

文章编号: 0253-2239(2010)08-2311-06

直升机发动机涡轮导向器激光修复组织性能研究

徐松华 肖 阳 李 健

(陆航研究所,北京 101121)

摘要 研究了直升机涡轮导向器叶片的激光修复技术。以直升机四级涡轮导向器分解叶片为基材,以镍基合金为熔覆材料,在激光功率为 1~2 kW,扫描速度为 2~15 mm/s,光斑直径为 1~3 mm,层厚为 0.2~0.6 mm 的工艺参数条件下,研究熔覆层的表面成形、显微硬度以及微观组织形貌。结果表明,综合叶片宏观形态、硬度分析与扫描电镜分析结果,可以得到组织细密、与基体呈良好冶金结合且无明显微观裂纹的熔覆层。因此,采用激光修复技术对受损涡轮导向器叶片进行修复的方案是可行的。

关键词 激光技术;叶片修复;激光修复技术;直升机

中图分类号 TG174.44 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103008.2311

Organization Property Researches of the Laser Repair Technology in the Helicopter Engine Turbine Oriented Implement

Xu Songhua Xiao Yang Li Jian

(Research Institute of Army Aviation, Beijing 101121, China)

Abstract The repair of the helicopter turbine oriented implement leaf blade was investigated by employing the laser repair technology. The fourth turbine oriented implement leaf blade of a helicopter and the Ni-base alloy were utilized as the substrate and layer cladding material, respectively. The surface figuration, microhardness and microstructure of the cladding layer were studied under laser power of 1~2 kW, scan velocity of 2~15 mm/s, facula diameter of 1~3 mm and thickness of 0.2~0.6 mm. The rigidity analysis, scanning electron microscope (SEM) observations and the macroscopical modality of the repaired leaf blade indicate that laser cladding layers of close organization and good metallurgy union were obtained. Therefore, it is feasible to employ the laser modification technology to repair the turbine oriented implement leaf blade shattered.

Key words laser technique; repair of leaf blade; laser repair technology; helicopter

1 引 言

激光熔覆修复航空发动机叶片具有重要的经济意义,国内外已开展许多工作。美国霍尼韦尔公司已经成功利用激光修复技术于 LF507 涡扇喷气发动机上,叶片的翻修成本仅为购置新叶片价格的 1/5,修理的涡轮叶片,可以比更换这些叶片节约 18 万美元^[1,2];英国罗-罗公司激光修复技术对 RB211 发动机涡轮叶片冠部阻尼面进行钴基耐磨合金敷层强化处理,获得非常好的效果^[3,4]。我国激光熔覆修复技术在新型航空发动机和国外进口航空发动机研制、生产与修复方面进行了大量探索,在修复叶片叶尖磨损、叶片冠部阻尼面的强化与修复

和修复叶片三维空间缺陷等方面取得了许多成果。但是激光修复技术应用于航空发动机等关键零件研制与修复时,在技术推广、批量生产等方面尚有明显的差距^[5~7]。

直升机发动机涡轮导向器叶片价格昂贵,发生损伤如不能得到及时备件更换将影响系统工作。传统的航空维修技术存在许多问题,例如许多叶片不能采用现有焊接技术维修,或者在维修过程中由于变形、开裂或热损伤而造成叶片报废,或者由于修复时受热使性能降低导致叶片使用寿命缩短、可靠性下降^[8,9]。此外维修效率低、后续加工量大、表面成形差、工艺复杂且难于控制等问题也困扰维修人员。

收稿日期: 2009-10-14; 收到修改稿日期: 2009-12-10

作者简介: 徐松华(1979—),男,硕士,工程师,主要从事航空维修工程方面的研究。E-mail: xush_xush@sina.com

利用激光修复技术,对涡轮导向器叶片排气边出现的裂纹进行修复,以探索叶片的批量修复,延长零部件使用寿命,提高修理能力,缓解航材短缺^[10,11]。

本文以激光修复技术作为直升机四级涡轮导向器分解叶片表面损伤的修复手段,研究叶片熔覆层的表面成形、显微硬度以及微观组织形貌。

2 激光修复技术熔覆试验

2.1 试验材料

2.1.1 基材

基材为直升机发动机燃气四级涡轮导向器分解叶片,化学成分的质量分数为: $W(C)=0.10\% \sim 0.25\%$; $W(Mn)=0.6\% \sim 1.2\%$; $W(Si)=0.7\% \sim 1.5\%$; $W(Cr)=20\% \sim 22\%$; $W(Ni)=11.0\% \sim 12.5\%$; $W(W)=2.4\% \sim 3.0\%$; $W(Ti)=0.05\% \sim 0.20\%$; $W(Mo)=0.25\%$; $W(V)=0.2\%$; $W(S)=0.04\%$; $W(P)=0.045\%$,余量为 Fe。表面用粗砂纸打磨,并用丙酮清洗。如图 1 所示。



图 1 四级导向器分解叶片

Fig. 1 Decompose lamina of the fourth oriented implement

2.1.2 熔覆材料

选择熔覆粉末,主要考虑高温性能满足工作温度要求,材料力学性能优于基材,对基材具有良好的浸润性,熔覆粉末-基材固溶度。激光修复采用镍基高温合金粉末。镍基合金主要特点是含有硅和硼,具有自我脱氧和自我造渣的性能,这就是所谓的自熔剂。这种自熔性合金材料被重熔时在熔覆层表面形成薄膜,能防止合金中的元素被氧化,获得氧化物含量相对低、气孔率少的熔覆层。镍基合金对基材有较大的适应性,可用于碳钢、合金钢、不锈钢以及铸铁等多类材料。

根据三级,四级导向器叶片的工作条件,选择 ZSG-F800 合金粉末(图 2),粒度为 250 目($58 \mu\text{m}$),其主要化学成分为 FeCrNi 基合金,含铁量较高,主要用 Cr 和 Mo 固熔强化的镍基合金,具有良好的抗

氧化和耐腐蚀性能,与导向器材料在化学与物理性能上有很好的适配性。该材料在 $900 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下具有很好的持久和蠕变强度,熔点为 $1480 \text{ }^\circ\text{C}$,有很好的热强性。以 ZSG-F800 合金粉末为基础,通过多次试验对粉末材料成分进行适当调整,使修复后导向器满足维修要求。



图 2 ZSG-F800 合金粉末

Fig. 2 ZSG-F800 alloy powder

2.2 实验设备及仪器

实验中使用的设备及仪器有:

1) LENS850R 激光快速修复系统,包括:6 kW 光纤激光器,7 轴计算机 SIMENS 数控控制系统,送粉器、检测与闭环控制单元,先进的控制软件和操作界面,循环惰性气体环境,西门子 810D 数控; $3 \text{ m} \times 1.2 \text{ m} \times 1 \text{ m}$; 2) DX-2000 显微硬度计; 3) JXP-2 光学显微镜; 4) TH160 里氏硬度计; 5) 显微金相仪。

2.3 实验方案与方法

2.3.1 四级导向器叶片裂纹特征

将四级导向器分解叶片,去除叶片表面污物,使其满足无损探伤的要求。

从叶片排气边取样,金相法制备,电子显微镜观察,发现该叶片的损伤失效特征如图 3 所示。

由图可知,1) 叶片排气边掉块,如图 3(a)所示,由于已经发生的掉块导致大的豁口形成。图中可见一个大块与一小块正欲脱落下来; 2) 裂纹沿晶界发生与扩展,这是导致掉块的原因; 3) 晶界上有很多孔洞形成,如图 3(a)、(b)和(d),在裂纹尖端前面有许多不连续孔洞。这可能表明晶界上裂纹是先通过孔洞形成而发生的; 4) 裂纹两侧和裂纹尖端存在氧化腐蚀,如图 3(c)和(e)所示; 5) 叶片基体材料发生了内氧化侵蚀,如图 3(f)所示。晶界上的第二相粒子被氧化腐蚀了,同时在其邻区也形成了一些腐蚀微孔洞; 6) 在图 3(f)中还可以看到裂纹前沿的破裂呈犬齿交错撕裂状,表明材料遭受到较大的张应力作用。

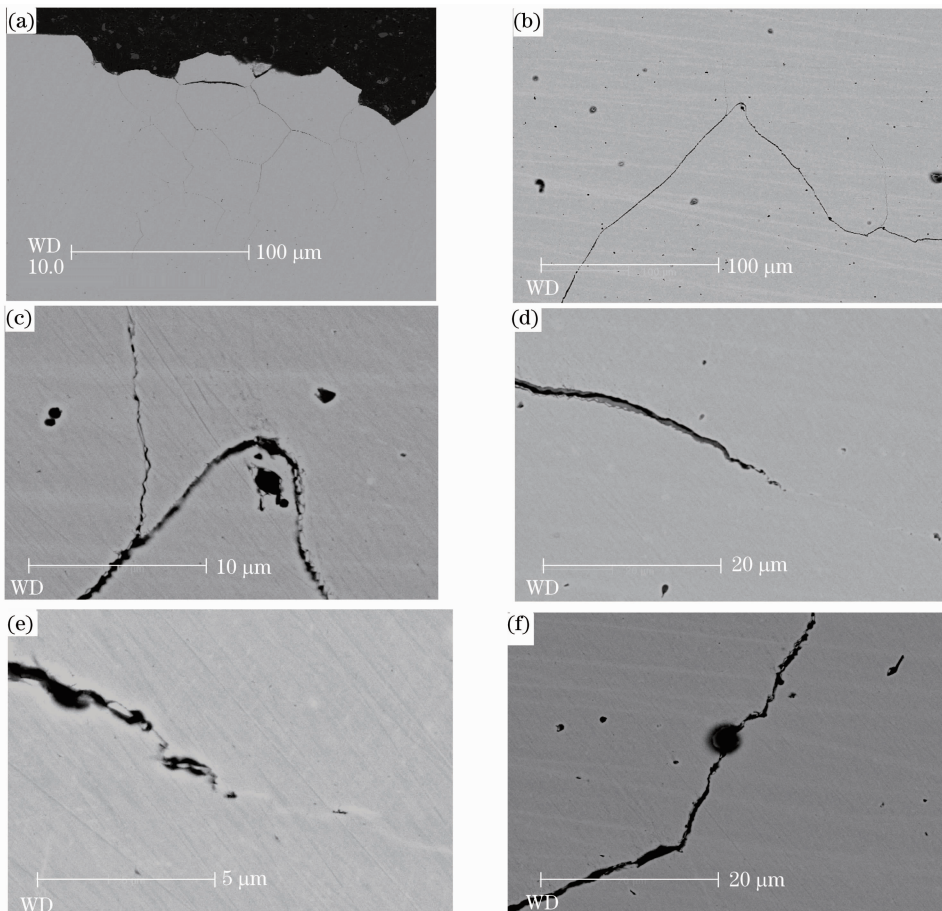


图 3 四级导向器叶片的损伤失效特征

Fig. 3 Damage failure features of the fourth oriented implement lamina

2.3.2 修复工艺

(1) 热处理

导向器叶片先行热处理, 1070 °C 回熔热处理, 修复后回火消除应力。

(2) 激光修复工艺参数

在四级导向器分解叶片指定位置测量并记录叶片节距尺寸; 按修复前叶片的状态测量并记录喉部尺寸; 消除工作时产生的附加应力; 将距损伤部位 10 mm 范围内的叶片部位抛磨, 去除氧化物以保证

激光熔覆质量; 对叶片迎风面边缘进行打磨, 去除含有裂纹的部分, 利用激光修复技术进行修复(如图 4 所示)。采用 CO₂ 激光器, 功率为 1~2 kW, 扫描速度为 2~15 mm/s, 光斑直径为 1~3 mm, 层厚为 0.2~0.6 mm。

通过多次试验对上述工艺参数进行优化。

3 试验结果与分析

3.1 表面成形

从表面成形观察, 修复后对叶片喉部尺寸检测, 喉部尺寸变化小于 0.1 mm; 激光修复技术得到的修复结果是理想的。利用激光修复技术修复后的效果如图 5 和图 6 所示。

3.2 显微硬度分析

从熔覆层显微硬度测试结果看, 熔覆层自上而下硬度分布较为均匀。接近熔覆层与基体结合部时硬度值有小幅下降。从熔覆层与基体界面的显微硬度点来看如图 7 所示, 硬度点边缘连续, 可以证明在基体和熔覆层间形成了良好的冶金结合。

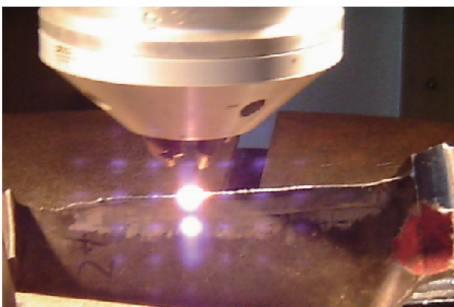


图 4 四级导向器分解叶片修复

Fig. 4 Repair of the fourth oriented implement decompose lamina



图 5 修复后的四级导向器分解叶片(未打磨)
Fig. 5 Decompose lamina of the fourth oriented implement after repair(before polishing)



图 6 四级导向器分解叶片打磨后恢复形状和尺寸
Fig. 6 Figure and size of the fourth oriented implement after polishing

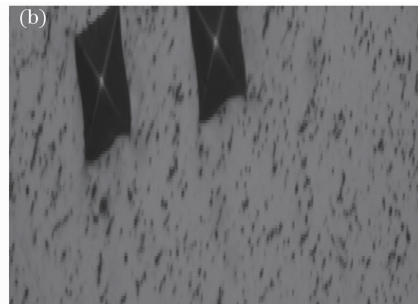
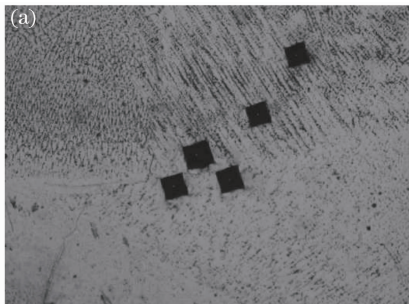


图 7 显微硬度测量。(a)低倍；(b)高倍

Fig. 7 (a) low-multiple and (b) high-multiple microhardness testing

3.3 扫描电镜分析

从扫描电镜图像可以看出,在熔覆层与基体的结合区形成了良好的冶金结合,如图 8 所示。

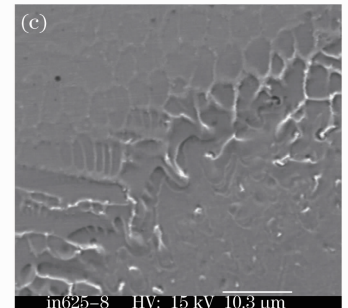
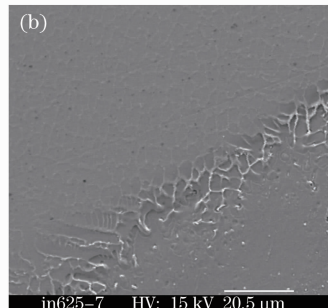
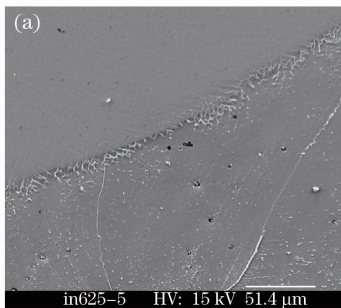


图 8 基体熔覆层界面(a)200×；(b)500×；(c)1000×

Fig. 8 Microstructure of laser clad layer boundary. (a)200×；(b)500×；(c)1000×

修复效果分析如下。

(1) 熔化区

熔化区即激光修复熔覆层,其成分为激光修复用粉末材料 Ni 基合金,从显微电镜照片[图 8(a)]上看,组织均匀细小,没有气孔、裂纹等缺陷。全部熔覆层组织由 Ni 的 γ 胞状晶,晶间析出物为 Ni, Fe, Cr 的碳化物组成。胞状晶用电子探针对接化区进行物相分析证实,作为基体组织胞状晶成分主要是 Ni, Fe, Cr, 并固溶了少量 Si, Mo 和 C。Cr 在基体和熔覆层中的分布较为相近。Fe 在基体中的含量明显高于熔覆层的 Fe 含量。Ni 的分布主要集中

于熔覆层,这说明熔覆层为 Ni 基合金,熔覆层材料基本未熔入基体中,基体材料也未污染熔覆层, Si 的含量主要分布于 SiC 颗粒中。熔覆层组织中, γ 相是主要的强化相,它主要通过和熔覆层中位错的交互作用强化基体,另外,基体相中固溶的 Fe, Cr, C, Si, Mo 等原子对基体会产生有效的固溶强化作用,基体组织上弥散分布的 Cr_{23}C_6 硬质相颗粒对熔覆层会产生显著的沉淀强化作用。晶格形式为胞状晶。

(2) 结合区

在扫描电镜照片[图 8(b), (c)]上,熔覆层与基体的结合区表现为一条凸起焊接带,这部分组织为

$\gamma(\text{Ni}, \text{Fe})$ 相。在激光修复过程中, Ni 基合金粉末熔化的同时, 基体表面也有一薄层受热熔化, 两者共同形成熔池。激光束移去后, 熔池底部开始冷却凝固, 凝固初期, 液-固界面向前推进速度较慢, 界面较稳定, 形成一定宽度的薄带。它们间的晶界很窄, 制作晶相试样时, 浸蚀剂难于浸蚀这些晶界, 所以在照片上看不到这些晶界。因而可以说熔覆层与基体达到了良好的冶金结合。

熔覆层底部平滑微凹, 熔池的界面清晰, 没有发现明显的微观裂纹, 这对获得较好的耐疲劳性很重要。熔池底部形成有以胞状晶组织为主的过渡区, 这层组织深入到基底中, 宽度很窄。靠近过渡区的基材晶粒粗大, 原因是此部分基材熔化后重新结晶, 发生退火。在聚焦光束的瞬间作用下(脉宽为 12 ms), 预敷的镍基粉末层形成熔体的瞬间便通过与之接触的基底热传导散热降温, 达到相对较快的加热熔化、冷却凝固的过程; 与熔体相接触的基底仅在表层部分升温熔化进入熔体中形成了过渡区组织。因此固-液相界面在熔池阶段由基底进入熔池的镍基成分较少而减小了对过渡层的稀释作用, 并使过渡区较窄。另一方面, 在此过程中形成清晰的近似于平面的固-液相界面前沿, 有利于合金在凝固初始阶段的成核。因此在激光修复技术工艺条件下获得了相对快的冷凝速度和相对较小而均匀的过渡区组织结构。

过渡区没有出现裂纹的另一个原因是合金熔覆层与基材的线膨胀系数差异较小, 可以有效地减少熔覆层残余拉应力, 减小其开裂敏感性。涂层与基材的线膨胀系数接近还可以防止熔覆层的脱落。

(3) 热影响区

试验证明, 基体热影响区的组织为细小的板条马氏体组织。在激光修复过程中, 由于激光能量密度高, 基体表面会出现微熔, 同时热量迅速向基体内部传递, 表面部分的基体达到奥氏体化温度, 由于受热速度快, 晶粒来不及长大, 形成的奥氏体晶粒十分细小, 另外溶入奥氏体中的碳量较少, 达不到奥氏体化时的平衡碳含量。激光停止作用后, 基体快速冷却, 由于冷却速度快, 获得超细化显微组织——隐晶板条马氏体。随着距表面的距离增加, 基体内部的马氏体含量逐渐减少, 最后过渡为基体的原始组织。

4 激光修复技术的改进

工程实践中, 将激光修复技术应用于直升机燃气涡轮导向器叶片的修复, 还要做以下考虑

(1) 优化工艺参数: 从热力学和外延生长的角度出发, 系统研究激光修复技术, 包括各种亚稳相的形成规律、组织特征及熔质在凝固过程的分配规律找到更合适的工艺条件。

(2) 结合大功率激光器的开发和激光光学系统的设计, 解决直升机零部件大面积激光修复的工艺问题, 并进一步提高激光修复技术对零部件的表面质量修复效果;

(3) 研制稳定性和自动化程度高、价格低的设备;

(4) 建立深入而简明实用的理论。

5 结 论

通过激光修复技术试验以及对熔覆层表面成形、硬度分析以及微观组织形貌, 可得以下结论

1) 综合叶片宏观形态、显微硬度与扫描电镜分析结果, 熔覆层与基体实现了冶金结合, 采用激光熔覆修复技术对受损燃气涡轮导向器叶片进行修复的方案是可行的;

2) 所选熔覆材料在激光修复技术熔覆过程中, 采用 CO_2 激光器, 功率为 1~2 kW, 扫描速度为 2~15 mm/s, 光斑直径为 1~3 mm, 层厚为 0.2~0.6 mm, 可以得到组织细密, 与基体呈良好冶金结合且无明显微观裂纹的熔覆层;

3) 修复区组织细小致密无明显缺陷, 并与基体冶金结合牢固, 结合界面上无冶金缺陷, 熔覆材料选择合理。

参 考 文 献

- Xu Bin, Lou Baiyang, Bai Wanjin *et al.*. Synthesis of SiC/Ni composite coatings by laser cladding and property of erosion resistance[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 147~150
- 徐 斌, 楼白杨, 白万金 等. 激光熔覆制备 SiC/Ni 基复合涂层及其耐冲蚀性能[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 147~150
- M. Brandt, S. Sun, A. Bishop. Laser repair of steam turbine blades(invited paper)[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3240~3244
- Chen Genyu, Mei Lifang, Zhang Mingjun *et al.*. Application and research of laser processing automobile body manufacturing[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(9): 17~23
- 陈根余, 梅丽芳, 张明军 等. 激光焊接、切割在汽车制造中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(9): 17~23
- Pan Ming, Tan Jiansong, Wang Jianping *et al.*. Dissimilar metal laser welding of cast Ni-based superalloy K418 turbo disk and alloy steel 42CrMo shaft[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s1): 147~150
- 庞 铭, 谭建松, 王建平等. K418 涡轮盘与 42CrMo 涡轮轴异种金属激光焊接[J]. *中国激光*, 2009, **36**(s1): 147~150
- Niu Wei, Sun Ronglu, Lei Yiwen *et al.*. Microstructure and formation mechanism of titanium matrix composites coating on Ti-6Al-4V by laser cladding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11):

- 1756~1759
牛 伟, 孙荣禄, 雷贻文等. Ti-6Al-4V 表面激光熔覆钛基复合涂层的微观组织及形成机制[J]. 中国激光, 2008, **35**(11): 1756~1759
- 6 Yang Nan, Yang Xichen. Model of interaction between metal powder particle and laser beam in laser cladding[J]. *Acta optica sinica*, 2008, **28**(9): 1745~1750
杨 楠, 杨洗陈. 激光熔覆中金属粉末粒子与激光相互作用模型[J]. 光学学报, 2008, **28**(9): 1745~1750
- 7 Hu Lianhai, Huang Jian, Li Zhuguot *et al.*. Microstructure and properties of high power CO₂ laser welded pipeline steel [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3174~3178
胡连海, 黄 坚, 李铸国等. 高功率 CO₂ 激光焊接管线钢接头的组织与性能[J]. 中国激光, 2009, **36**(12): 3174~3178
- 8 Dong Shiyun, Xu Binshi, Wang Zhijianet *al.*. Vital problems on laser remanufacturing gears [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s1): 134~138
董世运, 徐 滨, 王志坚等. 激光再制造齿类零件的关键问题研究[J]. 中国激光, 2009, **36**(s1): 134~138
- 9 Yang Xichen, Li Li, Zhang Ye. Numerical Simulation of Temperature Field of Coaxial Powder Flow in Laser Cladding[J]. *Acta optica sinica*, 2009, **29**(11): 3114~3120
杨洗陈, 栗 丽, 张 烨. 激光熔覆中同轴粉末流温度场的数值模拟[J]. 光学学报, 2009, 29(11): 3114~3120
- 10 Wang Huaming, Zhang Lingyun, Li An *et al.*. Progress on laser melting deposition processing and manufacturing of advanced aeronautical metallic structural materials and coatings[J]. *Metal heat treatment*, 2008, **33**(1): 82~85
王华明, 张凌云, 李 安等. 高性能航空金属结构材料及特种涂层激光熔化沉积制备与成形研究进展[J]. 金属热处理, 2008, **33**(1): 82~85
- 11 Wang Dongsheng, Tian Zongjun, Shen Lida *et al.*. Research states of laser surface modification technology on titanium alloys [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(6): 24~32
王东生, 田宗军, 沈理达等. 钛合金激光表面改性技术研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2008, **45**(6): 24~32