

文章编号: 0258-7025(2009)12-3210-05

Ti-6Al-4V 合金激光立体成形沉积态的平面应变 断裂韧度

薛蕾¹ 陈静¹ 虞文军² 林鑫¹ 黄卫东¹

(¹西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)
(²成都飞机工业(集团)有限责任公司, 四川 成都 610092)

摘要 采用激光立体成形(LSF)技术制备了 Ti-6Al-4V 平面应变断裂韧度(K_{IC})试样。沿沉积高度方向,沉积态组织呈现典型的 β 晶粒外延生长特性, β 晶粒的平均宽度约为 $100\sim 400\ \mu\text{m}$,长度可达若干厘米, β 晶粒内由细密的针状 α 及 $\alpha+\beta$ 板条组成。Ti-6Al-4V 激光立体成形沉积态试样的 $K_{IC}\geq 52.6\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$,达到锻件标准要求,不过,由于沉积态的组织特征, K_{IC} 具有典型的各向异性,与拉伸性能所表现的各向异性一致。 β 晶内细密 $\alpha+\beta$ 编织的魏氏组织的抗裂纹扩展能力较强,使得裂纹扩展对 β 晶界非常敏感。当裂纹扩展面垂直于 β 晶界时, K_{IC} 最高;在裂纹沿 β 晶界扩展的情况下,单位面积内的晶界长度越长越曲折,则 K_{IC} 越高。裂纹扩展方向与 β 晶界的夹角($0\sim 90^\circ$)越大, β 晶粒越细小,裂纹扩展越困难。

关键词 激光技术;激光立体成形;显微组织;平面应变断裂韧度;Ti-6Al-4V 合金;沉积态

中图分类号 TG146.4;TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093612.3210

Investigation on K_{IC} of As-Deposited Ti-6Al-4V Alloy Fabricated by Laser Solid Forming

Xue Lei¹ Chen Jing¹ Yu Wenjun² Lin Xin¹ Huang Weidong¹

(¹State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University,
Xi'an, Shaanxi 710072, China
²Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610092, China)

Abstract Samples of Ti-6Al-4V used in the test of plane strain fracture toughness (K_{IC}) test is fabricated by laser solid forming (LSF). Primary β grain, with a characteristic of epitaxial growth along the depositional direction, shows an average width of $100\sim 400\ \mu\text{m}$ and length of several centimeters. Within β grains, lathy α needles and fine-weaved dense Widmanstatten $\alpha+\beta$ laths are observed. $K_{IC}\geq 52.6\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ reaches the forging standard. And as same as the tensile property of LSF Ti-6Al-4V sample, K_{IC} property presents remarkable anisotropism which is caused by the microstructure characteristic. Fine-weaved dense Widmanstatten $\alpha+\beta$ laths owns strong ability in anti-crack-propagation, in result, crack-propagation shows sentivites to β grain boundary. If crack propagation runs the direction perpendicular to β grain boundary, K_{IC} value reaches maximum; if crack propagation runs the direction along β grain boundary, the longer the boundary, the higher the K_{IC} value. It is more easier for crack propagation with a small angle between crack-propagation direction and β grain boundary($0\sim 90^\circ$). The bigger angle and smaller β grain both result in difficulties in crack-propagation.

Key words laser technique; laser solid forming; microstructure; plane strain fracture toughness; Ti-6Al-4V alloy; as-deposited

收稿日期: 2009-10-14; 收到修改稿日期: 2009-11-01

基金项目: 中国博士后科学基金(20090451394)和凝固技术国家重点实验室自主研究项目(16-TZ-2007)资助课题。

作者简介: 薛蕾(1980—),男,博士后,主要从事金属零件的激光立体成形及修复技术等方面的研究。

E-mail: xuenwpu@gmail.com

1 引言

激光立体成形(LSF)技术是近年来以快速原型制造技术和激光熔覆技术为基础发展起来的一项先进的致密金属零件自由成形制造技术^[1~4]。采用 LSF 技术制备的金属零件具有优异的力学性能,其性能指标可达到锻件标准^[5,6]。LSF 技术所具有的“离散+堆积”的增材制造特点,不但使这项技术可以用于金属零件的三维实体制造,而且也可应用于受损零件的快速修复,通过在受损零件的待修复部位进行数字化逐层熔覆,最后生成与缺陷部位近形的三维实体,完成对损伤零件几何性能与力学性能的恢复。

对于 Ti-6Al-4V 合金,尽管 LSF 技术可以获得优异的力学性能,为该合金航空结构锻件的高性能修复提供了可能的技术途径,但是由于受损零件多已加工到位,在修复过程中将不允许进行较高温度的热处理以防引起零件变形或对零件基体组织产生不利影响。因此,往往要求激光修复件沉积态的力学性能直接达到使用要求,这便需要对激光修复区沉积态的组织与力学性能有一个清晰的认识。平面应变断裂韧度 K_{IC} 是航空结构锻件的一个重要力学性能指标,对于激光立体成形沉积态即激光修复区 K_{IC} 的研究,特别是 K_{IC} 与组织之间的关系的研究,目前尚未见报道。本文考察了激光立体成形 Ti-6Al-4V 合金沉积态的 K_{IC} ,同时研究了显微组织

(β 柱状晶取向)对 K_{IC} 的影响。

2 实验

在自制的 LSF-IV 型激光立体成形设备上完成 Ti-6Al-4V 合金试样的制备。该设备包括 2 kW YAG 激光器、惰性气氛室、高精度送粉系统和三轴运动系统,成形气氛氧体积分数控制在 10^{-5} 以内。共制备两种 K_{IC} 成形毛坯,尺寸分别为 40 mm(X)×40 mm(Y)×17 mm(Z)(如图 1 所示)和 17 mm(X)×40 mm(Y)×40 mm(Z),Z 方向为激光成形增高方向。激光加工参数如下:激光功率 1~1.5 kW,激光光斑直径 2~3 mm,扫描速度 6~10 mm/s,搭接率 33%,单层高度 0.4 mm,送粉率 3~5 g/min。所用粉末为 Ti-6Al-4V 合金氩雾化(GA)粉末,其化学成分见表 1。激光成形前,纯钛基材表面经砂纸打磨后用丙酮进行清洗。

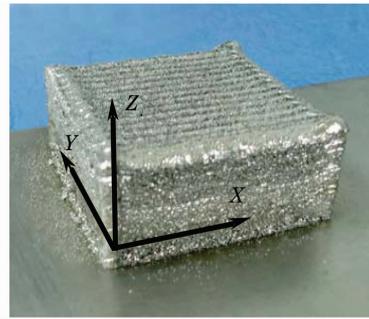


图 1 LSF 制备的 K_{IC} 毛坯试样

Fig. 1 Blank of K_{IC} fabricated by LSF

表 1 Ti-6Al-4V 合金粉末化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of the Ti-6Al-4V alloy powder (mass fraction, %)

H	O	N	C	Si	Fe	V	Al	Ti
0.008	0.13	0.038	0.014	0.026	0.098	4.02	6.25	Bal.

在成形毛坯上截取用于显微组织观察的试样,沿毛坯纵截面切开后用金相砂纸进行打磨,抛光后用 Kroll 腐蚀剂进行腐蚀,最后采用光学显微镜(OM)与扫描电镜(SEM)进行显微组织观察。将成形毛坯加工成紧凑拉伸试样,用线切割加工宽度 0.1 mm 的切口,然后用高频疲劳试验机预制长度大于 1.3 mm 的疲劳裂纹, K_{IC} 试验在 MTS 810 疲劳试验机上进行。

3 结果及分析

3.1 组织分析

LSF 组织本身具有非平衡近快速凝固和外延生长的特点,因此 Ti-6Al-4V 激光立体成形沉积态的显微组织为外延生长的魏氏组织。粗大初生 β 柱

状晶基本沿沉积高度方向生长[图 2(a)];晶内呈现典型的针状 α 及 $\alpha+\beta$ 板条组织[图 2(b),(c)],组织均匀细密。

由于凝固偏析,初生 β 晶界通常相比 β 晶内具有更高溶质含量,导致在冷却过程中, α 相通常在初生 β 晶界首先形核析出,进而有部分 α 相团束沿着初生 β 晶界析出向晶内生长[图 2(c)]。先前的研究表明^[7],Ti-6Al-4V 合金的结晶间隔较小,不易发生柱状晶向等轴晶生长的转变。另外,凝固过程是随着固液界面的推进而进行的,基于激光熔池本身的传热特征,熔池底部的温度梯度最高,并且基本沿沉积方向,凝固始终自熔池底部向熔池顶部进行,而在凝固过程中液态金属与固相基底始终保持接触而导致凝固组织呈现外延生长的特性。可以看到,初

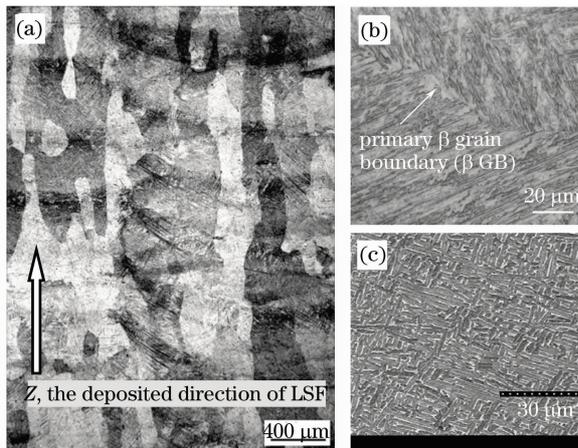


图2 LSF制备的 K_{IC} 试样的金相组织照片。

(a) β 柱状晶;(b)初生 β 相晶界;(c) $\alpha+\beta$ 相SEM照片

Fig. 2 Micrographs of the LSF sample. (a) β columnar crystals; (b) primary β grain boundary; (c) SEM of $\alpha+\beta$

生 β 柱状晶的平均宽度约为 $100\sim 400\ \mu\text{m}$,这主要是由于Ti-6Al-4V合金中 β 相的自扩散系数较大,晶粒生长激活能较小,使得Ti-6Al-4V合金激光立体成形的初生 β 柱状晶明显粗大^[8]。

3.2 平面应变断裂韧度 K_{IC}

由于大部分 β 柱状晶均沿沉积高度方向生长,使显微组织呈现明显的各向异性特征,以 β 柱状晶的生长方向[图1及图3(d)所示的Z方向]为参考,在与 β 柱状晶生长方向平行的剖面[图3(d)所示的XZ,YZ面]上显微组织为外延生长的柱状晶,在与 β 柱状晶生长方向垂直的剖面[图3(d)所示的XY面]上显微组织呈现等轴状。早期研究发现^[6],Ti-6Al-4V合金激光立体成形沉积态的室温拉伸性能因显微组织的各向异性而在不同方向有所差别(表2),沿Z方向的拉伸性能与沿X(或Y)方向的拉伸性能相比,强度低而塑性高。这是因为沿Z方向拉伸时柱状晶主轴与拉伸方向近于平行,贯通多个沉积层的连续晶界对拉伸变形的阻碍作用无法体现,导致强度低而塑性高;而沿X(或Y)方向拉伸时,粗大的柱状晶晶界与拉伸方向近乎垂直,对变形产生强烈的阻碍作用,从而导致强度高而塑性低。

表2 Ti-6Al-4V合金激光立体成形沉积态的室温拉伸性能

Table 2 Tensile properties of laser deposited Ti-6Al-4V alloy at room temperature

Tensile direction	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	$\delta/\%$
X (or Y)	1170	1110	6
Z	1100	1020	10

因此对于 K_{IC} 的研究将以 β 柱状晶的生长方向

为参考,预制3种不同扩展方向的裂纹,如图3(a),(b),(c)中的箭头所示。分别为:1)预制裂纹将沿Z方向扩展,即沿着 β 晶粒的外延生长方向扩展,裂纹与Z方向垂直[第I种,图3(a)];2)预制裂纹将沿着X(或Y)方向扩展,裂纹与Z方向垂直[第II种,图3(b)];3)预制裂纹将沿着X(或Y)方向扩展,裂纹与Z方向平行[第III种,图3(c)]。表3给出了不同裂纹预制形式的 K_{IC} 值,从中可以看到,所有裂纹预制形式的 K_{IC} 均达到了锻件标准,第I种裂纹预制形式的 K_{IC} 最低,第II种裂纹预制形式的 K_{IC} 最高。

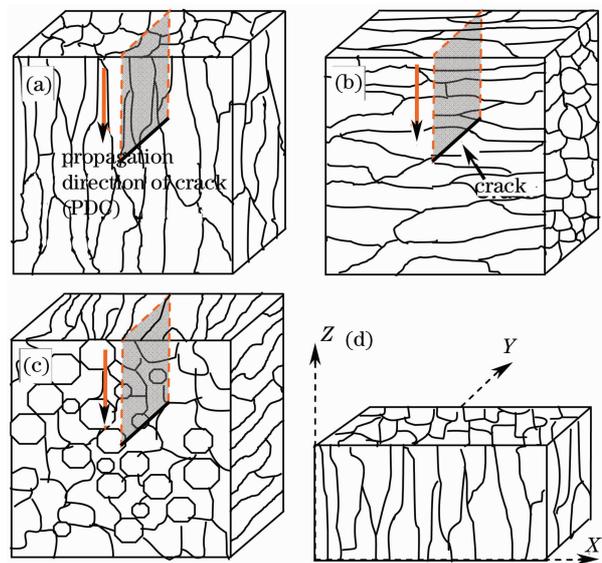


图3 K_{IC} 试样裂纹预制示意图

Fig. 3 Diagrammatic sketch for prefabricated crack of K_{IC} sample

表3 不同裂纹预制形式的 K_{IC}

Table 3 Values of K_{IC} for different pre-cracks

Type of pre-cracks	$K_{IC}/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$
I	52.6
II	62.7
III	56.7
Forging standards	≥ 50

一般来讲,影响金属材料 K_{IC} 的主要因素有:化学成分、显微组织及环境因素。本文所使用的粉末材料是确定的,且合金成分分布基本一致^[7],所测试的环境均为室温,所以不同裂纹预制形式的 K_{IC} 值的差异主要与试样的显微组织有关。

对于这3种裂纹预制形式来讲,激光立体成形沉积态的显微组织为初生 β 柱状晶及晶内的魏氏组织, β 晶粒的尺度比较大,宽度大约为 $100\sim 400\ \mu\text{m}$,长度可能达到若干厘米,所不同的是裂纹

扩展方向与 β 柱状晶的相对位向不同。第 I 种裂纹预制形式, 裂纹扩展时扩展面沿着 β 晶粒的生长方向, 顺着 β 晶界扩展 [图 4(a) 箭头所指], 裂纹扩展会比较顺利一些, 因此抗裂纹扩展能力较差。第 II 种裂纹预制形式下裂纹扩展面与 β 晶粒的生长方向垂直, 裂纹扩展要“切断”所有的 β 晶粒, 几乎不沿 β 晶界扩展, 裂纹扩展主要在 $\alpha + \beta$ 相中进行。由于 α 域的取向不同, 且针状 α 为编织状, 加上裂纹在垂直于 β 晶界扩展时要受到晶界的阻碍, 因此裂纹以此形式进行扩展时路径最曲折, 扩展受阻最大, 故 K_{IC} 值在三者中为最高。第 III 种裂纹预制形式, 裂纹扩展面与 β 晶粒的生长方向平行, 扩展方向垂直于 β 晶粒生长方向, 裂纹沿 β 晶界扩展 [图 4(c) 箭头所指], 由于 β 晶粒在 XY 剖面上为等轴状, 该截面上晶粒的尺寸较小, 约为 $100 \sim 200 \mu\text{m}$, 因此单位面积内的 β 晶界长度与第 I 种裂纹预制形式相比较长, 裂纹扩展的路径也比较曲折, 抗裂纹扩展能力稍强一些。上述 3 种裂纹预制形式的抗裂纹扩展能力的不同可以从测试试样的宏观断口上看到差异, 如

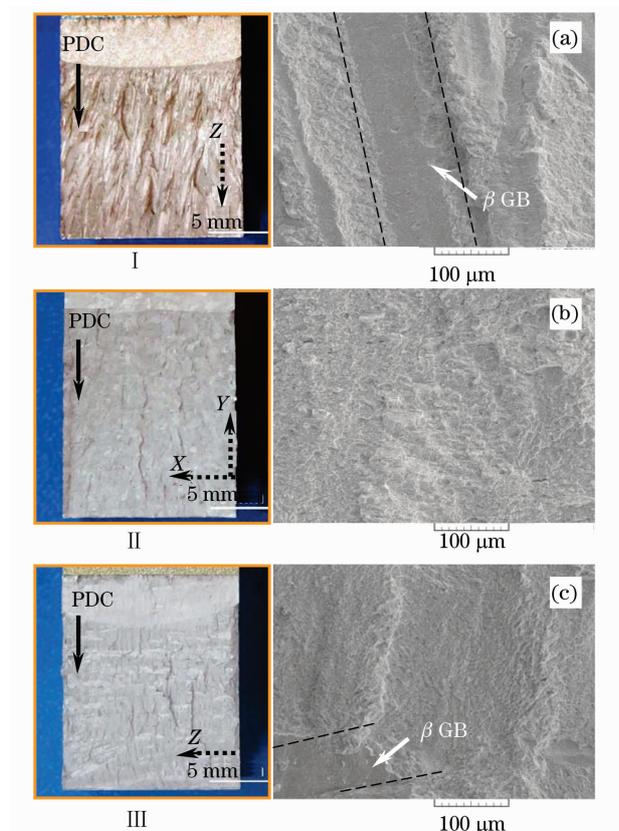


图 4 K_{IC} 试样的断口形貌。(a) 第 I 种预制裂纹断口;

(b) 第 II 种预制裂纹断口; (c) 第 III 种预制裂纹断口

Fig. 4 Macroscopic fractures of K_{IC} samples. (a) Type I; (b) type II; (c) type III

图 4 所示。图 4(a)~(c) 分别对应于 I~III 种预制裂纹, 左侧图中箭头 (PDC) 所指方向为裂纹扩展方向。可以明显看到, 图 4(a) 的断口有明显的方向性条纹, 比较长, 凹凸感强, 为裂纹沿着 β 晶粒生长方向扩展所致; 图 4(b) 的断口比较平缓, 为裂纹垂直贯穿 β 晶粒在 α 和 β 相之间扩展所致; 图 4(c) 的断口有明显的颗粒感, 在沿着裂纹扩展方向呈现阶梯状, 为裂纹平行于 β 晶粒生长方向扩展所致。

根据上面的分析可知, Ti-6Al-4V 合金激光立体成形沉积态的 K_{IC} 由于其组织而具有典型的各向异性, 这与拉伸性能所表现的各向异性相一致。 K_{IC} 在裂纹垂直于 β 晶界扩展的情况下最高; 如果裂纹沿 β 晶界扩展, 而单位面积内的晶界长度越长越曲折, 则 K_{IC} 越高。由于 β 晶内编织状的 $\alpha + \beta$ 对抗裂纹扩展的能力较强且没有明显的方向性, 而 β 晶界易于裂纹的扩展且有明显的方向性, 因此使得裂纹扩展对 β 晶界非常敏感。裂纹扩展方向与 β 晶界的夹角 ($0 \sim 90^\circ$) 越小, 扩展越容易, 夹角越大, 扩展越困难, β 晶粒越粗大, 扩展越容易, β 晶粒越细小, 扩展越困难。

4 结 论

1) Ti-6Al-4V 合金激光立体成形沉积态的组织呈现典型的外延生长特性, 初生 β 柱状晶平均宽度约为 $100 \sim 400 \mu\text{m}$, β 晶粒内的针状 α 及 $\alpha + \beta$ 板条组织细密。

2) Ti-6Al-4V 合金激光立体成形沉积态的 K_{IC} 性能达到锻件标准。同时, 受裂纹预制扩展方向和 β 晶粒的位向关系的影响, K_{IC} 呈现明显的各向异性, 当裂纹垂直于 β 晶界扩展时最高; 当裂纹沿 β 晶界扩展时, 单位面积内的晶界长度越长越曲折, K_{IC} 越高。

3) β 晶内的 $\alpha + \beta$ 编织对抗裂纹扩展的能力较强, 使得裂纹扩展对 β 晶界非常敏感; 裂纹扩展方向与 β 晶界的夹角 ($0 \sim 90^\circ$) 越大, β 晶粒越细小, 扩展越困难。

参 考 文 献

- 1 M. L. Griffith, D. M. Keicher, C. L. Atwood *et al.*. Freeform fabrication of metallic components using laser engineered net shaping LENS [C]. Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings, Austin, TX: University of Texas at Austin Publishers, 1996, 12-14: 125
- 2 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
- 3 Zhong Minlin, Yang Lin, Liu Wenjin *et al.*. Laser direct manufacturing W/Ni telescope collimation component [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(4): 482~486
- 钟敏霖, 杨 林, 刘文今 等. 激光快速直接制造 W/Ni 合金太空望远镜准直器 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(4): 482~486
- 4 Xinhua Wu, Jing Liang, Junfa Mei *et al.*. Microstructures of laser-deposited Ti-6Al-4V [J]. *Materials and Design*, 2004, **25**: 137~144
- 5 David Abbott, Frank Arcella. Laser forming titanium components [J]. *Advanced Materials & Processes*, 1998, **153**(5): 29~30
- 6 Chen Jing, Zhang Shuangyin, Xue Lei *et al.*. Mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy by laser rapid forming [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2007, **36**(3): 475~479
- 陈 静, 张霜银, 薛 蕾 等. 激光快速成形 Ti-6Al-4V 合金力学性能 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2007, **36**(3): 475~479
- 7 Xue Lei, Chen Jing, Lin Xin *et al.*. Microstructures and mechanical properties of laser rapid repaired Ti-6Al-4V alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2007, **36**(6): 989~993
- 薛 蕾, 陈 静, 林 鑫 等. 激光快速修复 Ti-6Al-4V 合金的显微组织与力学性能 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2007, **36**(6): 989~993
- 8 Lin Xin, Xue Lei, Chen Jing *et al.*. Microstructure and mechanical properties of laser forming repaired Ti-6Al-4V alloy component [J]. *China Surface Engineering*, 2009, **22**(1): 20~23
- 林 鑫, 薛 蕾, 陈 静 等. 激光成形修复 Ti-6Al-4V 钛合金零件的组织与性能 [J]. *中国表面工程*, 2009, **22**(1): 20~23