

## 激光冲击对 K403 合金激光熔覆修复微观组织和性能的影响

张佩宇, 汪 诚, 谢孟芸, 李玉琴, 安志斌

(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:** 针对激光熔覆修复 K403 镍基高温合金构件组织粗大和力学性能下降的问题, 提出采用激光冲击强化技术对修复区进行表面强化。利用 SEM 观察不同区域微观组织, 利用显微硬度、残余应力和高温拉伸强度测试研究其力学性能。结果表明, 激光冲击强化细化试样表层晶粒; 强化后, 试样基体区和熔覆区表面硬度分别提高 21% 和 8%, 影响深度约 0.8 mm; 激光冲击在试样表层引入约 610 MPa 且均匀分布的残余压应力, 影响深度层达 1.2 mm, 经保温处理后, 应力释放约 18%, 但在表面仍残留较大的残余压应力; 激光冲击提高了材料高温拉伸强度约 15%, 解决了激光熔覆修复 K403 镍基构件力学性能下降的问题。

**关键词:** 激光冲击强化; K403 合金; 微观组织; 残余应力; 拉伸强度

**中图分类号:** TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0906003

## Effect of laser shock processing on microstructure and properties of K403 alloy repaired by laser cladding

Zhang Peiyu, Wang Cheng, Xie Mengyun, Li Yuqin, An Zhibin

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

**Abstract:** Aiming at bulky grains and declination of mechanical properties of K403 nickel-alloy repaired by laser cladding, the laser shock processing (LSP) technology was applied to strengthen the surface of repaired region. The microstructure was observed through SEM and the mechanical properties were represented by testing microhardness, residual stress and high temperature tensile strength. The results show that the LSP refines crystalline grain of the surface of the specimen. After LSP, the surface hardness of matrix region and cladding zone were improved by 21% and 8% respectively. The hardness affected depth of the LSP was about 0.8 mm. Besides, about 610 MPa and equally distributed residual compressed stress was generated and the affected depth was about 1.2 mm. After thermal retardation, the residual compressed stress was released by about 18%, but high residual compressed stress also existed on surface. The high temperature tensile strength was increased by about 15% after LSP. The problem of mechanical properties decrease of K403 nickel-alloy repaired by laser cladding was solved.

**Key words:** laser shock processing; K403 alloy; microstructure; residual stress; tensile strength

收稿日期: 2017-01-05; 修订日期: 2017-02-10

基金项目: 国家自然科学基金(51305456); 陕西省工业攻关项目(2014K08-31)

作者简介: 张佩宇(1993-), 男, 硕士生, 主要从事材料表面工程方面的研究。Email: zpy7716061@163.com

导师简介: 汪诚(1974-), 男, 教授, 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

## 0 引言

镍基高温合金具有良好的高温强度和抗氧化、抗腐蚀性能、优异的抗疲劳和抗蠕变性能、断裂性能和组织稳定性,是航空发动机的定寿材料,被广泛应用于涡轮导向叶片<sup>[1]</sup>。涡轮叶片由于工作环境恶劣,经常会出现变形、裂纹和缺损等问题,造成构件的报废。为了节约成本,将废弃零件再利用,实现构件的绿色高性能再制造,在不改变基体材料性能的前提下,修复损伤合金部件具有重要的经济价值。

国内目前主要采用高能束激光热加工如焊接、熔覆等对缺陷部件进行二次加工和制造。激光熔覆(Laser Cladding, LC)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>[2]</sup>。但是,在制造中激光热效应和材料冷热不均匀将导致的组织晶粒粗大和残余拉应力<sup>[3]</sup>的形成,使得修复后部件的力学性能下降。为解决这一问题,在热加工后通常用热处理等方法恢复组织和力学性能,但是某些部件,例如合金叶片,在激光热加工后不允许二次热处理,否则叶片材料性能将严重降低。

激光冲击强化技术(Laser Shock Processing, LSP)是利用纳秒脉冲(ns 量级)激光诱导形成高压冲击波的力学效应对材料进行表面处理,引起材料的超高应变率动态冷塑性变形,从而产生稳定的残余压应力和微观组织变化<sup>[4]</sup>。相比热处理,激光冲击强化具有高能高压、局部可调的优点。国内外有不少关于激光冲击强化改善熔覆(焊接)修复构件性能的研究。何卫锋<sup>[5]</sup>等人研究激光冲击 TC17 钛合金熔覆修复试样的疲劳性能,结果表面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。Omar Hatamleh<sup>[6]</sup>对激光冲击铝合金焊接接头进行研究,经激光冲击强化在 AA2195 铝合金表面和一定深度范围内引入了较大数值的残余压应力,显微硬度显著提高,疲劳裂纹扩展速率下降,抗疲劳性能提高。但是对于镍基高温合金的研究鲜有报道。

文中针对激光熔覆修复 K403 镍基高温合金构件组织粗大和力学性能下降的问题,运用激光冲击强化处理修复区表面,改善表面不同区域微观组织、硬度和残余应力分布,提高修复构件高温拉伸强度。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

实验采用 K403 镍基高温合金,这种合金在铸态下的主要组成相是: $\gamma$  固溶体、 $\gamma'$  相、 $\gamma$ - $\gamma'$  共晶、MC 碳化物。 $\gamma'$  相是合金的主要强化相,占合金质量的 58%~59%。它用多种金属元素综合强化,具有较高的高温强度。该合金的铸造性能良好,适合于制造 1000  $^{\circ}\text{C}$  以下工作的燃气涡轮导向叶片和 900  $^{\circ}\text{C}$  以下工作的涡轮转子叶片及其他零件<sup>[1]</sup>,K403 合金的主要化学成分见表 1。

表 1 K403 合金主要化学成分(wt%)

Tab.1 Main chemical components of K403 alloy

Component	Ni	Fe	C	Cr	Co
Value	Bal	<2.0	0.11~0.19	10.1~12.1	4.4~6.1
Component	Mn	W	Mo	Al	Ti
Value	<0.5	4.7~5.9	3.8~4.4	5.5~5.8	2.1~2.6

### 1.2 实验方法

激光熔覆实验是在基于粉末床的选区激光熔化成型装备上完成的。熔覆用合金粉末采用 X-40 钴基金属粉末,流动性较好,在实验之前对其进行干燥处理,去除粉末中的水分。如图 1 所示,采用同步供给式方法修复试样,首先在材料上预制凹槽(熔池),凹槽深度为 3 mm;然后采用激光熔覆修复还原出完

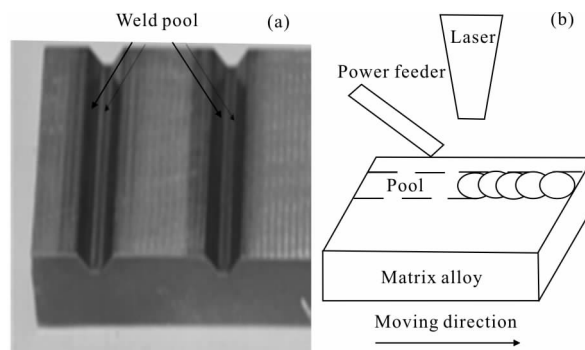


图 1 试样激光熔覆示意图

Fig.1 Schematic of laser cladding of specimen

整的形貌。激光熔覆具体工艺参数：激光功率密度为 2 500 W,送粉率为 6 g/min,扫描速度为 6 mm/s,氩气保护气流量为 120 L/h,多道搭接率为 30%,光斑直径为 3 mm。

实验在 YLSS-D25A 型激光冲击强化系统上完成。激光冲击处理的具体参数：激光波长为 1 064 nm,脉冲宽度为 20 ns,光斑直径为 3 mm,光斑搭接率为 50%,功率密度为 12 GW/cm<sup>2</sup>,冲击一次。

### 1.3 测试方法

采用 ZEISS SUPRA55 型扫描电子显微镜(SEM)观察激光冲击强化后试样表层和心部显微组织。显微硬度测试采用 Duramin-10 硬度仪,载荷为 200 g,加载时间为 15 s,表面硬度测试点选取如图 2 所示。测量深度方向硬度时,可将试件沿与表面呈 45°的方向切开,并做成硬度测试试样,测试 45°表面上的硬度。采用 X-350AX 应力仪分别测试试样熔覆区和基体区的残余应力,测试方向如图 2 所示。测量深度方向残余应力时,对试样表面进行电解抛光,每隔 0.2 mm 测量一次。

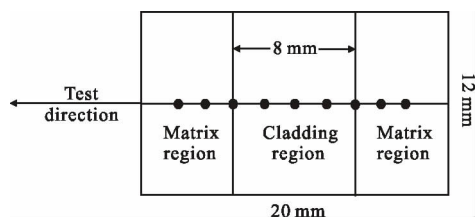


图 2 表面硬度和残余应力测试方向

Fig.2 Test direction of surface hardness and residual stress

高温拉伸性能测试在 BZ-GD-30 高低温拉伸实验机器上进行,高温拉伸试样的尺寸如图 3 所示,图中熔覆区尺寸为 6 mm×8 mm,激光冲击区域为 6 mm×16 mm。高温拉伸实验参数：设定温度为 600、700、800、900 °C,保温约 10 min,拉伸速率为 0.5 mm/min。

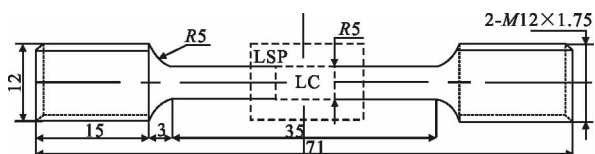


图 3 标准高温拉伸试样

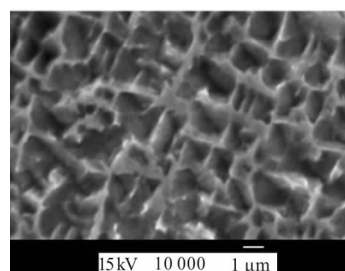
Fig.3 Standard high temperature tensile specimen

## 2 结果及分析

### 2.1 微观组织

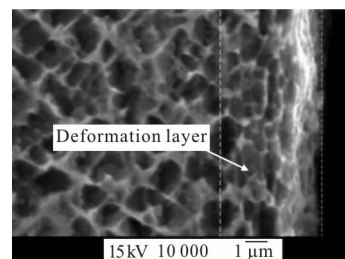
采用 SEM 观察强化后修复试样不同区域表层和心部显微组织。其中,心部组织可视为基体材料结构特征,表层组织为强化影响层。

图 4 是激光冲击基体区(K403 合金)横截面的 SEM。从图 3(a)可以看出,基体区心部  $\gamma'$  相呈方形,且分布均匀;强化后(图 3(b)),激光冲击波使基体区表层组织发生剧烈塑性变形,试样表层  $\gamma'$  相沿垂直冲击方向被压缩,胞壁变薄,最上面的表面组织有明显细化,变形区深度大约为 5  $\mu\text{m}$ 。



(a) 基体区心部组织

(a) Microstructure of the core in matrix zone



(b) 基体区表层组织

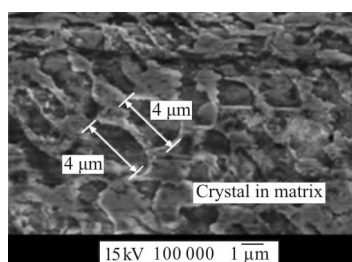
(b) Microstructure of the surface in matrix zone

图 4 激光冲击基体区 SEM 图

Fig.4 SEM photographs of matrix zone after LSP

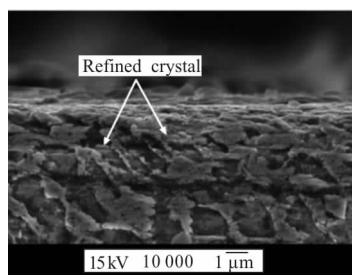
图 5 是激光冲击熔覆区(X-40 钴基金属粉末)横截面的 SEM 图,熔覆区基体组织主要为等轴晶,晶粒相对粗大,其尺寸约为 4  $\mu\text{m}$ (图 5(a))。激光冲击使熔覆区表层晶粒沿塑性变形方向的晶臂被压缩(图 5(b)),最表面晶粒细化,晶粒尺寸约为 1~2  $\mu\text{m}$ 。

激光冲击表面晶粒细化是通过激光诱导的等离子体冲击波实现,高压等离子冲击波是形成高应变



(a) 熔覆区基体组织

(a) Microstructure of the matrix in cladding zone



(b) 熔覆区表层组织

(b) Microstructure of the surface in cladding zone

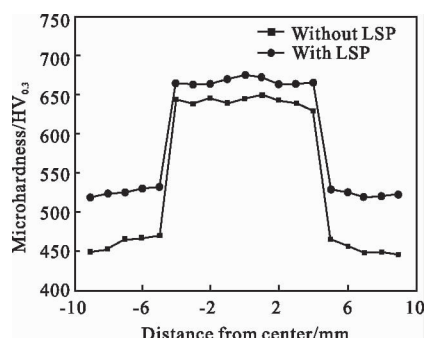
图 5 激光冲击强化熔覆区 SEM 图

Fig.5 SEM photographs of cladding zone after LSP

率塑性变形的能力载体，是形成实现表面晶粒细化的直接动力。冲击波在性质不同的界面上将发生反射和折射，K403 熔覆修复试样表面存在多种界面和缺陷，从而引发冲击波的反射和折射，形成复杂的波系。当复杂波系的波压大于材料的动态屈服强度时，材料表面晶粒发生位错和变形<sup>[7]</sup>。在冲击波的持续作用下，位错塞积形成位错墙，而位错墙随着取向差增大逐步演变成新的晶界，新晶界的产生伴随新的细小晶粒形成，最终实现表层晶粒细化。

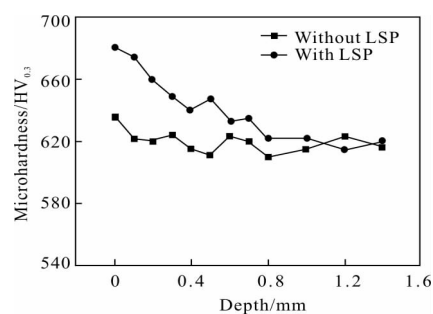
## 2.2 显微硬度

激光冲击前后修复试样不同区域的表面显微硬度分布如图 6(a)所示，图中正负 4 mm 范围内为熔覆区。从图中可以看出，强化前基体区的显微硬度值约为 461 HV<sub>0.3</sub>，熔覆区的硬度约为 633 HV<sub>0.3</sub>，分布均匀；基体区到修复区有一个台阶式的过渡，这个区域为过渡结合区(热影响区)，这是因为熔覆用 X-40 钴基金属粉末比基体 K403 材料有着更高的硬度。强化后的试样不同区域的硬度分布趋势与原始熔覆试样大致一致，但表面不同区域的硬度均有所提高，相对于强化前，强化后试样的基体区和熔覆区硬度分别提高 21%和 8%。



(a) 不同区域表面硬度

(a) Surface hardness in different regions



(b) 熔覆区截面硬度

(b) Cross section hardness in cladding zone

图 6 熔覆修复试样硬度分布

Fig.6 Hardness distribution of cladding repaired specimen

图 6(b)为激光冲击前后熔覆区截面显微硬度分布。强化前，试样沿深度方向的硬度值在 600~640 HV<sub>0.3</sub> 之间。强化后的试样显微硬度提高，由表及里硬度下降，深度大于 0.8 mm 时接近未处理试样硬度值。

激光冲击强化提高材料硬度作用机理如下：(1) 激光诱导高压冲击波作用材料表面产生剧烈的塑性变形，其加工硬化会使表面显微硬度加大；(2) 在剧烈塑性变形层中，材料表面发生晶粒细化，晶粒细化可以提高金属试样的硬度和强度<sup>[8]</sup>。此外，随着冲击波在材料内部传播衰减，材料内部的塑性变形逐渐减小，相应地硬度变化减小，直至趋于稳定。

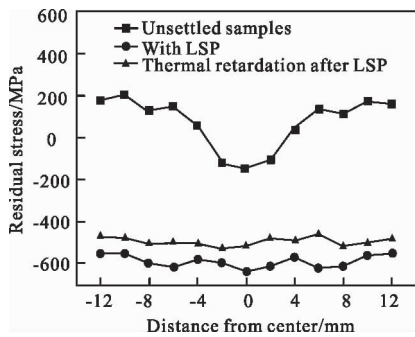
## 2.3 残余应力

图 7 是原始熔覆修复试样、激光冲击修复试样以及 600 °C 保温 2 h 后激光冲击修复试样的残余应力分布。不同区域表面残余应力分布如图 7(a)所示，原始熔覆修复试样熔覆区中心处呈压应力状态，最大为 164 MPa，并由中心向两边递增，在热影响区成拉应力状态，约 272 MPa。激光冲击在试样表面引入



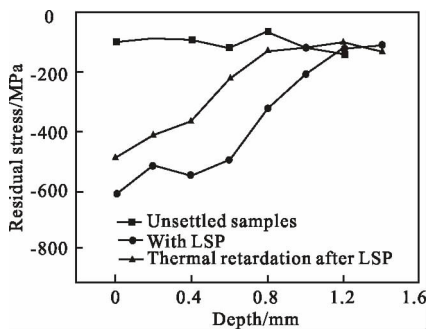
了约 530~650 MPa 且均匀分布残余压应力。经 600 °C 2 h 保温后,激光冲击修复试样表面残余应力有所释放,下降约 18%,影响深度减小。

图 7(b)是三种状态下试样熔覆区截面残余应力分布。强化前,熔覆区沿深度方向呈压应力状态,但数值较小,约 50~150 MPa。强化后,试样表面残余压应力最大,影响深度约 1.2 mm。保温后,熔覆区截面残余应力值有所下降,影响深度约 0.8 mm。



(a) 不同区域表面残余应力分布

(a) Surface residual stress in different regions



(b) 熔覆区截面残余应力

(b) Cross section residual stress in cladding zone

图 7 熔覆修复试样残余应力分布

Fig.7 Residual stress distribution of cladding repaired specimen

激光熔覆具有快冷快热的特点,合金粉末在激光熔覆过程中受热,在熔池中呈液态,对基体结合区膨胀作用力较小。而在熔池冷却阶段时,却要经历液态收缩、凝固收缩和固态收缩等复杂情况<sup>[9]</sup>。如图 8 所示,熔池开槽在试样表面,熔覆层的冷却收缩受左右两端基体的约束,并对左右两端基体产生一拉力  $F$ ,进而在结合区产生拉应力。由于试样左右对称,在左右两端拉力  $F$  的作用下,试样表面产生一弯矩  $M$ ,使得试样有弯曲的趋势(两端向上,中间内凹)。

因此,导致了试样熔覆层(中间)呈现压应力。

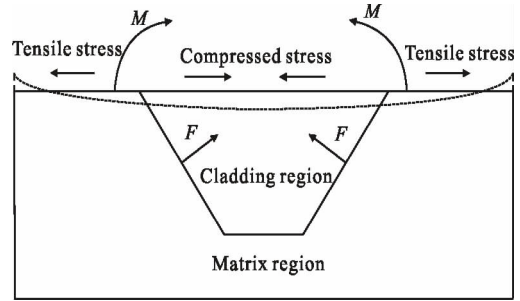


图 8 熔覆试样残余应力的产生

Fig.8 Residual stress appearance of cladding repaired specimen

激光冲击强化使得试样表面产生剧烈的塑性变形,并引入较大的残余压应力,消除了熔覆层与 K403 合金基体结合时产生的残余拉应力。虽然激光冲击修复试样在高温环境下出现了部分应力释放,但相比于原始熔覆修复试样,其表面和深度方向内仍存有较大的残余压应力。

#### 2.4 高温拉伸性能

从表 2 可知,与熔覆试样相比,600 °C 时激光冲击修复试样的抗拉强度提高约 15%。随着温度的升高,熔覆层与基体之间的结合强度降低,造成修复试样的高温拉伸强度下降。

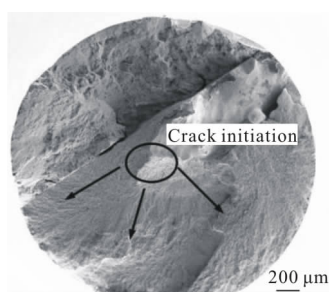
表 2 修复试样高温拉伸强度

Tab.2 High temperature tensile strength of repaired specimen

Temperature/°C	Tensile strength/MPa		Increment rate
	LC+LSP	LC	
600	843	732	15.2%
700	695	592	17.4%
800	421	370	13.8%
900	359	314	14.3%

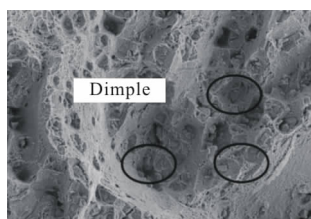
为进一步研究激光冲击强化提高试样高温拉伸性能的机理,对 900 °C 高温拉伸实验中激光冲击修复试样断口进行分析。从图 9(a)可以看出,试样裂纹源起始于熔覆区和基体区过渡结合的次表面,过渡结合区是整个试样的薄弱部分,在拉伸过程中容易在此处发生断裂。激光冲击强化提高了试样结合区

表面及次表面的显微硬度,硬化层的塑变抗力得以加强,迫使裂纹源的位置从结合区次表面向内移一段距离。另一方面,激光冲击强化使得试样表层各区域的晶粒尺寸减小,数量增多,晶界增多,可以提高滑移变形抗力,增加裂纹扩展的晶界阻力<sup>[10]</sup>。在激光冲击试样的断口处可以观察到大量的韧窝组织,如图 9(b)所示,韧窝组织的出现可以有效延缓裂纹的扩展<sup>[11]</sup>。此外,激光冲击消除了结合区的残余拉应力,虽然在高温下部分压应力得到释放,但在表面及深度方向还存在有较大的残余压应力,提高了试样的抗拉强度。



(a) 断口宏观图

(a) Macrograph of fracture



(b) 韧窝组织

(b) Dimples

图 9 激光冲击熔覆修复试样断口微观组织

Fig.9 Fractograph of cladding repaired specimen after LSP

### 3 结 论

文中采用激光冲击强化提高 K403 镍基高温合金熔覆修复试样组织和力学性能,有如下结论:

(1) 激光冲击强化在试样表层引入 5 μm 左右的塑性变形层,并使表层晶粒细化。

(2) 激光冲击强化能提高熔覆修复试样表面硬度,其中基体区和熔覆区硬度分别提高 21% 和 8%,影响深度约为 0.8 mm。

(3) 激光冲击强化消除了修复试样熔覆层与基

体结合区的残余拉应力,并在试样表层引入约为 610MPa、均匀分布的残余压应力,影响深度约 1.2mm。

(4) 经 600 °C 保温 2 h 后,应力释放约 18%;激光冲击强化能提高修复试样高温拉伸强度约 15%。

(5) 激光冲击强化使试样表层发生剧烈的塑性变形,一方面压缩表层晶胞、增加位错密度、使得细化晶粒;另一方面产生加工硬化、提高表面硬度;此外,激光冲击能引入较大的残余压应力,高温环境下部分应力释放后,仍在一定深度内存有较大的残余压应力。硬度的提高、晶粒细化以及残余压应力的共同作用下,提高了 K403 合金熔覆修复构件的高温拉伸强度。

### 参 考 文 献:

- [1] Yan Anru, Yang Tiantian, Wang Yanling, et al. Forming process and high temperature mechanical properties of variable energy laser selective melting manufacturing IN718 superalloy [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23 (6): 1695-1704. (in Chinese)  
闫岸如, 杨恬恬, 王燕灵, 等. 变能量激光选区熔化 IN718 镍基超合金的成形工艺及高温机械性能 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(6): 1695-1704.
- [2] Cai Zhixiang, Zeng Xiaoyan. Development and applications of laser micro cladding [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2010, 3(5): 405-414. (in Chinese)  
蔡志祥, 曾晓雁. 激光微熔覆技术的发展及应用 [J]. 中国光学, 2010, 3(5): 405-414.
- [3] Bian Hongyou, Li Xiangpeng, Li Ying, et al. Research on the laser deposition repair of GH4169 [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 0206006. (in Chinese)  
卞宏友, 赵翔鹏, 李英, 等. 激光沉积修复 GH4169 合金试验研究 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(2): 0206006.
- [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. (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): 0921002.
- [5] He Weifeng, Zhang Jin, Yang Zhuojun, et al. Fatigue properties research of titanium alloy repaired by laser cladding and laser shock processing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(11): 1103008. (in Chinese)  
何卫锋, 张金, 杨卓君, 等. 激光冲击强化钛合金熔覆修复试件疲劳性能研究 [J]. 中国激光, 2015, 42(11): 1103008.

- [6] Omar Hatamleh. A comprehensive investigation on the effects of laser and shot peening on fatigue crack growth in friction stir welded AA2195 joints [J]. *International Journal of Fatigue*, 2009, 31: 974–988.
- [7] 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.
- [8] Qiao Hongchao, Zhao Yixiang, Zhao Jibin, et al. Effect of laser peening on microstructures and properties of TiAl alloy [J]. *Optics & 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 合金组织和性能的影响[J]. *光学 精密工程*, 2014, 22(7): 1766–1773.
- [9] Liu Hongxi, Leng Ning, Zhang Xiaowei, et al. Microstructure and wear behavior of WC/Co50 composite coatings on 40Cr cutting tool surface prepared by laser cladding [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(1): 0120001. (in Chinese)  
刘洪喜, 冷凝, 张晓伟, 等. 40Cr 刀具表面激光熔覆 WC/Co50 复合涂层的微观组织及其耐磨损性能 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(1): 0120001.
- [10] Liu Jun, Yang He, Sun Zhichao. High temperature tensile fracture behavior of K403 Ni–based superalloy [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2014, 37(7): 25–28. (in Chinese)  
刘君, 杨合, 孙志超. K403 镍基高温合金的高温拉伸断裂行为[J]. *兵器材料科学与工程*, 2014, 37(7): 25–28.
- [11] Zhang Lei, Lu Jinzhong, Zhang Yongkan, 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.