

激光熔化沉积 Ti-6Al-2Zr-Mo-V 合金 高周疲劳变形行为

贺瑞军, 王华明

(北京航空航天大学, 北京 100191)

摘要: 研究激光熔化沉积 Ti-6Al-2Zr-Mo-V 合金在高周疲劳失效中的变形行为, 并提出相应的变形机制。结果表明, 激光沉积钛合金疲劳裂纹萌生和扩展中的变形行为都与其位错运动和滑移行为密切相关。疲劳裂纹扩展中的滑移主要沿两个滑移面进行; 裂纹扩展亚表面存在大量二次裂纹。解释两种不同类型二次裂纹的形成机制和作用。分析粗大柱状晶晶界变形特征。

关键词: 激光熔化沉积; 钛合金; 疲劳; 变形

中图分类号: TG 146.2⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2010)02-0288-04

钛合金由于具有高的比强度、优异的耐蚀性等一系列优点, 在航空航天、石油化工等领域都得到了日趋广泛的应用^[1,2]。钛合金的疲劳失效是其实际工业应用中主要的失效方式^[3], 研究其疲劳失效行为有主要的意义。研究表明, 钛合金疲劳裂纹萌生与位错运动及滑移行为有关^[4], 裂纹扩展通常沿一定晶体学滑移面进行。在疲劳失效中存在多种方式的变形行为^[5], 这些变形行为都与材料的显微组织有密切的关系, 而钛合金组织与材料加工制备方法及成形工艺密切相关。

激光熔化沉积(laser melting deposition, LMD) 是快速凝固激光材料加工技术与快速原型技术相结合的先进制造技术^[6]。在金属零件 CAD 实体模型离散切片数据计算机数控系统驱动下, 以快速凝固激光熔覆材料制备技术为手段, 通过金属材料的激光熔化-快速凝固逐层沉积直接制备并成形出组织细小致密、成分均匀、性能优异的高性能金属材料及其近净成形零件。激光成形技术同时具有激光加工和快速原型技术的优点。一方面, 激光成形技术具有无需成形模具、加工成本低、没有前后的加工处理工序、几乎是一次近成形, 材料利用率高, 成形速度快, 成形周期短, 理论上可以制造任意形状的复杂零件等一系列的优点。另一方面, 成形过程中熔池有极高的能量密度, 熔池凝固时有极快的基体自冷却速度, 成形的材料有致密精细、成分均匀的微观组织, 具有很好的强度、韧性和

疲劳性能, 某些力学性能达到甚至超过锻造钛合金水平。

本研究进行 Ti-6Al-2Zr-Mo-V 合金高周疲劳试验。通过对其疲劳变形行为的研究, 探索激光沉积钛合金疲劳失效中的变形模式和机制, 以及其组织对变形行为的影响, 了解激光沉积钛合金的疲劳变形特性。

1 实验

采用激光熔化沉积制造方法成形宽 600 mm、高 500 mm、厚 20 mm 的合金板材。然后在 750 进行 1 h 的去应力退火热处理。疲劳试样的轴向尺寸为 140 mm, 最窄横截面直径为 5 mm。试样轴向平行于合金板材激光沉积层方向。图 1 显示了激光沉积 Ti-6Al-2Zr-Mo-V 合金的显微组织。其组织由 α/β 两相

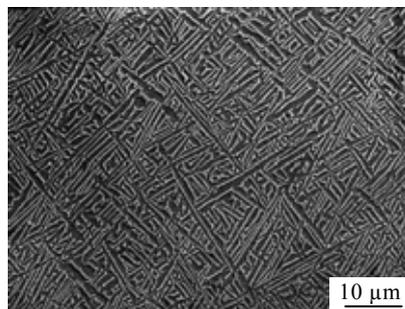


图 1 激光沉积 Ti-6Al-2Zr-Mo-V 合金显微组织
Fig.1 SEM microstructure of LMD Ti-6Al-2Zr-Mo-V alloy

收稿日期: 2009-05-21

基金项目: 国家自然科学基金(50625413);“973”计划(2006CB 605206-2)资助

作者简介: 贺瑞军, 男, 1982 年生, 博士生, 北京航空航天大学材料激光加工制造实验室, 北京 710016, 电话: 010-82339697, E-mail: herie_6860@163.com

组成。激光沉积凝固过程中冷却速率达到 10^4 /s, 沉积 Ti-6Al-2Zr-Mo-V 合金具有取向随机的细小 α/β 片层组织。片层集束尺寸为 5~20 μm , 平均约为 13 μm 。 α 片层宽度约为 0.9 μm , β 片层约为 0.2 μm 。

采用扫描电镜分析疲劳断口形貌。并制备疲劳亚表面金相试样, 观察疲劳断口亚表面变形形貌。从试样断口表面处开始向下切取平行断面的小薄片用以制备透射电镜观察试样。

2 结果及讨论

2.1 位错

图 2 为激光熔化沉积 Ti-6Al-2Zr-Mo-V 合金疲劳试样亚表面位错形态。从图 2a 中可以看到, α/β 相界面处位错密度非常大。 α 相中柏氏矢量相反的位错在应力作用下向相反方向运动, 形成向相反方向弯曲的呈“弓”形的位错线。这些位错线一端在 α/β 相界面处, 另一端在 α 相内某些钉扎点或另一侧的 α/β 相界面处。从图 2b 中可以明显观察到 α 相中在不同滑移系上的位错。有些位错仿佛穿过了 α/β 相界面。这可能是由于观察角度的原因, α 相内的位错线在电镜下的成像穿过了 β 相造成的。

图 3 显示了激光熔化沉积 Ti-6Al-2Zr-Mo-V 合金疲劳试样亚表面位错反应。或者位错受阻, 或者改变运动方向。图 3a 中可以观察到平面滑移位错的位错组态特征, A 处为位错交割反应留下的痕迹; B 处发生了位错的分解反应, 一个全位错分解为两个不全位错; β 相内也可以观察到位错。图 3b 中显示了 α 相内复杂的位错网, 有大量位错反应, 位错重叠形成复杂的图像, A 处有位错交割反应形成的位错网络结构。

可以看出, 激光熔化沉积 Ti-6Al-2Zr-Mo-V 合金

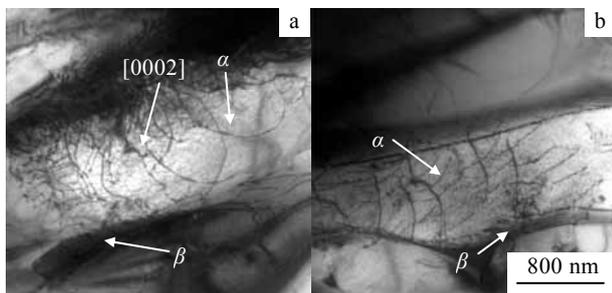


图 2 激光熔化沉积 Ti-6Al-2Zr-Mo-V 合金疲劳试样亚表面位错形态

Fig.2 SEM images of the dislocations in the fatigue fracture subsurface of LMD Ti-6Al-2Zr-Mo-V alloy (a) bow dislocations and (b) dislocations in two slip systems

的细小 α/β 组织中, α/β 片层相界面可能是发射位错的源头。在相界面处位错密度较高。 β 相片层极其薄, α 相比 β 相软, 位错更容易在 α 相内产生并受外力作用下发生运动。在 α 相内滑移系会被开动, 并形成平面滑移位错。在外力作用下位错发生交割、分解、钉扎等反应, 或者弯曲运动形成“弓”形位错, 并在 α 相内形成复杂的位错网络。

2.2 滑移

在激光熔化沉积 Ti-6Al-2Zr-Mo-V 合金疲劳行为中, 滑移是其塑性变形的的主要方式。裂纹通过在 α 、 β 两相内的协调变形进行扩展。根据伯格取向关系, 激光成形 Ti-6Al-2Zr-Mo-V 合金中 α 、 β 片层并行排列生长。研究表明, 双相钛合金片层之间晶体学关系近似满足 $\{110\}_\beta // \{0001\}_\alpha$, $\langle 111 \rangle_\beta // [11\bar{2}0]_\alpha$ ^[7]。 α 相内基面和棱面的滑移方向 $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 与 β 相内的滑移方向 $\langle 111 \rangle$ 近似平行, 所以裂纹扩展中 α 、 β 两相内可以发生滑移面平行过渡转移^[8]。但是以上的晶体学关系中, β 相中 $\{110\}_\beta$ 面上的 $\langle 111 \rangle_\beta$ 与 α 相中 $\{0001\}_\alpha$ 面上的 $\langle 11\bar{2}0 \rangle_\alpha$ 之间由于几何晶体学的关系并不是完全的平行, 而是近似的平行, 这两个取向之间存在一个小的夹角(图 4)。

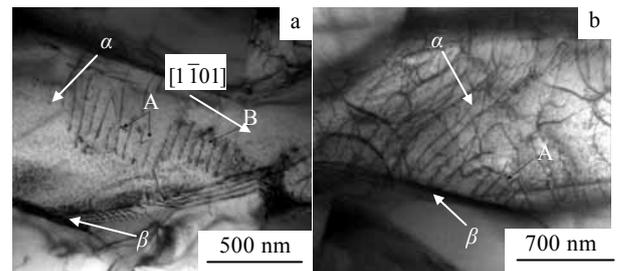


图 3 激光熔化沉积 Ti-6Al-2Zr-Mo-V 合金疲劳试样亚表面位错反应及 α 相内复杂位错网络结构

Fig.3 SEM images of the dislocation reaction (a) and complex dislocation network (b) of LMD Ti-6Al-2Zr-Mo-V alloy

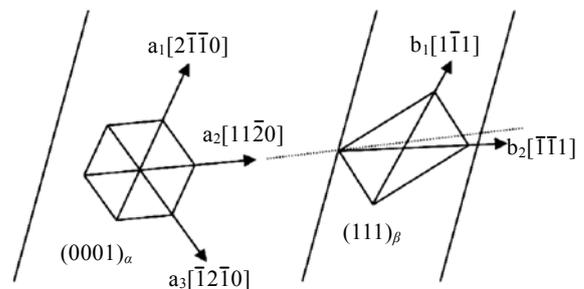


图 4 激光沉积 Ti-6Al-2Zr-Mo-V 合金 α 、 β 相取向关系示意图
Fig.4 Illustration of the orientation relationship between α and β phase of LMD Ti-6Al-2Zr-Mo-V alloy

激光沉积钛合金片层组织尺寸极为细小，疲劳裂纹的形核和组织高度敏感。由于 $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 和 $\langle 111 \rangle$ 在某一个方向上的滑移方向的微小差别以及 α 、 β 两相变形能力的不同协调性(α 、 β 两相硬度不同，片层厚度差异悬殊)导致了裂纹形核中 β 的撕裂和 α 相在滑移面上的解理断裂(图5)。

2.3 二次裂纹

疲劳断口表面和亚表面的 SEM 分析结果显示，激光沉积 Ti-6Al-2Zr-Mo-V 合金疲劳失效变形中主要存在两种类型的二次裂纹。片层界面处二次裂纹通常平行于疲劳条带分布，这种二次裂纹是裂纹在垂直片层集束扩展时形成疲劳条带的过程中片层界面在垂直裂纹扩展方向上在剪切撕裂应力作用下开裂形成的。由于激光沉积钛合金的片层组织极为细小，所以这类二次裂纹深度较小，扩展范围和路径很短，仅局限在一个片层集束的范围内(图6a和6b);片层集束界面

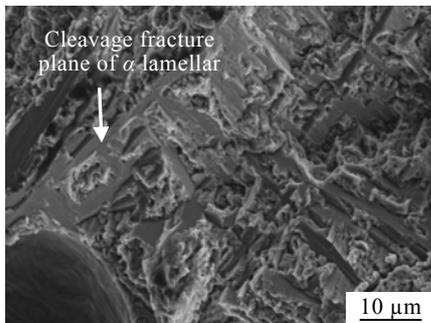


图5 疲劳源区试样断口表面形貌

Fig.5 SEM image of the fatigue initiation region morphology of LMD Ti-6Al-2Zr-Mo-V alloy

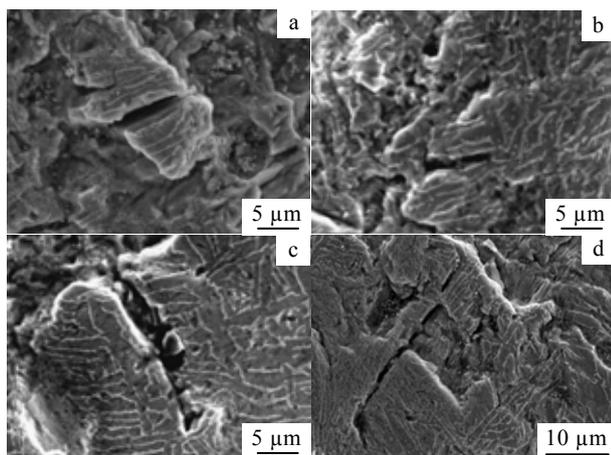


图6 激光沉积 Ti-6Al-2Zr-Mo-V 合金疲劳失效变形中的二次裂纹
Fig.6 SEM images of the secondary cracks of LMD Ti-6Al-2Zr-Mo-V alloy: (a, b) along the lamellae interface and (c, d) along lamellar colony boundaries

的二次裂纹是在主裂纹扩展过程中受到较大阻力时发生裂纹的分支扩展形成的。其重要作用是通过帮助消耗能量的方式减轻主裂纹扩展中遇到的阻力，使主裂纹继续向前扩展。因此，这种类型的二次裂纹可以在与主裂纹几乎垂直的方向上向下扩展很深，其扩展路径长，有时会很曲折(图6c和6d)。这两种不同类型的二次裂纹由于其形成方式的不同，在裂纹扩展过程的作用也有所不同，但是有一点是相同的，所有的二次裂纹在裂纹扩展中都能帮助消耗大量的能量，有效提高裂纹扩展能量消耗，从而降低裂纹扩展速率，提高疲劳失效寿命。

2.4 晶界变形

图7a显示了粗大柱状晶晶界在疲劳失效过程中的变形行为。可以明显看到沿晶界有一条约30 μm宽的变形带。这说明粗大柱状晶晶界在疲劳过程中会优先发生变形。激光熔沉积钛合金组织具有粗大柱状晶在沉积方向上定向凝固生长的特征，大尺寸晶界的存在对其力学性能有一定的影响。图7b是其变形带的高倍SEM照片。从中可以观察到变形的细节。在晶界一侧沿晶界排列的片层集束，其取向与应力加载方向近似垂直。这些片层集束在正拉应力的作用下发生了片层分离，可以明显观察到片层张开后形成的间隔。而在晶界的另一侧，片层集束与晶界垂直，与应力加载方向之间的夹角很小，所以片层没有受到垂直其取向的正拉应力，没有发生片层分离的变形。这表明，晶界处的变形行为与晶界两侧片层集束取向和应力加载方向都有着密切的关系。

综上所述，在疲劳裂纹形核和扩展中，存在多种方式的变形行为。这些变形行为都与材料的显微组织有密切的关系。激光沉积钛合金具有尺寸细小、取向丰富的片层组织，其显微组织对其疲劳行为具有重要影响。裂纹通过这些变形行为的协调作用进行扩展。另外，各种变形行为都有助于裂纹形核和扩展中的能

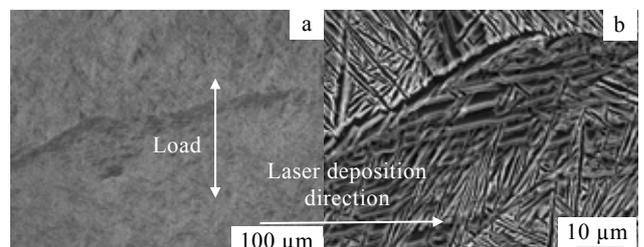


图7 柱状晶晶界疲劳失效变形形貌

Fig.7 SEM images of the deformation of the columnar grain boundary: (a) perpendicular to the stress load direction; and (b) details of the deformation

量消耗，从而提高裂纹扩展阻力，降低扩展速率，改善材料抗疲劳性能。

3 结 论

1) 激光沉积 Ti-6Al-2Zr-Mo-V 合金的 α/β 片层相界面是发射位错的源头。位错在 α 相内运动时至少两个滑移系会被开动。

2) 激光沉积 Ti-6Al-2Zr-Mo-V 合金疲劳行为二次裂纹可以在片层界面或片层集束界面处形成。两种二次裂纹形成模式不同，但都能有效消耗裂纹扩展能量，提高裂纹扩展阻力。

3) 激光沉积钛合金粗大柱状晶晶界在疲劳过程中优先发生变形。其变形行为与晶界两侧片层集束取向和应力加载方向密切相关。

参考文献 References

- [1] Shi Changxu (师昌绪), Li Hengde (李恒德), Zhou Lian (周廉). *Handbook of Materials Science and Engineering* (材料科学与工程手册)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 2
- [2] Li Chenggong (李成功), Fu Hengzhi (傅恒志), Yu Qiao (于翹) *et al. Aerospace Materials* (航空航天材料)[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 41
- [3] Tao Chunhu (陶春虎), Liu Qingquan (刘庆琰), Cao Chunxiao (曹春晓) *et al. Failure and Prevention of Aeronautical Titanium Alloy* (航空用钛合金的失效及其预防)[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 34
- [4] Lütjering G, Gysler A. *Titanium Science and Technology 1984* [C]. Munich, FRG: Deutsche Gesellschaft für Metallkunde, 1984, 4: 2065
- [5] Kocanda S. *Fatigue Failure of Metals*[M]. Poland: Sijithoff & Noorahoff International Publishers, 1978: 49
- [6] Wang Huaming (王华明), Zhang Lingyun (张凌云), Li An (李安) *et al. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics* (北京航空航天大学学报)[J], 2004, 10: 962
- [7] Welsch G, Weiss I, Eylon D *et al.* In: Weiss I, Srinivasan R, Bania P J eds. *Advances in the Science and Technology of Titanium Alloy Processing* [C], Warrendale, PA: Minerals, Metals and Materials Society, 1997: 169
- [8] Jin O, Mall S. *Mater Sci Eng A*[J], 2003, 359: 356

Deformation Behavior in High-Frequency Fatigue Failure of Laser Melting Deposited Ti-6Al-2Zr-Mo-V Alloys

He Ruijun, Wang Huaming
(Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Deformation behavior in high-frequency fatigue failure of laser melting deposited Ti-6Al-2Zr-Mo-V alloys was investigated. The deformation modes and mechanisms were also discussed. The results indicate that the deformation behavior during fatigue crack nucleation and propagation are closely related to the dislocation motion and slip behavior. The fatigue cracks by slip deformation propagate along two slip planes. A lot of secondary cracks were observed on the crack propagation subsurface. Formation mechanism and effect of two types of secondary cracks were explained. Grain boundary deformation of coarse-columnar crystal was also discussed.

Key words: laser melting deposition (LMD); titanium alloy; fatigue; deformation

Corresponding author: He Ruijun, Candidate for Ph. D., Laboratory of Laser Materials Processing and Manufacturing, Beihang University, Beijing 100191, P. R. China, Tel: 0086-10-82339697, E-mail: herie_6860@163.com