

## 无保护层激光冲击对 GH3044 涡轮机匣围组织性能的影响

谢孟芸<sup>1</sup>, 汪 诚<sup>1</sup>, 张佩宇<sup>1</sup>, 明继青<sup>2</sup>, 陈 辉<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学 等离子体动力学重点实验室, 陕西 西安 710038;  
2. 中国人民解放军第五七一三工厂, 湖北 襄阳 441002)

**摘要:** 针对激光冲击强化涡轮机匣部件难以贴覆吸收保护涂层的问题, 提出无保护层激光冲击(LSPwC)+水砂纸磨除烧蚀层的复合工艺, 研究 LSPwC 对 GH3044 合金微观组织和力学性能的影响, 验证复合工艺的可行性。采用能谱仪(EDS)、扫描电子显微镜(SEM)和金相显微镜分析试样表层元素组成和微观组织, 通过测试残余应力和高周疲劳寿命表征其力学性能。结果表明, LSPwC 在试样表层产生约 10~15  $\mu\text{m}$  的烧蚀层, 烧蚀层内碳、氧元素富集且残余拉、压应力交替存在, 烧蚀层以下晶粒和碳化物不同程度地均匀细化; 相比原始试样, LSPwC 对 GH3044 合金疲劳寿命提升不明显; 水砂纸磨除烧蚀层后, 试样表面残余压应力约 510 MPa, 影响深度层达 1 mm, 疲劳寿命提高到原始试样的 3 倍。

**关键词:** 激光冲击强化; GH3044 合金; 微观组织; 残余应力; 高周疲劳寿命  
**中图分类号:** TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0406005

## Effects of LSPwC on microstructure and properties of GH3044 turbine case

Xie Mengyun<sup>1</sup>, Wang Cheng<sup>1</sup>, Zhang Peiyu<sup>1</sup>, Ming Jiqing<sup>2</sup>, Chen Hui<sup>2</sup>

(1. Science and Technology on Plasma Dynamics Laboratory, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. No.5713 Factory of PLA, Xiangyang 441002, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of covering absorption and protection coatings on turbine case parts during laser shock processing, a compound technology was put forward, which used water sand paper to polish out the ablative layer after laser shock processing without coating (LSPwC). The effects of LSPwC on microstructure and mechanical properties of GH3044 alloy were researched, the feasibility of the compound technology was verified. Energy disperse spectroscopy (EDS) was used to analyze element composition, the surface microstructure of samples was observed by means of scanning electron microscope (SEM) and metallographic microscope, mechanical properties were studied through residual stress and high cycle fatigue life test. The results show that LSPwC generates an ablative layer on sample surface, which thick 10–15  $\mu\text{m}$  range. Carbon and oxygen are rich in the layer, while the residual and tensile compressive stress alternately exist. The grain and carbide under the ablative layer are even-distributed and refined to different degree; Compared to original samples, LSPwC nearly improves the

收稿日期: 2017-11-10; 修订日期: 2017-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(51205406); 陕西省工业攻关计划(2014K08-31)

作者简介: 谢孟芸(1994), 男, 硕士生, 主要从事金属表面强化方面的研究。Email: xmy83789@163.com

导师简介: 汪诚(1974-), 男, 教授, 博士, 主要从事航空发动机结构强度和激光冲击强化技术方面的研究。Email: warrant\_74@126.com

fatigue life of GH3044 alloy. After polishing out the ablative layer by water sand paper, a residual compressive stress, which is about 510 MPa, is generated on surface and the affected depth is about 1 mm. Besides, the fatigue life is improved to be about 3 times compared to original samples.

**Key words:** laser shock processing; GH3044 alloy; microstructure; residual stress; high cycle fatigue life

## 0 引言

涡轮机匣是航空发动机的主要承力构件, 由于涡轮是在高温高转速大功率条件下工作, 经过长期服役的涡轮机匣要承受热负荷、循环载荷和振动载荷<sup>[1]</sup>。特别是机匣叶片安装边, 受高周疲劳载荷的影响, 容易引起疲劳裂纹, 缩短服役寿命, 威胁飞行安全。

激光冲击强化(Laser Shock Processing, LSP)作为一种新兴的表面强化技术, 可在不改变基材性能的前提下, 提高构件的抗疲劳性能, 延长服役寿命<sup>[2-4]</sup>。在 LSP 实际使用过程中, 通常会在构件表面贴覆涂层以保护其不受高能激光烧蚀。常用的吸收保护涂层有黑漆和铝箔, 黑漆涂层对不规则曲面贴合性良好, 但需要等待其干燥后才能进行强化; 铝箔涂层使用方便, 但对倒角、不规则曲面的贴合性不好<sup>[5]</sup>。发动机涡轮机匣叶片安装边外形不规则, 不适合用铝箔做保护层; 若使用黑漆涂层, 则需要花费大量时间在涂层的贴覆和去除上, 造成工作效率低下, 不利于大规模推广使用。

因此, 国内外学者进行了无涂层激光冲击强化(LSPwC)相关探索研究并取得了一定的成果, 以日本学者 Sano<sup>[6-8]</sup>为核心的团队对不锈钢、钛合金、铝合金等材料进行 LSPwC 实验研究, 国内也有何卫锋<sup>[9]</sup>等学者对 K24 镍基合金开展 LSPwC 研究。结果表明, LSPwC 可以在试样表层诱导产生一定厚度的残余压应力层, 改善表层微观组织, 提高疲劳寿命。目前, LSPwC 主要在小能量(小于 1 J)脉冲激光下实施, 对构件的抗疲劳性能提升有限, 因而制约了 LSPwC 的应用推广。而对于高能量、激光热效应不可忽略的 LSPwC 研究鲜有报道。

文中采用高能脉冲激光冲击强化技术提高涡轮机匣的抗疲劳性能, 并针对机匣叶片安装难以贴覆吸收保护涂层的问题, 提出“LSPwC+水砂纸磨除表面烧蚀层”的复合工艺, 研究 LSPwC 对材料微观组织和力学性能的影响, 验证复合工艺的可行性。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

某型发动机涡轮机匣 GH3044 材料是变形强化镍基高温合金, 在 900 °C 以下具有较高的塑性和等热强性, 主要由 Ni-Cr 为基单  $\gamma$  相奥氏体和少量的 MC 和 M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 型碳化物组成。密度 8.89 g/cm<sup>3</sup>, 常温下静态屈服强度  $\sigma_y$  为 590 MPa, 其主要化学成分如表 1 所示<sup>[1]</sup>。

表 1 GH3044 合金的主要化学成分

Tab.1 Main chemical components of GH3044 alloy

Ni	Cr	C	Mo
Bal	25%	≤0.1	≤1.5
Ti	W	Fe	Al
0.5%	15%	≤4%	≤0.5

### 1.2 试验方法

激光冲击强化实验在 YS80-M50 型激光冲击强化系统上完成, 涡轮机匣激光冲击强化如图 1 所示, 强化区域为机匣叶片安装边内圆一圈。

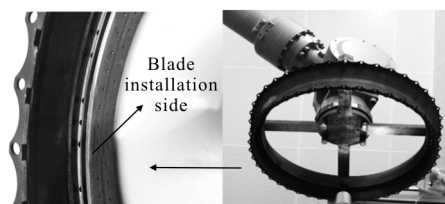


图 1 涡轮机匣激光冲击强化  
Fig.1 LSPwC of turbine case

涡轮机匣 GH3044 材料 LSPwC 过程中, 激光能量的选择是关键。激光能量过小, 虽然对构件表面的热影响可忽略不计, 但强化效果不明显; 而激光能量过大, 又会严重烧蚀构件表面, 影响安装尺寸和基材性能。

经 Fabbro<sup>[10]</sup>理论估算和试验探索, 最终选择的

激光冲击强化工艺参数为:激光能量 3 J,脉冲宽度为 20 ns,光斑直径为 2 mm,光斑搭接率为 50%,冲击一次,约束层为去离子水,无吸收保护层。

### 1.3 测试方法

为方便测试,从涡轮机匣上切取 GH3044 合金试样,如图 2 所示。

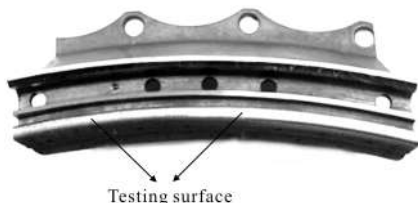


图 2 GH3044 合金试样

Fig.2 Sample of GH3044 alloy

沿机匣垂直强化表面线切割切取试片,超声波清洗试片,干燥后镶样。80#~2 000# 水砂纸打磨试片剖面,抛光布抛光至镜面,腐蚀试片(腐蚀剂:15 gCuSO<sub>4</sub>+3.5 mlH<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+50 mlHCl)。采用 ZEISS SUPRA55 型扫描电镜和 SG-51 型金相显微镜观察激光冲击强化前后试片截面显微组织。配合扫描电镜,采用 EDAX GENESIS 型能谱仪分析材料元素组成。

采用 Proto LXR D 应力仪测试试样表面及深度方向残余应力,测量 3 个点取均值;测量深度方向残余应力时,对试样表面进行电解抛光(电解液:20% 高氯酸+80%酒精),每隔 0.2 mm 测量一次。

高周疲劳试验在 ES-50-455 型振动台上完成。由于直接测试机匣疲劳寿命需在发动机上进行搭车长试,成本高且周期长,故选择在 GH3044 合金标准疲劳试样上考核其疲劳性能,试样尺寸和强化部位如图 3 所示,试样热处理以及强化工艺参数与机匣保持一致。采用 600#、800#、1 000# 水砂纸打磨试样表面烧蚀层至目视有金属光泽,打磨深度约 10~15 μm。

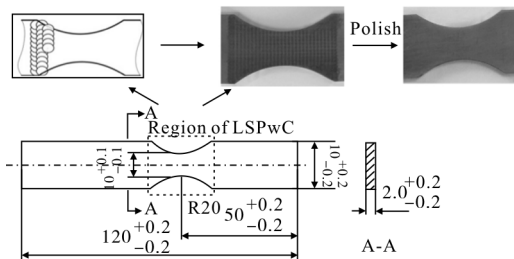


图 3 试样尺寸和强化部位

Fig.3 Sample size and LSPwC region

高周疲劳性能测试试样分为 3 组:原始状态试样、LSPwC 试样、“LSPwC+水砂纸磨除烧蚀层”试样。试样振型为一阶弯曲振动,通过 ANSYS 仿真确定试验应力  $\sigma_{max}=400$  MPa,测试指定应力条件下试样出现裂纹的时间和循环次数,以此作为试样的疲劳寿命。

## 2 结果及分析

### 2.1 能谱分析

配合扫描电子显微镜,对 LSPwC 后 GH3044 合金表面烧蚀层进行能谱分析。从图 4 可以看出,表面烧蚀层的厚度大约为 10~15 μm,且厚薄不一。对于涡轮机匣叶片安装边,其装配误差允许控制在 50 μm 之内,因此打磨去除表面烧蚀层不会影响其安装尺寸。如图 5(a)所示,EDS 能谱检测到烧蚀层 Spectrum 1 处各元素质量百分比分别为:O 元素 26%,C 元素 22%,Cr 元素 4%,Ni 元素 48%。相比原始 GH3044 合金各元素百分比(表 1 所示),强化后试样表层 Ni、Cr 等金属元素含量减少,C 元素含量增加,且新增质量百分比为 26%的 O 元素。此外,从图 5(b)能谱分析得知,Spectrum 2 处白色颗粒状物质主要成分为 WC。

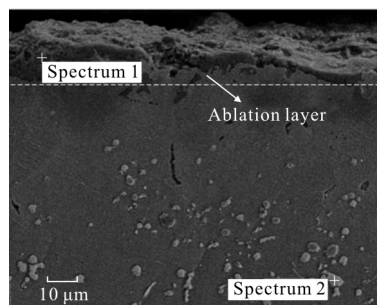
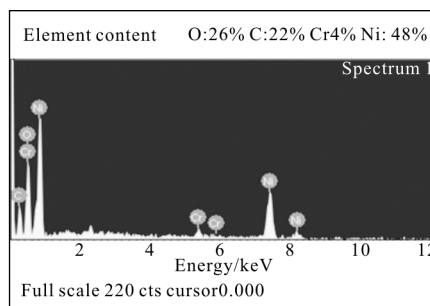


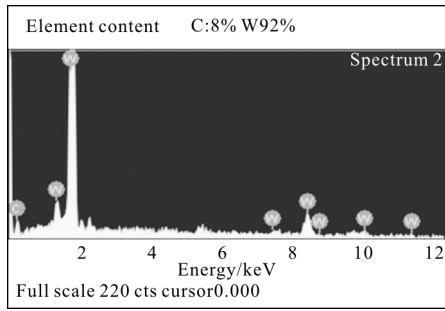
图 4 强化后试样截面 SEM 图

Fig.4 Cross section SEM photographs of samples after LSPwC



(a) 光谱 1

(a) Spectrum 1



(b) 光谱 2

(b) Spectrum 2

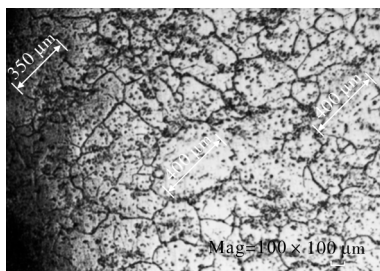
图 5 强化后试样截面 EDS 图

Fig.5 Cross section EDS photographs of samples after LSPwC

激光烧蚀作用机理如下：高能纳秒脉冲激光直接照射材料表面，激光能量一部分被材料表面反射，另一部分被材料表层物质吸收。当材料表面达到熔点温度，就会形成熔融层，温度继续升高，材料就会出现汽化蒸发现象。随着温度的再度升高，蒸汽分子被激光电离击穿形成等离子体，等离子体具有较高的动量和能量，最终形成冲击波<sup>[1]</sup>。由于涡轮机匣激光冲击强化过程中没有贴覆吸收保护层，高能纳秒脉冲激光直接照射合金表面引起表层 Ni、Cr 等金属元素出现熔化、汽化和电离等一系列复杂的物理变化，使得 Ni、Cr 等金属元素的含量下降，C 元素的含量相对增多。此外，缺少保护涂层的合金表面在高温下易被氧化，从而导致烧蚀层内 O 元素富集。

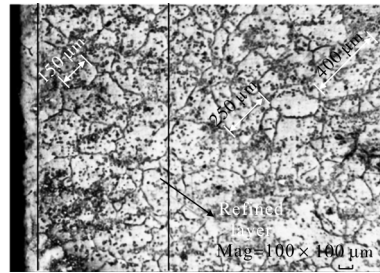
### 2.2 微观组织

图 6 是 LSPwC 前后 GH3044 合金截面金相图，从图 6(a)中可以看出，未强化的试样为主要为 Ni-Cr 基单相  $\gamma$  奥氏体，晶胞相对粗大，尺寸约 300~400  $\mu\text{m}$ 。碳化物 Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 呈链状分布在晶界，WC 在晶界和晶内少量分布。而图 5(b)中，强化后试样表层晶胞沿着冲击波传播方向被压缩变形，单相  $\gamma$  奥氏体明显细化，尺寸约 150~250  $\mu\text{m}$ 。对比强化后试样



(a) 未强化

(a) Without LSPwC



(b) 强化

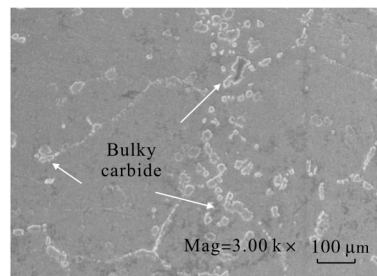
(b) With LSPwC

图 6 试样截面金相图

Fig.6 Cross section metallographs of samples

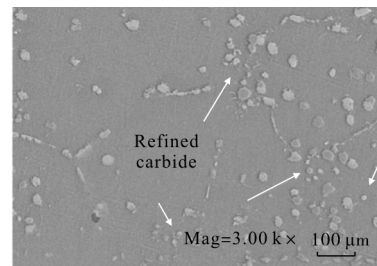
表层和心部的微观组织发现，表层组织晶胞细化明显，而心部组织晶胞尺寸大小接近未强化试样，晶胞变形细化影响层深约 700  $\mu\text{m}$ 。

为进一步研究 LSPwC 对 Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>、WC 等碳化物的影响规律，采用更高放大倍数的扫描电镜观察强化前后 GH3044 合金微观组织。图 7 是激光冲击前后 GH3044 合金 SEM 图，从图 7(a)可以看出，未强化的试样表层碳化物主要沿晶界呈链状集中分布，且尺寸较大。而图 7(b)中，强化后试样表层部分碳化物得到细化，原有的链式分布被打破，分布更为弥散均匀。



(a) 未强化

(a) Without LSPwC



(b) 强化

(b) With LSPwC

图 7 试样截面 SEM 图

Fig.7 Cross section SEM photographs of samples

当高能纳秒脉冲激光烧蚀金属表面时,金属表面吸收激光能量而发生爆炸性蒸发,诱导产生的高压等离子体在约束层的约束下发生爆炸,形成高压冲击波,该冲击波作用于金属表面并向内部传播<sup>[12]</sup>。GH3044 镍基合金表面存在多种界面和缺陷,高压冲击波在传播过程中会发生不同程度的反射和折射,形成复杂的波系<sup>[13]</sup>。当复杂波系的波压超过金属的动态屈服极限时,沿冲击波传播方向表层晶胞将发生变形和细化<sup>[14]</sup>。此外,大量分布在晶界的碳化物在复杂波系的持续冲击力作用下,部分较大颗粒被击碎细化,原有的链式布局被打破,碳化物分布更加弥散均匀。

2.3 残余应力

表 2 为 LSPwC 后试样烧蚀层表面及深度方向残余应力分布,从表 2 中可以看出,烧蚀层表面及次表面(表面以下 5 μm 内)残余压力值分布不均,既存在残余拉应力又存在残余压应力。当深度约为 15 μm 时,残余压应力值最大,为-486.6 MPa,这也与微观组织中观察到烧蚀层厚度约 10~15 μm 的结果相吻合。

表 2 烧蚀层内残余应力分布

Tab.2 Residual stress distribution in ablative layer

Depth/μm	Residual stress/MPa			
	Point1	Point2	Point3	Average
0	133.4	18.9	-51.5	33.6
5	64.1	-130.9	27.8	-13.0
10	-303.2	-218.9	-239.7	-253.9
15	-496.2	-510.1	-453.4	-486.6
20	-505.7	-487.3	-433.1	-475.3

为进一步研究激光冲击对 GH3044 合金烧蚀层以下残余应力的影响规律,采用水砂纸打磨除去烧蚀层后,测试试样表面及深度方向残余应力分布,如图 8 所示。从图 8 中可以看出,未强化的试样表面和深度方向残余应力数值较小,接近无应力状态。激光冲击在试样表层和一定深度范围内引入较大的残余压应力,试样表面残余压应力最大,约 510 MPa,随深度的增加,残余压应力逐渐减小,影响深度约 1 mm。

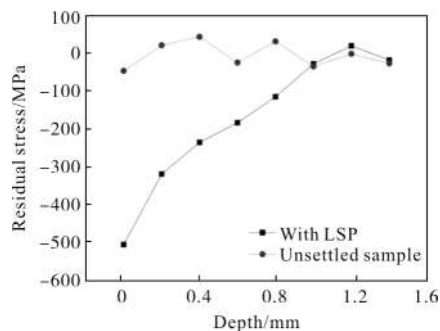


图 8 试样截面残余应力分布

Fig.8 Cross section residual stress distribution of samples

LSPwC 是一个快热快冷的过程,由于缺乏吸收涂层的保护,高能纳秒脉冲激光辐射产生的瞬时高温使得 GH3044 合金表面局部发生熔化、汽化,随后又迅速冷凝收缩,产生拉应力。与此同时,激光诱导等离子冲击波使得金属表面发生塑性变形,其力学效应表现为获得较高的残余压应力。GH3044 合金表面烧蚀层同时受热变形和塑性变形的作用而出现残余拉、压应力交替的现象。但在烧蚀层以下,金属材料不受热应力的影响,只受等离子体冲击波的作用而产生较大的残余压应力。

2.4 高周疲劳寿命

3 种状态下试样高周疲劳寿命如图 9 所示。从图 9 可以看出,原始试样的疲劳寿命为 1.152×10<sup>6</sup>, LSPwC 试样疲劳寿命为 1.255×10<sup>6</sup>,较原始试样提升不明显。而水砂纸磨除烧蚀层后,其疲劳寿命提高为 3.647×10<sup>6</sup>,是原始试样的 3 倍。测试结果验证了“LSPwC+水砂纸磨除烧蚀层”复合工艺在发动机涡轮机匣上应用的可行性和有效性。

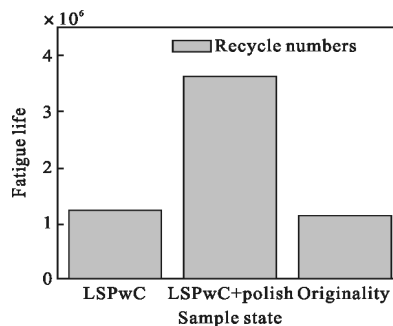


图 9 不同状态试样的疲劳寿命

Fig.9 Fatigue lifes of different samples

激光冲击强化提高 GH3044 合金疲劳寿命机理如下:一方面,激光冲击在 GH3044 合金表面及一定

深度范围内引入较大的残余压应力,残余压应力的存在降低了交变载荷中的拉应力水平,提高疲劳裂纹萌生寿命。同时,残余压应力的存在引起裂纹的闭合效应,有效降低疲劳裂纹的扩展驱动力,延长疲劳裂纹扩展寿命<sup>[15]</sup>。另一方面,激光冲击使得 GH3044 合金的主要相  $\gamma$  奥氏体明显细化,晶粒尺寸减小,数量增多,提高了晶粒的滑移变形抗力,增加裂纹扩展的晶界阻力<sup>[16]</sup>。此外,激光冲击强化使得 Cr23C6 和 WC 等碳化物更为均匀细小,弥散分布在晶界和晶内的碳化物有效阻碍了位错运动,起到弥散强化的作用,有利于提高合金的抗疲劳强度。

在高能量 LSPwC 过程中,表面烧蚀层的存在影响 GH3044 合金的疲劳性能。金属的疲劳裂纹通常起源于次表面,而 LSPwC 产生的厚约 10~15  $\mu\text{m}$  的烧蚀层正是疲劳裂纹的萌生区域。烧蚀层内拉应力的存在增加了交变载荷中的拉应力水平。此外,激光烧蚀后, Ni、Cr 等金属元素含量下降、C、O 元素的大量富集也降低了表层抵抗疲劳裂纹扩展的强度。虽然烧蚀层以下一定深度内微观组织得到细化,且存有较大的残余压应力,但由于烧蚀层的存在, LSPwC 对 GH3044 合金高周疲劳寿命的提升不明显。

### 3 结论

文中采用 LSPwC 提高 GH3044 合金微观组织和力学性能,验证“LSPwC+水砂纸磨除烧蚀层”复合工艺的在涡轮机匣上应用推广的可行性,有如下结论:

(1) LSPwC 在试样表层产生约 10~15  $\mu\text{m}$  的烧蚀层,烧蚀层内 Ni、Cr 等金属元素含量下降、C、O 元素含量增加,且残余拉、压应力交替存在;激光冲击使试样表层  $\gamma$  奥氏体明显变形细化、碳化物分布更加均匀细小,晶粒细化影响层深约 700  $\mu\text{m}$ ;水砂纸磨除烧蚀层后,试样表面残余压应力约 510 MPa,应力影响深度层约 1 mm。

(2) 烧蚀层的存在影响激光冲击强化对试样疲劳性能的提升效果,水砂纸磨除烧蚀层后,其高周疲劳寿命提高为原始试样的 3 倍。表层晶胞的变形细化、碳化物的弥散强化以及残余压应力的引入是激光冲击强化提高试样高周疲劳寿命的主要原因。

### 参考文献:

- [1] Guo Jianting. High Temperature Alloy Manual [M]. Beijing: Science Press, 2008: 456-460. (in Chinese)  
郭建亭. 高温合金手册[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 456-460.
- [2] Zou Shikun. Application of laser shock processing on aeronautical manufacturing [J]. *China Surface Engineering*, 2016, 29(3). (in Chinese)  
邹世坤. 激光冲击强化在航空制造技术上的应用[J]. 中国表面工程, 2016, 29(3).
- [3] Zhang Y K, Lu J Z, Ren X D, et al. Effect of laser shock processing on the mechanical properties and fatigue lives of the turbojet engine blades manufactured by LY<sub>2</sub> aluminum alloy[J]. *Materials and Design*, 2009, 30: 1690-1703.
- [4] 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): 0921002.
- [5] Wang C, Shen X J, An Z B. Effects of laser shock processing on microstructure and mechanical properties of K403 nickel-alloy [J]. *Materials and Design*, 2016, 89: 582-588.
- [6] Li Wei, Li Yinghong, He Weifeng, et al. Development and application of laser shock processing [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2008, 45(12): 15-19. (in Chinese)  
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.
- [7] Sano Y, Obata M, Kubo T, et al. Retardation of crack initiation and growth in austenitic stainless steels by laser peening without protective coating [J]. *Materials Science and Engineering*, 2006, 417(1-2): 334-340.
- [8] Sano Y, Masaki K, Gushi T, et al. Improvement in fatigue performance of friction stir welded A6061-76 aluminum alloy by laser peening without coating [J]. *Materials and Design*, 2012, 36: 809-814.
- [9] Msswad 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*, 2012, 536: 82-91.
- [10] Jiao Yang, He Weifeng, Luo Sihai, et al. Study of micro-scale laser shock processing without coating improving the high cycle fatigue performance of K24 simulated blades [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(10): 1003002. (in Chinese)  
焦阳, 何卫锋, 罗思海, 等. 无保护涂层激光冲击提高 K24

- 合金高周疲劳性能研究[J]. 中国激光, 2015, 42(10): 1003002.
- [11] Li Yuqin, Wang Xuède, Song Feilong, et al. Study on microstructure and performances of 304 stainless steel treated by laser shock processing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(10): 1006005. (in Chinese)  
李玉琴, 王学德, 宋飞龙, 等. 激光冲击304不锈钢微观组织和性能研究 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(10): 1006005.
- [12] Qiao Hongchao, Zhao Yixiang, Zhao Jibin. Effect of laser peening on microstructures and properties of TiAl alloy [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2014, 22 (7): 1766–1773. (in Chinese)
- [13] Li Yuqin, He Weifeng, Nie Xiangfan, et al. Research on GH4133 nickel–alloy under laser shock processing [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2015, 44(6): 1517–1521. (in Chinese)  
李玉琴, 何卫锋, 聂祥樊, 等. GH4133 镍基高温合金激光冲击强化研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(6): 1517–1521.
- [14] Hua Yinqun, Xue Qing, Liu Haixia, et al. Study of the substructure in nanometer copper thin films treated by laser shock processing [J]. *Chinese Optical Letters*, 2013, 11(3): 1402.
- [15] Li Yazhi, Wang Qi, Zhang Zipeng, et al. Exploring further fatigue crack closure in residual stress field through numerical simulation [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2011, 29(1): 97–10. (in Chinese)  
李亚智, 王启, 张自鹏, 等. 残余应力场中疲劳裂纹闭合的数值分析[J]. 西北工业大学学报, 2011, 29(1): 97–102.
- [16] 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): 3548–3555. (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): 3548–3553.