

# 激光成形修复 Ti17 合金组织与高温性能研究

陈 静 张 强 刘彦红 王俊伟 林 鑫

(西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

**摘要** 激光修复试样由激光修复区、热影响区和锻件基体区组成。修复区由贯穿多个熔覆层呈外延生长的粗大  $\beta$  柱状晶组成, 柱状晶内为编织细密的网篮组织,  $\alpha$  相的尺寸极其细小。热影响区组织由基体的锻造双态组织向修复区组织过渡。修复试样经 600 °C, 1 h 炉冷退火后,  $\beta$  柱状晶晶界连续性基本没有受到影响, 晶内  $\alpha$  板条略有长大, 长宽比减小。退火前后修复试样显微硬度测试结果表明, 退火态试样各区显微硬度相比沉积态均略有增加, 增幅仅 5%。退火后修复试样的高温拉伸性能和高周疲劳性能结果显示, 拉伸性能强度指标高于模锻件标准, 塑性与模锻件标准相当。修复试样疲劳极限为 295 MPa, 达到 Ti17 模锻件标准的 70%, 并对其在不同加载模式下的失效行为和断裂机制进行了分析。

**关键词** 激光技术; 激光成形修复; Ti17 合金; 组织; 高温性能

**中图分类号** TG146.2<sup>+</sup>3; TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0603022

## Research on Microstructure and High-Temperature Properties of Ti17 Titanium Alloy Fabricated by Laser Solid Forming

Chen Jing Zhang Qiang Liu Yanhong Wang Junwei Lin Xin

(State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

**Abstract** The sample fabricated by laser solid forming (LSF) consists of laser repaired zone (RZ), heat affected zone (HAZ) and forge substrate. The repaired zone consists of coarse columnar  $\beta$  grains which grow epitaxially from the substrate. And  $\beta$  grains are made of extremely fine basket-weave microstructure where a lot of fine acicular  $\alpha$  phases precipitate on. Microstructure of heat affected zone transits from duplex microstructure to basket-weave microstructure. After 600 °C, 1 h furnace cooling annealing continuity of columnar,  $\beta$  grain boundaries have not been affected, and  $\alpha$  laths grow slightly and length/width ratio of  $\alpha$  laths decreases. Microhardness test shows that hardness value of annealed sample is 5% higher than that of as-deposited sample. The results of high temperature tensile properties and high cycle fatigue property of annealed samples suggest that compared with the forging standard, the tensile strength index is higher while ductility index corresponds to the standard. The fatigue limit is 295 MPa which reaches 70% of the forging standard. At last, failure behavior and fracture mechanism of laser repair samples under different loading modes are analyzed.

**Key words** laser technique; laser forming repair; Ti17 alloy; microstructure; high temperature properties

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 350.3390

## 1 引 言

钛合金由于具有比强度高、热强性好和耐腐蚀性好等优点, 在航空、航天、航海、能源等领域具有广阔的应用前景<sup>[1,2]</sup>。Ti17 (Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr) 钛

合金是一种富  $\beta$  的  $\alpha + \beta$  型钛合金, 是美国通用电气公司在 20 世纪 70 年代为先进的 GE 发动机研制成功的钛合金。该合金具有高强度、高韧性和高淬透性的特点, 又称为“三高”钛合金, 主要用于制造发动

**收稿日期**: 2011-03-23; **收到修改稿日期**: 2011-04-25

**基金项目**: 国家自然科学基金(50871089)、西北工业大学科技创新基金(2010KJ0103)和凝固技术国家重点实验室自主研究课题(33-TP-2009)资助课题。

**作者简介**: 陈 静(1970—), 女, 博士, 教授, 主要从事激光立体成形制造与修复再制造等方面的研究。

E-mail: phd2003cjj@nwpu.edu.cn

机风扇、压气机盘件和大截面的锻件<sup>[3~5]</sup>。

Ti17 整体叶盘在加工过程中的误加工损伤、叶片在使用中受外物打伤或因高周疲劳而损伤的情况经常发生,如果对零件整体进行更换,势必造成时间和经济上的极大浪费。因此 Ti17 整体叶盘的修复技术就成为了制约 Ti17 整体叶盘获得广泛应用的一个关键问题。激光成形修复(LFR)技术所具有的热输入小、热影响区(HAZ)小、修复区(RZ)与零件本体为冶金结合、计算机控制及柔性化修复等优点能够克服传统修复技术的缺点<sup>[6]</sup>,这就为 Ti17 整体叶盘的修复工作提供了一条可能的途径。本课题组已经针对 Ti17 整体叶盘的修复工作开展了激光立体成形(LSF)以及激光成形修复 Ti17 合金组织性能研究,并得到了其部分力学性能指标,但尚未对其不同加载模式下的失效行为及断裂机理进行深入研究。

本文以 Ti17 合金整体叶盘的激光修复为研究背景,对激光成形修复 Ti17 合金沉积态和退火态组织和显微硬度进行了分析,并对退火态合金 400 °C 下拉伸性能和高周疲劳性能进行了研究,对激光成形修复 Ti17 合金失效行为进行了详细描述并初步揭示了其断裂机理。

## 2 实 验

激光立体成形实验是在西北工业大学凝固技术国家重点实验室建立的激光立体成形装备上完成

的。该装备由 RS-850 型 CO<sub>2</sub> 激光器、LMP-408 型四坐标数控工作台、JPSF-2 型送粉器、同轴送粉喷嘴和惰性气体保护箱等组成。实验采用的主要工艺参数如表 1 所示。实验材料包括 Ti17 合金锻件基材和粒度为 100~200 目(75~150 μm)的 Ti17 球形粉,Ti17 球形粉化学成分如表 2 所示。实验之前将粉末材料在 120 °C 真空条件下(不大于 -0.1 Pa)进行烘干处理,以减少粉末吸潮对成形质量带来的影响。拉伸和高周疲劳测试用试样为 50% 的槽修复试样,即基体区和修复区各占试样横截面面积的 50%。用酸液对 Ti17 合金锻件基材的工作面进行清洗,再用丙酮清洗干净。

制备激光成形修复金相试样并切割成 5 mm×8 mm×8 mm 的试样 2 块,其中一块在 SX-4-10 箱式电阻炉内进行热处理,600 °C,1 h 炉冷退火。采用 OLYMPUS GX71 型倒置式金相显微镜和 JSM-6390A 型扫描电子显微镜(SEM)观察试样的微观组织。在 Duramin-A300 显微硬度计上测试修复试样显微硬度。拉伸与高周疲劳性能测试试样制备完成经热处理(600 °C,1 h 炉冷退火)后,用线切割和机加工后制成标准的棒状拉伸试样和高周疲劳试样(如图 1 所示),在 ZWICK 150 型电子拉力实验机上进行 400 °C 的拉伸实验。在 PLG-100C 高频疲劳试验机上进行高周疲劳实验。疲劳测试条件为: $K_1 = 1, R = -1, T = 400$  °C。

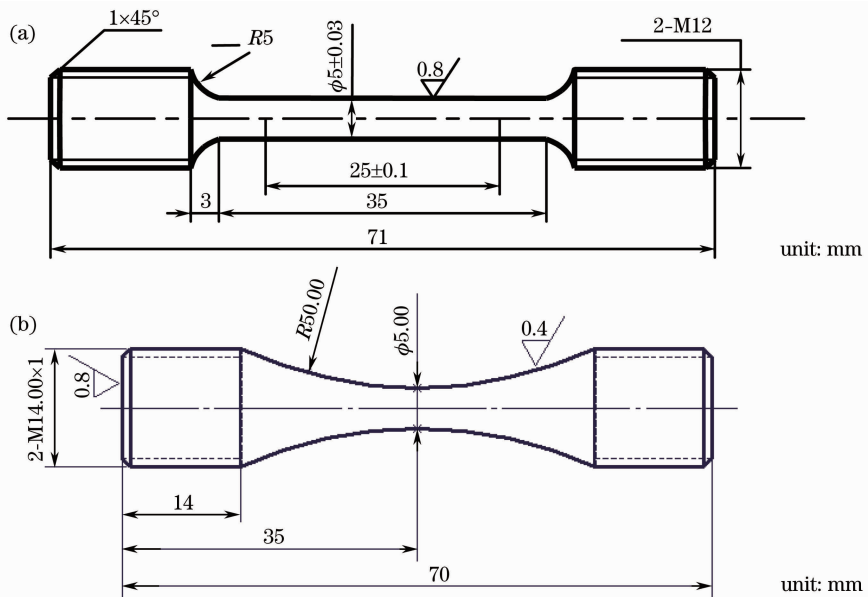


图 1 (a)激光成形修复 Ti17 合金拉伸试样尺寸和(b)高周疲劳试样尺寸

Fig. 1 (a) Geometric drawing of tensile bar and (b) geometric drawing high-cycle fatigue sample

表 1 激光立体成形工艺参数

Table 1 Processing parameters of the process of LSF

Laser power /kW	Scanning speed /(m/s)	Powder feeder rate /(g/min)	Flow of shielding gas /(L/h)	Laser spot diameter /mm	Overlaps /%	Increment of Z axis /mm
1.6~1.8	3~5	4~5	350~400	2~3	40~60	0.3~0.4

表 2 Ti17 钛合金粉末化学成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical compositions of the Ti17 titanium alloy powder (mass fraction, %)

Al	Sn	Zr	Mo	Cr	Fe	Si	N	H	O	Ti
5.02	2.15	2.01	4.06	3.95	0.047	0.025	0.012	0.004	0.087	Bal.

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 修复试样沉积态组织

图 2 为激光成形修复 Ti17 合金沉积态显微组织照片。图 2(a)为修复试样光学显微镜照片,从图中可以看出修复试样宏观组织共分为 3 个区域:修复区、热影响区和锻件基材区(BMZ),图 2(b)~(f)分别为 3 个区域的扫描电镜照片。修复区沉积态宏观组织为贯穿多个熔覆层呈外延生长的粗大柱状晶,柱状晶主轴垂直于光束扫描方向或略向光束扫描方向倾斜,如图 2(b)所示。不同熔覆层之间呈层带组织,层带组织的形成主要是由于部分组织受热粗化而引起的。激光立体成形过程中,层与层之间是致密冶金结合,熔覆新的一层时,会使前一熔覆层部分重熔。这也就相当于对前一层的组织进行了热处理,前一层距离重熔区越近,受到的影响也就越

大,相应的组织粗化也就越明显。这样逐层堆积之后,试样宏观上就形成了一层平行于扫描方向的层带组织。此外,宏观组织呈现明暗交替的现象,这是由于晶粒的晶体学取向不同所致。沉积态的显微组织为编织细密的网篮组织, $\beta$ 基体中析出的 $\alpha$ 相极其细小,长度为 $1\sim 3\ \mu\text{m}$ ,宽度为 $0.1\sim 0.2\ \mu\text{m}$ ,如图 2(c)所示。由于晶内组织极其细小,因此在光学显微镜下无法观察到微观相结构。

热影响区是修复区和基材区的过渡区域,在靠近修复区(热影响区上部)和靠近基材区(热影响区下部)的不同区域显微组织有较明显的差异。热影响区上部[图 2(d)]与热影响区下部[图 2(e)]均有少量由尺寸较小的 $\alpha$ 板条长大合并所形成的粗大 $\alpha$ 板条,等轴 $\alpha$ 基本消失,趋于形成新的晶界,且热影响区上部较下部组织更加细密。基材区是 Ti17 合

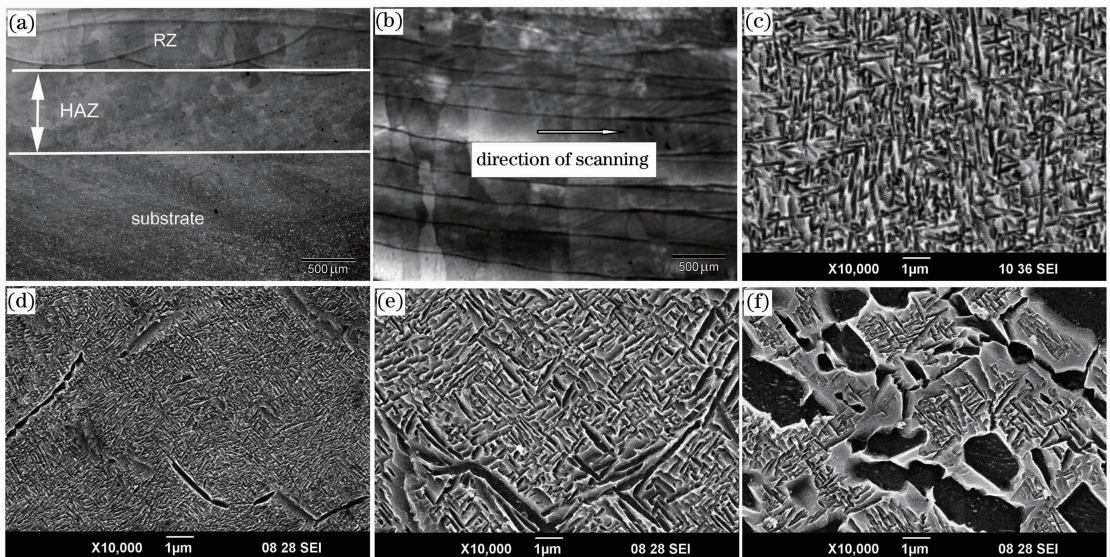


图 2 修复试样沉积态显微组织。(a)光镜照片,(b)修复区宏观组织,(c)修复区微观组织,(d)热影响区上部 SEM 照片,(e)热影响区下部 SEM 照片,(f)基材区 SEM 照片

Fig.2 Microstructure of as-deposited repaired sample. (a) optical micrographs, (b) macrostructure of repaired zone, (c) microstructure of repaired zone, (d) SEM photo of HAZ's upper section, (e) SEM photo of HAZ's lower section, (f) SEM photo of substrate

金锻造组织,为等轴  $\alpha$  和  $\alpha$  板条构成的双态组织。对比图 2(b)~(e) 可以发现,热影响区上部更接近修复区组织,而热影响区下部更接近基材组织。热影响区完成了基材区向修复区组织的过渡,激光修复区和锻件本体形成了致密的冶金结合。

### 3.2 热处理对组织及显微硬度的影响

图 3 为 600 °C, 1 h 炉冷退火后修复试样的显微组织照片。对比图 3(b) 和图 2(c) 可以发现修复区经 600 °C, 1 h 炉冷退火后,修复区  $\alpha$  相尺寸基本没有变化,但是在保温过程中  $\beta$  基体上析出了更多针

状  $\alpha$  相,这主要是由于保温时间短,析出的  $\alpha$  相来不及长大的缘故。同样由于保温时间短的原因,热影响区上部及下部的显微组织相对热处理前虽然  $\alpha$  相析出较多,尺寸也有所增加,但显微组织不均匀,主要以尺寸较小的针状  $\alpha$  为主,仅有少量  $\alpha$  板条,热影响区下部仍残留少量锻件基材等轴  $\alpha$  相,如图 3(d) 所示。锻件基材经 600 °C, 1 h 炉冷退火后等轴  $\alpha$  尺寸增大,部分尺寸较小的等轴  $\alpha$  相消失不见,同时析出更多  $\alpha$  板条,如图 3(e) 所示。

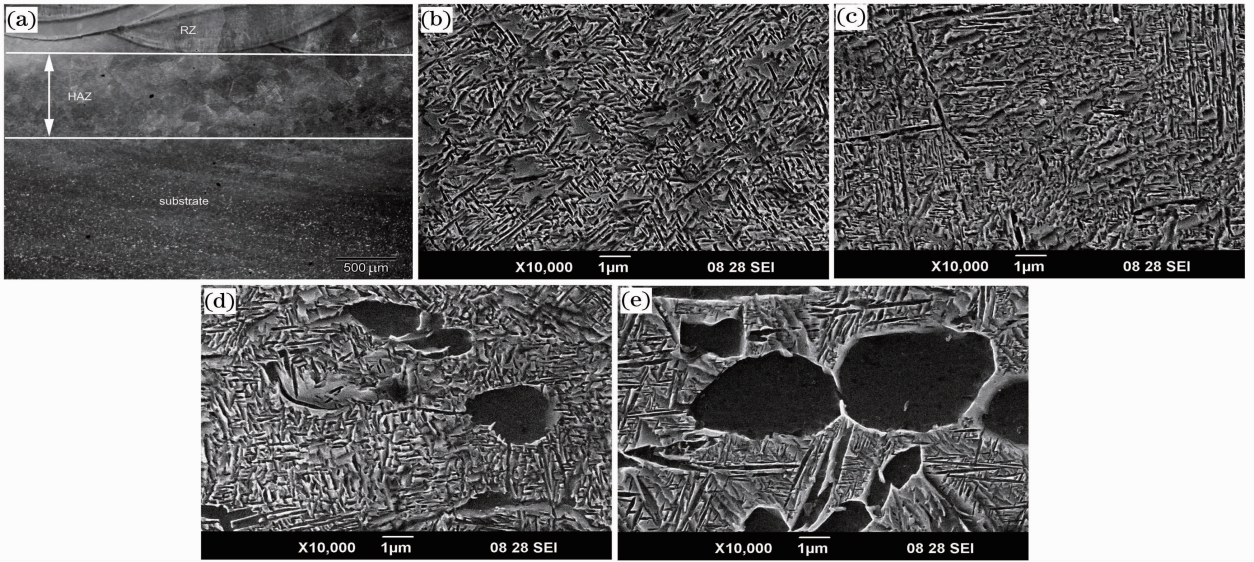


图 3 修复试样 600 °C, 1 h 炉冷退火后的显微组织。(a) 光镜照片, (b) 修复区 SEM 照片, (c) 热影响区上部 SEM 照片, (d) 热影响区下部 SEM 照片, (e) 基材区 SEM 照片

Fig. 3 Microstructure photos of repaired samples after furnace cooling annealing (600 °C, 1 h). (a) optical micrographs, (b) SEM photo of repaired zone, (c) SEM photo of HAZ's upper section, (d) SEM photo of HAZ's lower section, (e) SEM photo of substrate

激光成形修复零件中修复区、热影响区和锻件基材区的硬度及其分布情况将对修复后零件的性能带来很大影响。如果修复区较锻件基材硬度过高,会导致韧性严重降低,甚至在局部产生微裂纹,导致

整个零件失效。对激光成形修复试样沉积态及 600 °C, 1 h 炉冷退火两种状态下试样的不同区域进行了显微硬度测试,测试结果如图 4 所示。

从图 4 中可以看出,沉积态与退火态修复试样均为热影响区显微硬度最高,修复区略高于锻件基材,三者相差很小,显微硬度匹配良好。试样经 600 °C, 1 h 炉冷退火后,修复区、热影响区及基材区显微硬度较沉积态均有大约 5% 的小幅升高。这是由于 Ti17 合金是一种富  $\beta$  稳定元素的  $\alpha + \beta$  型两相钛合金,且激光立体成形是一个近快速非平衡的凝固过程,凝固速度较快,再加上修复试样沉积高度较低,成形过程中热作用时间较短,三者共同作用导致激光立体成形修复区沉积态  $\alpha$  相析出较少且尺寸很小,主要为针状  $\alpha$  相,因此显微硬度较低。退火热处理后,经过一定时间的保温,修复区、热影响区及锻

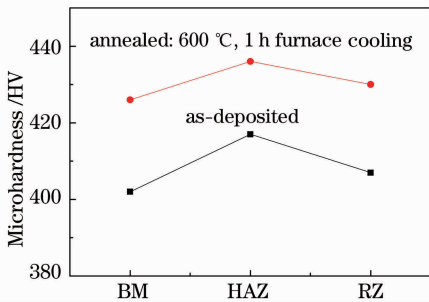


图 4 沉积态与退火态试样显微硬度

Fig. 4 Microhardness of samples as deposited and annealed

件基材区  $\alpha$  相数量增多,尺寸增大,析出相的增多使得退火后显微硬度较热处理前小幅增加。

### 3.3 高温拉伸性能

激光成形修复 Ti17 合金的 400 °C 拉伸性能如表 3 所示,其强度优于锻件标准,塑性与锻件标准相当。图 5(a)为修复 Ti17 合金的 400 °C 拉伸宏观断口,从图可以看到,纤维区基本都处于修复区,而剪

切唇基本分布在基体区。试样断口具有显著的韧窝特征。其中纤维区中部的韧窝[图 5(b)]比较深,而剪切唇区的韧窝[图 5(c)]则比较浅。在修复区与基体区的界面处韧窝的形态有明显区别:基体区韧窝明显比修复区的大,如图 5(d)所示。这表明基体区的塑性比修复区的塑性好。

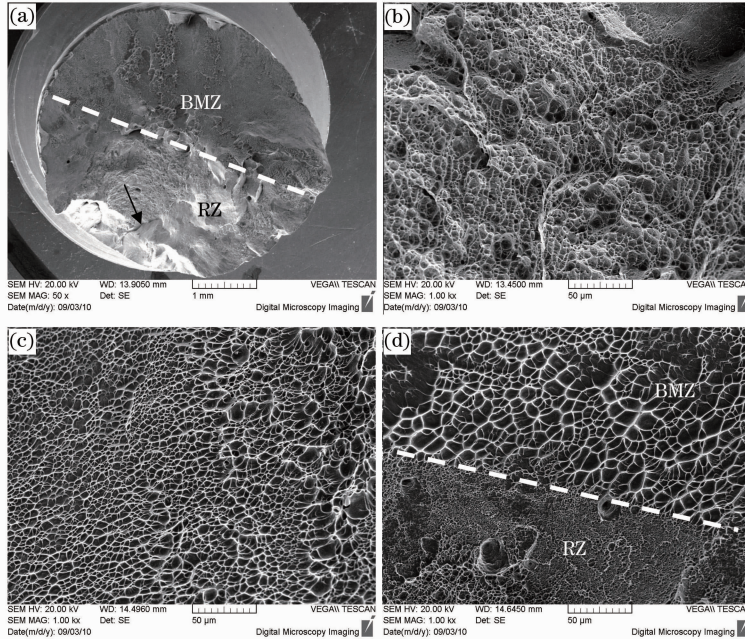


图 5 激光成形修复 Ti17 合金 400 °C 拉伸断口。(a)断口全貌,(b)纤维区中心,(c)剪切唇区,(d)修复区与基体区界面

Fig. 5 400 °C tensile fracture of LFR Ti17. (a) fracture panorama, (b) fiber zone, (c) shear lip, (d) juncture of RZ and BMZ

表 3 激光成形修复 Ti17 400 °C 拉伸性能

Table 3 400 °C tensile properties of LFR Ti17 titanium alloys

Number of sample	$T / ^\circ\text{C}$	$\sigma_b / \text{MPa}$	$\sigma_{0.2} / \text{MPa}$	$\delta / \%$	$\psi / \%$
1 <sup>#</sup>	400	980	865	11.5	23.0
2 <sup>#</sup>	400	1000	885	10.0	29.5
Standard	400	885	730	10.0	25.0

修复试样的高温拉伸性能与其修复区和基体区不同的组织特点是密切相关的。如前所述,修复区组织为编织细密的网篮组织,相比基体的双态组织相界面比例大,因此相界面的强化作用更显著。而且组织细小使滑移的平均自由行程减小,从而增强了组织的变形抗力。这使得修复区具有更高的强度。而基体为双态组织,等轴  $\alpha$  相均匀分布在层片状  $\alpha + \beta$  组织之间,起着变形协调作用,因此具有更好的塑性<sup>[7]</sup>。这样,同时具有这两种组织的修复试样在拉伸过程中,由于基体区塑性较好,会随之产生相应的弹塑性变形,因此修复区承受的拉伸载荷不断加大。裂纹会首先在修复区产生并扩展,形成断口中的纤维区[图 5(a)]。裂纹扩展至整个修复区

后,基体区无法承受加载的拉伸载荷最终以剪切唇的方式断裂[图 5(a)]。这样修复试样在拉伸性能上趋向体现修复区的强度和塑性。

### 3.4 高周疲劳性能

实验结果表明 Ti17 合金修复试样 400 °C 下疲劳极限为 295 MPa,达到模锻件标准的 70%。图 6(a)为 50%修复体积分数的激光成形修复 Ti17 合金高周疲劳宏观断口照片,从图中可以看到宏观断口由疲劳源区、裂纹稳定扩展区和瞬断区组成。根据图 6(a)和(b)中的放射条纹知疲劳源应为修复区中的气孔,该气孔直径大约 50  $\mu\text{m}$ 。疲劳源区宏观上比较平坦、光滑。在裂纹源区扩展阶段裂纹张开位移小,扩展缓慢,反复地张开闭合使得断口两面相互挤磨,

这样形成了这一较平滑的区域。疲劳寿命主要包括裂纹萌生寿命和裂纹稳定扩展寿命,气孔缺陷的存在使得疲劳裂纹提前萌生从而降低了材料的疲劳寿命,因此,优化激光立体成形的工艺参数、减少修复过程中产生的缺陷可以有效提高激光成形修复 Ti17 合金的疲劳寿命。

稳定扩展区在基体区和修复区分别表现不同的微观形貌:基体区断口表面比较粗糙;修复区则比较平坦,可以看到光滑的解理面,有些解理面上还分布有指向疲劳源方向的河流花样[见图 6(c)箭头所指]。基体区各部位均可见疲劳条带的存在,如图 6(d)所示,而修复区只在靠近瞬断区的部位有明显的疲劳条带,如图 6(e)所示。假设疲劳条带间距和每一次循环裂纹扩展距离相一致,那么对图 6(d)、(e)中的疲劳条带间距进行估算,得到疲劳裂纹在基体区和修复区的扩展速率分别为  $1.23 \times 10^{-3}$ ,  $2.34 \times 10^{-3}$  mm/cycle<sup>[8,9]</sup>。修复区和基体区在裂纹稳定扩展阶段的不同表现说明修复区的抗疲劳裂纹扩展能

力比基体区差。这是由两者的组织特点决定的。修复区内粗大的柱状晶使得晶界对疲劳裂纹的阻碍作用减少,有利于疲劳裂纹的扩展。同时,柱状晶内的网篮组织过于细小,使得  $\alpha$  板条之间的界面类似平直界面,这样裂纹扩展路径平直,裂纹扩展消耗的能量减少。这些因素造成修复区的抗裂纹扩展能力不及基体区。

另外,疲劳条带与局部裂纹扩展方向垂直并指向疲劳源,由此推断的疲劳源位置与前面分析是一致的。稳定扩展阶段微观形貌的另一主要特征是存在二次裂纹,如图 6(d)和(e)中箭头所指。其呈断裂分布并与疲劳条带平行。二次裂纹的存在使得疲劳主裂纹扩展过程中的局部应力得到松弛,有利于提高材料的疲劳性能。

瞬断区是疲劳裂纹扩展到临界尺寸后失稳扩展形成的区域,类似静载拉伸断口的瞬断区。修复区和基体区微观形貌相似,其主要特征是韧窝形貌,如图 6(f)所示。

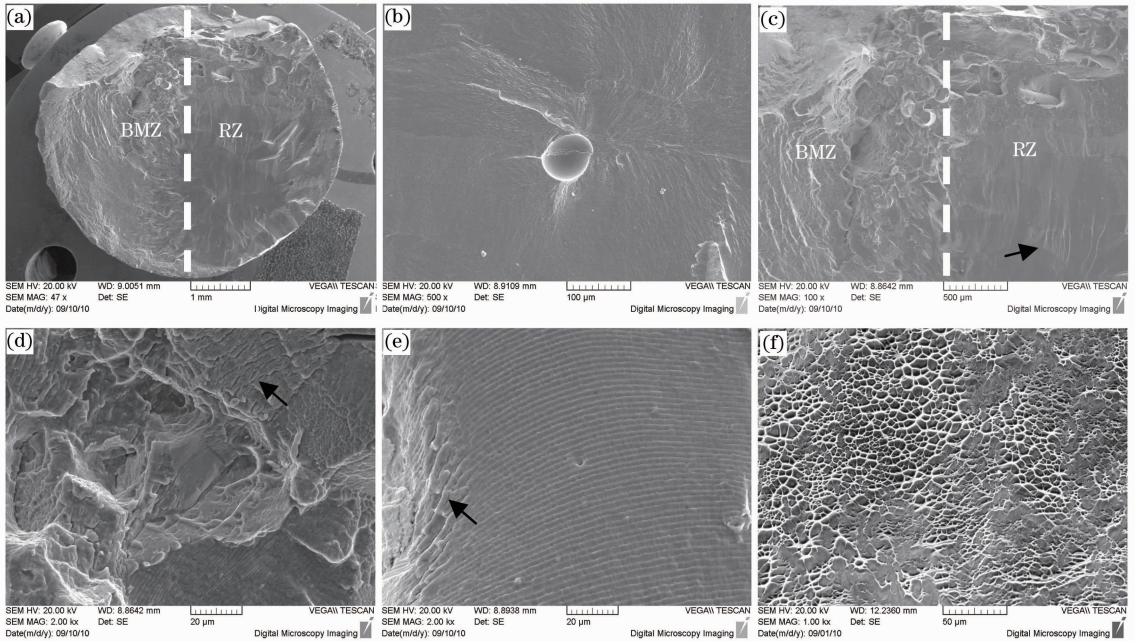


图 6 激光成形修复 Ti17 合金 400 °C 光滑试样高周疲劳断口形貌。(a)宏观断口,(b)疲劳源区,(c)稳定扩展区,(d)基体区疲劳条带,(e)修复区疲劳条带,(f)瞬断区

Fig. 6 400 °C high cycle fatigue fracture of laser forming repaired Ti17. (a) fracture panorama, (b) fatigue source, (c) extend zone, (d) fatigue striation in BMZ, (e) fatigue striation in RZ, (f) transient fracture

## 4 结 论

1) 修复试样宏观组织分为修复区、热影响区和锻件基材区。修复区沉积态宏观组织为贯穿多个熔覆层呈外延生长的粗大柱状晶,柱状晶主轴垂直于光束扫描方向或略向光束扫描方向倾斜。宏观组织

呈现明暗交替的现象并出现层带组织。显微组织为编织细密的网篮组织,  $\beta$  基体中析出的  $\alpha$  相极其细小,长度为  $1 \sim 3 \mu\text{m}$ ,宽度为  $0.1 \sim 0.2 \mu\text{m}$ 。热影响区组织由基体的锻造双态组织向修复区组织过渡,热影响区的宽度约为  $0.8 \text{ mm}$ 。

2) 经 600 °C, 1 h 炉冷退火后, 修复区中  $\alpha$  相尺寸基本没有变化, 但是在保温过程中  $\beta$  基体上析出了更多针状  $\alpha$  相; 热影响区上部及下部析出更多  $\alpha$  相; 锻件基材中等轴  $\alpha$  尺寸增大, 部分尺寸较小的等轴  $\alpha$  相消失不见, 同时析出更多  $\alpha$  板条。修复试样经 600 °C, 1 h 炉冷退火后, 3 个区域显微硬度较沉积态均有大约 5% 的小幅升高。

3) 激光成形修复 Ti17 合金的 400 °C 拉伸强度优于锻件标准, 塑性与锻件标准相当。裂纹首先在修复区产生并扩展, 修复试样在拉伸性能上趋向体现修复区的强度和塑性。

4) 激光成形修复 Ti17 合金试样 400 °C 下疲劳极限为 295 MPa, 达到模锻件标准的 70%。疲劳裂纹在修复区气孔处萌生。修复区的微观形貌主要是解理特征以及少量疲劳条带, 而基体区则大部分区域均有疲劳条带。这说明修复区的抗疲劳裂纹扩展能力较基体区差。

### 参 考 文 献

- 1 Duan Chuanbao. A briefing of development in titanium industry at home and abroad[J]. *Shanghai Steel & Iron Research*, 2003, (1): 39~42  
段传宝. 国内外钛工业发展状况概述[J]. 上海钢研, 2003, (1): 39~42
- 2 C. Leyens, M. Peters. Titanium and Titanium Alloys [M]. Chen Zhenhua transl.. Beijing: Chemical Industry Press, 2005. 3~20  
C. 莱茵斯, M. 皮特尔斯. 钛与钛合金[M]. 陈振华译, 北京: 化学工业出版社, 2005. 3~20
- 3 Yu Hanqing, Zeng Weidong, Zhou Yigang *et al.*. On beta

- forging of Ti-17 alloy [J]. *J. Northwestern Polytechnical University*, 1995, **13**(3): 340~344  
俞汉清, 曾卫东, 周义刚等. Ti-17 合金  $\beta$  锻造研究[J]. 西北工业大学学报, 1995, **13**(3): 340~344
- 4 Zeng Weidong, Hu Xianhong, Yu Hanqing *et al.*. An investigation on hot deformation mechanism of Ti-17 alloy[J]. *J. Materials Engineering*, 1996, (9): 27~30  
曾卫东, 胡鲜红, 俞汉清等. Ti-17 合金高温变形机理研究[J]. 材料工程, 1996, (9): 27~30
- 5 Li Qiang, Xu Yongbo, Shen Letian *et al.*. Dynamic mechanical properties and damage characteristics of titanium alloys (Ti17) [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 1999, **35**(5): 491~494  
李 强, 徐永波, 沈乐天等. Ti17 钛合金的动态力学性能和损伤特性[J]. 金属学报, 1999, **35**(5): 491~494
- 6 Huang Weidong, Li Yanmin, Feng Liping *et al.*. Laser solid forming of metal powder materials [J]. *J. Materials Engineering*, 2002, (3): 40~43  
黄卫东, 李延民, 冯莉萍等. 金属材料激光立体成形技术[J]. 材料工程, 2002, (3): 40~43
- 7 Cao Jingxia, Fang Bo, Huang Xu *et al.*. Effects of microstructure on properties of TA15 titanium alloy [J]. *Rare Metals*, 2004, **28**(2): 362~364  
曹京霞, 方 波, 黄 旭等. 微观组织对 TA15 钛合金力学性能的影响[J]. 稀有金属, 2004, **28**(2): 362~364
- 8 W. Rostoker, J. R. Dvorak. Interpretation of Metallographic Structures [M]. 2nd ed., Liu Yikuan, Wei Fuming, Zhou Lian *et al.* transl.. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1984. 46  
W. 劳斯特克, J. R. 德伏莱克. 金相组织解说[M]. 第 2 版, 刘以宽, 魏馥铭, 周 莲等译, 上海: 上海科学技术出版社, 1984. 46
- 9 Liu Fencheng, Lin Xin, Yang Gaolin *et al.*. Microstructures and mechanical properties of laser solid formed nickle base superalloy Inconel 718 in different atmospheres [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2010, **46**(9): 1047~1054  
刘奋成, 林 鑫, 杨高林等. 不同气氛激光立体成形镍基高温合金 Inconel 718 的显微组织和力学性能[J]. 金属学报, 2010, **46**(9): 1047~1054