

# 激光冲击处理对 TC4 修复件疲劳裂纹扩展速率的影响

葛茂忠<sup>1</sup>, 项建云<sup>2</sup>, 汤洋<sup>1</sup>

<sup>1</sup>江苏理工学院材料工程学院, 江苏 常州 213001;

<sup>2</sup>常州轻工职业技术学院机械工程与技术学院, 江苏 常州 213164

**摘要** 通过疲劳裂纹扩展实验,研究了激光冲击处理对 TC4 修复件疲劳裂纹扩展速率的影响,对比分析了激光冲击处理前后 TC4 修复件的表层残余应力、表面粗糙度和断口形貌的变化。结果表明,TC4 修复件的激光修复区由  $\beta$  晶粒和沿晶界分布的  $\alpha$  相组成,热影响区由等轴  $\alpha$  晶粒和  $\beta$  转变组织组成。激光冲击处理 TC4 修复件物相的衍射峰半峰全宽较大,其表层的残余应力为压应力,表面的粗糙度增大。通过修正的七点递增多项式拟合法,获得了不同修复件的裂纹扩展速率方程。激光冲击 TC4 修复件的疲劳裂纹扩展速率小于未激光冲击的。

**关键词** 激光技术; 激光熔覆修复; 激光冲击处理; TC4 钛合金; 残余应力; 裂纹扩展速率

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.071405

## Effect of Laser Shock Processing on Fatigue Crack Growth Rate of TC4 Repaired Parts

Ge Maozhong<sup>1</sup>, Xiang Jianyun<sup>2</sup>, Tang Yang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Materials Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou, Jiangsu 213001, China;

<sup>2</sup>School of Mechanical Engineering and Technology, Changzhou Vocational Institute of Light Industry, Changzhou, Jiangsu 213164, China

**Abstract** By the fatigue crack growth experiment, the effect of laser shock processing (LSP) on fatigue crack growth rate of TC4 repaired parts is investigated and the changes of surface residual stress, surface roughness and fracture morphology of TC4 repaired parts before and after LSP are compared and analyzed. The experimental results indicate that, the laser repaired zone of TC4 repaired parts is composed of  $\beta$  grains and  $\alpha$  phase which distributes along the grain boundaries, and the heat affected zone consists of equiaxed  $\alpha$  grains and  $\beta$  transformation structure. After the LSP, the full width at half maximum of diffraction peaks is larger, the surface residual stress is compressive stress, and the surface roughness increases. Based on the modified seven-point incremental polynomial fitting method, the fatigue crack growth rate equations of different repaired parts are obtained. The fatigue crack growth rate of TC4 repaired parts with LSP is smaller than that without LSP.

**Key words** laser technique; laser cladding repair; laser shock processing; TC4 titanium alloy; residual stress; crack growth rate

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 310.1860

## 1 引言

钛合金具有低密度、高比强度、耐腐蚀性及无磁性等性能,被广泛应用于航空航天领域<sup>[1]</sup>。航空航天领域关键件的结构复杂,加工尺寸精度和表面光

洁度要求高,因此关键件的加工困难;此外,钛合金的价格昂贵,直接报废会造成经济损失。因此,利用近净成形和快速成形等绿色技术,对航空发动机等大型设备及关键零部件实施再制造具有重要的意义<sup>[2]</sup>。

收稿日期: 2017-12-28; 收到修改稿日期: 2018-01-21

基金项目: 江苏省自然科学基金面上项目(BK20151171)

作者简介: 葛茂忠(1970—),男,博士,副教授,主要从事激光表面改性方面的研究。E-mail: gmzxjy@126.com

激光熔覆修复技术利用激光熔覆技术,结合离散堆积的方法,在受损件待修复区域逐层堆积涂层材料,以恢复受损件的几何形状<sup>[3]</sup>。激光熔覆修复技术具有热影响区小、能量输入可控、自动化程度高、界面结合强度高优点<sup>[4]</sup>。Bendeich 等<sup>[5]</sup>采用激光熔覆技术,修复了受损的涡轮叶片边缘,但叶片边缘存在容易导致疲劳裂纹的残余拉应力。Lin 等<sup>[6]</sup>通过高温热处理方法,消除了激光修复汽轮机叶片榫头中的残余拉应力。尽管激光熔覆修复技术在受损关键件的修复中发挥了巨大的作用,但激光修复区域中较大的温度梯度会导致修复件中存在残余拉应力,进而诱发修复件开裂和变形。通常采用热处理工艺消除修复件的残余拉应力,但当受损件尺寸较大时,修复操作困难;进行多层熔覆修复时,热量的累积效应导致修复区的晶粒粗大,削弱了修复件的力学性能。因此,有必要研究新的表面处理工艺以消除修复区域的残余拉应力。

激光冲击处理(LSP)技术利用强激光诱导冲击波,使材料表层发生剧烈的塑性变形,进而改变材料表层的微观结构,形成残余压应力层,从而提高金属材料的抗疲劳、抗磨损和抗应力腐蚀的性能<sup>[7-11]</sup>。闫世兴等<sup>[12]</sup>采用激光冲击处理技术,消除了 Fe314 熔覆层中的残余拉应力。汪诚等<sup>[13]</sup>研究了激光冲击处理对 TC4 熔覆件力学性能的影响。何卫锋等<sup>[14]</sup>研究发现,激光冲击处理钛合金熔覆件的抗疲劳强度比母材的提高了 23.5%。罗开玉等<sup>[15]</sup>研究了激光冲击处理对 316L 不锈钢熔覆层微观组织和力学性能的影响。然而,关于激光冲击处理对 TC4 修复件疲劳裂纹扩展速率影响的研究鲜有报道。

本文采用激光熔覆修复技术和激光冲击处理技术,对 TC4 钛合金板进行了修复和表面强化处理;通过疲劳裂纹扩展实验,研究了激光冲击处理对 TC4 修复件疲劳裂纹扩展速率的影响;根据修正的七点递增多项式拟合法,基于数理统计方法,获得了不同试样的疲劳裂纹扩展速率方程;对激光冲击处理前后 TC4 修复件的微观组织、残余应力、表面粗糙度及强化机理进行了分析。

## 2 实验过程

### 2.1 实验材料

选择厚度为 10 mm 的轧制态 TC4 钛合金板作为实验母材,粒径为 75~120  $\mu\text{m}$  的 TC4 粉末作为熔覆粉,TC4 钛合金板的力学性能见表 1,TC4 钛合金板和粉末的化学成分见表 2。实验前,TC4

粉末需在真空条件下加热至 110  $^{\circ}\text{C}$  左右以去除水分。

表 1 TC4 钛合金板的力学性能

Table 1 Mechanical properties of TC4 titanium alloy plate

Property	Elastic modulus /	Yield strength /	Strength limit /	Elongation / %
	GPa	MPa	MPa	
Value	110	820	1050	9.5

表 2 TC4 钛合金板和粉末的化学成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical compositions of TC4 titanium alloy plate and powder (mass fraction, %)

Element	Al	V	Fe	O	C	N	H	Ti
Substrate	5.5-6.8	3.5-4.5	0.3	0.2	0.1	0.05	0.015	Bal.
Powder	5.5-6.75	3.4-4.5	$\leq 0.3$	-	$\leq 0.1$	-	-	Bal.

### 2.2 激光熔覆修复

激光熔覆修复前,在尺寸为 62.5 mm  $\times$  60 mm  $\times$  10 mm 的矩形板两侧对称地预制 46 mm  $\times$  12 mm  $\times$  2 mm 的凹槽,如图 1 所示。凹槽经打磨后进行喷砂处理,并用丙酮清洗后热风烘干。激光熔覆修复的工艺参数:激光功率为 2400 W,扫描速度为 12 mm  $\cdot$  s<sup>-1</sup>,搭接率为 30%,送粉速率为 1 r  $\cdot$  min<sup>-1</sup>,离焦量为 5 mm,光斑直径为 3 mm<sup>[16]</sup>,保护气氛为氩气。

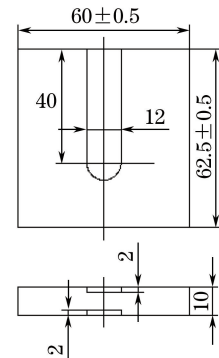


图 1 带槽矩形板示意图

Fig. 1 Schematic of rectangular plate with grooves

### 2.3 微观结构观测和残余应力测量

采用德国卡尔蔡司公司生产的 Axio Imager Mzm 光学显微镜观察试样的微观结构。采用荷兰帕纳科公司生产的 X'PERT POWER 型衍射仪(XRD)测定试样的物相成分。采用河北爱思特应力技术有限公司生产的带 Cu-K $\alpha$  靶的 X-350A 型衍射仪测量试样的表层残余应力,测试表面采用电解抛光的方法逐层去除材料<sup>[1,14]</sup>。为了保证实验结果的准确性,每个实验重复测试 3 次。

## 2.4 激光冲击实验

采用 Nd:YAG 激光系统进行激光冲击处理,工艺参数:激光波长为 1064 nm,频率为 5 Hz,脉宽为 15 ns,光斑直径为 3 mm,激光脉冲能量为 7 J,相邻圆形光斑搭接率为 50%。采用 2 mm 厚的流动水帘作为约束层,以提高激光诱导产生的冲击波的峰值压力<sup>[11]</sup>。采用 0.1 mm 厚的专用铝箔作为吸收层,以防止试样表面受到热损伤<sup>[11]</sup>。试样的激光冲击区域和扫描方向如图 2 所示。激光冲击区域为 28 mm×15 mm,激光扫描方向与 TC4 板轧制方向平行。

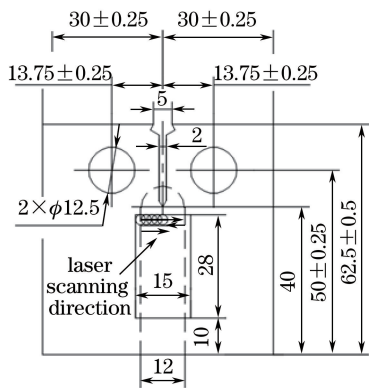


图 2 试样的激光冲击区域和扫描方向

Fig. 2 LSP zone and scanning direction of sample

## 2.5 疲劳裂纹扩展实验

疲劳裂纹扩展实验的试样分为两组,分别为未进行激光冲击处理和进行激光冲击处理的,每组分别制备 3 个试样。采用美国 MTS 公司生产的 MTS

Landmark 370.10 电液伺服实验系统进行疲劳裂纹扩展实验,实验方法为增 K 法,最大和最小载荷分别为 9.5 kN 和 0.95 kN,应力比为 0.1,采用频率为 13.33 Hz 的正弦加载模式。利用 MTS Landmark 370.10 实验系统实时测量裂纹长度。疲劳裂纹扩展实验前,在试样上预制长度为 2 mm 的裂纹。实验温度为 25 °C,相对湿度为 50%~60%。断裂的试样用丙酮进行超声清洗后吹干,采用德国卡尔蔡司公司生产的  $\Sigma$ IGMA500 型扫描电镜观察断口形貌。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 微观结构

TC4 修复件的横截面形貌如图 3 所示,其中图 3(b)~(d)分别为图 3(a)中矩形区域 b~d 的局部放大图。从图 3(a)可以看出,TC4 修复件的横截面由修复区(RA)、热影响区(HAA)和母材组成。修复区主要由粗大的  $\beta$  柱状晶组成,柱状晶沿试样厚度方向向熔池方向生长,晶界完整清晰, $\beta$  柱状晶的平均宽度约为 190  $\mu\text{m}$ 。从图 3(b)、(c)可以看出,在  $\beta$  晶粒的晶界上, $\alpha$  相连续分布;在  $\beta$  晶粒内部分布着一定取向的片状  $\alpha$  相,相邻的片状  $\alpha$  相之间又分布着  $\beta$  相,该结构属于典型的魏氏组织<sup>[3]</sup>。同时可以发现,修复区底部晶粒的尺寸小于修复区顶部的。由图 3(d)可知,热影响区主要由等轴  $\alpha$  晶粒和  $\beta$  转变组织组成,属于典型的双态组织<sup>[3]</sup>。因此,从修复区至热影响区的微观结构由魏氏组织逐渐演变为双态组织。

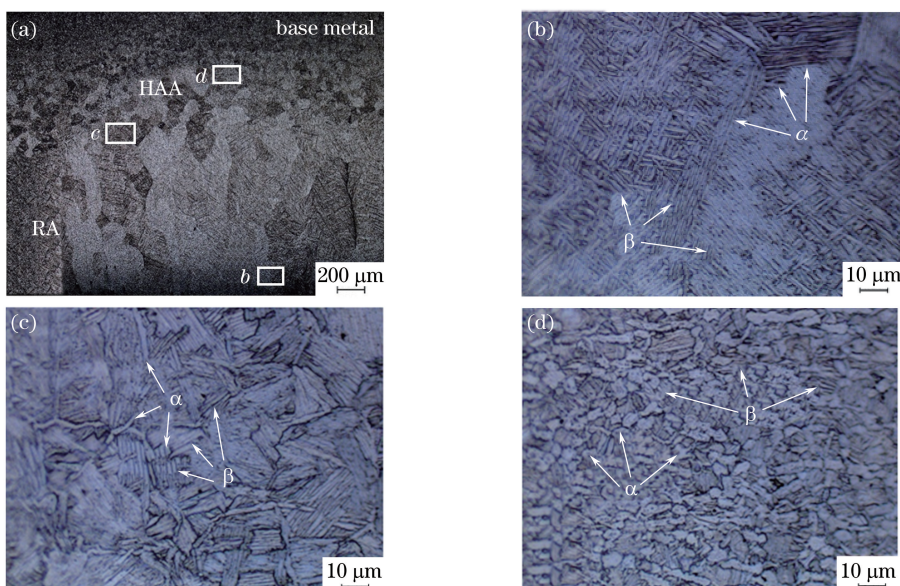


图 3 横截面形貌。(a) TC4 修复件;(b)(c)(d)图 3(a)的区域放大图

Fig. 3 Cross-sectional morphologies. (a) TC4 repaired part; (b)(c)(d) local magnification in Fig. 3(a)

### 3.2 XRD 图谱

激光冲击前后修复区域的 XRD 图如图 4 所示。可以看出,激光冲击前后 TC4 修复件主要由  $\alpha$  相和  $\beta$  相组成,说明激光冲击处理过程中没有发生物相的转变和产生新的物相。激光冲击处理后,TC4 修复件物相衍射峰的强度减小,衍射峰的位置往衍射角增大的方向移动。此外,衍射峰的半峰全宽明显增大,这是晶粒细化和位错密度增大引起的<sup>[17]</sup>。

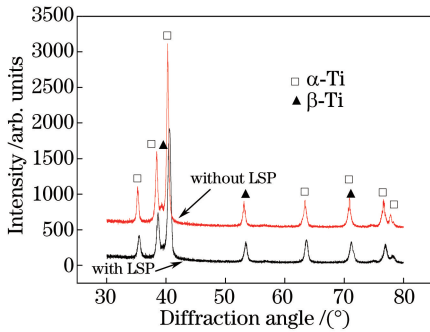


图 4 激光冲击前后修复区域的 XRD 图

Fig. 4 XRD patterns of repaired zones before and after LSP

### 3.3 残余应力

激光冲击前后修复区域沿深度方向的残余应力分布如图 5 所示。可以看出,激光冲击处理前,修复区域的残余应力为拉应力,最大拉应力出现在修复件表面,达到 110 MPa。残余拉应力的存在会导致修复件开裂或变形,影响制件的尺寸精度。激光冲击处理之后,修复区域表层的残余应力为压应力,最大压应力出现在修复件表面,达到 -295 MPa。因此,激光冲击处理改变了 TC4 修复件表层的应力状态,由拉应力转变为压应力,且残余压应力随着距离试样表面深度的增大而减小。这是由于激光诱导产生的高压冲击波在试样内部传播时能量逐步衰减,塑性变形程度随之减小,因此,残余压应力也逐步减小<sup>[11]</sup>。当激光脉冲能量为 7 J 时,由激光冲击处理

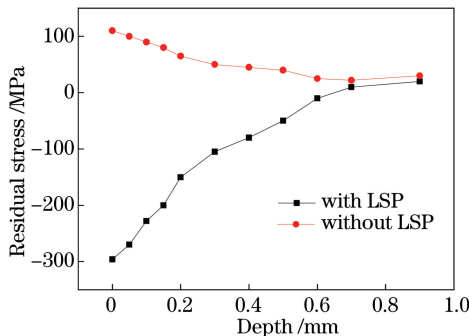


图 5 激光冲击前后修复区域沿深度方向的残余应力分布

Fig. 5 Residual stress distributions of repaired zones before and after LSP along depth direction

诱导产生的残余压应力层深度达到 0.5 mm 左右。

### 3.4 表面粗糙度

激光冲击处理前,TC4 修复件表面用金相砂纸打磨后用丙酮清洗并吹干。采用美国 NANOVEA 公司生产的 NANOVEA PS50 型三维非接触式表面形貌仪测得激光冲击处理前 TC4 修复件的表面粗糙度为  $1.2 \mu\text{m}$ ,激光冲击处理后 TC4 修复件的表面粗糙度为  $1.6 \mu\text{m}$ ,激光冲击处理后试样的表面粗糙度有所增大。表面粗糙度增大的区域由于应力集中而成为裂纹源,从而减小试样的疲劳抗力。然而,激光冲击处理后 TC4 修复件的抗疲劳能力显著增大,说明 TC4 修复件抗疲劳能力提高的决定因素是晶粒细化和残余压应力的共同作用。

### 3.5 疲劳裂纹扩展速率分析

#### 3.5.1 修正的七点递增多项式拟合法

采用修正的递增多项式拟合法分析 TC4 修复件的疲劳裂纹扩展速率,该方法将来自同一母体的不同试样当作一个整体,依次选取七个数据点,通过二次多项式拟合法获得同一母体中不同试样裂纹长度  $a$  的局部拟合方程。计算选定的七个数据点中间点所对应裂纹长度的平均值,将该平均值代入局部拟合方程计算循环次数  $N$ ;将局部拟合方程对循环次数求导后得到局部裂纹扩展速率方程;再将计算得到的循环次数代入局部裂纹扩展速率方程,得到相同裂纹长度下不同试样的裂纹扩展速率。

#### 3.5.2 疲劳裂纹扩展实验

激光冲击处理前后 TC4 修复件的  $a-N$  曲线如图 6 所示,其中后一条曲线比前一条曲线的循环次数依次增加了 2500。可以看出,激光冲击试样的疲劳寿命明显优于未激光冲击处理的。未激光冲击处理试样的循环次数分别为 33974,34458 和 31347,激光冲击试样的循环次数分别为 65413,62312 和 64502。激光

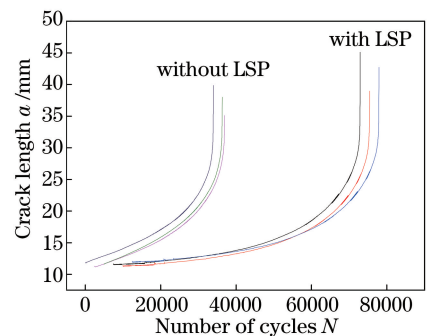


图 6 激光冲击前后 TC4 修复件的  $a-N$  曲线

Fig. 6  $a-N$  curves of TC4 alloy repaired parts before and after LSP

冲击诱导产生的晶粒细化和残余压应力使得激光冲击 TC4 修复件的疲劳寿命提高了近一倍。

### 3.5.3 裂纹扩展速率计算

基于修正的七点递增多项式拟合法,相同裂纹

长度下激光冲击处理前后 TC4 修复件的裂纹扩展速率结果见表 3。在相同的裂纹长度下,激光冲击 TC4 修复件的裂纹扩展速率明显小于未激光冲击的。

表 3 激光冲击前后 TC4 修复件的裂纹扩展速率

Table 3 Crack growth rate of TC4 repaired parts before and after LSP

Point No.	Crack length $a$ /mm	Expansion rate of samples without LSP /( $10^{-4}$ mm $\cdot$ cycle $^{-1}$ )			Expansion rate of samples with LSP /( $10^{-4}$ mm $\cdot$ cycle $^{-1}$ )		
		1	2	3	1	2	3
		1	18	4.53	4.48	4.57	3.7
2	19	5.77	5.85	5.47	4.48	4.3	4.27
3	20	6.91	6.8	6.72	4.91	4.89	4.92
4	21	7.19	7.8	7.26	6.28	6.19	6.32
5	22	8.8	9.03	8.87	6.83	6.94	7.03
6	23	11.7	12.1	12.4	7.56	7.86	7.9
7	24	12.8	12.6	13.2	9.18	9.3	9.23

### 3.5.4 裂纹扩展速率方程

疲劳裂纹扩展过程分为裂纹扩展起始阶段、裂纹稳定扩展阶段和裂纹快速扩展阶段,其中裂纹稳定扩展阶段时间的长短决定了试样的疲劳裂纹扩展寿命<sup>[18]</sup>。

通常的裂纹扩展速率 Paris 方程为

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^n, \quad (1)$$

式中  $da/dN$  是裂纹扩展速率;  $C$  与  $n$  为材料系数;  $\Delta K$  是应力强度因子变化范围大小。

对(1)式两边取对数可得对数疲劳裂纹扩展速

表 4 激光冲击前后 TC4 修复件的对数平均裂纹扩展速率和对数应力强度因子变化范围大小

Table 4 Logarithmic average crack growth rate and variance range of logarithmic stress intensity factor of TC4 repaired parts before and after LSP

PointNo.	Crack length $a$ /mm	$\lg\left(\frac{da}{dN}\right)$ of		$\lg \Delta k /(\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$
		samples without LSP / (mm $\cdot$ cycle $^{-1}$ )	samples with LSP / (mm $\cdot$ cycle $^{-1}$ )	
1	18	-3.34422	-3.43063	1.3763
2	19	-3.24438	-3.36151	1.3990
3	20	-3.16685	-3.30921	1.4217
4	21	-3.12979	-3.20319	1.4449
5	22	-3.05061	-3.15906	1.4675
6	23	-2.91841	-3.10939	1.4913
7	24	-2.89053	-3.03448	1.5171

当  $1.37 \leq \lg \Delta k \leq 1.65$  时,通过对数平均裂纹扩展速率和对数应力强度因子变化范围大小的线性拟合可以得到参数  $\lg C$  和  $n$ , 计算结果见表 5。可以看到, 相关系数接近于 1, 说明线性拟合程度非常高。由  $\lg C$  和  $n$  可以得到激光冲击前后 TC4 修复

率方程, 即

$$\lg\left(\frac{da}{dN}\right) = \lg C + n \lg(\Delta K). \quad (2)$$

(2)式表明,对数裂纹扩展速率与对数应力强度因子变化范围大小呈线性关系,因此,可用 Paris 方程表示裂纹稳定扩展阶段的疲劳裂纹扩展速率。

将根据修正七点递增多项式拟合法得到的不同试样在相同裂纹长度下的疲劳裂纹扩展速率取平均值后再取对数,并计算裂纹长度对应的对数应力强度因子变化范围大小,计算结果见表 4。

件的 Paris 方程为

$$\frac{da}{dN} = 1.5251 \times 10^{-8} (\Delta K)^{3.2588}, \quad (3)$$

$$\frac{da}{dN} = 4.9329 \times 10^{-8} (\Delta K)^{2.8209}. \quad (4)$$

在裂纹稳定扩展阶段,  $\lg((da/dN))$  与  $\lg \Delta k$  间

的关系曲线如图 7 所示。可以看到,激光冲击前后 TC4 修复件裂纹扩展速率的变化趋势是一致的,即裂纹扩展速率随着应力强度因子变化范围大小的增大而增大。当应力强度因子变化范围大小相等时,未激光冲击处理 TC4 修复件的裂纹扩展速率远大于激光冲击处理的。此外,未激光冲击处理 TC4 修复件拟合直线的斜率明显大于激光冲击处理的,这表明未激光冲击处理 TC4 修复件的裂纹扩展速率的增速较大。激光冲击处理 TC4 修复件在稳定裂纹扩展阶段的裂纹扩展速率明显减小,因此,激光冲击处理 TC4 修复件的疲劳扩展寿命明显优于未激光冲击的。

表 5 激光冲击前后 TC4 修复件的参数  $\lg C$  和  $n$   
Table 5  $\lg C$  and  $n$  parameters of TC4 repaired parts before and after LSP

Condition	$\lg C$	$n$	Correlation coefficient
Without LSP	-7.8167	3.2588	0.9904
With LSP	-7.3069	2.8209	0.9951

### 3.6 断口分析

激光冲击前后 TC4 修复件的断口形貌如图 8 所示。从图 8(a)、(b)可以看出,在裂纹稳定扩展阶

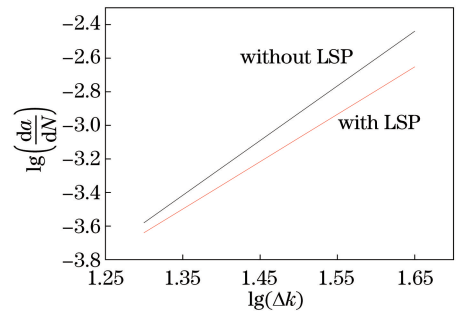


图 7 稳定裂纹扩展阶段  $\lg(da/dN)$  与  $\lg \Delta K$  间的关系曲线  
Fig. 7 Relationship between  $\lg(da/dN)$  and  $\lg(\Delta K)$  in stable crack growth stage

段,激光冲击前后 TC4 修复件的断口表面存在大量的解理台阶,说明断裂属于脆性断裂。从图 8(c)、(d)可以看到,激光冲击前后 TC4 修复件的断口上存在一簇贝纹线,贝纹线近似呈平行弧线,未激光冲击 TC4 修复件的贝纹线间距大于激光冲击的。贝纹线间距越大,说明裂纹扩展越快。这表明在裂纹稳定扩展阶段,未激光冲击 TC4 修复件的裂纹扩展速率远大于激光冲击的。由图 8(e)、(f)可以看出,激光冲击前后 TC4 修复件的断口上均分布着大量的韧窝,说明两者在瞬断区的断裂属于韧性断裂,但激光冲击 TC4 修复件的韧窝较小。

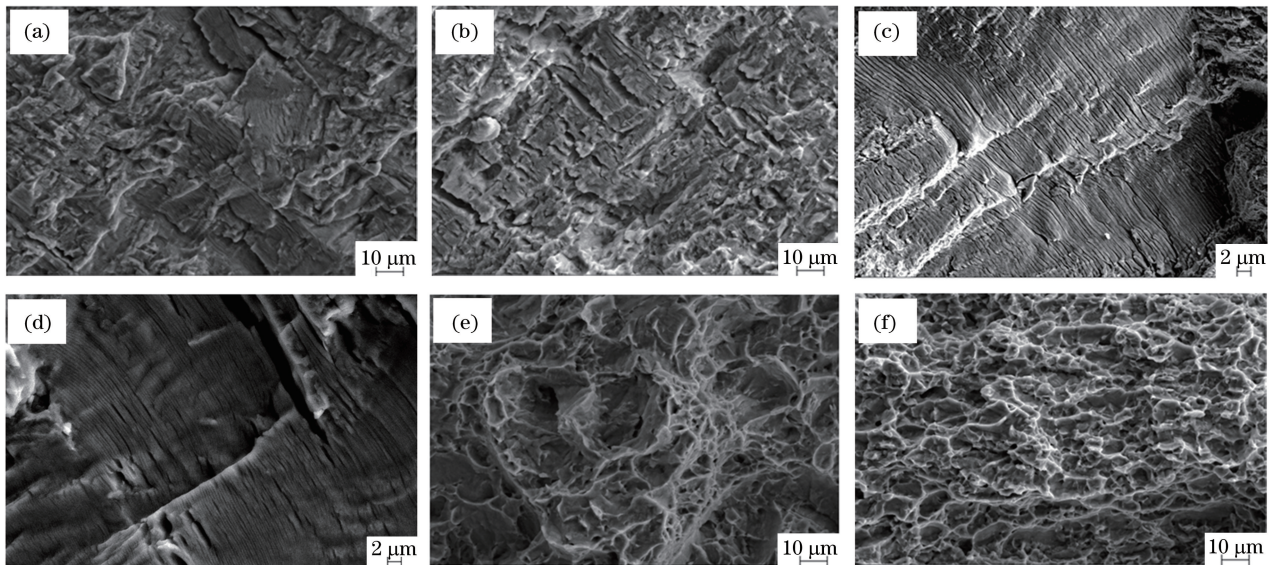


图 8 TC4 修复件的断口形貌。(a)未激光冲击,稳定裂纹扩展阶段;(b)激光冲击,稳定裂纹扩展阶段;  
(c)图 8(a)的局部放大;(d)图 8(b)的局部放大图;(e)未激光冲击,修复件瞬断区;(f)激光冲击,修复件瞬断区  
Fig. 8 Fracture morphologies of TC4 repaired parts. (a) Without LSP, in stable crack growth stage; (b) with LSP, in stable crack growth stage; (c) local magnification of Fig. 8(a); (d) local magnification of Fig. 8(b); (e) without LSP, in rapid crack zone of repaired parts; (f) with LSP, in rapid crack zone of repaired parts

### 3.7 抗疲劳机理分析

XRD 衍射图谱分析结果表明,激光冲击能实现

TC4 修复件表层晶粒的细化。激光冲击诱导产生的冲击波压力能达到数个吉帕,在冲击波超高压力

的作用下, TC4 修复件表层发生剧烈的塑性变形, 位错滑移被全面激发, 晶粒被显著细化<sup>[18]</sup>。晶粒细化导致晶界增多, 而晶界增多能有效阻止疲劳裂纹的扩展。此外, 晶粒细化导致晶粒数目增多, 由于相邻晶粒的晶体学取向不同, 裂纹扩展时需要消耗更多的能量, 从而疲劳裂纹扩展速率减小<sup>[18]</sup>。激光冲击处理改变了 TC4 修复件表层的应力状态, 由残余拉应力转变为残余压应力。残余压应力能够平衡部分外加载荷, 有效减小了 TC4 修复件的实际承载量, 从而减小了疲劳裂纹扩展的驱动力; 残余压应力还能够有效地闭合裂纹, 减小裂纹尖端的应力强度因子变化范围大小, 从而阻碍裂纹的扩展, 进而减小疲劳裂纹扩展速率<sup>[18-19]</sup>。

## 4 结 论

通过疲劳裂纹扩展实验, 研究了激光冲击处理对 TC4 修复件疲劳裂纹扩展速率的影响, 分析了激光冲击处理前后 TC4 修复件表层的残余应力, 表面粗糙度和断口形貌的变化, 得到以下结论。

1) 在一定的工艺参数条件下, 能够制得与 TC4 修复件呈冶金结合的修复层, 且修复区和热影响区分别为典型的魏氏组织和双态组织。

2) 激光冲击处理不仅能实现 TC4 修复件表层晶粒的细化, 而且能将 TC4 修复件表层的应力状态由残余拉应力改变为残余压应力。

3) 根据修正的递增多项式拟合法, 并运用数理统计方法, 获得了激光冲击前后 TC4 修复件的疲劳裂纹扩展方程。

4) 激光冲击处理之后, TC4 修复件的疲劳裂纹扩展速率减小。

## 参 考 文 献

- [1] Nie X F, He W F, Zhou L C, *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.
- [2] Editorial committee of *Chinese manufacturing*. Made in China 2025[M]. Beijing: People Press, 2015: 1-62.  
《中国制造》编写组. 中国制造 2025[M]. 北京: 人民出版社, 2015: 1-62.
- [3] Huang W D. Laser additive manufacturing [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2007.
- [4] Gong X Y, Liu M K, Li Y, *et al.* Research on repair of TC11 titanium alloy components by laser melting deposition process [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(2): 0203005.  
宫新勇, 刘铭坤, 李岩, 等. TC11 钛合金零件的激光熔化沉积修复研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(2): 0203005.
- [5] Bendeich P, Alam N, Brandt M, *et al.* Residual stress measurements in laser clad repaired low pressure turbine blades for the power industry [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, 437(1): 70-74.
- [6] Lin C M. Parameter optimization of laser cladding process and resulting microstructure for the repair of tenon on steam turbine blade [J]. *Vacuum*, 2015, 115: 117-123.
- [7] Zhou J Z, Huang S, Zuo L D, *et al.* Effects of laser peening on residual stresses and fatigue crack growth properties of Ti-Al titanium alloy [J]. *Optics and Laser in Engineering*, 2014, 52: 189-194.
- [8] Ren X D, Zhang Y K, Zhang T, *et al.* Comparison of the simulation and experimental fatigue crack behaviors in the nanoseconds laser shocked aluminum alloy [J]. *Materials & Design*, 2011, 32(3): 1138-1143.
- [9] Lu J Z, Luo K Y, Dai F Z, *et al.* Effects of multiple laser shock processing (LSP) impacts on mechanical properties and wear behaviors of AISI 8620 steel [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2012, 536: 57-63.
- [10] Sealy M P, Guo Y B, Caslaru R C, *et al.* Fatigue performance of biodegradable magnesium-calcium alloy processed by laser shock peening for orthopedic implants [J]. *International Journal of Fatigue*, 2016, 82: 428-436.
- [11] Ge M Z, Xiang J Y, Yang L, *et al.* Effect of laser shock peening on the stress corrosion cracking of AZ31B magnesium alloy in a simulated body fluid [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2017, 310: 157-165.
- [12] Yan S X, Dong S Y, Xu B S, *et al.* Mechanics of removing residual stress of Fe314 cladding layers with laser shock processing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(10): 1003004.  
闫世兴, 董世运, 徐滨士, 等. Fe314 合金熔覆层残余应力激光冲击消除机理 [J]. *中国激光*, 2013, 40

- (10): 1003004.
- [13] Wang C, Lai Z L, An Z B, *et al.* Properties improvement of laser clad TC4 titanium alloy by laser shock processing[J]. Journal of Jiangsu University, 2013, 34(3): 331-334.  
汪诚, 赖志林, 安志斌, 等. 激光冲击强化对熔覆后 TC4 钛合金性能的提高[J]. 江苏大学学报, 2013, 34(3): 331-334.
- [14] He W F, Zhang J, Yang Z J, *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.  
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.
- [15] Luo K Y, Zhou Y, Lu J Z, *et al.* Influence of laser shock peening on microstructure and property of cladding layer of 316L stainless steel [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0402005.  
罗开玉, 周阳, 鲁金忠, 等. 激光冲击强化对 316L 不锈钢熔覆层微观结构和性能的影响[J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0402005.
- [16] Ge M Z, Xiang J Y, Yang X H. Effects of laser cladding remanufacturing on microstructure and impact toughness of TC4 titanium alloy[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(20): 178-182.  
葛茂忠, 项建云, 杨晓红. 激光熔覆再制造对 TC4 钛合金微观结构和冲击韧性的影响[J]. 热加工工艺, 2017, 46(20): 178-182.
- [17] Hou L F, Wei Y H, Shu X F, *et al.* Nanocrystalline structure of magnesium alloys subjected to high energy shot peening[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 492(1/2): 347-350.
- [18] Shu D L. Metal mechanical properties[M]. Beijing: China Machine Press, 1999: 1-169.  
束德林. 金属力学性能[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999: 1-169.
- [19] Huang S, Zhu Y, Guo W, *et al.* Effect of laser peening on fatigue strength of TC17 titanium alloys[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(11): 111406.  
黄帅, 朱颖, 郭伟, 等. 激光喷丸对 TC17 钛合金疲劳强度的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(11): 111406.