

## 无保护层激光冲击对 K24 镍基合金力学性能的影响

王学德, 罗思海, 何卫锋, 聂祥樊, 焦 阳

(空军工程大学 等离子体重点实验室, 陕西 西安 710038)

**摘 要:** 激光冲击强化是一种有效提高材料疲劳强度的表面处理技术。针对 K24 镍基高温合金模拟叶片特点, 文中提出采用无保护层激光冲击强化进行表面处理。同时采用 X 射线衍射、显微硬度计表征了不同参数冲击下材料截面残余应力和显微硬度变化规律, 并利用高周振动疲劳试验验证其强化效果。结果表明: 无保护层激光冲击强化处理后在材料表层形成一定数值的残余压应力, 冲击 1、3、5 次后表面残余应力分别为 -428、-595、-675 MPa, 影响深度分别约为 110、150、160  $\mu\text{m}$ ; 显微硬度冲击一次后提升了 29.2%, 影响深度约为 60  $\mu\text{m}$ 。采用不等应力冲击后 K24 镍基合金模拟叶片疲劳强度由原始试件的 282 MPa 提高到 327 MPa, 提高了 16%。

**关键词:** 无保护层激光冲击强化; K24 镍基合金; 残余应力; 显微硬度; 疲劳强度

**中图分类号:** TG655 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0106005

## Effects of laser shock processing without coating on mechanical properties of K24 nickel based alloy

Wang Xuede, Luo Sihai, He Weifeng, Nie Xiangfan, Jiao Yang

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

**Abstract:** Laser shock processing is a novel surface treatment technology to increase the fatigue strength of materials. Based on the characteristic of K24 nickelbased alloy simulation blades, the laser shock processing without coating (LSPwC) was carried out. Whilst the change discipline of micro-hardness and residual stress on the cross-section of K24 nickel-based alloy after different parameters of LSPwC were examined by micro-hardness tester and residual stress tester. In addition, the high cycle fatigue tests were conducted to verify the reinforcement effect. The experimental results show that particular compressive residual stress on the surface was induced by LSPwC, the largest residual stress value was -428, -595, -675 MPa with 110, 150, 160  $\mu\text{m}$  depth affected layer under 1, 3, 5 impacts respectively. The surface micro-hardness was increased by 29.2% with 60  $\mu\text{m}$  depth under one impact. The fatigue strength of simulation blades was improved from 282 MPa to 327 MPa, improved by about 16% after unequal stress impact.

**Key words:** laser shock processing without coating; K24 nickel based alloy; residual stress; micro-hardness; fatigue strength

收稿日期: 2016-05-15; 修订日期: 2016-06-21

基金项目: 国家 973 项目(2015CB057400); 国家自然科学基金(51405506, 51505496)

作者简介: 王学德(1966-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事表面工程领域方面的研究。Email: wangxuede@163.com

通讯作者: 罗思海(1990-), 男, 博士生, 主要从事激光冲击强化技术及其应用等方面的研究。Email: luo\_hai@126.com

## 0 引言

激光冲击强化技术是利用高压等离子体冲击波作用金属表面诱导产生残余压应力以及晶粒细化的一种新型的表面改性技术<sup>[1]</sup>。自进入人们视野以来,迅速发展为表面工程领域的研究热点,不断推动激光冲击强化技术和工艺发展,已成功应用于多种材料,包括钛合金<sup>[2-3]</sup>、镍基合金<sup>[4-5]</sup>、铝合金<sup>[6]</sup>、不锈钢<sup>[7]</sup>等多种航空材料和关键部件。随着部件向微小化、精细化发展,日本的 Y Sano 等人开展了低能量、小光斑无保护层水下冲击的激光冲击强化(laser shock processing without coating, LSPwC)方法研究,并应用此方法对不锈钢<sup>[8-9]</sup>、钛合金<sup>[10]</sup>、铝合金<sup>[11]</sup>进行处理。结果表明,冲击处理后,在表层产生约为 0.2 mm 厚的残余压应力,可以有效消除工作中的残余拉应力,有效提高了部件腐蚀性能。此外,印度、斯洛文尼亚、西班牙针对冲击后表面形貌开展了相关研究<sup>[12-13]</sup>,而国内主要进行了相关方面的仿真研究<sup>[14]</sup>。

镍基合金在航空工业中广泛应用于涡轮叶片,随着发动机的快速发展,需要镍基合金具有较高疲劳强度。但是 K24 模拟叶片表面粗糙度大、内部存在孔洞、杂质等缺陷,对真实叶片进行金相观察发现存在同样的问题。在研究中发现低能量、小光斑激光冲击强化影响深度小,激光诱导冲击波对材料缺陷敏感度小。因此提出采用无保护层激光冲击强化的工艺方法。无保护层微激光冲击强化是针对解决微小精密结构疲劳断裂问题提出的一种表面强化技术,但由于其重复频率(10 Hz)相比传统激光冲击强化频率(0.5~2 Hz)要高,近年来该技术被广泛采用来研究其对金属材料表面性能的影响规律<sup>[15-16]</sup>。但现有公开文献鲜有采用此种方法对镍基合金进行表面处理的报道。文中采用无保护层激光冲击强化对 K24 镍基合金进行表面处理,研究其对镍基合金显微硬度和残余应力的影响规律,在此基础上进行高周振动疲劳试验验证其强化效果,并加以分析讨论。

## 1 实验材料和方法

### 1.1 实验材料

镍基高温合金在高温环境下有较高的强度、耐腐蚀性和良好的抗氧化性等性能,作为涡轮发动机

部件广泛应用于高温服役环境。实验选用 K24 镍基合金模拟叶片,生产完全按照发动机叶片制造工艺进行,经过微观组织和化学成分检验达到叶片使用要求。主要的化学成分如表 1 所示,模拟试件尺寸如图 1 所示。模拟叶片设计是按照实际叶片载荷情况由中国航天科工集团三十一研究所设计,委托中国科学院金属研究所铸造成形的,其振动过程中叶片根部中央薄弱区一定程度上可以很好的表示真实叶片疲劳薄弱区状态。

表 1 K24 镍基合金的主要化学成分

Tab.1 Main composition of K24 nickel based super alloy

Composition	Value
Cr	8.5%~10.5%
Co	12.0%~15.0%
Mo	2.7%~3.4%
Ti	4.2%~4.7%
Al	5.0%~5.7%
W	1.0%~1.8%
C	0.14%~0.20%
Ni	-

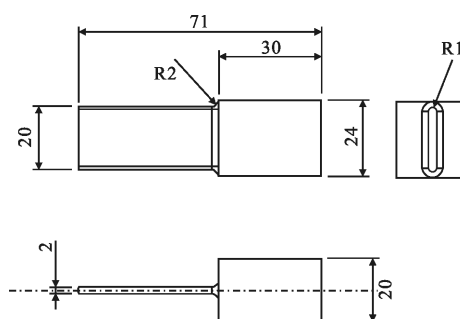


图 1 K24 模拟叶片尺寸(单位:mm)

Fig.1 Diagrammatic sketch of K24 simulated blade(Unit:mm)

K24 镍基合金室温下的弹性模量  $E=213$  GPa,泊松比  $\nu$  为 0.30,其相应的抗拉强度  $\sigma_b$  为 930 MPa。K24 具有较高的高温强度、塑性和良好的工艺性,适用于 950 °C 以下工作的涡轮转子叶片和导向叶片等部件<sup>[17]</sup>。

### 1.2 无保护层激光冲击强化原理

无保护层激光冲击强化(LSPwC)是在传统激光冲击强化上发展而来的,采用的是水下冲击的方式,其冲击原理示意图如图 2 所示。该技术采用的是无吸收保护层工艺,其原理是利用微激光(小光斑、小

能量、短脉宽)直接辐射金属材料表面,与激光熔覆、激光切割等利用激光热效应不同,无保护层激光冲击强化是利用激光诱导等离子冲击波的力学效应。其原理同激光冲击强化技术原理一样<sup>[18-19]</sup>,微激光辐射金属表面后诱导产生高压(>1 GPa)等离子体冲击波,当冲击波的峰值压力超过材料动态屈服强度

时,发生超高应变率塑性变形,从而在表层产生残余应力以及诱使晶粒细化,从而提高材料的疲劳性能。采用不等应力冲击方法,选用的冲击参数为50 mJ/532 nm/8 ns。其中区域 1 选用的光斑直径选用 0.4 mm,功率密度为 4.97 GW/cm<sup>2</sup>,其他三个区域选用的光斑直径为 0.6 mm,功率密度为 2.21 GW/cm<sup>2</sup>。

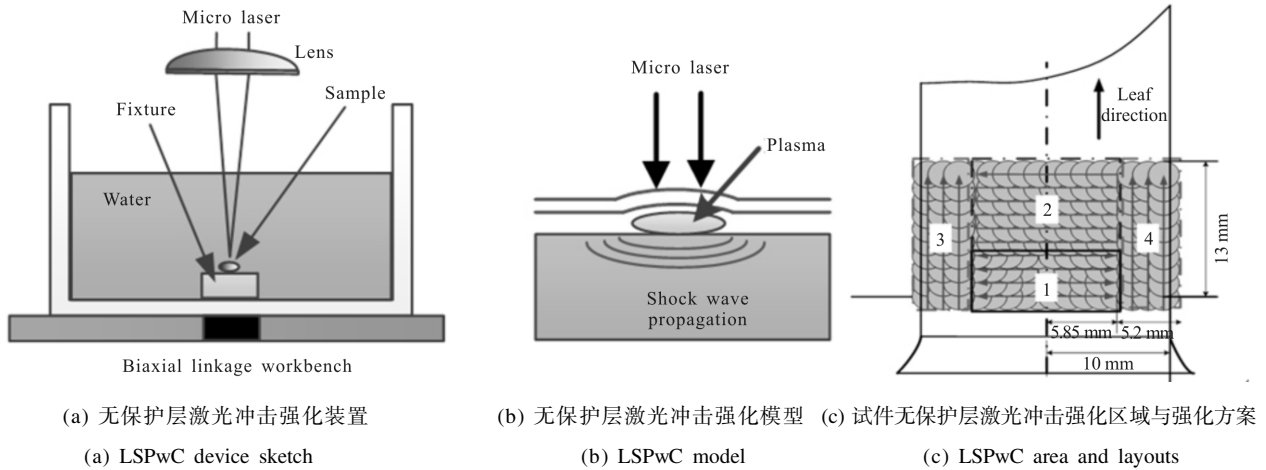


图 2 无保护层激光冲击强化原理示意图和工艺规划

Fig.2 Schematic diagram of LSPwC and LSPwC process

### 1.3 实验方法

采用 MVS-1000JMT2 型显微维氏硬度计进行显微硬度测试,硬度测量由表面向心部进行直到硬度达到基体硬度为止,选取测量载荷为 500 g,保荷时间 10 s,在距表面相同距离分别测量 3~5 个点求平均值作为该深度上的硬度值。残余应力测试在西安交通大学完成,采用的是爱斯特公司的 X-350A 型 X 射线应力分析仪。相关参数设置为:管压 27 kV,管流 7 mA,Cr-K $\alpha$  辐射,准直管 1 mm,测试晶面为 {213} 衍射面,2 $\theta$  扫描范围 135°~121°,扫描步距 0.1°,时间常数 0.5 s, $\psi$  角 0°、24.2°、35.3°、45°,应力常数 -601 MPa/(°),截面残余应力测试采用化学腐蚀的方法对试样进行逐层减薄(腐蚀溶液为:HNO<sub>3</sub> 24%+HF 14%+H<sub>2</sub>O 62%(体积比),腐蚀速率:1 cm<sup>2</sup>面积 0.2~0.5  $\mu$ m/s),在每个要求深度上测量强化区域上 2~3 个点,取平均值作为该深度上的残余应力。

## 2 显微硬度

在 K24 模拟叶片表面冲击部位和未冲击部位进行显微硬度测试,表面测试结果如图 3 所示,K24 镍基合金未经过激光冲击强化的表面显微硬度约为

383 HV0.5,经过 1、3、5 次冲击后表面硬度分别达到 495、526、538 HV0.5,影响深度分别为 60、100、130  $\mu$ m。冲击 1 次表面硬度提高了 29.2%,3 次冲击提高了 37.3%,5 次冲击增加了 40.5%。硬度的增加是由于冲击次数增大将导致表层的塑性变形量增加,晶粒细化作用和位错密度的增加更加明显<sup>[4]</sup>。另一方面,随着冲击次数增加,表面硬度随着增加,但是增加幅度逐渐减小。这是因为随着冲击次数增加,Hugoniot 弹性疲劳极限以及动态屈服强度增加,塑性变形发生更加困难,使得硬度增加幅度减小<sup>[20]</sup>。

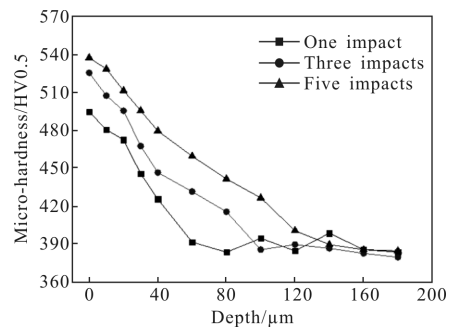


图 3 K24 镍基合金微激光冲击后显微硬度分布

Fig.3 Distribution of micro-hardness of K24 nickel based alloy after LSPwC

研究表明,材料在超高应变率冲击波作用下,会产生高密度位错,同时冲击后会诱使位错运动,使得金属材料表层发生硬化<sup>[4]</sup>。材料硬度的变化与微观组织的变化有着密切联系,位错密度和晶体结构的变化都会导致材料硬度的改变。对于多晶金属来说,金属的强度和位错密度之间有经典的 Taylor 公式<sup>[21]</sup>:

$$\Delta h = k_h M \alpha G b \sqrt{\rho} \quad (1)$$

式中: $M$  为位向因子; $G$  为材料的剪切模量; $b$  为柏氏矢量; $\alpha$  为常数; $k_h$  为斜率; $\rho$  为位错密度。由公式(1)可知,位错密度和硬度有着线性关系。激光冲击能在金属材料表面发生晶粒细化甚至形成纳米晶,在次表层产生高密度位错,这也相应地提高了金属材料的硬度<sup>[2]</sup>。冲击波在材料内部发生衰减,压力降低导致位错密度降低,反映到硬度上,就是硬度随深度减小,且冲击波衰减到一定程度,不能引起原子间的畸变时,硬度值稳定在基体值附近。

### 3 残余应力

测量功率密度为  $4.97 \text{ GW/cm}^2$  时不同冲击次数下的激光冲击后强化区域平均残余应力,结果如图 4 所示。冲击 1、3、5 次后,表面残余应力分别为  $-428$ 、 $-595$ 、 $-675 \text{ MPa}$ ,影响深度分别约为  $110$ 、 $150$ 、 $160 \mu\text{m}$ ,随着冲击次数增加,在一定范围内,残余应力值以及影响层深度都有所增加。随着冲击次数的增加,残余应力值增大,但是增加幅度减小,这是因为每次冲击处理后,材料的动态屈服强度增大,激光多次冲击诱导的塑性变形在表面趋于饱和。

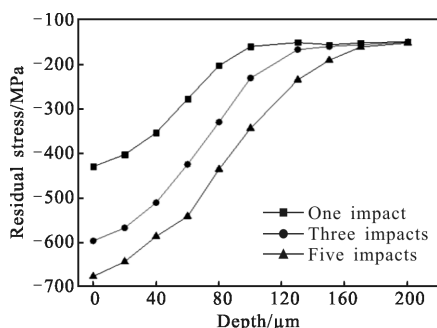


图 4 不同冲击次数下沿深度方向上的残余应力

Fig.4 Residual stresses in different impacts along the depth direction

众所周知,金属材料的残余应力产生是因为激光诱导塑性变形引起的金属微观组织结构改变的结

果<sup>[22]</sup>。激光冲击强化诱导剧烈塑性变形,促使金属材料晶格发生畸变,同时诱使位错产生且发生滑移,导致残余压应力的出现。已有的研究表明,传统激光冲击强化和喷丸都能诱使残余压应力的产生,从而有效提高材料疲劳寿命<sup>[2]</sup>。文中采用无保护层激光冲击强化对 K24 镍基合金处理后虽产生一定数值的残余压应力,但是冲击后在表面发生烧蚀等缺陷,是否会成为疲劳源,因此需通过振动疲劳试验验证强化效果。

### 4 振动疲劳

把模拟叶片分成两组,一组为未进行 LSPwC 处理的样件 17 件;根据残余应力和显微硬度测试结果,另一组选取采用不等应力冲击方式冲击且次数为 3 次的冲击样件 17 件,采用单边夹持的方式进行高周振动疲劳试验,如图 5 所示。

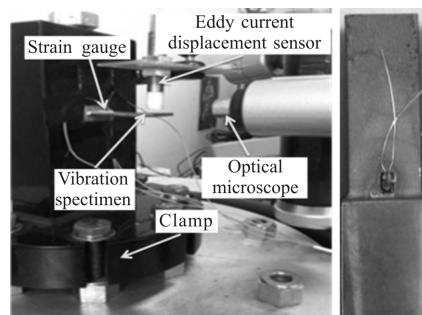


图 5 振动疲劳试验

Fig.5 Test of vibration fatigue

高周疲劳实验采用的是升降法,结果如图 6 所示。由疲劳升降法可知,当应力  $\sigma_n$  遵循正态分布时,取子样平均值作为母体中值估计值,疲劳极限  $\sigma_r$  应等于以  $n'$  为权的  $\sigma_n$  的加权平均值,在 95% 的置信度下,冲击前后疲劳试件的疲劳极限由原始试件的  $282 \text{ MPa}$  提高到  $327 \text{ MPa}$ ,提高了 16%,说明 LSPwC 可以有效提高 K24 镍基合金的疲劳强度。激光冲击强化之所以能提高材料疲劳强度,这是因为激光诱导冲击波作用,在超高应变率下 ( $>10^6/\text{s}$ ) 发生塑性变形,一方面引起表层晶粒发生细化,同时有高密度位错产生。晶粒细化导致晶界增多,使得裂纹萌生和扩展临界应力增大,有效提高了裂纹滞止应力,阻止裂纹萌生,减缓裂纹扩展<sup>[23]</sup>;另一方面诱导一定数值的残余压应力产生,在疲劳载荷加载过程中,可有效抵消部分残余拉应力,降低实际加载应力,从而达到

延缓裂纹萌生和扩展的目的。两者共同作用,提高材料疲劳性能。

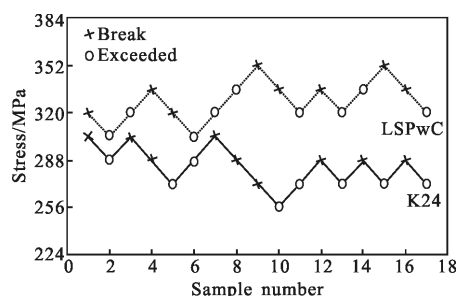


图 6 试件无保护层激光冲击前后疲劳升降图

Fig.6 Fatigue life curve of specimens before and after LSPwC

## 5 结论

文中针对K24 镍基合金模拟叶片表面粗糙度大、内部存在因铸造导致的气孔等特点,提出采用无保护层激光冲击强化来提高疲劳强度。主要结论如下:

(1) 无保护层激光冲击强化后在 K24 镍基合金材料表层产生高数值残余压应力,激光功率密度  $4.97 \text{ GW/cm}^2$  冲击 1、3、5 次后,表面残余应力分别为  $-428$ 、 $-595$ 、 $-675 \text{ MPa}$ ,影响深度分别约为  $110$ 、 $150$ 、 $160 \mu\text{m}$ 。表面硬度由未强化样件的  $383 \text{ HV}0.5$  提高到  $495$ 、 $526$ 、 $538 \text{ HV}0.5$ ,影响深度分别为  $60$ 、 $100$ 、 $130 \mu\text{m}$ 。这是因为强化后材料表层微观组织发生细化和诱导高密度位错产生,使得表面硬度提升,同时诱导应力场发生变化,转化为残余压应力。

(2) 不等应力冲击后,K24 模拟叶片疲劳强度由原始试件的  $282 \text{ MPa}$  提高到  $327 \text{ MPa}$ ,提高了  $16\%$ 。疲劳强度的提高归于强化后在表面形成的残余压应力和微观组织变化。

## 参考文献:

[1] Jiao Yang, He Weifeng, Sun Ling, et al. Study on compound technology of laser shock peening and aluminizing improve the mechanical properties of K417 alloy [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(8): 2274–2279. (in Chinese)  
焦阳, 何卫锋, 孙岭, 等. 激光喷丸与渗铝复合工艺提高 K417 合金力学性能研究 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44 (8): 2274–2279.

[2] Nie Xiangfan, He Weifeng, Zhou Liucheng, et al. Experiment investigation of laser shock peening on TC6 titanium alloy to improve high cycle fatigue performance[J].

*Materials Science and Engineering A*, 2014, 594: 161–167.

[3] An Zhibin, Shen Xiaojun, Gao Shan, et al. Nanocrystallization of Ni-based superalloy K403 by laser shock peening [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(9): 921002. (in Chinese)  
安志斌, 沈晓骏, 高山, 等. 激光冲击强化 K403 镍基高温合金表面纳米化[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(9): 921002.

[4] Li Yinghong, Zhou Liucheng, He Weifeng, et al. The strengthening mechanism of a nickel-based alloy after laser shock processing at high temperatures [J]. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2013, 14: 055010.

[5] Zhang Lei, Lu Jinzhong, Zhang Yongkang, et al. Effects of processing parameters on fatigue properties of LY2 Al alloy subjected to laser shock processing [J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(6): 061406.

[6] Li Yuqin, Li Yinghong, He Weifeng, et al. Wear resistance of 12CrNi3A steel after carburization and laser shock [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40 (9): 0903004. (in Chinese)  
李玉琴, 李应红, 何卫锋, 等. 激光冲击渗碳 12CrNi3A 钢的磨损性能[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0903004.

[7] Shen Xiaojun, Wang Cheng, An Zhibin, et al. Effects of oblique laser shock processing on rotary bending fatigue of aero-engine fan shaft [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(12): 2274–2279. (in Chinese)  
沈晓骏, 汪诚, 安志斌, 等. 斜激光冲击对航空发动机风扇轴弯曲疲劳性能的影响 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44 (12): 2274–2279.

[8] Sano Yuji, Obata Minoru, Kubo Tatsuya, et al. Retardation of crack initiation and growth in austenitic stainless steels by laser peening without protective coating[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, 417: 334–340.

[9] Maawad E, Sano Y, Wagner L, et al. Investigation of laser shock peening effects on residual stress state and fatigue performance of titanium alloys [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2012, 536: 82–91.

[10] Sano Y, Masaki K, Gushi T, et al. Improvement in fatigue performance of friction stir welded A6061-T6 aluminum alloy by laser peening without coating [J]. *Materials and Design*, 2012, 36: 809–814.

[11] Kalainathan S, Sathyajith S, Swaroop S. Effect of laser shot peening without coating on the surface properties and corrosion behavior of 316L steel [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50: 1740–1745.

- [12] Uroš Trdan, Juan A Porro, José L Ocana, et al. Laser shock peening without absorbent coating (LSPwC) effect on 3D surface topography and mechanical properties of 6082-T651 Al alloy [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2012, 208: 109-116.
- [13] Che Zhigang. Numerical simulation and experimental study of microscale laser shock processing on metallic target [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2009. (in Chinese)  
车志刚. 微尺度激光冲击强化金属靶材数值模拟与实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [14] China Aeronautical Materials Handbook. Edits Committee. The Second of China Aeronautical Materials Handbook [M]. Beijing: China Standards Press, 2001: 645-651. (in Chinese)  
《中国航空材料手册》编委会. 中国航空材料手册第 2 卷 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2001: 645-651.
- [15] Kalainathan S, Prabhakaran S. Recent development and future perspectives of low energy laser shock peening [J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 81: 137-144
- [16] Zhu Yunhu, Fu Jie, Zheng Chao, et al. Effect of laser shock peening without absorbent coating on the mechanical properties of Zr-based bulk metallic glass [J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 75: 157-163.
- [17] Rubio-Gonzalez C, Ocan' a J L, Gomez-Rosas G, et al. Effect of laser shock processing on fatigue crack growth and fracture toughness of 6061-T6 aluminum alloy [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2004, 386: 291-292.
- [18] Qiao Hongchao, Zhao Yixiang, Zhao Jibin, et al. Effect of laser peening on microstructure and properties of TiAl alloy [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(7): 1766-1773. (in Chinese)  
乔红超, 赵亦翔, 赵吉宾, 等. 激光冲击强化对 TiAl 合金组织和性能 [J]. 光学 精密工程, 2014, 22(7): 1766-1773.
- [19] Montross C S, Wei T, Ye L, 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.
- [20] Li B L, Godfrey A, Meng Q C, et al. Microstructure evolution of IF-steel during Cold Rolling [J]. *Acta Materialia*, 2004, 52: 1069-1081.
- [21] 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.
- [22] Yilbas B S, Arif A E M. Laser shock processing of aluminium: model and experimental study [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2007, 40: 6740-6747.
- [23] Zhou Liucheng. The compound strengthen mechanism of laser shock processing and its application on the turbine blades in aeroengine [D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2014. (in Chinese)  
周留成. 激光冲击复合强化机理及在航空发动机涡轮叶片上的应用研究 [D]. 西安: 空军工程大学, 2014.