

文章编号: 0258-7025(2009)08-2197-05

激光冲击强化对 K417 材料振动疲劳性能的影响

李 伟 何卫锋 李应红 汪 诚 杨卓君

(空军工程大学工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要 为研究激光冲击强化(LSP)对镍基高温合金振动疲劳强度的影响,使用流水约束层和铝箔涂层,利用波长为 532 nm,脉宽为 10 ns,能量为 1.5 J,冲击光斑尺寸为 1.6 mm 的 YAG 激光器对 K417 试件进行了激光冲击强化处理。使用升降法测试比较了冲击处理试件和未处理试件的振动疲劳强度。结果表明,试件经激光冲击强化后振动疲劳强度由 106.5 MPa 提高到 285.5 MPa,疲劳性能大大提高。对激光冲击强化后的试件断口分析结果表明激光冲击的强化作用抑制了裂纹在试件表层的萌生和扩展,从而提高了材料的振动疲劳强度。

关键词 激光技术; 激光冲击强化; 表面处理; 镍基高温合金; 振动疲劳; 冲击波

中图分类号 TG665; V216.3 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093608.2197

Effects of Laser Shock Processing on Vibration Fatigue Properties of K417 Material

Li Wei He Weifeng Li Yinghong Wang Cheng Yang Zhuojun

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

Abstract In order to study the effects of laser shock processing (LSP) on the vibration fatigue strength of nickel-based superalloy, water and aluminum foil were used for confining medium and ablation medium. K417 specimens were processed with YAG laser. With the wavelength of 532 nm, pulse duration of 10 ns, and output energy of 1.5 J. The laser was focused on a spot of $\phi 1.6$ mm. The effects of laser shock processing on the vibration fatigue strength of K417 are investigated using up-down method. The experimental results show that laser shock processing can increase K417's vibration fatigue strength from 106.5 MPa to 285.5 MPa. Fracture analysis results show that laser shock processing strengthens the metal surface and suppresses the crack's initiation and expansion. So the K417's fatigue performance is improved.

Key words laser technique; laser shock processing; surface treatment; nickel-based superalloy; vibration fatigue; shock wave

1 引 言

K417 材料属于镍基高温合金的一种,在航空工业中主要用于制造发动机工作叶片^[1]。由于航空发动机自身的工作特点,当发动机工作时,来自发动机的激振力会促使叶片作强迫振动,激振力的频率与叶片的固有频率相等时叶片就会产生共振,此时,叶片承受的交变应力的幅值可能达到危险的数值,致

使叶片疲劳断裂。大量的统计资料表明,叶片的故障大部分是由振动疲劳引起的。要解决叶片振动疲劳故障,除了可以通过调整叶片的固有频率(在叶尖上去除材料或者在叶身上加箍带)使其与激振力频率不重合外,更简单有效的办法是对叶片故障部位进行强化,提高其振动疲劳强度储备。

作为一种革命性的金属表面强化方法,激光冲

收稿日期: 2009-01-15; 收到修改稿日期: 2009-03-03

基金项目: 国防预研基金(5132701)资助项目。

作者简介: 李 伟(1982—),男,博士研究生,主要从事激光冲击强化技术及其应用等方面的研究。

E-mail: liwei53895354@126.com

导师简介: 李应红(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事航空材料表面处理以及等离子体流动控制等方面的研究。

E-mail: yinghong_li@126.com

击强化(LSP)能显著提高材料抗疲劳、磨损和应力腐蚀等性能。自从 20 世纪 70 年代美国巴特学院(B. P. Fairand 等^[2])研究了激光诱导的冲击波对材料性能的改善以来,激光冲击强化便引起国内外众多学者的关注。1994 年 12 月美国的高循环疲劳科学和技术计划开始,其目的是减少航空发动机高循环疲劳引发的故障,其中一项重要内容就是研究使用激光冲击强化技术对部件表面进行强化^[3]。近年来,LSPT 公司和 GE 公司更是在激光冲击成套设备上取得重大进展,2004 年,美国为 F22 战斗机建立了价值 2 亿美元的激光冲击强化生产线,将这项技术推向工程应用^[4,5]。在国内,中国科技大学、江苏大学、北京航空工程研究所等单位也开展了激光冲击强化铝合金、镁合金、不锈钢等材料的研究^[6~8]。但从公开的文献来看,针对激光冲击强化改善高温合金疲劳性能的很少,且目前国内外大多使用大能量(单脉冲能量 30 J 以上)的 Nd:Glass 激光器,由于 Nd:Glass 激光器在光束质量以及可靠性方面存在的固有缺陷,使得其工程应用成本高昂。本文使用国内发展较成熟的小能量、小光斑 YAG 激光器,针对 K417 材料,研究激光冲击强化对镍基高温合金振动疲劳性能的影响。

2 激光冲击强化的原理

激光冲击强化的原理如图 1 所示,当高功率的短脉冲激光通过透明约束层作用于金属表面的涂层

时,涂层吸收激光能量迅速气化并形成大量稠密的高温等离子体,该等离子体在约束层的约束下继续吸收激光能量急剧升温膨胀,然后爆炸形成高强度冲击波作用于金属表面。这种高压力学效应能使金属表面发生高应变率的塑性变形,从而改变材料表面的微观组织并产生高幅值的残余压应力,提高材料的抗疲劳、抗应力腐蚀等性能^[9,10]。

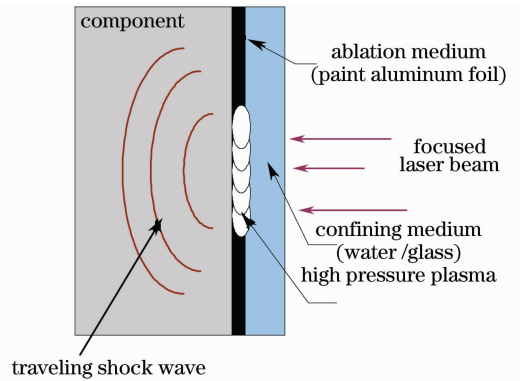


图 1 激光冲击强化原理

Fig. 1 Schematic of laser shock processing

3 振动疲劳试件的激光冲击强化

3.1 材料和试件

选用 K417 材料按照该材料所制发动机叶片的实际热处理工艺进行热处理,经线切割、打磨、抛光,加工成振动疲劳试件,共加工试件 32 片。K417 材料的化学成分如表 1 所示,试件的形状及尺寸如图 2 所示。

表 1 K417 镍基高温合金的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical ingredient of K417 nickel-based superalloy (mass fraction, %)

Co	Cr	Al	Ti	Mo	Fe
14~16	8.5~9.5	4.8~5.7	4.5~5.7	2.5~3.5	<1
C	V	Zr	Si	Mn	Ni
0.13~0.22	0.6~0.9	0.05~0.09	<0.5	<0.5	Bal.

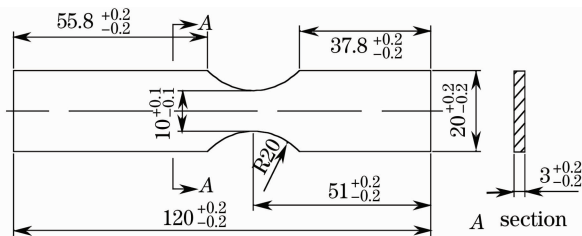


图 2 振动疲劳试件

Fig. 2 Vibration fatigue specimen

3.2 激光冲击强化设备

强化试验在空军工程大学研制的激光冲击强化系统上完成。整套系统由高功率脉冲激光器、工件

夹持运动平台以及相关的控制及监控系统 3 部分组成。其中,激光器选用空军工程大学与北京镭宝激光有限公司联合研制的 SGH-60 型 YAG 激光器。该型激光器具有光束质量好、可靠性高等特点,且可以通过 RS232 接口连接计算机进行控制。SGH-60 型激光器外观及主要参数如图 3 所示。工件夹持运动平台选用的是高精度五自由度框架式机器人,采用伺服电机驱动,精度高、响应快。监控系统可以对激光器发射激光的能量及工件的运动状态进行实时监控,并在异常时发出警告。使用编制的软件通过控制系统协调机器人的运动以及激光脉冲的发射即

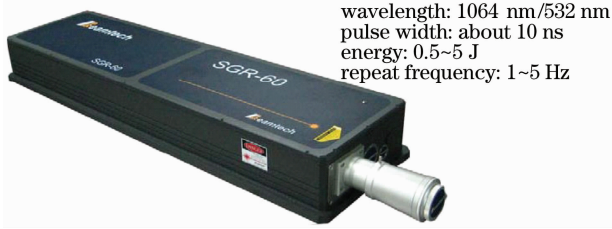


图 3 实验所用 YAG 激光器及其性能参数

Fig. 3 Laser device and its performance parameters

可完成冲击强化过程。

3.3 试验参数的选取

涂层约束层:涂层的作用主要是保护工件不被激光灼伤并增强对激光能量的吸收,目前常用的涂层材料有黑漆和铝箔等。由于黑漆很难保证涂覆均匀,涂覆后需要等待很长时间干燥,且冲击强化后的残余物不易去除,故本实验选用铝箔作为吸收涂层,厚度为 0.1 mm。约束层除了能约束等离子体的膨胀从而提高冲击波的峰值压力外,还能通过对冲击波的反射延长其作用时间。选用的约束层为流水,厚度约 2 mm。

激光波长:YAG 激光器发射的激光波长为 1064 nm,本试验利用非线性晶体在强激光作用下的二次非线性效应,将 1064 nm 的非可见激光倍频为 532 nm 的绿光。相对于 1064 nm 的激光,532 nm 的绿光可减少水对激光能量的吸收,有利于激光能量的有效利用^[11]。

激光脉宽:所用激光器脉宽约为 10 ns。

重复频率:重复频率太低则处理效率低下,但为确保能建立均匀的水约束层,冲击频率也不易过高。综合权衡,本实验选取的冲击频率为 1 Hz。

光斑大小:由于 K417 材料所制叶片的疲劳裂纹均出现在叶片榫头的榫齿部位,该部位几何形状复杂,要对该部位进行激光冲击强化必须使用较小直径的光束,为了模拟对榫齿的强化,这里选择激光

光斑直径为 1.6 mm。

激光功率密度:激光冲击的强化作用是通过激光辐照材料表面产生的冲击波,使金属表层发生塑性变形来实现的。要保证冲击强化的效果,所用的激光功率密度要足够大,这样才能使冲击波的峰值压力超过材料的动态屈服强度,从而使金属表层发生高应变率的塑性变形;但另一方面,若选择的激光功率密度过大,将会使冲击后的金属表面残留较深的冲击坑,严重影响金属的表面完整性。根据断裂力学原理,表面粗糙度值越大,切口效应就越大,即应力集中系数越大,抗疲劳性能越差。所以要选择合适的激光功率密度。结合试验确定所用激光能量为 1.5 J,在激光光斑直径为 1.6 mm,脉宽为 10 ns 的情况下,可以计算所用的激光功率密度为 7.46 GW/cm²。

冲击方式的确定:经试验测试,搭接率为 50 % 时,可在冲击后的金属表面观察到光滑均匀的微凹坑,本试验选取搭接率为 50 %。此外由于试件厚度较薄,单面冲击会使试件发生变形,试验对试件试验段的两面均进行了激光冲击强化。

3.4 K417 试件的激光冲击强化

使用以上确定的参数完成 16 片试件的激光冲击强化试验,冲击后的铝箔涂层没有发生破裂,从而有效地避免了工件表面受到激光灼伤,冲击后的铝箔形貌及局部放大图如图 4 所示。

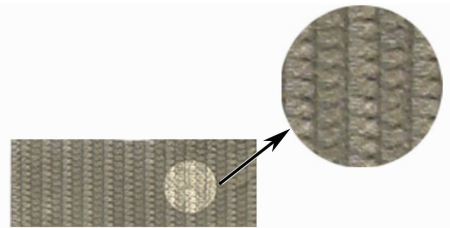


图 4 冲击后的铝箔涂层形貌

Fig. 4 Photo of Al foil after impacts

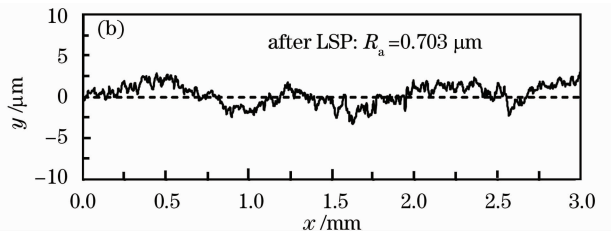
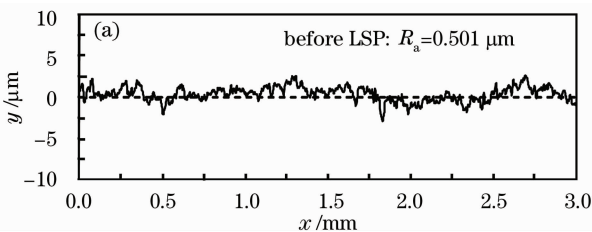


图 5 K417 材料激光冲击强化前(a)后(b)粗糙度变化

Fig. 5 Surface roughness of K417 material before (a) and after (b) LSP

去掉涂层后可以观察到激光诱导的冲击波在强化区留下光亮、均匀的微凹坑,表明所选用的激光功率密度达到了使 K417 材料发生动态塑性变形的要

求。K417 材料激光冲击强化前后表面轮廓和粗糙度的对比如图 5 所示。其中 R_a 是表征材料表面粗糙度的“轮廓算术平均偏差”可以看出使用所选参数

冲击强化对材料表面粗糙度影响较小。同时,系统监测到的激光能量数据表明激光器发射激光稳定可靠,从而保证了冲击效果的一致性。

4 振动疲劳试验

疲劳强度是表征材料与结构疲劳性能的重要参量之一,用升降法可以较一般 S-N 曲线法更准确方便地测定出疲劳强度。

规定振动的试件如果在循环次数达到 10^7 之前,激振频率累积下降 3 Hz,则实验终止并判定试件“破坏”,在升降图中用“×”表示。如果循环次数达到 10^7 ,激振频率累积下降小于 3 Hz,则试验终止并判定试件“越出”,在升降图中用“○”表示。实验应力超过给定值 10 % 的循环次数达到本次实验的 25 % 时或在试件夹持位置产生裂纹的试件作废。

首先从未冲击强化的试件中选出 6 片做参数摸底试验,以选择正式试验所用初始应力和应力级差,根据这 6 片的测试结果,确定未冲击强化试件初始应力为 110 MPa,应力级差为 5 MPa,对其余 10 片做振动疲劳试验,得出升降图如图 6 所示。

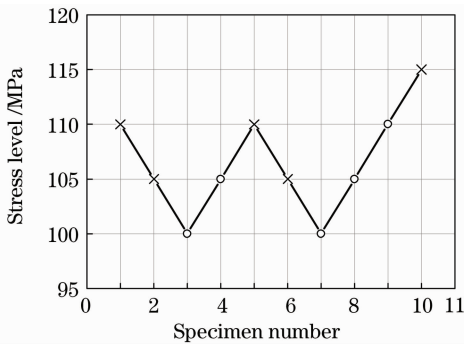


图 6 原始试件升降图($N=10^7$)

Fig. 6 Up-down graph without LSP ($N=10^7$)

可以看出,实验在 4 级应力水平下进行,试验在 2,3 点出现相反的结果,但数据 1 在后面的试验中被包括,数据可用,共有 10 个有效数据。计算原始试件的平均疲劳强度为

$$\sigma_0 = (100 \times 2 + 105 \times 4 + 110 \times 3 + 115 \times 1) / 10 = 106.5 \text{ MPa}$$

然后从冲击强化的试件中取 6 片做预备性试验,根据这 6 片的测试结果,确定激光冲击强化试件初始应力为 275 MPa,应力级差为 15 MPa。对其余 10 片做振动疲劳试验,得出升降图如图 7 所示。可以看出,试验在 4 级应力水平下进行,试验在 1,2 点出现相反的结果,共有 10 个有效数据。计算激光冲击强化后试件的疲劳强度为

$$\sigma_1 = (260 \times 1 + 275 \times 3 + 290 \times 4 + 305 \times 2) / 10 = 285.5 \text{ MPa}$$

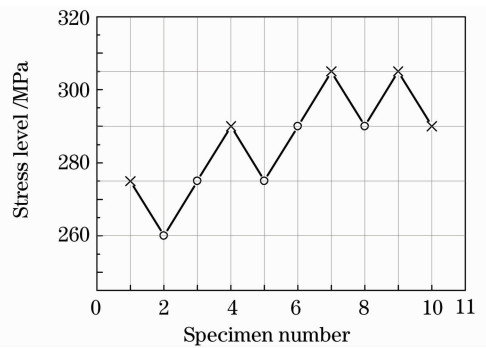


图 7 激光冲击强化试件升降图($N=10^7$)

Fig. 7 Up-down graph with LSP ($N=10^7$)

可见经过激光冲击强化之后的 K417 试件振动疲劳强度由 106.5 MPa 提高到 285.5 MPa,提高了 1.68 倍。

5 断口观察

选取振动疲劳之后的激光冲击处理试件,继续在振动台上激振,迫使其完全从试验段断裂,然后对试样断面进行扫描电镜(SEM)观察。试件的宏观

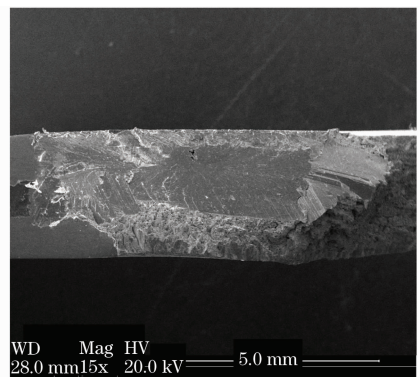


图 8 试件宏观断口

Fig. 8 Macroscopic fracture of the K417 specimen

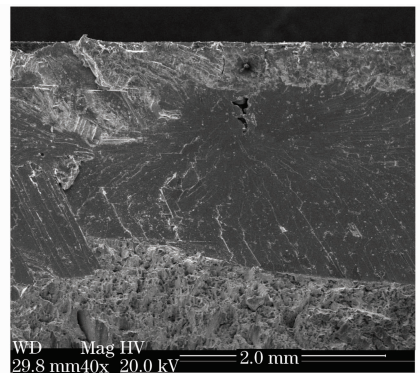


图 9 裂纹起源于试件次表层

Fig. 9 Subsurface cracks on shocked specimen

断口形貌如图 8 所示,放大后观察发现激光冲击强化后的试件裂纹源于试件的次表层,这正说明激光冲击强化对金属表层产生了明显的强化作用。由于材料在高应变率下发生的塑性变形,使得此金属表层位错密度大大增加,亚结构细化,同时残留数值较高的残余压应力,从而能够抑制裂纹的萌生和扩展,迫使裂纹从次表层萌生,如图 9 所示。

由于航空发动机零部件加工缺陷、微动磨损等产生的应力集中均位于材料表面,对金属表面进行激光冲击强化后,能显著提高其疲劳性能。

6 结 论

试验结果表明,在本文选定的工艺参数下,经过冲击强化的镍基高温合金 K417 试件的振动疲劳强度大大提高,由 106.5 MPa 提高到 285.5 MPa,提高了 1.68 倍。

目前国内输出能量 1~5 J,重复频率 1~10 Hz,脉宽 10 ns 的 YAG 激光器制造技术已经相对成熟,且这种小光斑处理方式方便处理航空发动机尺寸较小的叶片榫齿、小孔等部位,可以真正发挥激光冲击强化适应性强的优点,并且其相对较高的重复频率可以弥补由于光斑较小带来的处理效率下降的缺点,对解决困扰航空业的航空发动机叶片疲劳断裂问题的解决有一定的意义。

致谢:感谢空军工程大学工程学院飞行器与动力工程系振动实验室程礼教授和李全通副教授为本论文试验设计付出的辛勤劳动。

参 考 文 献

1 Ma Kangmin, Long Nidong. Aerial Material and the Application [M]. Xi'an: Air Force Engineering Institute Press, 1999

- 马康民,龙霓东. 航空材料及应用[M]. 西安:空军工程学院出版社,1999
- 2 B. P. Fairand, A. H. Clauer. Laser generation of high-amplitude stress waves in materials[J]. *Appl. Phys.*, 1979, **50**(3): 1497~1502
- 3 High cycle fatigue (HCF) science and technology program 2002 annual report[R]. UniversalTechnology Corporation, 2003
- 4 D. W. See, J. L. Dulaney, A. H. Clauer *et al.*. The air force manufacturing technology laser peening initiative[J]. *Surface Engin.*, 2002, **18**(1): 32~36
- 5 B. M. Davis, S. R. Mannava, T. J. Rockstroh *et al.*. Performance of gen IV LSP for thick section airfoil damage tolerance[C]. AIAA, 2004, **2062**: 1~10
- 6 Wang Shengbo, Fan Yong, Wu Hongxing *et al.*. Research of strengthening 7050 aerial aluminum alloy structural material with laser shock processing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(1): 125~128
- 王声波,范 勇,吴鸿兴等. 7050 航空铝合金结构材料激光冲击强化处理研究[J]. 中国激光, 2004, **31**(1): 125~128
- 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 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
- 9 Li Wei, Li Yinghong, He Weifeng *et al.*. Effects of laser shock processing on the fatigue life of nickel-based superalloy[J]. *New Technology & New Process*, 2008, (8): 70~72
- 李 伟,李应红,何卫锋等. 激光冲击强化对镍基高温合金疲劳寿命的研究[J]. 新技术新工艺, 2008(8): 70~72
- 10 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 [J]. 激光与光电子学进展, 2008, **45**(12): 15~19
- 11 Hu Yongxiang. Research on the numerical simulation and impact effects of laser shock processing[D]. Shanghai: Shanghai Jiao tong University, 2008
- 胡永祥. 激光冲击处理工艺过程数值建模与冲击效应研究[D]. 上海:上海交通大学, 2008