

激光沉积 TA15 钛合金显微组织及高周疲劳性能研究

杨 光¹, 刘佳蓬^{1,2}, 钦兰云¹, 任宇航¹, 王 维¹

- (1. 沈阳航空航天大学 航空制造工艺数字化国防重点学科实验室, 辽宁 沈阳 110136;
2. 中国航空发动机四川燃气涡轮研究院, 四川 绵阳 621700)

摘要: 对激光沉积 TA15 钛合金显微组织进行研究, 并分析了室温下高周疲劳裂纹的萌生和扩展特性。采用光学显微镜(OM)和扫描电子显微镜(SEM)分析了试样疲劳断口以及纵截面显微组织形貌。研究表明, 激光沉积宏观组织呈现定向生长的柱状晶形貌, 晶粒内部为细小的网篮组织, 经过双重退火后, 网篮组织有粗化趋势。疲劳源区存在与 α 集束尺寸相当的解理断裂平面, 稳定扩展区疲劳裂纹扩展路径曲折, 这与片层组织中 α 集束位向不同有关, 一定区域内疲劳裂纹平行 α 片层或近似垂直 α 片层扩展, 扩展区的二次裂纹有助于扩展能量的消耗, 提高疲劳寿命。

关键词: 激光沉积; TA15 钛合金; 高周疲劳; 裂纹萌生; 裂纹扩展

中图分类号: TG146.2*3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1106003

Study on microstructure and high cycle fatigue property of laser deposited TA15 titanium alloy

Yang Guang¹, Liu Jiapeng^{1,2}, Qin Lanyun¹, Ren Yuhang¹, Wang Wei¹

- (1. Key Laboratory of Fundamental Science for National Defence of Aeronautical Digital Manufacturing Process, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;
2. Sichuan Gas Turbine Establishment, Aero Engine Corporation of China, Mianyang 621700, China)

Abstract: The microstructure of laser deposited TA15 titanium alloy was investigated and high cycle fatigue property including crack initiation and crack propagation at room temperature was analyzed. The fatigue fracture surface and microstructure of longitudinal section were examined by optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM). The results indicate that as-deposited macrostructure consists of directional column grains with extremely fine basket-weave microstructure. After double-annealing treatment, coarse lamellar-like basket-weave microstructure was obtained. The crack initiation region was characterized by crystallographic cleavage facets of α lamellar. The crack tended to propagate tortuously, which was related to different orientations of α lamellar. Its propagation direction in certain areas was parallel or approximately perpendicular to α lamellar and the secondary cracks in the crack propagation region helped consuming energy and improved the fatigue life.

Key words: laser deposition; TA15 titanium alloy; high-cycle fatigue; crack initiation; crack propagation

收稿日期: 2018-06-10; 修订日期: 2018-07-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB1100504); 国家自然科学基金(51505301, 51375316); 沈阳增材制造工程技术研究中心项目(F16-078-8-00)

作者简介: 杨光(1978-), 男, 副教授, 博士, 主要从事激光沉积制造/修复技术研究。Email: yangguang@sau.edu.cn

0 引言

TA15(Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V)为高 Al 当量的近 α 型钛合金,具备 α 型钛合金的热强性和可焊性,由于在组织中有 β 相(2%~8%)的存在,它同时兼具接近于 $\alpha+\beta$ 型钛合金的塑性。TA15 钛合金具有良好的工艺性能、热稳定性和焊接性能,因此在航空领域的应用越来越多^[1]。但受钛合金自身粘性大等原因的影响,采用锻造结合机械加工等传统制造技术制造复杂钛合金构件工序繁多、成本高,制约了钛合金构件在国防领域的应用。激光沉积制造(Laser Deposition Manufacturing, LDM)技术以快速原型制造技术为基础,在无需任何模具和工装的条件能够快速制造出任意复杂形状的零件,该技术以材料快速凝固激光冶金制备技术为手段,通过金属材料的激光逐层熔化沉积,由零件 CAD 模型直接完成高性能“近终形”复杂金属零件的制造,与传统金属零件制造技术相比,具有制造周期短、材料利用率高等优点^[2]。目前,对增材制造钛合金成形件疲劳性能研究大多集中在 TC4 钛合金,Wang 等^[3]研究的电弧增材 Ti-6Al-4V 为具有片层组织的柱状晶,片层组织间的位错有效减小了晶界间的位错塞积,其疲劳性能优于锻件;Zhang 等^[4]对电弧成形 TC4 钛合金研究表明片层状的魏氏组织表现出优于锻件的裂纹扩展特性;S.Leuders 等^[5]对选区激光烧结 TC4 钛合金疲劳特性进行研究,发现残余应力影响疲劳裂纹的扩展行为;Wycisk 等^[6]对熔丝成形 TC4 钛合金的疲劳寿命进行研究,结果表明,当试样表面具有较大的粗糙度时,疲劳裂纹更易在表面形核;贺瑞军等^[7]研究了激光沉积制造 Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V 钛合金高周疲劳(HCF)特性,发现 α/β 片层能缩短疲劳源区的滑移长度,提高了疲劳裂纹形核阻力。TA15 钛合金作为重要的航空结构材料,目前对其增材制造疲劳特性研究较少,因此文中利用激光沉积制造技术制备 TA15 钛合金棒材,研究了沉积态与双重退火热处理后的微观组织变化,对双重退火后的试样进行室温高周疲劳实验。采用扫描电子显微镜(SEM)观察疲劳断口,研究了疲劳裂纹的萌生与扩展特性。

1 实验设备与条件

激光沉积制造 TA15 钛合金实验在沈阳航空航天大学建立的激光沉积制造系统上完成。实验基材采用锻造 TA15 钛合金,实验前对基材沉积表面进行打磨后用丙酮进行擦洗,保证沉积表面清洁,沉积材料为真空等离子旋转电极法制备的 TA15 球形粉末,粒度分布为 47~156 μm ,化学成分(in wt%)为:6.7Al,1.7Mo,0.02Si,2.3V,2.1Zr,0.04Fe,0.01C,0.11O,0.01N,0.003H,其余为 Ti。激光沉积制造试件工艺参数为:激光功率 2 000 W,扫描速度 10 mm/s,送粉速度 10 g/min,扫描间距 2.0 mm,搭接率 45%~55%。制备出厚壁件尺寸为 100 mm \times 80 mm \times 20 mm,双重退火热工艺为 950 $^{\circ}\text{C}$ 保温 2 h,炉冷再 600 $^{\circ}\text{C}$ 保温 4 h,空冷,将激光沉积 TA15 钛合金制备光滑试样进行高周疲劳测试,试样轴线平行于沉积方向。高周疲劳实验在室温空气环境下进行,控制波形为正弦波,用 Instron8801-100 kN 电液伺服疲劳试验机进行实验,应力比 $R=0.06$,加载频率 $f=8\sim 10$ Hz。

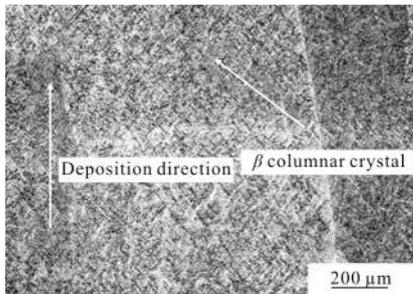
在靠近疲劳源的断裂表面截取用于微观组织观察的金相试样,经过镶嵌、打磨和抛光后,腐蚀液为 Kroll 腐蚀剂(HF-HNO₃-H₂O 体积比为 1:6:7);采用 ULTRA/PLUS 场发射扫描电子显微镜和 OLYMPUSGX51 光学显微镜(OM)分别分析疲劳断口形貌和显微组织以及裂纹扩展路径。

2 结果与分析

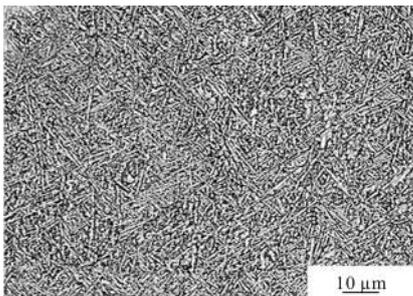
2.1 组织分析

图 1 为激光沉积制造 TA15 钛合金沉积态组织,激光沉积制备工艺具有定向逐层沉积的特点,图 1(a)中可见沉积制造过程中层间搭接痕迹并观察到贯穿多个沉积层的粗大 β 柱状晶,其生长方向略倾向激光沉积方向,宽度约为 300~600 μm ,组织表现出各向异性的特征,沉积态微观组织照片如图 1(b)所示。由于激光沉积冷却速率较快,晶粒内部组织来不及长大,为细小的片层组织,不同的亚晶粒内可见单个 α 片层及 α/β 片层集束, α/β 片层集束是沉积过程中在固态相时,由原始 β 相在两相转变温度下转化形成的,取向随机,相互交叠,单个 α 片层宽度约为

0.8 μm , β 片层宽约为 0.2 μm , α/β 片层集束平均宽度为 2~4 μm , α 相长宽比约为 15.5。尽管在柱状晶内片层沿各个方向生长且交错, 但同一束域的 α/β 片层之间遵循一定的伯格位向关系: $\{0001\}_\alpha // \{101\}_\beta, [2\bar{1}10]_\alpha // [\bar{1}11]_\beta$ 。



(a) 宏观
(a) Macrostructure



(b) 微观
(b) Microstructure

图 1 激光沉积 TA15 钛合金显微组织图

Fig.1 Micrographs of laser deposited microstructure(LDM) TA15 titanium alloy

在沉积过程中, 因存在相变应力和热应力, 对沉积态试样进行退火热处理, 工艺路线如图 2 所示。经过热处理后 β 柱状晶形貌未见明显变化 (图 3(a)), 然而晶内网篮组织变得较粗大 (图 3(b)), α 相长宽比约为 23, 高于沉积态试样, 这是由于 TA15 钛合金的 β 相转变温度为 980~1 020 $^\circ\text{C}$, 故热处理温度

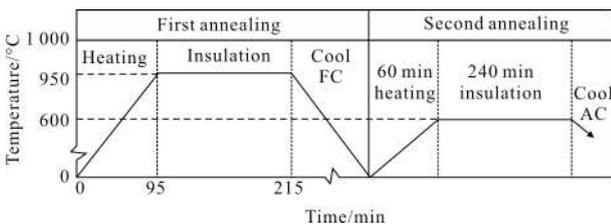
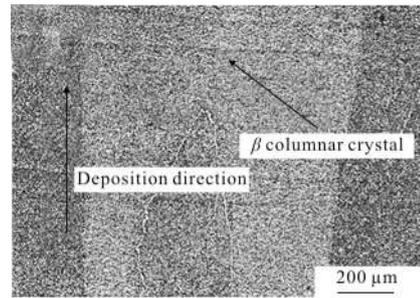
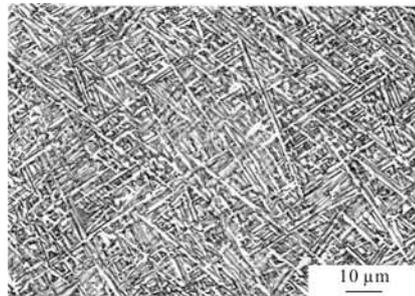


图 2 双重退火处理工艺路线
Fig.2 Double annealing routing



(a) 宏观
(a) Macrostructure



(b) 微观
(b) Microstructure

图 3 双重退火态激光沉积 TA15 钛合金显微组织

Fig.3 Micrographs of LDM TA15 titanium alloy after double-annealing

在 950 $^\circ\text{C}$ 时, 略低于 β 转变点温度, α 相不会全部转变为 β 相, 导致残余 α 相在高温固溶扩散过程中粗化, 温度在 600 $^\circ\text{C}$ 时, 晶内 α 片层析出长大。

2.2 高周疲劳性能

图 4 为激光沉积 TA15 钛合金高周疲劳应力-寿命曲线。其中 N_f 为疲劳寿命, σ_{max} 为应力。激光沉积 TA15 钛合金具有细小取向随机片层组织, 裂纹在取向不同的集束界面处扩展容易受阻, 因此极易改变方向进入下一个片层集束, 这样有效地增加了裂纹

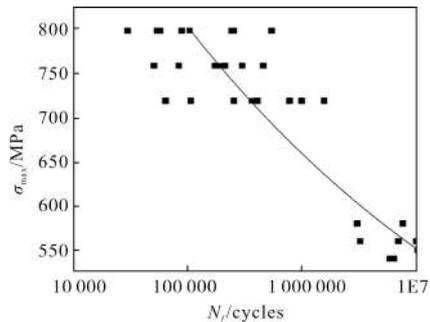


图 4 激光沉积 TA15 钛合金高周疲劳 S-N 曲线
Fig.4 HCF S-N curve of LDM TA15 titanium alloy

扩展路径的长度,在裂纹扩展方向改变的同时常伴有 α 片层集束界面处的撕裂变形,增加了能量消耗,从而提高了裂纹的扩展阻力,因此激光沉积 TA15 钛合金具有较高的高周疲劳强度,疲劳极限值达 550 MPa。

2.3 断裂表面和断裂行为

图 5 为疲劳断口的表面形貌,激光沉积试件宏

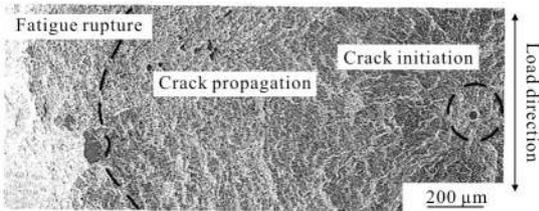
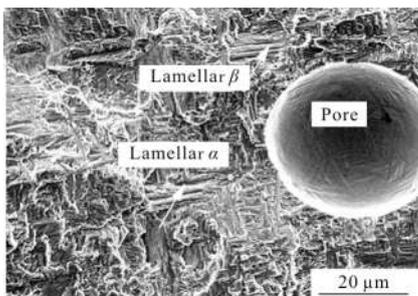


图 5 激光沉积 TA15 的疲劳断裂 SEM 表面形貌

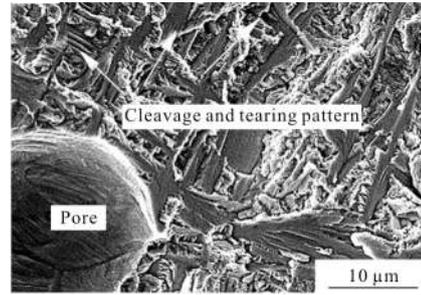
Fig.5 SEM micrograph of LDM TA15 fatigue fracture surface

观疲劳断口是由与加载方向垂直的疲劳裂纹源区、疲劳裂纹扩展区与疲劳瞬断区三部分组成。沉积试样具有明显气孔,由于气孔缺陷导致局部应力集中,造成高应力区的出现,故滑移带更容易在孔边出现,萌生疲劳裂纹。此外,扩展区与瞬断区的界限比较明显,瞬断区较明亮且高低起伏。图 6 所示为疲劳源区不同位置的断裂形貌,可见气孔附近取向不同的 α/β 片层痕迹以及沿 α/β 片层断裂的小平面(图 6(a)),同时可观察到沿滑移面的解理断裂和 α/β 片层的撕裂形貌(图 6(b)),由于 α 、 β 两相硬度不同,且片层厚度相差较大导致两相变形能力的不协调,同时由于 α 相钛合金为密排六方结构(hcp), β 相为体心立方结构(bcc),二者在晶体学取向上, β 相中 $\{101\}_\beta$ 面上的 $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]_\beta$ 与 α 相中 $\{0001\}_\alpha$ 面上的 $[2\bar{1}\bar{1}0]_\alpha$ 之间关系并非完全平行,而是存在一个夹角,因此二者在某滑移方向有着细微差别,导致断裂表面呈现 α 相沿滑



(a) α/β 片层

(a) α/β lamellar



(b) 解理与撕裂形貌

(b) Cleavage and tearing pattern

图 6 疲劳源区 SEM 形貌

Fig.6 SEM micrographs in fatigue fracture region

移面的解理断裂与 β 相撕裂形貌,断裂平面的尺寸与片层集束尺寸相当,疲劳裂纹源区表现出高度组织敏感性。

在疲劳裂纹萌生后扩展一定距离,可观察到断裂表面距离疲劳源约 $60 \mu\text{m}$ 处由于集束取向不同而形成的撕裂形貌,如图 7 所示。当裂纹从一个片层集束扩展至另一个取向不同的集束时,裂纹沿着集束容易滑移的方向扩展至集束界面处引起撕裂变形。尺寸细小的片层组织容易引起撕裂和界面处的变形,从而提高裂纹扩展的抵抗能力。

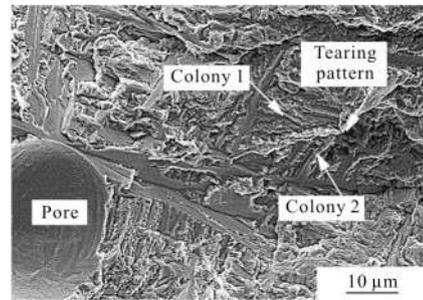
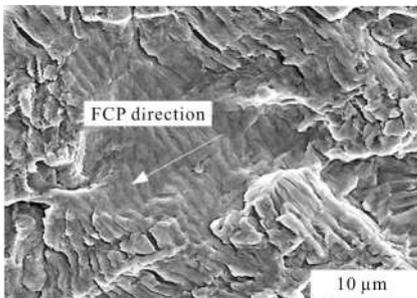


图 7 集束界面变形形貌

Fig.7 SEM micrograph of interlaced colonies

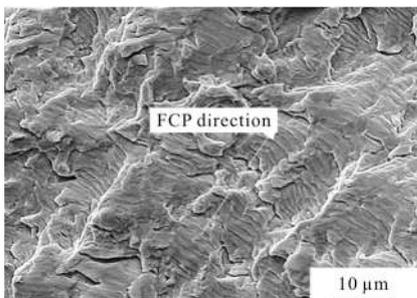
疲劳裂纹从源区沿着滑移带的主滑移面向内部扩展进入疲劳扩展阶段,裂纹形成后,在拉应力作用下,裂纹张开,尖端钝化,卸载时闭合,裂纹尖端重新锐化,再受一次循环拉力,由于尖端的应力集中,使裂纹发生亚稳临界扩展,便留下一条疲劳条带,每一条带为一次循环扩展的痕迹,疲劳裂纹稳定扩展区疲劳条带形貌如图 8 所示,疲劳条带近似相互平行,方向与局部扩展方向垂直。进一步观察发现,由于片层的取向随机,疲劳条带与 α/β 片层大体存在二种位置

关系,一种是疲劳条带近似平行于片层(图 8(a)),另一种是疲劳条带近似垂直于片层(图 8(b)),二种情况下均可见 α/β 片层在疲劳条带下分布的痕迹,疲劳裂纹的扩展伴随二次裂纹的产生,激光沉积TA15 钛合金疲劳失效过程中主要存在两种类型的二次裂纹,一种平行于疲劳条带分布,具有一定区域性,扩展范围短且深度小(图 9(a)),这类二次裂纹主要是由于片层界面受到垂直于裂纹扩展方向的剪切撕裂应力作用形成的;另一种二次裂纹垂直疲劳条带,是主裂纹扩展受到较大阻力时发生分支扩展造成的(图 9(b)),这类二次裂纹在与主裂纹垂直的方向向下扩展很深,其作



(a) 疲劳条带平行片层集束

(a) Striations parallel to the lamellar colony

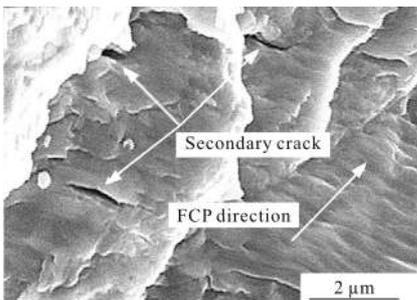


(b) 疲劳条带垂直片层集束

(b) Striations perpendicular to the lamellar colony

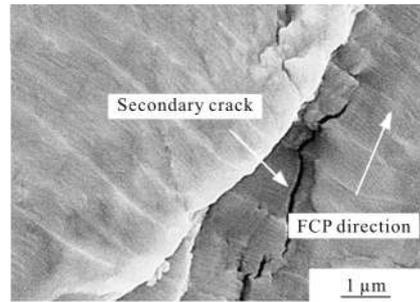
图 8 疲劳裂纹扩展区 SEM 形貌

Fig.8 SEM micrographs of fatigue crack propagation region



(a) 二次裂纹平行疲劳条带

(a) Secondary crack parallel to striations



(b) 二次裂纹垂直疲劳条带

(b) Secondary crack perpendicular to striations

图 9 疲劳失效变形中的二次裂纹 SEM 图

Fig.9 SEM images of secondary cracks in fatigue deformation

用是减轻主裂纹的扩展阻力。二次裂纹的形成释放了主裂纹尖端的应力,消耗大量的应变能,提高疲劳裂纹的扩展抗力,降低裂纹的扩展速率,一定程度上提高了疲劳寿命。

疲劳试样失效断裂后,将断口沿着纵截面切开,观察疲劳源附近的疲劳裂纹扩展行为。由于片层组织中相邻的 α 集束具有不同的位向,裂纹在经过不同 α 集束时扩展路径会发生改变,一定区域内疲劳裂纹主要以平行 α 片层形式扩展,如图 10 II 所示,当疲劳裂纹遇到取向一致的 α 片层集束时,裂纹会发生偏转并沿着集束边界扩展,如图 10 I 所示,这主要由于裂纹扩展向着周围组织最薄弱处扩展,所以裂纹极易遇到下一个 α 片层或取向不同的片层集束时发生转向,使扩展路径变得曲折,部分区域疲劳裂纹近似垂直 α 片层扩展,如图 10 III 所示,同时可见 α/β 片层由于抵抗外力作用大幅度扭曲变形,通过观察发现,疲劳裂纹平行或垂直 α 片层扩展占大部分比例,这主要是因为片层之间存在着具有不同晶体结构的 α 相和 β 相,两相钛合金中,体心立方结构 β 相与密排六方结构 α 相之间存在 Burgers 位向关系^[8]($\{0001\}_\alpha // \{101\}_\beta, [2\bar{1}\bar{1}0]_\alpha // [1\bar{1}\bar{1}]_\beta$),两相界面处结合力低于片层内部,因此两相界面处成为疲劳裂纹扩展过程中的薄弱环节,容易发生开裂,导致裂纹平行 α 片层扩展,参考文献[9]也曾指出 α 相 $\{0001\}$ 面的 $[11\bar{2}0]$ 晶向与 β 相 $\{110\}$ 面的 $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ 晶向平行,滑移容易在相界间发生,导致裂纹平行于片层扩展,Sansoz^[10]等人对 Ti6242 合金的研究中也发现疲劳裂纹容易平行或垂直 α 片层扩展,其中柱

面 $\{01\bar{1}0\}$ 滑移造成疲劳裂纹平行于 α 片层,而柱面 $\{10\bar{1}0\}$ 滑移或基面 $\{0001\}$ 滑移是导致疲劳裂纹垂直 α 片层方向扩展的主要原因。

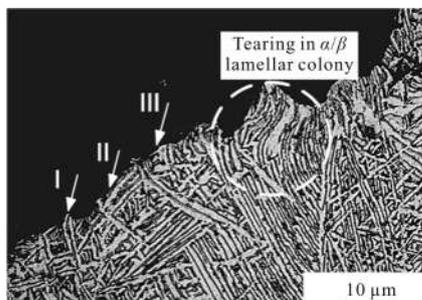


图 10 疲劳裂纹扩展区显微组织形貌

Fig.10 Microstructure of fatigue crack propagation region

当疲劳裂纹扩展接近临界尺寸时将发生失稳扩展直至快速破断,图 11 为疲劳瞬断区断口微观形貌。瞬断区主要是由大量微孔聚集型韧窝以及由于塑性变形而形成的撕裂棱组成,局部韧窝分布均匀,疲劳过程中大量位错的存在使点阵严重扭曲,裂纹在晶粒内部扩展较困难,彼此相邻的边界处发生较大的塑性变形以撕裂的方式连接,形成撕裂棱和韧窝,很明显,激光沉积 TA15 钛合金疲劳断裂方式为韧性断裂。

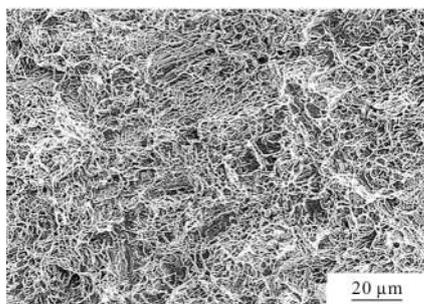


图 11 疲劳瞬断区 SEM 形貌

Fig.11 SEM micrograph of fatigue rupture region

3 结 论

(1) 激光沉积 TA15 钛合金沉积态组织由具有沿沉积方向定向生长特征的柱状晶组成,柱状晶内部为细小的网篮组织;双重退火热处理后,晶内网篮组织粗化,与沉积态相比, α 相长宽比明显增加。

(2) 激光沉积 TA15 钛合金具有较高的高周疲劳强度,疲劳极限值达 550 MPa,疲劳源区断口形貌具有组织敏感性,敏感尺寸可达 α 片层集束尺寸,两

相硬度不同及应变不协调性导致断裂表面呈现 α 相沿滑移面的解理断裂与 β 相撕裂形貌。

(3) 疲劳裂纹扩展过程中,由于 α 片层集束不同位向,疲劳裂纹扩展路径曲折,一定区域内疲劳裂纹平行 α 片层或近似垂直 α 片层,二次裂纹能够消耗大量能量,降低裂纹扩展速率,激光沉积 TA15 钛合金疲劳断裂方式为韧性断裂。

参考文献:

- [1] Li Liang, Sun Jianke, Meng Xiangjun, et al. Application state and prospects for titanium alloys [J]. *Tit Ind Prog*, 2004, 21 (5): 19-24. (in Chinese)
- [2] Yang Qiang, Lu Zhongliang, Huang Fuxiang, et al. Research on status and development trend of laser additive manufacturing [J]. *Aeronaut Manuf Techno*, 2016, 507(12): 26-31. (in Chinese)
- [3] Wang F, Williams S, Colegrove P, et al. Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2013, 44: 968-977.
- [4] Zhang Jikui, Wang Xueyuan. Fatigue crack propagation behaviour in wire+arc additive manufactured Ti - 6Al - 4V: Effects of microstructure and residual stress[J]. *Materials and Design*, 2016, 90: 551-561.
- [5] Leuders S, Thone M, Riemer A, et al. On the mechanical behavior of titanium alloy TiAl6V4 manufactured by selective laser melting: Fatigue resistance and crack growth performance [J]. *Int J Fatigue*, 2013, 48: 300-307.
- [6] Wycisk E, Solbach A, Siddique S, et al. Effects of defects in laser additive manufacturing Ti -6Al -4V on fatigue properties [J]. *Physics Procedia*, 2014, 56: 371-378.
- [7] He Ruijun, Wang Huaming. HCF properties of laser deposited Ti-6Al-2Zr-Mo-V alloy [J]. *Acta Aeronaut et Astronaut Sin*, 2010, 31(7): 1488-1493. (in Chinese)
- [8] Shi X H, Zeng W D, Shi C L, et al. Study on fatigue crack growth rates of Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe titanium alloy with basket-weave microstructure [J]. *Mat Sci Eng A*, 2015, 621: 143-148.
- [9] Jin O, Mall S. Effects of microstructure on short crack growth behavior of Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si alloy [J]. *Materials Science and Engineering*, 2003, A359: 356-367.
- [10] Sansoz F, Ghonem H. Effects of loading frequency on fatigue crack growth mechanisms in a/b Ti microstructure with large colony size [J]. *Materials Science and Engineering*, 2003, A356: 81-92.