文章编号:1001-5078(2016)10-1189-06 ·激光应用技术·

微激光冲击提高 TC17 钛合金高周疲劳性能研究

薛丁元,何卫锋,焦 阳,周留成,罗思海
(空军工程大学等离子体重点实验室,陕西 西安 710038)

摘 要:针对钛合金薄构件激光冲击强化过程中由于在叶背部分冲击波反射与耦合降低残余压应力的问题,提出采用微激光冲击强化(μLSP)的方法对 TC17 钛合金进行强化,利用高周疲劳实验验证其改善效果,从残余应力和疲劳断口形貌观察两个方面讨论分析疲劳性能改善的原因。实验结果表明:与未处理试件相比,微激光冲击强化试件疲劳强度提高了 32%。微激光冲击在钛合金试件表层诱导产生一定数值,深度为 100 μm 厚的残余压应力层;在残余压应力的作用下,疲劳裂纹源内移,同时在其疲劳断口扩展区中有疲劳条带和二次裂纹,这是微激光冲击后 TC17 钛合金试件疲劳性能改善的主要原因。

关键词:激光技术;微激光冲击强化;TC17 钛合金;高周疲劳;残余压应力
中图分类号:TG655 **文献标识码**:A **DOI**:10.3969/j.issn.1001-5078.2016.10.004

Study on high cycle fatigue performance of TC17 titanium alloy improved by micro-scale laser shock processing

XUE Ding-yuan, HE Wei-feng, JIAO Yang, ZHOU Liu-cheng, LUO Si-hai
(Science and Technology on Plasma Dynamics Laboratory, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: As the reflection and coupling of shock wave at the back of specimens reduces residual compressive stress on the surface of titanium alloy thin components, the TC17 Titanium Alloy was processed by the micro-scale laser shock processing (μLSP), and the improvement effect was verified through the high cycle fatigue tests. The improvement reasons of high cycle fatigue performance were analyzed from residual stress distribution and fatigue fracture morphology. The results show that, compared with untreated specimens, the fatigue strength of the specimens treated by μLSP is improved by 32%. Residual compressive stress layer with 100 μm thick and certain values was induced on the surface of the TC17 titanium alloy specimens by μLSP. Under the influence of the residual compressive stress, the crack sources move inward. Simultaneously, there are some fatigue strips and quadric cracks in the propagation zone of the fatigue fractures, and these are the main reasons of the high cycle fatigue performance improvement.

Key words: laser technology; micro-scale laser shock processing; TC17 titanium alloy; high cycle fatigue; compressive residual stress

1 引 言

激光冲击强化是一种先进的表面强化技术,通过激光诱导产生的等离子体冲击波作用于靶材表面,引起表层材料发生超高应变率塑性变形,进而产

基金项目:国家重点基础研究发展计划(No. 2015CB057400)、国家自然科学基金(No. 51505496,51305456)资助。
作者简介:薛丁元(1992-),男,硕士研究生,主要从事航空部件损伤修复与表面强化技术研究。E-mail: fbijaychou200@163.com
通讯作者:焦 阳(1991-),男,博士研究生,主要从事航空部件损伤修复与表面强化技术研究。E-mail: young_joeafeu@163.com
收稿日期:2016-02-20;**修订日期**:2016-03-19

生残余压应力和微观组织变化,从而提高其抗疲劳性能[1-4]。由于其技术优势显著,已成为国际抗疲劳制造研究的热点和前沿[5]。然而由于钛合金叶片边缘厚度较薄(1 mm),叶边部分在激光冲击强化过程中,由于冲击波的反射与耦合,抵消叶片表层塑性变形,降低残余压应力的问题,严重制约激光冲击强化技术在钛合金薄叶片上的应用。为解决上述问题,提出采用微激光冲击强化技术对钛合金薄构件进行处理。

微激光冲击强化是在激光冲击强化基础上发展起来的一种新型表面强化技术,其原理与激光冲击强化技术相同。由于其具有光斑直径小(μm)、激光能量小(mJ),影响层深度浅的技术特点,已经广泛地用于薄膜构件、MEMS 构件的表面强化[6-10]。但针对航空部件采用微激光冲击强化技术的应用研究较少。

本文采用航空用 TC17 钛合金材料为研究对象,对其进行微激光冲击强化处理,通过设计高周疲劳试验,不同冲击次数,研究微激光冲击强化对 TC17 钛合金疲劳性能的影响,并对强化机理进行讨论,研究结果对提高钛合金薄构件的疲劳性能提供理论支持和技术支撑,为保障飞行安全和战斗力提供重要作用。

2 疲劳试验

2.1 试件制备

疲劳试件按照中航工业标准"HB 5287 -96 金属材料轴向加载疲劳试验"中所规定的标准疲劳试件进行制备,疲劳试件尺寸如图 1 所示。

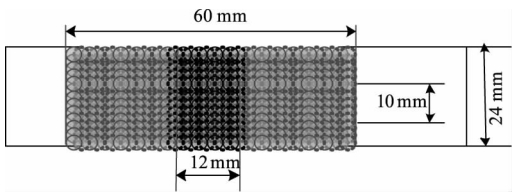


图 1 标准拉 - 拉疲劳试件

Fig. 1 Standard tension fatigue specimens

疲劳试件共两组:未处理试件和微激光冲击试件。为了降低疲劳试验结果的分散性,每组 3 个试件。

微激光冲击强化实验是在 Mianna - Q 型系统上完成的,该系统如图 2 所示。微激光冲击强化功率密度为 3.7 GW/cm^2,脉宽为 10 ns,光斑能量为 85 mJ,光斑直径为 0.4 mm,双面冲击。为了优化应力分布状态,选用如图 3 所示的 S 型冲击工艺路径。

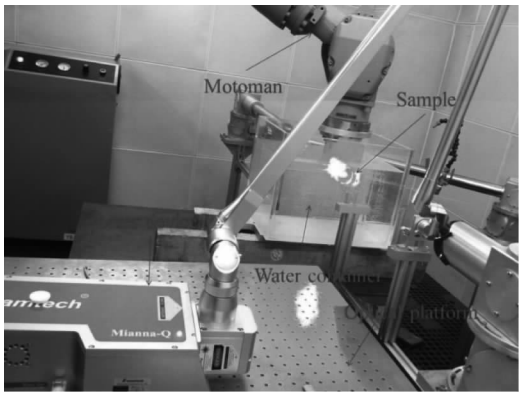


图 2 微激光冲击强化试验系统图

Fig. 2 Micro-scale Laser Shock Processing system

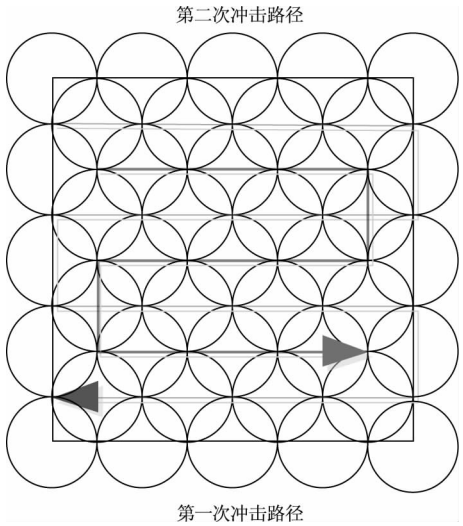


图 3 疲劳试件微激光冲击强化路径示意图

Fig. 3 Schematic diagram of μLSP path on fatigue specimen

2.2 试验方法及结果

试验选用逐级加载法(step-loading method),仅仅需要一根试件就可以获得试样疲劳强度。疲劳试验选定的应力循环周次为 $\Delta N = 1 \times 10^6$,应力比 $R = 0.1$。试件在应力比 $R = 0.1$、$\Delta N = 1 \times 10^6$ 循环周次下的疲劳极限 σ 为:

$$\sigma = \sigma_{lb} + \frac{N_l}{\Delta N}\Delta\sigma \tag{1}$$

疲劳试验是在 QBG - 100 型高频疲劳试验系统上完成。试验采用正弦波加载,加载方式为轴向加载,应力比 $R = 0.1$,加载频率为 85 Hz,试验温度为室温。

首先对未处理试件进行试验,考虑钛合金材料的力学性能,选定 300 MPa 为初始应力,应力增量为 30 MPa,该试件没有失效继续增加应力水平,直至在某一应力水平下出现疲劳失效,则试验结束。如此进行试验,可得到第一组的逐级加载示意图如图

4 所示。计算可得未处理试件的疲劳强度为 360.1 MPa。

与第一组试样相同,选用同样的方法进行疲劳试验,得到第二组试样的逐级加载示意图如图 5 所示。计算可得微激光冲击处理试件的平均疲劳强度为 475.2 MPa。由试验结果可知,与未处理试件相比,微激光冲击可提高钛合金试件的疲劳强度达 32%。

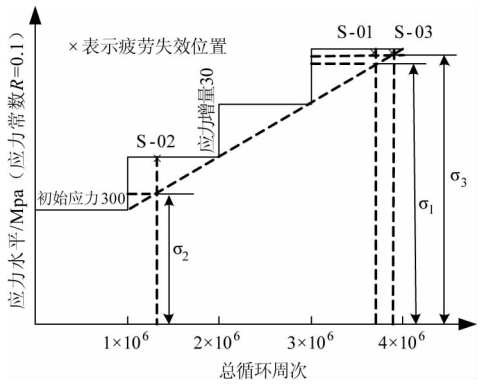


图 4　TC17 钛合金基体试件逐级加载试验示意图

Fig. 4 Schematic diagram of step - loading method of TC17 titanium alloy base specimen

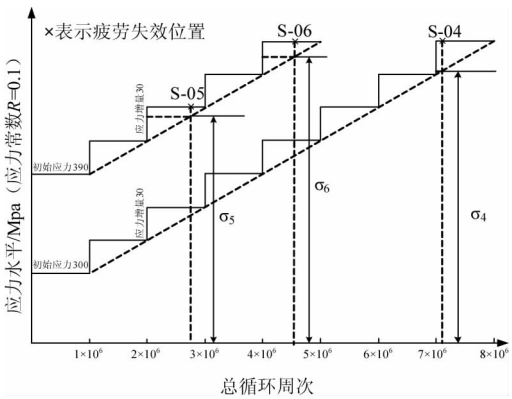


图 5　TC17 钛合金微激光冲击试件逐级加载试验示意图

Fig. 5 Schematic diagram of step - loading method testing of TC17 titanium alloy after μLSP

3　试验结果分析

3.1　残余应力测试

已有研究表明,激光冲击在试样表面诱导产生的残余压应力对于改善金属构件的疲劳性能具有重要作用[11-14]。残余应力测定试验在爱斯特公司生产的 X-350A 型 X 射线应力测定仪上进行,试验执行 GB7704-87 国标。

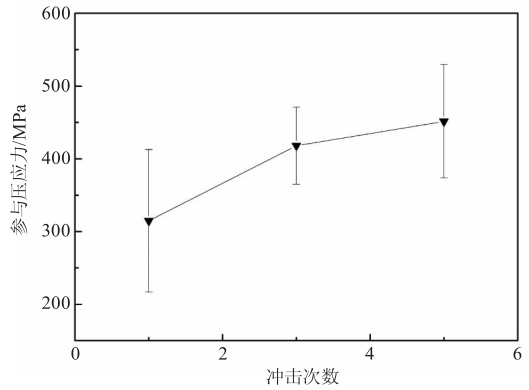
测量方法为侧倾固定 Ψ 法,每次测量采用 4 个 Ψ,分别为 0.0°、15.0°、30.0°、45.0°,采用交相关法进行定峰;采用 Cr-Kα 靶头辐射,衍射晶面为 {213} 晶面,应力常数为 -277 MPa,扫描 2θ 角范围为 145.0°~135.0°,扫描步距为 0.10°/s,计数时间为 1 s。X 光管电压和电流分别为 30.0 kV、10.0 mA,准直管直径为 2 mm。采用电化学腐蚀的方法对试样进行逐层去除减薄,以此来完成微激光冲击强化试样残余压应力沿深度方向的测定,腐蚀溶液为 HNO_3(24%)+HF(14%)+H_2O(62%),腐蚀速率为 1 cm^2 面积上 0.2~0.5 μm/s。

表 1 为 TC17 钛合金试样表面残余应力测试结果,与未处理试样相比,微激光冲击能够在试样表面诱导产生 -314.7MPa 的残余压应力。图 6 为不同冲击次数微激光冲击 TC17 钛合金试样残余应力分布,从图 6(a)中可知看出,采用 3.7 GW/cm^2 的功率密度冲击 1/3/5 次后,试样表面的残余应力分别为 -314.7MPa/-418.1MPa/-451.4MPa,说明试样表面的残余压应力值随着冲击次数的增加而增加,但增加的幅度却在逐渐减小,这是由于随着冲击次数的增加,靶材试样表面的塑性变形逐渐饱和,塑性变形更加困难,从而引起残余压应力值的增加幅度逐渐减小[15]。如图 6(b)所示为靶材试样表层截面残余应力曲线,残余应力随着深度的增加而降低,直至最后稳定保持不变。从图中可以看出微激光诱导产生的残余压应力影响层深度为 100 μm 左右,与激光冲击强化相比,影响层深度较浅,适用于为薄构件、MEMS 微构件的表面强化。

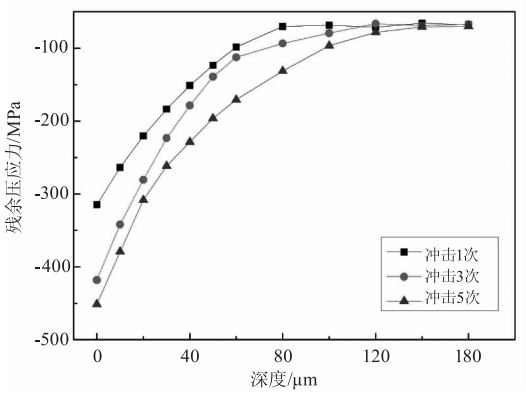
表 1　TC17 钛合金试样表面残余应力测试结果

Tab. 1 Residual stresses on the surface of TC17 titanium alloy specimens

Number	Laser parameters	Methods	Residual stresses/MPa
1	—	untreated	124.5±42
2	85mJ/0.4mm/1 time	μLSP	-314.7±98
3	85mJ/0.4mm/3 times	μLSP	-418.1±53
4	85mJ/0.4mm/5 times	μLSP	-451.4±78



(a) 表面残余应力场分布



(b) 截面残余应力分布

图 6 微激光冲击 TC17 钛合金试样残余应力分布

Fig. 6 Residual stress distribution of TC17 titanium alloy specimens with μLSP

3.2 疲劳断口形貌观察

疲劳试件断口包含着疲劳试件从裂纹萌生到发生断裂整个过程的失效信息。对疲劳断口的形貌进行观察是一种分析疲劳试件断裂机制以及失效原因的有效手段。疲劳试件的断口观察采用 JEOL JSM－6360LV 型扫描电子显微镜。为了便于对疲劳试件断口进行形貌观察,采用金相切割机将疲劳断口试样从疲劳试件上截取下来,其截取试件如图 7 所示。

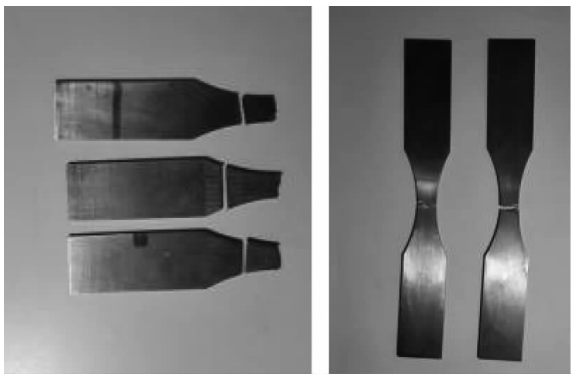


图 7 疲劳试件截取试件图

Fig. 7 Cross-sectional graph of fatigue specimens

TC17 钛合金基体疲劳试件、微激光冲击试件的宏观疲劳断口形貌如图 8、9 所示,从图中可以看出,基体试件中出现了两个疲劳裂纹源 A 和 B,微激光冲击试件中有一个疲劳裂纹源 C。图 10 为 A、B、C 三个疲劳源区的局部放大图,从图中可以看出,钛合金基体试件疲劳裂纹源从试件表面开始萌生并向试件内部扩展,而微激光冲击试件的裂纹源位于次表层,这是由于在微激光诱导产生的残余压应力的作用下,致使疲劳裂纹源内移。

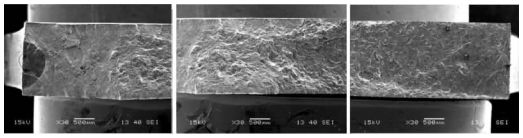


图 8 TC17 钛合金基体疲劳试件断口宏观形貌

Fig. 8 Fracture morphology of TC17 titanium alloy base fatigue specimen

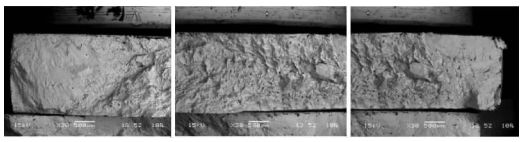


图 9 微激光冲击钛合金试件断口宏观形貌

Fig. 9 Fracture morphology of TC17 titanium alloy specimen after μLSP

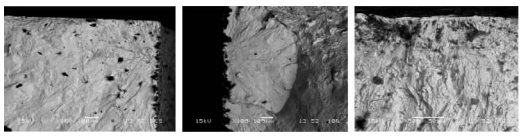
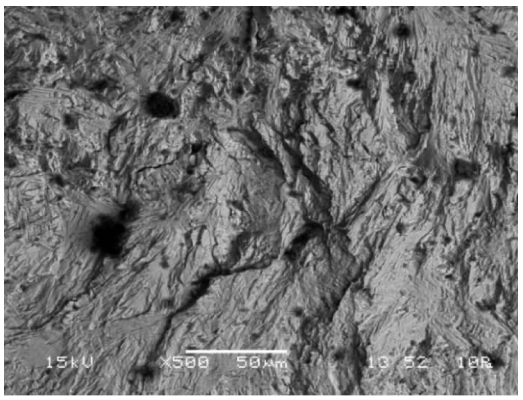


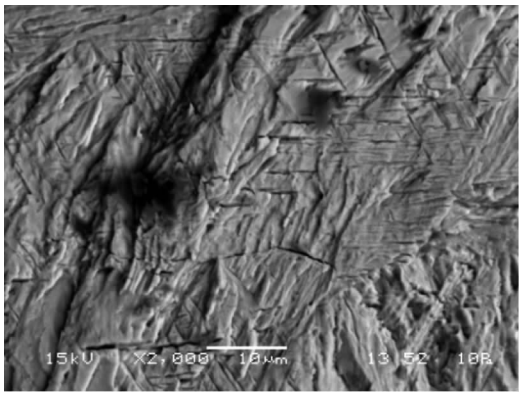
图 10 疲劳裂纹源区及早期扩展区域局部放大图

Fig. 1 Local amplification figures of fatigue crack initiation zone and early extension area

图 11 为不同表面状态试件断口疲劳裂纹稳定扩展区的形貌图,基体试件断口稳定扩展区中包含了大量的解理特征,解理面和河流状花样清晰可见。“河流状花样”实际上是由一系列的疲劳台阶所构成的形貌特征。微激光冲击试件疲劳断口扩展区中能够发现部分疲劳条带和二次裂纹,疲劳条带是在一次循环加载结束的产物,疲劳条带使疲劳裂纹扩展需要消耗更多的能量,从而延长疲劳裂纹的扩展时间;二次裂纹是试样内部的一些杂质、二相颗粒和晶界部位存在应力集中,在疲劳循环载荷的作用下导致 TC17 钛合金沿着裂纹面撕裂,从而形成二次裂纹能够延缓疲劳裂纹的扩展[16]。



(a) 钛合金基体试件



(b) 微激光冲击试件

图 11　疲劳试件断口稳定扩展区形貌图

Fig. 11 Fracture morphology of stable extension area in the fatigue propagation region

微激光冲击在试件表面诱导产生的残余压应力是影响金属构件疲劳性能的关键因素。残余压应力是由于激光诱导产生的冲击波压力大于金属材料的屈服极限,靶材试样发生剧烈塑性变形,进而引起靶材试样发生晶格畸变引起的。一方面,试样表面的残余压应力抵消了一部分外加载荷,使得作用于金属构件的实际工作应力减小;另一方面,微激光冲击试件疲劳断口扩展区中有疲劳条带和二次裂纹,这些疲劳条带和二次裂纹可以起到延缓裂纹扩展的作用,这些是微激光冲击试件疲劳性能改善的主要原因。

4　结　论

本文研究了微激光冲击对 TC17 钛合金高周疲劳性能的影响,从残余应力和疲劳断口形貌观察两个方面对疲劳性能改善原因进行了分析讨论,得出主要结论如下:

(1) TC17 钛合金基体试件的疲劳强度为 360.1MPa,微激光冲击试件的疲劳强度为 475.2MPa,与基体试件相比,提高了 32%,表明微激光冲击强化可以有效提高 TC17 钛合金试件的疲劳强度。

(2)微激光冲击强化在试件表层诱导产生了一定数值的残余压应力,其影响深度达到了 100 μm,且残余应力幅值和影响层深度均随着冲击次数的增加而增大。

(3)与未处理试件相比,在残余压应力的作用下,微激光冲击试件的疲劳裂纹源内移,同时在其疲劳断口扩展区中有疲劳条带和二次裂纹,有效地降低了裂纹扩展速率,延缓裂纹扩展,提高金属构件的疲劳寿命。

参考文献:

[1] Charles S Montross, Tao Wei, Lin Ye, et al. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24: 1021 – 1036.

[2] HE Weifeng, LI Yinghong, LI Wei, et al. Laser shock peening on vibration fatigue behavior of compressor blade [J]. J Aerospace Power, 2011, 26(7): 1551 – 1556. (in Chinese)
何卫锋,李应红,李伟,等. 激光冲击强化提高压气机叶片疲劳性能研究[J]. 航空动力学报, 2011, 26(7): 1551 – 1556.

[3] ZHANG Yongkang, YU Shuisheng, YAO Hongbing, et al. Experimental study of shock waves induced by higj-power pulsed laser in AZ31B magnesium alloy[J]. Acta Physic Sinica, 2010, 59(8): 5602 – 5605. (in Chinese)
张永康,于水生,姚红兵,等. 强脉冲激光在 AZ31B 镁合金中诱导冲击波的实验研究[J]. 物理学报, 2010, 59(8): 5602 – 5605.

[4] GUO Naiguo, LUO Xinmin, HUA Yinqun, et al. The effects of laser shock processing on microstructure and properties of metal[J]. Material Review, 2006, 20(6): 10 – 13. (in Chinese)
郭乃国,罗新民,花银群. 激光冲击处理对金属微结构及其性能的影响[J]. 材料导报, 2006, 20(6): 10 – 13.

[5] J Gallagher, T Nicholas, A Gunderson, et al. Advanced high cycle fatigue (HCF) life assurance methodologies [R]. AFRL – ML – WP – TR – 2005 – 4102, University of Dayton research institute, 2004.

[6] ZHOU Jianzhong, FAN Yujie, HUANG Shu, et al. Research and prospect on micro-scale laser shot peening [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(6): 0601003 – 1 – 0601003 – 11. (in Chinese)
周建忠,樊玉杰,黄舒,等. 激光微喷丸强化技术的研究与展望[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0601003 – 1 – 0601003 – 11.

[7] FAN Yujie, ZHOU Jianzhong, HUANG Shu, et al. Research on mechanical response of copper treated by micro-laser shock peening using nanoindentation technique[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(6): 230 – 234. (in Chinese)
樊玉杰,周建忠,黄舒,等. 激光微喷丸强化纯铜表面的纳米压痕分析[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 230 – 234.

[8] FAN Yujie, ZHOU Jianzhong, HUANG Shu, et al. Analysis and development of microscale laser shock peening oriented metalic components in MEMS[J]. Laser Technology, 2010, 34(5): 665 – 669. (in Chinese)
樊玉杰,周建忠,黄舒,等. MEMS 金属微构件的激光微喷丸强化技术分析与展望[J]. 激光技术, 2010, 34(5): 665 – 669.

[9] Zhigang Che, Liangcai Xiong, Tielin Shi, et al. Numerical and experimental study of microscale laser shock processing using excimer laser[J]. IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, 2009, 25(6): 265 ~ 269.

[10] Zhigang Che, Liangcai Xiong, Tielin Shi, et al. FEM Calculation of micro-scale Laser Shock Proeessing on MEMS material with excimer laser[J]. International Conference on Advanced Design and Manufacture, 2008: 785 – 792.

[11] LI Wei, HE Weifeng, LI Yinghong, et al. Laser shock processing on vibration fatigue properties of K417 material [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(8): 2197 – 2201. (in Chinese)
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.

[12] LI Wei, HE Weifeng, LI Yinghong, et al. Development and application of laser shock processing[J]. Laser And Optoelectronics Progress, 2008, 45(12): 15 – 19. (in Chinese)
李伟,何卫锋,李应红,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.

[13] LI Wei, HE Weifeng, LI Yinghong, et al. Effects study of laser shock processing on the fatigue life of nickel-based superalloy[J]. New Technology And New Process, 2008, (8): 70 – 72. (in Chinese)
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.

[14] WU Dongjiang, YIN Bo, ZHANG Weizhe, et al. Nd: YAG laser beam welding invar36 alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(11): 1773 – 1777. (in Chinese)
吴东江,尹波,张维哲,等. 激光焊接殷钢材料的工艺研究[J]. 中国激光, 2008, 35(11): 1773 – 1777.

[15] LI Yuqin, HE Weifeng, WANG Xuede, et al. Impact of laser shock times on the wear resistance of 38CrMoAl steel [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(7): 2090 – 2094. (in Chinese)
李玉琴, 何卫锋, 王学德, 等. 激光冲击次数对 38CrMoAl 钢渗氮耐磨损性能的影响[J]. 高电压技术, 2014, 40(7): 2090 – 2094.

[16] Maxwell D C, Nicholas T. A rapid method for generation of a haigh diagram for high cycle fatigue[J]. Fatigue and Fracture Mechanics, 1999, 29: 626 – 641.