量越大,冲击形成的微凹坑深度越大,粗糙度有增加趋势。

在脉冲能量为 2.0 J 情况下,激光冲击强化和喷丸对 K417 材料表面轮廓和粗糙度的对比如图 4

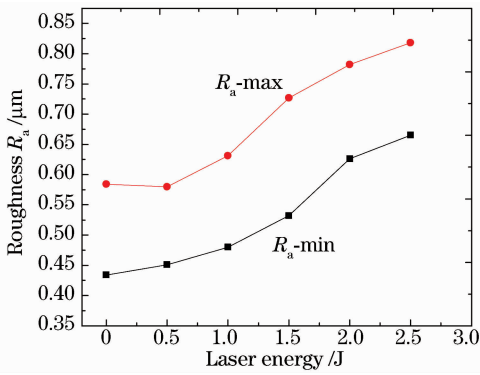


图 3 不同激光能量对材料表面粗糙度的影响  
Fig. 3 Surface roughness of K417 material with different energies in LSP

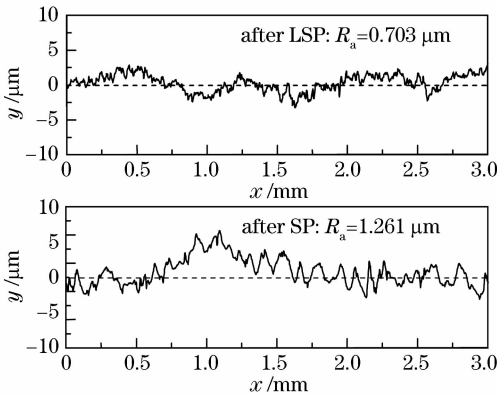


图 4 激光冲击强化和喷丸表面粗糙度对比  
Fig. 4 Surface roughness after LSP and SP

所示。原始表面粗糙度  $R_a$  为  $0.501 \mu\text{m}$ ，激光冲击强化后  $R_a$  稍有增加 ( $0.703 \mu\text{m}$ )，但比喷丸 (SP) ( $0.3 \text{ A}$ ) 后表面的粗糙度要小 ( $R_a$  为  $1.261 \mu\text{m}$ )。

### 3.2 显微硬度

分别从前文不同参数激光冲击强化后的材料中切割一部分，进行镶嵌、粗磨、细磨、抛光和腐蚀，制备出金相试样，进行深度方向的显微硬度测试，结果如图 5 所示。

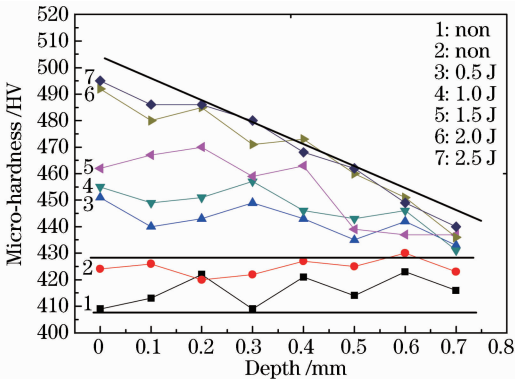


图 5 激光冲击后显微硬度与深度的关系  
Fig. 5 Micro-hardness with different energies in LSP

从图 5 可知，未经激光冲击强化试件显微硬度在  $410 \sim 430 \text{ HV}$  之间，在深度方向分布均匀；经过激光冲击强化以后表面显微硬度值明显提高，且激光能量越大硬度有增大趋势，能量大于  $2.0 \text{ J}$  时硬度值变化不大；强化后材料硬度影响深度可达  $0.7 \text{ mm}$  以上。

### 3.3 微观组织

材料的疲劳性能决定于晶体滑移的难易，晶体的滑移又决定于材料的屈服强度，而屈服强度又决定于材料的组织结构，主要包括晶粒尺寸、亚晶粒尺寸、晶体的位错结构、晶体晶格畸变(微观应力)等。根据 Hall-Petch 关系<sup>[14]</sup>， $\sigma = \sigma_0 + kd^{-0.5}$ ，材料的强度与晶粒大小密切相关，式中  $\sigma$  为  $0.2\%$  的屈服强度， $d$  为晶粒尺寸， $\sigma_0$  为移动单个位错的晶格摩擦力， $k$  称为 H-P 强度常数。因此材料的微观组织结构是影响其疲劳性能的内在因素。

由于 K417 材料具有较粗大的枝晶组织，X 射线残余应力分析误差较大，电镜或扫描电镜下难以观察到强化后晶粒形态的变化，而 X 射线谱线衍射半峰全宽取决于组成材料晶粒的亚晶粒尺寸大小 ( $D$ ) 与晶体点阵畸变程度 ( $\Delta a/a$ ， $a$  为晶体点阵常数)，能得到材料的  $D-\Delta a/a$  定量结果，可以给出强化后点阵畸变程度、塑性变形程度、亚晶粒细化量级等相对结果。采用 X 射线衍射方法对激光冲击强化后表层材料进行分析。晶体 (220) 原子面的 X 射线衍射谱线半峰全宽 ( $\beta$ ) 测量结果如表 1 所示，衍射峰宽化明显，说明表层材料产生了较大的塑性变形，位错密度增加，晶粒发生细化，微观残余应力增大<sup>[15]</sup>，有利于提高材料的疲劳强度。

表 1 X 射线衍射峰半峰全宽测量值

Table 1 Full width of half-maximum of the diffraction peak at different laser energies

Number	Laser energy / J	Mean value of $\beta / (^\circ)$
1	0.0	2.585
2	1.0	2.698
3	1.0	2.708
4	1.5	2.838
5	1.5	2.921
6	2.0	3.233
7	2.0	3.185

## 4 振动疲劳试验

根据对材料表面粗糙度、显微硬度和微观组织的测试分析结果，选择 K417 激光冲击能量为  $2.0 \text{ J}$ ，

此时材料具有好的强化效果,且对表面粗糙度影响不大。

叶片榫槽处由于结构不连续导致应力集中,是结构的薄弱部位,在使用过程中容易出现疲劳断裂。为了研究激光冲击强化对沟槽部位疲劳性能的影响,设计了某涡轮叶片榫槽部位的模拟试件,如图 6 所示,其材料为 K417。

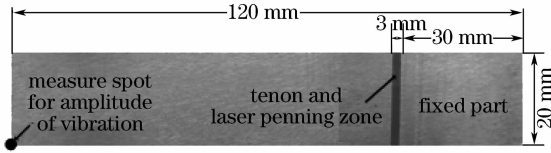


图 6 某涡轮叶片榫槽振动疲劳模拟试件

Fig. 6 Vibration fatigue sample with the same groove in a turbine blade

由于激光冲击强化是单点强化方式,光斑较小时单脉冲处理面积很小,强化区域一般需要若干个光斑搭接冲击,过渡区布置和精确控制是确保强化效果的重要因素。有研究表明,激光冲击强化使得材料表面残余应力分布具有一定的不一致性和不均匀性<sup>[16]</sup>;同时,由于槽底面积很小,若采用相同的激光功率密度进行处理,在槽底上下边缘倒圆处容易形成应力突变和应力集中。通过在边缘设置过渡区的方法来消除应力突变和应力集中。具体方法是,在槽中心区使用 2.0 J 能量,在过渡区降低功率密度采用 1.0 J 能量进行冲击强化,如图 7 所示。

表 2 模拟试件振动疲劳试验结果

Table 2 Vibration fatigue experiment results

Sample classes	Number	Frequency /Hz	Vibration fatigue life /( $10^6$ N)	Average of fatigue life /( $10^6$ N)
Without LSP	1	297	3.26	2.21
	2	304	1.99	
	3	292	1.39	
	4	295	2.20	
LSP	1	299	4.50	3.69
	2	301	2.99	
	3	296	3.60	
	4	292	3.67	

从疲劳试验结果可知,激光冲击强化后模拟试件的平均疲劳寿命由  $2.21 \times 10^6$  N 增加到了  $3.69 \times 10^6$  N,提高了 67%。试验后对试件槽附近进行染色探伤,发现未激光冲击强化试件的槽内及槽两侧均存在大量裂纹,而强化过的试件槽内无裂纹,只在未进行强化的槽两侧存在裂纹,说明激光冲击强化对抑制裂纹萌生效果非常明显。该工艺方法

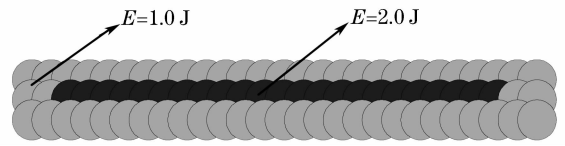


图 7 榫槽强化区和过渡区能量布置示意图

Fig. 7 Schematic of energy distribution in laser peening zone and transition zone

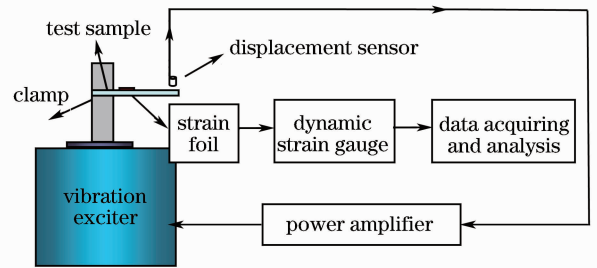


图 8 疲劳试验系统连接示意图

Fig. 8 Schematic of vibration fatigue experiment system

将试件通过夹具夹持并固定在电磁振动台上,先调节夹具的位置,使一阶弯曲节线基本位于槽内,确定夹持的位置,然后采用常温下的一阶弯曲振动进行疲劳试验,试验系统的安装及连接如图 8 所示。

由于槽底部位空间小,应变片粘贴困难,因此采用振幅控制的方法进行试验,在远离槽底部位粘贴应变片,进行振动监控。通过前期试验摸索后确定正式试验的尖端振幅为 2.2 mm。对有无激光冲击强化各 4 件模拟试件进行疲劳对比试验,试验结果如表 2 所示。

可以实现涡轮叶片榫槽部位激光冲击强化。

## 5 结 论

1) 强化参数为脉冲能量 2.0 J,光斑直径 1.5 mm 条件下,激光冲击强化能有效提高 K417 材料疲劳寿命,模拟试件的振动疲劳对比试验表明,激光冲击强化可以提高沟槽试件疲劳寿命达 67%。

2) 激光冲击强化对 K417 材料表面粗糙度影响不大,能提高 K417 材料显微硬度,影响深度达 0.7 mm;强化后 X 射线衍射峰宽化明显,使表层材料产生了较大的塑性变形,位错密度增加,微观残余应力增大,改善材料微观组织,这是激光冲击强化提高材料疲劳强度的原因。

### 参 考 文 献

- 1 M. Gerland, M. Hallouin, H. N. Presles. Comparison of two new surface treatment processes, laser induced shock waves and primary explosive; application to fatigue behavior [J]. *Mat. Sci. Eng. A*, 1992, **156**(2):175~182
- 2 J. M. Yang, Y. C. Her, N. Han *et al.*. Laser shock peening on fatigue behavior of 2024-T6 Al alloy with fastener holes and stop holes [J]. *Mat. Sci. Eng. A*, 2001, **298**(1-2):296~299
- 3 P. Peyre, R. Fabbro. Laser shock processing: a review of the physics and applications [J]. *Opt. Quantum Electron.*, 1995, **27**(12):1213~1229
- 4 Zou Shikun, Tan Yongsheng, 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
- 5 Cao Ziwen, Zou Shikun, Liu Fangjun *et al.*. Laser shock processing on 1Cr11Ni2W2MoV martensite steel [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2):316~320  
曹子文,邹世坤,刘方军等. 激光冲击处理 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2):316~320
- 6 Hua Yinqun, Chen Ruifang, Lu Miao *et al.*. Study on the experiment of 40Cr steel by laser shock processing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(4):495~498  
花银群,陈瑞芳,路淼等. 激光冲击强化处理 40Cr 钢的实验研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(4):495~498
- 7 Zhang Yongkang, Chen Jufang, Xu Renjun. Experimental research of laser shock strengthening AM50 magnesium alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7):1068~1072  
张永康,陈菊芳,许仁军. AM50 镁合金激光冲击强化实验研究[J]. *中国激光*, 2008, **35**(7):1068~1072
- 8 Li Wei, Li Yinghong, He Weifeng *et al.*. Development and application of laser shock processing [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(12):15~19  
李伟,李应红,何卫锋等. 激光冲击强化技术的发展和应  
用[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(12):15~19
- 9 Li Wei, He Weifeng, Li Yinghong *et al.*. Effects of laser shock processing on vibration fatigue properties of K417 material [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8):2197~2201  
李伟,何卫锋,李应红等. 激光冲击强化对 K417 材料振动疲劳性能的影响[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8):2197~2201
- 10 R. Fabbro, J. Fournier, P. Ballard *et al.*. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry [J]. *J. Appl. Phys.*, 1990, **68**(2):775~784
- 11 R. Fabbro, P. Peyre, L. Berthe *et al.*. Physics and applications of laser-shock processing [J]. *J. Laser Appl.*, 1998, **10**(6):265~279
- 12 P. Peyre, R. Fabbro, P. Merrien *et al.*. Laser shock processing of aluminium alloys: Application to high cycle fatigue behaviour [J]. *Mat. Sci. Eng. A*, 1996, **210**(1-2):102~113
- 13 Pal Molian, Raathai Molian, Rajeev Nair. Laser shock wave consolidation of nanodiamond powders on aluminum 319 [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2009, **255**(6):3859~3867
- 14 Wang Lei. Mechanical Property of Metals [M]. Shenyang: North East University Press, 2005  
王磊. 材料的力学性能[M]. 沈阳:东北大学出版社, 2005
- 15 Tu Hailing, Gan Yong. Physical and Chemical Properties Measurement of Metals [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007  
屠海令,干勇. 金属材料理化测试全书[M]. 北京:化学工业出版社, 2007
- 16 S. A. Martinez, S. Sathish, M. P. Blodgett *et al.*. Residual stress distribution on surface-treated Ti-6Al-4V by X-ray diffraction [J]. *Exp. Mech.*, 2003, **43**(2):141~147