

# 激光冲击强化钛合金熔覆修复试件疲劳性能研究

何卫锋 张 金 杨卓君 杨竹芳 李玉琴 李 靖

空军工程大学等离子体动力学重点实验室, 陕西 西安 710038

**摘要** 激光成形修复钛合金构件存在修复区晶粒粗大和残余拉应力,以及不同区域间组织及性能不均匀的问题,导致修复构件的疲劳性能明显降低。本文采用激光冲击强化技术,对激光熔覆修复试件进行了表面强化,研究了激光冲击对其疲劳强度的影响,并从残余应力和微观组织等方面分析了激光冲击提高熔覆试件疲劳强度的原因。结果表明,钛合金基体试件的疲劳强度为401 MPa,激光熔覆试件的疲劳强度为365 MPa,下降了9%;激光冲击强化后,熔覆试件的疲劳强度达到了450.80 MPa,相比基体提高了23.5%。激光冲击强化在试件表层引入了数百兆帕的残余压应力,影响层深度可达430  $\mu\text{m}$ ,同时可使修复区的组织和性能变得均匀,从而提高了修复试件的疲劳抗力。

**关键词** 激光技术; 激光熔覆; 激光冲击强化; 钛合金; 疲劳强度

**中图分类号** TN249; TG665 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201542.1103008

## Fatigue Properties Research of Titanium Alloy Repaired by Laser Cladding and Laser Shock Processing

He Weifeng Zhang Jin Yang Zhuojun Yang Zhufang Li Yuqin Li Jing

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

**Abstract** When repaired by laser forming repair, there generates tensile residual stress and bulky grains in the repair zone of titanium alloy components. Meanwhile, microstructures and performances are ill-distributed between the repair and matrix zone. Due to all above, fatigue strength of the repaired components is reduced seriously. Laser shock processing is adopted to treat the specimens which are repaired by laser cladding. The effect of laser shock processing on fatigue strength of the repaired specimens is researched. Mechanism of the effect is demonstrated by residual stress and microstructure analysis. The results suggest that fatigue limit of the matrix specimens is 401 MPa, but that of the laser cladding specimens is 365 MPa, which decreases by 9%; while treated by laser shock processing, fatigue limit of laser cladding specimens is improved up to 450.80 MPa, which increases by 23.5%. Considerable compressive residual stress is introduced by laser shock processing in the material surface, and depth of it reaches at 430  $\mu\text{m}$ . Moreover, microstructures and performances are well-distributed. Compressive residual stress and improved microstructures are the reasons for that fatigue strength is enhanced.

**Key words** laser technique; laser cladding; laser shock processing; titanium alloy; fatigue strength

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 140.3580

## 1 引 言

钛合金具有比强度高、耐蚀性、与复合材料的相容性好等优点,在飞机和发动机上的用量越来越大<sup>[1-2]</sup>。在加工和服役过程中,由于钛合金对缺口非常敏感,常常由于零部件局部损伤而导致整个零件报废,造成巨大的经济损失。例如,整体叶盘叶片局部被外来的砂粒等固体打伤,形成微小的缺陷,为保证装备安全可靠,必须更换整个叶盘<sup>[3-4]</sup>。因此,对零件进行修复,不仅可以挽回损失,而且可以节省时间,提高装备的可靠

收稿日期: 2015-05-19; 收到修改稿日期: 2015-07-18

基金项目: 国家973计划(2015CB057400), 国家自然科学基金(51205406)

作者简介: 何卫锋(1977—),男,副教授,主要从事航空发动机结构疲劳断裂与表面工程技术方面的研究。

E-mail: hehe\_coco@163.com

性和完好率<sup>[5-6]</sup>。

激光快速成形修复(LFR)技术具有“离散+堆积”的增材制造特点,可用于对局部损伤构件的快速修复,能够精确恢复零件的结构尺寸<sup>[7-8]</sup>。激光修复试样一般分成基体区、热影响区和修复区3个区域,各区域组织和性能不完全一致<sup>[9-11]</sup>。例如,与Ti-6Al-4V钛合金母材相比,激光快速修复区的韧性降低,但抗拉强度并未显著降低,呈现明显的高强低塑特性,这种不均匀性使得修复部件的抗疲劳性能降低,从而影响修复部件的使用寿命和可靠性<sup>[12-13]</sup>。因此,采用后续处理方法降低高强低韧不匹配性,提高修复区材料性能的均匀性,对提高修复部件的疲劳性能具有重要意义。

本文针对激光成形修复存在高强低韧、疲劳强度低的问题,将激光修复和激光冲击处理相结合,对钛合金材料进行组合修复。采用激光成形修复技术恢复损伤构件的几何形状,利用激光诱导的高压冲击波对修复区域进行处理,改善激光熔覆后不同区域的微观组织及表面残余应力分布,使激光熔覆修复区组织和性能与基体相近,从而提高修复构件的疲劳强度。

## 2 试件材料和试验方法

### 2.1 试验材料

本文所用材料为TC17钛合金,是一种近 $\beta$ 型 $\alpha+\beta$ 钛合金<sup>[14]</sup>,主要用于制造航空发动机风扇、压气机整体叶盘或叶片。TC17钛合金的主要化学成分(质量分数,%)为Al: 4.5~5.5, Mo: 3.5~4.5, Cr: 3.5~4.5, Sn: 1.6~2.4, Zr: 1.6~2.4, Fe: 0.30, C: 0.05, N: 0.05, H: 0.0125, O: 0.08~0.13,其余为Ti。

激光快速成形修复试验在LSF-I型激光立体成形设备上完成。首先在材料上预制凹槽,凹槽深度为3 mm;然后采用激光熔覆修复还原出完整形貌。合金粉末采用等离子旋转电极法制备的TC17球形粉,在试验之前先对其进行烘干处理,去除粉末中水分对激光覆熔的影响。激光快速成形修复的工艺参数是参考凝固技术重点实验室前期关于TC4钛合金激光熔覆工艺参数的研究<sup>[15]</sup>,经过多次探索试验得到,其具体参数如下:激光功率2000 W,扫描速度10 mm/s,送粉率4 g/min,多道搭接率25%。

图1为熔覆修复区的扫描电镜(SEM)观察图。从图中可以看出,修复区组织致密,无气孔、裂纹等修复缺陷;熔覆层单层沉积厚度在0.4 mm左右,从图中并未看到层与层之间明显的分界现象,说明激光熔覆修复形成的组织层间结合性良好。

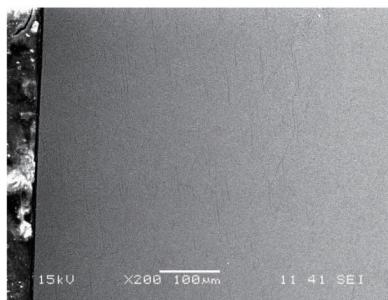


图1 熔覆修复区SEM图

Fig.1 SEM photograph of laser cladding repaired zone

试验所需为拉-拉疲劳试件,其尺寸如图2所示。其中试件中央10 mm×20 mm的区域为激光熔覆修复区域。

对熔覆试件待强化部位进行抛光处理,然后进行激光冲击强化(LSP),其在YLS-D25A型激光冲击强化系统上完成。作为一种高能激光表面改性技术,激光冲击强化的原理和过程是:采用脉冲功率密度超过1 GW/cm<sup>2</sup>的高能激光辐照材料表面,诱导产生压力大于1 GPa的高压冲击波,作用在材料表面并向内部传播,使材料发生超高应变率动态响应,从而形成较深(>1 mm)的残余压应力并发生微观组织变化,消除残余拉应力并使修复区性能均匀,从而达到提高修复构件疲劳强度的目的<sup>[16-20]</sup>。本文对钛合金进行激光冲击处理的具体参数为:激光波长为1064 nm,脉冲宽度为20 ns,光斑直径为3 mm,光斑搭接率为50%,4 GW/cm<sup>2</sup>的功率密度的光束冲击试件1次。采用分光镜将激光分成两路,对试件的两侧面同时进行处理,冲击区域在试件

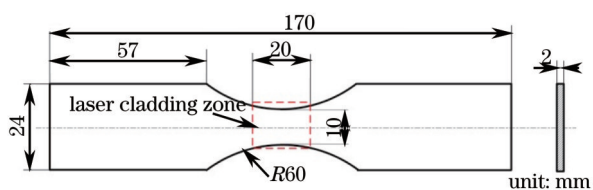


图2 标准拉-拉疲劳试件

Fig.2 Standard tension-tension fatigue specimen

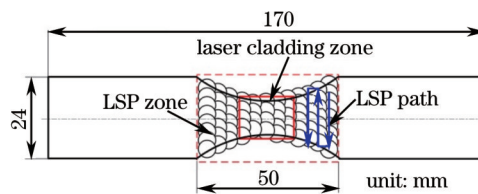


图3 疲劳试件强化区域与路径示意图

Fig.3 Impact zone and path of fatigue specimen

上的尺寸为 50 mm×24 mm,按垂直试件中心线的路径冲击,如图 3 所示。

### 2.2 试验方法

对不同状态的试件采用逐级加载法<sup>[1]</sup>进行轴向拉伸疲劳试验,应力比  $R=0.1$ ,加载频率为 15 Hz。试验在 MTS810 疲劳试验系统上完成,应力循环周次  $\Delta N = 2 \times 10^5$ 。疲劳极限  $\sigma$  可以根据(1)式得到。式中,  $\sigma_1$  为最后失效时的应力水平,  $\sigma_{ib}$  为最后失效的前一个应力水平,  $N_1$  为最后失效时的应力水平下进行的循环周次。

$$\sigma = \sigma_{ib} + \frac{N_1}{\Delta N} \Delta \sigma, \quad (1)$$

## 3 试验结果

本文进行了钛合金不同状态试件的静态拉伸试验和疲劳试验,静态拉伸试验的目的是为疲劳试验提供初始应力。

### 3.1 静态拉伸试验结果

图 4 为试件的真实应力-应变曲线图。试验结果表明,钛合金母材试件的抗拉强度为 1170 MPa,激光熔覆修复试件的抗拉强度为 961 MPa,仅为母材的 82%,强化后的抗拉强度为 1058 MPa,达到了基体的 90%。

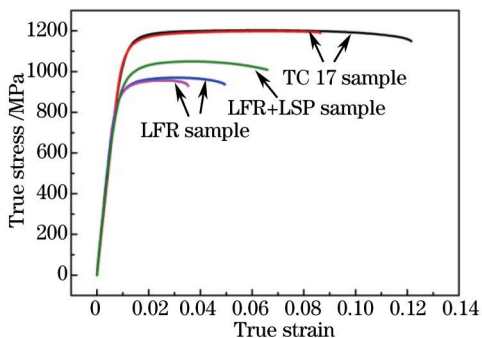


图4 不同状态试件的真实应力-应变曲线关系

Fig.4 True stress-strain curve of different specimens

表 1 所示为不同状态试样的静态拉伸性能数据。熔覆试件的屈服强度和延伸率均有下降,分别为基体的 10%和 35%,说明基体与熔覆区之间的性能存在较大的不均匀程度;而冲击处理后材料的屈服强度和延伸率均有不同程度的提高,达到了基体的 95%左右,基体与修复区之间性能的不均性降低。

表 1 不同状态试件的拉伸性能

Table 1 Tensile properties of different specimens

Specimen	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\delta_5$ /%
TC17	1178	1078	6.5
TC17	1162	1056	7.2
LFR	971	913	4.5
LFR	953	896	4.3
LFR+LSP	1058	962	6.2

### 3.2 疲劳试验结果

根据拉伸试验结果,激光熔覆试件的初始疲劳最大应力约为 300 MPa,考虑到基体试件和强化试件的疲劳强度有所增加,为了减少载荷加载级数,强化试件和基体试件的初始应力分别增加到 350 MPa和 400 MPa。由

于第一个基体试件加载到第二级即断裂,将后续试件的初始应力减小到 300 MPa。各试件的应力增量  $\Delta\sigma$  均为初始应力的 10%。不同状态的试件疲劳加载和破坏过程如图 5 所示。

试验结果表明,基体试件的疲劳极限为 401 MPa,激光熔覆试件的疲劳极限为 365 MPa,与基体试件相比,激光熔覆后疲劳极限下降了 9%;强化后熔覆试件的疲劳极限为 450.80 MPa,与激光熔覆试件相比,激光冲击强化把修复试件的疲劳极限提高了 23.5%;与基体试件相比,强化后修复试件的疲劳强度同样得到提高,达 12%。试验证明激光冲击强化可以有效提高激光熔覆试件的疲劳强度。

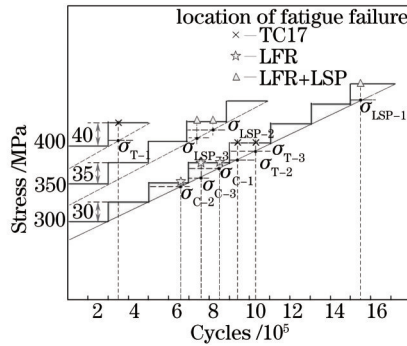


图5 不同状态试件疲劳试验加载与失效图

Fig.5 Loading and failure diagram of fatigue test for different specimens

## 4 分析与讨论

激光诱导冲击波对材料作用,提高激光熔覆试件疲劳强度的原因可从残余应力和微观组织变化两个方面进行分析。

### 4.1 残余应力

残余应力采用 X 射线衍射法,通过 X350A 型应力测定仪测得。测试采用侧倾固定  $\Psi$  法,每次测量采用 4 个  $\Psi$ ,分别为  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ ,采用的辐射靶为 Cu  $K\alpha$ ,衍射晶面为 Ti[213],应力常数为  $-277$  MPa,  $2\theta$ 角扫描为  $135.00^\circ \sim 149.00^\circ$ ,扫描步距为  $0.10^\circ/s$ ,计数时间为 1 s;X 光管电压和电流分别为 27.0 kV、7.0 mA;准直管直径为 2 mm。其中,每个点测试三次,取平均值作为该点的应力值。

激光熔覆试件表面残余应力的测试结果如图 6 所示。激光熔覆试件表面存在残余拉应力,熔覆修复区中心的拉应力值最大,并向两侧逐步递减,基体区的残余应力值较小,低于 100 MPa。激光冲击波的作用是诱导材料发生动态响应,可消除材料表面的残余拉应力,并形成一定数值的残余压应力。在经过激光功率密度为  $4 \text{ GW/cm}^2$  冲击之后,表面形成了约 650 MPa 的残余压应力,且分布较为均匀。

采用 X 射线衍射结合电化学腐蚀剥层的方法,对深度方向残余应力进行测量,电解液为体积分数为 5% 甘油和 95% 氯化铵饱和溶液。熔覆修复区残余应力随深度的变化曲线如图 7 所示。随着深度增加,熔覆区拉应力数值不断减小,在一定深度出现了平衡压应力,在之后的区域中存在拉应力和压应力交替出现的现象,但数值较小(平均小于 50 MPa)。经过功率密度为  $4 \text{ GW/cm}^2$  激光冲击 1 次后,深度方向的残余应力测试结

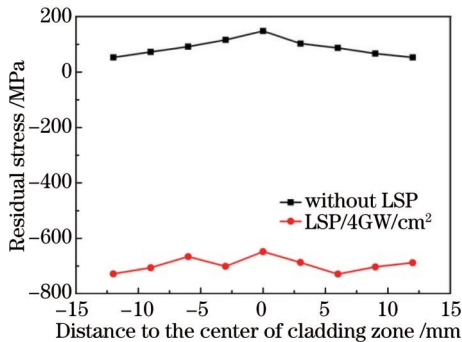


图6 熔覆试件表面残余应力分布

Fig.6 Surface residual stress distribution of cladding specimens

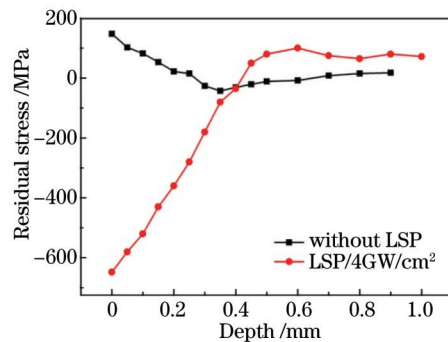


图7 熔覆区截面残余应力分布

Fig.7 Cross section residual stress distribution of cladding zone

果表明,随着深度增加,残余压应力数值逐渐减小,在一定深度处减小为0,之后转变为残余拉应力,转变深度为430  $\mu\text{m}$ 。

#### 4.2 微观组织

以功率密度为4  $\text{GW}/\text{cm}^2$ 的激光强化1次,观察试件的微观组织变化情况。图8为试件基体区的透射电镜(TEM)观察图。从图8(a)中可以看出,试件基体区组织粗大,但看不到位错和明显的缺陷;图8(b)为经4  $\text{GW}/\text{cm}^2$ 的功率密度强化1次处理后的透射电镜观察图,选区电子衍射花样已有成环趋势,说明组织发生了细化,而且存在大量细化晶粒,由明场像可以看出晶粒尺寸已经细化到纳米级别。

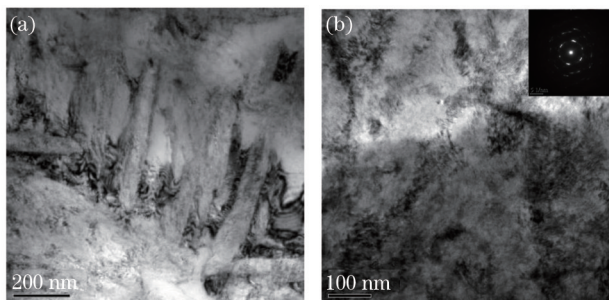


图8 钛合金试件基体区TEM图。(a) 未经过激光冲击的试件;(b) 激光冲击的试件

Fig.8 TEM photographs of cladding specimen in matrix zone. (a) Specimen without LSP; (b) specimen with LSP

图9(a)为试件熔覆修复区的透射电镜图。TC17钛合金激光熔覆后初生 $\beta$ 柱状晶内析出很多针状和板条状 $\beta$ 相,是典型网篮状魏氏组织,熔覆修复区组织存在很多取向一致的 $\beta$ 簇。4  $\text{GW}/\text{cm}^2$ 功率密度激光强化处理1次后,产生了高密度位错,如图9(b)所示。高功率激光诱导产生的冲击波高压力学效应,使熔覆修复区表层产生了具有超高应变率的动态塑性变形,塑性变形使得表层内部位错发生滑移并迅速增殖,位错运动在晶界或相界面处受到阻碍,使得这些区域位错密度增加<sup>[22]</sup>。Lindemann等<sup>[23]</sup>发现,位错密度 $\rho$ 随着压力 $P$ 的平方根( $\rho \propto P^{1/2}$ )的变化而变化,激光功率密度增加,形成的冲击波压力增大,在材料表层产生的位错密度随之增大。TC17是高堆垛层错能钛合金,结合高堆垛层错能钛合金的塑性变形特点和透射结果可知,在激光冲击强化作用下,超高应变率塑性变形在材料表面引起晶格畸变,使得表层材料产生组织细化,形成高密度位错。

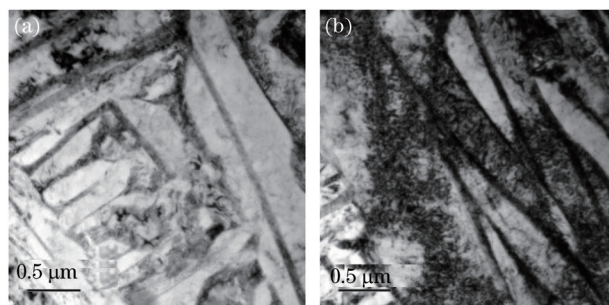


图9 钛合金试件熔覆修复区TEM图。(a) 未经过激光冲击的试样;(b) 激光冲击的试样

Fig.9 TEM photographs of cladding specimen in repaired zone. (a) Specimen without LSP; (b) specimen with LSP

由于疲劳裂纹一般源于试件表面。激光冲击强化使试件表层晶粒细化,裂纹驱动力被更多细小的晶粒承受,晶内核晶界的应变度相差较小,应力集中较小,因而材料受力均匀,裂纹不易萌生;对于钛合金材料,位错强化导致的强度增量与材料中位错密度的平方根呈正比<sup>[22]</sup>,位错密度增大,强度的增量越大,材料的疲劳抗性提高越明显。此外,冲击消除了残余拉应力,并产生了一定的残余压应力,可有效降低实际工作应力的幅值,从而提高疲劳裂纹萌生的临界应力水平<sup>[23-24]</sup>。激光冲击波对材料的这两种因素的共同作用,使得激光快速修复钛合金试件的疲劳抗力显著提高。

## 5 结 论

本文采用激光冲击强化对钛合金熔覆修复试件进行处理,研究了其对修复试件疲劳强度的影响,并从微观组织和残余应力两个方面分析了影响机理,有如下结论:

1) TC17基体试件的疲劳强度为401 MPa,熔覆修复试件的为365 MPa,修复后试件的疲劳强度降低了9%;激光冲击强化后,修复试件的疲劳强度达到450.80 MPa,比基体提高了23.5%。激光冲击强化可以显著提高修复试件的疲劳性能。

2) 激光诱导产生的残余压应力降低了试件表面的实际工作应力,提高了疲劳裂纹萌生的临界应力水平;同时激光冲击波作用使材料表层组织均匀细化,增加了裂纹萌生难度。残余压应力与晶粒细化,是激光冲击强化提高修复试件疲劳强度的主要原因。

## 参 考 文 献

- 1 Zhao Dandan. Development and application of titanium alloys in the aviation[J]. Foundry, 2014, 63(11): 1114-1117.  
赵丹丹. 钛合金在航空领域的发展与应用[J]. 铸造, 2014, 63(11): 1114-1117.
- 2 Jin Hexi, Wei Kexiang, Li Jianming, *et al.*. Research development of titanium alloy in aerospace industry[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(2): 280-292.  
金和喜, 魏克湘, 李建明, 等. 航空用钛合金研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(2): 280-292.
- 3 Zou Shikun, Gong Shuili, Guo Enming, *et al.*. Laser peening of turbine engine integrally blade rotor[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(6): 0601009.  
邹世坤, 巩水利, 郭恩明, 等. 发动机整体叶盘的激光冲击强化技术[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0601009.
- 4 S Spanrad, J Tong. Characterization of foreign object damage (FOD) and early fatigue crack growth in laser shock peened Ti-6Al-4V aerofoil specimens[J]. Procedia Engineering 2, 2010, 2(1): 1751-1759.
- 5 Liu Q, Madabhushi J, Bruce, *et al.*. Laser cladding as a potential repair technology for damaged aircraft components[J]. International J Structural Integrity, 2011, 2(3): 314-331.
- 6 Yang Wei. Advanced repair technologies of modern aero engine blisks[J]. Applied Laser, 2011, 31(4): 299-302.  
杨 微. 现代航空发动机整体叶盘的先进修复技术[J]. 应用激光, 2011, 31(4): 299-302.
- 7 Yang Jian, Chen Jing, Yang Jieqiong. Researches of microstructure and mechanical properties on TC18 titanium alloy wrought billet repaired by laser additive manufacturing[J]. Applied Laser, 2013, 33(5): 477-481.  
杨 健, 陈 静, 杨杰穷. 激光成形修复TC18钛合金锻件组织性能研究[J]. 应用激光, 2013, 33(5): 477-481.
- 8 V K Narva, A V Marants, Zh A Sentyurina. Investigation into laser cladding of steel-titanium carbide power mixtures on a steel substrate[J]. Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2014, 55(3): 282-288.
- 9 Lu Penghui, Liu Jianrui, Xue Lei, *et al.*. Microstructure and cracking behavior of K418 superalloy by laser forming repairing[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(2): 315-319.  
卢朋辉, 刘建睿, 薛 蕾, 等. 激光成形修复K418高温合金的显微组织与开裂行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(2): 315-319.
- 10 Zhao Weiqiang, Yang Xiaokun, Xue Lei, *et al.*. Study on microstructure and mechanical properties of 30CrMnSiNi2A super-strength steel by laser forming repair[J]. Applied Laser, 2015, 35(1): 48-52.  
赵卫强, 杨肖琨, 薛 蕾, 等. 激光成形修复30CrMnSiNi2A超高强度钢组织与力学性能研究[J]. 应用激光, 2015, 35(1): 48-52.
- 11 Qi Yongai, Zhao Jianfeng, Xie Deqiao, *et al.*. Flexural property of GH4169 nickel-based superalloy by laser repair[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1103009.  
戚永爱, 赵剑峰, 谢德巧, 等. 激光修复GH4169镍基高温合金的弯曲性能[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1103009.
- 12 Xue Lei, Chen Jing, Lin Xin, *et al.*. Low cycle fatigue property of laser forming repaired TC4 forgings[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(7): 1225-1229.  
薛 雷, 陈 静, 林 鑫, 等. 激光成形修复TC4合金锻件的低周疲劳性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(7): 1225-1229.
- 13 Zhao Wenyu, Lu Fengui, Li Zhuguo, *et al.*. Study on high-cycle fatigue behavior of laser-cladding stellite6 on 17-4PH stainless steel[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1003014.  
赵文雨, 芦凤桂, 李铸国, 等. 17-4PH不锈钢表面激光熔覆Stellite6合金涂层高周疲劳行为研究[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1003014.
- 14 Editorial board of China Aeronautic Materials Handbook. China Aeronautic Materials Handbook[M]. Beijing: China Standard Press, 2001.  
《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- 15 Zhang Shuangyin, Lin Xin, Chen Jing, *et al.*. Influence of processing parameter on the microstructure and forming characterizations

- of Ti-6Al-4V titanium alloy after laser rapid forming processing[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2007, 36(10): 1839-1843.
- 张霜银, 林 鑫, 陈 静, 等. 工艺参数参激光快速成形 TC4 钛合金组织及成形质量的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2007, 36(10): 1839-1843.
- 16 A King, A Steuwer, C Woodward, *et al.*. Effects of fatigue and fretting on residual stresses introduced by laser shock peening [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, 435- 436: 12-18.
- 17 Li Xingcheng, Zhang Yongkang, Lu Yalin, *et al.*. Research of corrosion resistance for AZ31 magnesium alloy by laser shock processing [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(4): 0403002.
- 李兴成, 张永康, 卢雅琳, 等. 激光冲击 AZ31 镁合金抗腐蚀性能研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(4): 0403002.
- 18 J Z Lu, K Y Luo, Y K Zhang, *et al.*. Effects of laser shock processing and strain rate on tensile property of LY2 aluminum alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2010, 528(2): 730-735.
- 19 Wang Cheng, Lai Zhilin, He Weifeng, *et al.*. Effect of multi-impact on high cycle fatigue properties of 1Cr11Ni2W2MoV stainless steel subject to laser shock processing[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(1): 0103001.
- 汪 诚, 赖志林, 何卫锋, 等. 激光冲击次数对 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢高周疲劳性能的影响[J]. *中国激光*, 2014, 41(1): 0103001.
- 20 Huang Wei, Chen Wei, Pan Hui, *et al.*. Effect of foreign object damage upon the high cycle fatigue strength of TC4[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2014, 36(3): 357-362.
- 黄 伟, 陈 伟, 潘 辉, 等. 外物损伤对钛合金 TC4 高周疲劳强度的影响研究[J]. *机械强度*, 2014, 36(3): 357-362.
- 21 Zhou Lei, He Weifeng, Wang Xuede, *et al.*. Effect of laser shock processing on high cycle properties of 1Cr11Ni2W2MoV stainless steel[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2011, 40(4): 174-177.
- 22 Marc Andre Meyers. *Dynamic Behavior of Materials*[M]. Zhang Qingming, Liu Yan, Huang Fenglei *et al.* trans. Beijing: National Defence Industry Press, 2006: 225-261.
- Marc Andre Meyers. 材料的动力学行为[M]. 张庆明, 刘 彦, 黄风雷等译, 北京: 国防工业出版社, 2006: 225-261.
- 23 Lindemann J, Buque C, Appel F. Effect of shot peening on fatigue performance of a lamellar titanium aluminide alloy[J]. *Acta Materialia*, 2006, 54(4): 1155-1164.
- 24 Nie Xiangfan, He Weifeng, Zang Shunlai, *et al.*. Effects on structure and mechanical properties of TC11 titanium alloy by laser shock peening[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2014, 29(2): 321-327.
- 聂祥樊, 何卫锋, 臧顺来, 等. 激光冲击对 TC11 钛合金组织和力学性能的影响[J]. *航空动力学报*, 2014, 29(2): 321-327.

栏目编辑: 宋梅梅