

α 相织构对激光沉积制造 TC4 合金力学行为影响研究

钦兰云^{1**}, 金子心¹, 赵朔¹, 倪家强², 刘艳梅², 杨光^{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沈阳飞机工业(集团)有限公司, 辽宁 沈阳 110034

摘要 为探明激光沉积制造 TC4 合金拉伸性能各向异性产生的机制, 对不同取样角度的试样进行拉伸性能测试, 并采用电子背散射衍射技术对成形件的晶体取向进行分析。结果表明: 90° 试样(拉伸试样的长轴方向与水平方向夹角为 90°) 的延伸率比 45° 试样高 32%, 抗拉强度和屈服强度分别低 9% 和 8%; 90° 试样中的主要织构所对应的 Schmid 因子值最高, 为 0.485, 外加拉伸应力 σ 与滑移方向分切应力 τ 之间的夹角 θ 为 38°, 试样首先开动的滑移系为柱面滑移系; 45° 试样的 Schmid 因子值最低, 为 0.415, θ 为 28°, 试样首先开动的滑移系是锥面滑移系; 90° 试样中小角度晶界的占比最小, 为 1%, 45° 试样中小角度晶界的占比最高, 为 29.2%; 90° 试样具有最优的塑性, 而 45° 试样具有最高的强度。

关键词 激光技术; 电子背散射衍射技术; 拉伸性能; 各向异性; Schmid 因子; 取向差

中图分类号 O732

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0102007

Effect of α Texture on Mechanical Behavior of TC4 Alloy Fabricated by Laser Deposition Manufacturing

Qin Lanyun^{1**}, Jin Zixin¹, Zhao Shuo¹, Ni Jiaqiang², Liu Yanmei², Yang Guang^{1*}

¹Key Laboratory of Fundamental Science for National Defence of Aeronautical Digital Manufacturing Process, Shenyang Aerospace University, Shenyang, Liaoning 110136, China;

²Shenyang Aircraft Industry (Group) Corporation Ltd., Shenyang, Liaoning 110034, China

Abstract To investigate the generation mechanism of anisotropy of tensile properties, we tested the tensile properties of samples from different sampling angles and analyzed the crystal orientation of formed parts using electronic back-scattering diffraction. The results demonstrate that the elongation of the 90° sample (angle between the long axis direction of the tensile sample and the horizontal direction is 90°) is 32% higher than that of the 45° sample, and the tensile strength and yield strength are 9% and 8% lower, respectively. The Schmid factor corresponding to the 90° sample's main texture has the highest value of 0.485, and the angle θ between external tensile stress σ and shear stress along the sliding direction τ is 38°. The first moving slip system is a prismatic slip system. The Schmid factor of the 45° sample is the lowest (0.415), and θ is 28°. The first slip system of the sample is a pyramidal slip system. The 90° sample has the smallest proportion of small angular grain boundaries (1%), whereas the 45° sample has the highest proportion (29.2%). Additionally, the 90° sample has optimal plasticity, whereas the 45° sample has the highest strength.

Key words laser technology; electronic back-scattering diffraction; tensile properties; anisotropy; Schmid factor; misorientation

OCIS codes 280.1350; 050.1940; 290.0290

1 引言

TC4 合金具有比强度高、密度低、耐腐蚀性强等

优异的综合性能, 已被广泛应用于航空制造业中^[1-2]。激光沉积制造 TC4 合金的力学性能会随其微观结构的变化而变化^[3]。刘征^[4]通过实验发现,

收稿日期: 2019-08-08; 修回日期: 2019-09-09; 录用日期: 2019-10-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB1100504, 2018YFB1105805); 工信部民用飞机专项科研项目(MJZ-2016-G-71)

* E-mail: yangguang@sau.edu.cn; ** E-mail: qinly@sau.edu.cn

TC11 合金在快速冷却后存在大量织构,拉伸性能的各向异性很明显,从而制约它的应用。严振宇等^[5]发现,随着层间停留时间的延长,激光熔化沉积态试样的宏观层带现象更加明显,室温力学性能的各向异性显著增大。李明东^[6]认为拉伸性能的各向异性主要是由 β 晶界对内部组织的阻碍程度及晶界与拉力相对方向不同造成的。Carroll 等^[7]认为 TC4 在沉积方向的塑性比水平方向高的主要原因是位错容易在柱状 β 晶界和 α 相中开动, β 柱状晶形态和 α 相连续晶界的存在使得水平试样呈现低延展性^[8]。Yang 等^[9-10]指出激光能量密度对 TC4 钛合金晶体取向具有重要影响,随着激光能量密度增大,各向异性更加明显。杨义等^[11]观察到 BT18Y 合金中的 β 柱状晶晶界由连续 α 片层连接而成,室温下的 α 相含量远大于 β 相含量。因此,分析 α 相织构类型对力学性能的影响是非常重要的。Waryoba 等^[12]在实验中发现,在转变过程中, α 相的 $\{0001\}$ 基面近似平行于 β 相的 $\langle 110 \rangle$ 面, α 相的 $\langle 1120 \rangle$ 近似平行于 β 相的 $\langle 111 \rangle$ 。

综上所述,拉伸性能的各向异性是多因素共同

作用的结果,其中,晶粒取向分布对钛合金力学性能有很大影响^[13-14],而电子背散射衍射(EBSD)可以获得材料的晶粒取向和晶界特征^[15]。本文着重研究激光沉积制造 TC4 合金固有的晶体织构对拉伸性能的影响,从 90° 、 45° 、 0° 方向分别取样进行室温拉伸性能测试,分析 α 织构类型,确定 Schmid 因子值,根据得出的 Schmid 因子值确定每个试样首先开动的滑移系,揭示各个取样方向的主要织构所对应的 Schmid 因子值与滑移系类型、小角度晶界占比对性能的影响规律,从而揭示激光沉积制造 TC4 合金拉伸性能各向异性产生的机制。

2 实 验

2.1 实验设备与材料

激光沉积制造实验采用激光同轴送粉工艺,以 TC4 合金球形粉末为原料,粉末粒度为 $45\sim 180\ \mu\text{m}$,其化学成分如表 1 所示,实验前对粉末进行烘干处理。基材选用锻造 TA15 钛合金基板,制备尺寸为 $140\ \text{mm}\times 35\ \text{mm}\times 105\ \text{mm}$ 的沉积块,实验参数如表 2 所示,整个实验过程在动态密封氩气氛围下进行。

表 1 TC4 合金粉末的化学成分

Table 1 Chemical composition of TC4 alloy powder

Element	Al	V	Fe	C	H	N	O	Ti
Mass fraction / %	5.5~6.8	3.5~4.5	≤ 0.30	≤ 0.10	≤ 0.015	≤ 0.20	≤ 0.20	Bal.

表 2 实验工艺参数

Table 2 Experimental process parameters

Process parameter	Power / W	Scanning spacing / mm	Scanning velocity / $(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	Powder feed rate / $(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	Layer thickness / mm
Value	2400	2.3	10	0.8	0.6

2.2 实验方法

采用光学显微镜(OM)对激光沉积制造 TC4 合金的显微组织进行观察,观察前需对试样依次进行机械研磨、抛光、腐蚀处理。腐蚀液采用 HF、 HNO_3 、 H_2O 按体积比为 $1:6:7$ 配制而成,将试样表面完全浸入腐蚀液中,腐蚀时间约为 2 min。

在沉积块上按图 1 所示制取拉伸取样, z 向为沉积方向,拉伸试样的长轴方向与 x 方向分别呈 90° 、 45° 及 0° 。在每个取样方向加工 3 个拉伸试样,利用 INSTRON5982 电子万能试验机在室温下进行拉伸测试。采用 EBSD 技术分析试样的晶体学取向,EBSD 试样经预磨、机械抛光后进行离子刻蚀,以去除样品表面的应力层。EBSD 实验在 MAIA3 TriglavTM 设备上完成,探头型号为 NordlysMax3,实验电压为 20 kV,工作距离为 12 mm,电子束强度为

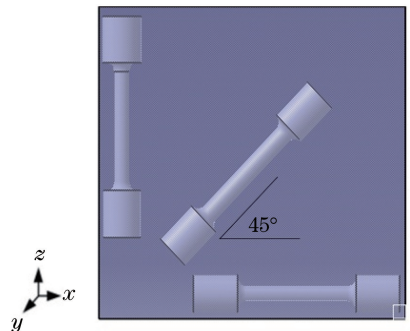


图 1 试样取向示意图

Fig. 1 Diagram of sample orientation

18,样品倾斜 70° ,步长为 $0.4\ \mu\text{m}$ 。

3 实验结果与分析

3.1 拉伸性能的各向异性

图 2 所示为 90° 、 45° 及 0° 试样的应力-应变曲线和

拉伸性能。从图 2(a)可以看出,三种拉伸试样的弹性模量基本相同,但强度有明显差异。从图 2(b)、(c)可以看出:45°拉伸试样的抗拉强度和屈服强度最高,分别为 1075 MPa 和 968 MPa,但其塑性最差;90°试样

的抗拉强度明显低于 45°和 0°试样,只有 977 MPa,但其塑性较好,延伸率可达 16.2%;45°试样的延伸率为 12.3%,0°试样的延伸率为 14.2%。以上数据表明激光沉积 TC4 合金具有明显的各向异性。

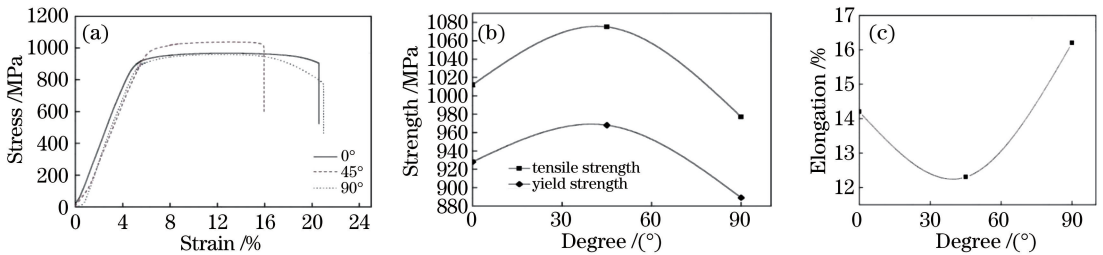


图 2 试样的拉伸性能各向异性。(a)应力-应变曲线;(b)强度;(c)延伸率

Fig. 2 Anisotropy of tensile properties of sample. (a) Stress-strain curve; (b) strength; (c) elongation

3.2 显微组织

图 3 为沉积态 TC4 合金的显微组织,沉积方向如图 3(a)中虚线箭头所示,沉积态试样的组织由粗大的 β 柱状晶组成,沉积层间出现了明显的层带,层带厚度约 163 μm ,这是因为后续多层堆积输入的热量对前堆积层具有循环热处理作用。

内包含有大量的 α 片层,晶界完整且晶界周围有大量的 α 片层沿晶界生长成集束状。同时可以发现细长的 α 相间布满了短棒状 α 相,这是因为在激光沉积制造过程中 α 相会在晶内或晶界形核长大,当不同生长方向的 α 相互接触后就会停止生长,导致生长速度较快的 α 相呈长条状,而生长速度缓慢的 α 相呈短棒状。

从图 3(b)可以看出,沉积态试样中的原始 β 晶

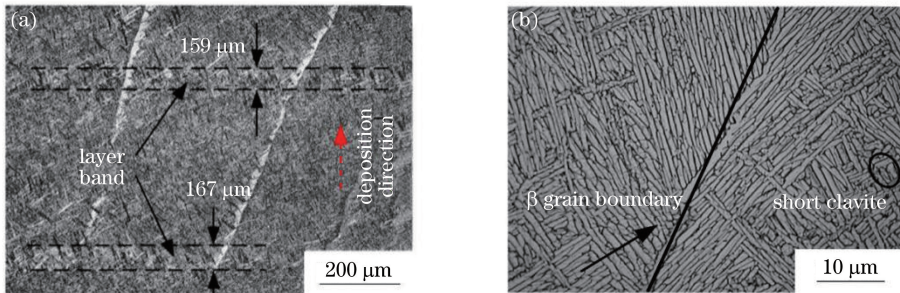


图 3 沉积态 TC4 合金的显微组织。(a)低倍照片;(b)高倍照片

Fig. 3 Microstructure of deposited TC4 alloy. (a) Low magnification image; (b) high magnification image

3.3 织构分析

利用 EBSD 技术分别对 90°、45°、0°试样的晶体学取向进行表征与分析,由图 3 可知,激光沉积制造 TC4 合金中 α 相的体积分数较高,各取样方向试样都高于 70%,且激光沉积制造中具有 hcp 晶体结构的 α 相具有较强的各向异性^[16]。在变体选择中,成核和生长倾向于特定的方向,在某些方向聚集的比例决定了最终的织构。因此,本文主要对 α 相的织构进行分析。

主要织构如图 4 中箭头所示。从图 4 可以看出,在 90°试样中,hcp 结构的 c 轴与沉积方向约成 45°, α 相的主要织构为 $(11\bar{2}0)[\bar{1}100]$,织构强度为 21.52。在激光沉积制造 TC4 合金的凝固过程中,晶粒倾向于沿着垂直于基板的方向生长,这是因为这个方向有最大的温度梯度,散热最快。但是,在每个晶粒中的晶胞都倾向于沿着最容易生长的方向生长^[18]。其中,hcp 结构晶粒倾向于沿着 $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ 方向生长^[19],扫描方向为 $\langle \bar{1}2\bar{1}0 \rangle$, α 相在沉积区域内竞争生长,排挤那些取向不利的晶粒,所以与沉积方向近似成 45°的织构的强度最大。在图 5 所示的 45°试样中, α 织构呈对称分布, α 相的主要织构为 $(0001)[\bar{1}120]$,织构强

分别对 90°、45°、0°试样进行 EBSD 分析,为了更具有代表性,扫描区域的大小为 10 mm \times 10 mm。EBSD 测量的局部取向信息如图 4~6 所示,利用 ATOM 软件可以得到晶面指数 (hkl) ,晶面指数 (hki) 可以通过公式转换得到^[17],转换公式为

$$i = -(h + k) \quad (1)$$

度为 11。在图 6 所示的 0°试样中,α 相的主要织构为 $\{0001\}[1\bar{2}10]$, 织构强度为 17.39。相变过程中的变

体选择会增大取向的集中分布,产生较强的织构,不同的织构导致了力学性能的各向异性。

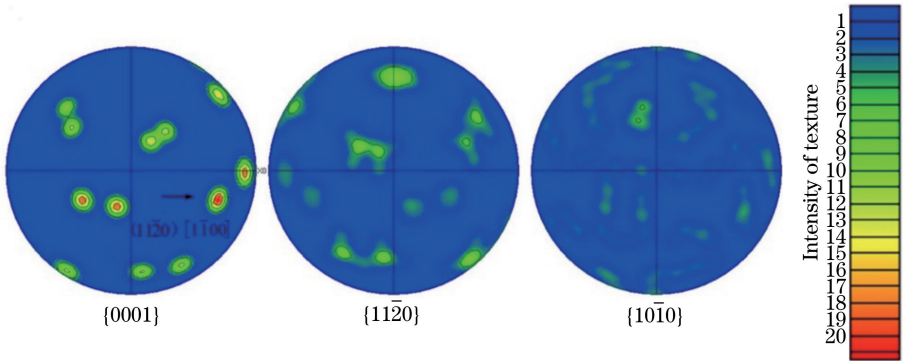


图 4 90°试样的极图(PF)
Fig. 4 PF of 90° sample

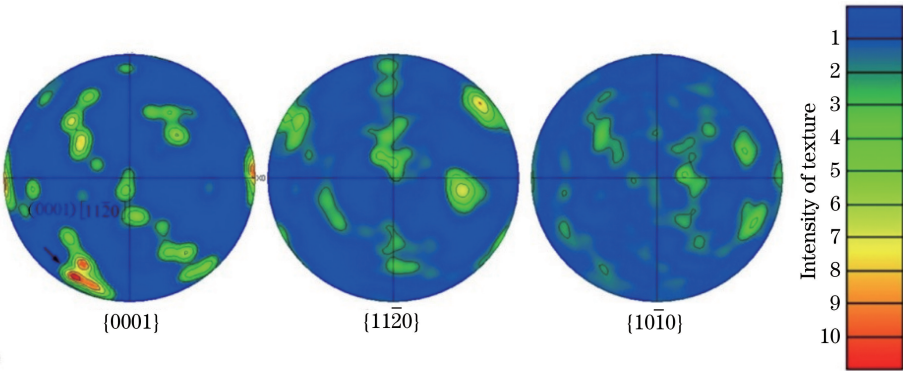


图 5 45°试样的极图
Fig. 5 PF of 45° sample

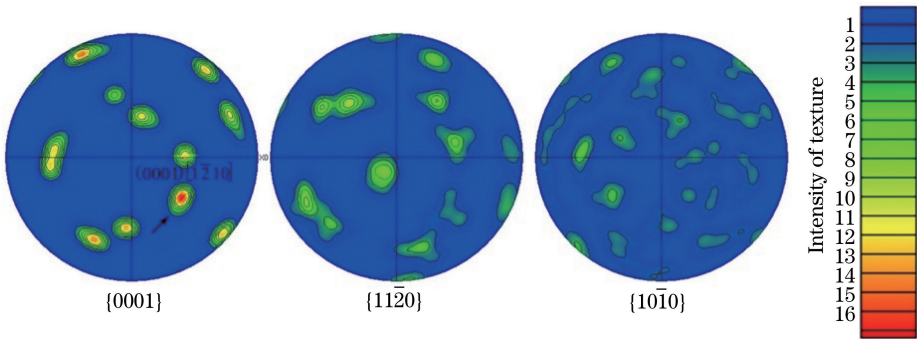


图 6 0°试样的极图
Fig. 6 PF of 0° sample

3.4 滑移行为对力学性能的影响

在加载力的过程中,不同方向的晶粒会通过不同的滑移机制发生变形,影响成形件塑性和强度的主要因素为率先激活的滑移系类型。hcp 结构的主要滑移面为 $\{0001\}$ 、 $\{10\bar{1}0\}$ 和少量的 $\{10\bar{1}1\}$ 。滑移的激活依赖于两个因素:Schmid 因子(m)和启动滑移系统所需的临界剪切应力(CRSS)。其中能使 $\langle a \rangle$ 基面、 $\langle a \rangle$ 柱面、和 $\langle c+a \rangle$ 锥面滑移开动的 CRSS

值的比值为 $1:1:2.64^{[20]}$, 锥面滑移系最不容易开动,开动需要更大的临界剪切应力^[21]。

材料的塑性变形主要通过滑移的方式进行,不同取向的晶粒在拉伸过程中所受应力并不一致,有利位向的滑移系首先开动。根据 Schmid 定则, Schmid 因子越大,表示该滑移系越容易开动,塑性越好^[22]。为了定量分析不同取样方向的滑移系的作用,用 m 来衡量 Schmid 因子值,计算公式为

$$m = \cos \theta \cos \psi = \cos \theta \cos(90^\circ - \theta) = \cos \theta \sin \theta = \frac{1}{2} \sin(2\theta), \quad (2)$$

式中： θ 为外加拉伸应力 σ 与滑移方向分切应力 τ 之间的夹角； ψ 为外加拉伸应力 σ 与滑移面法向的夹角； m 是关于 θ 的正弦函数，在 $\theta < 45^\circ$ 时为单调递增，单向拉伸时 m 的最大值为 0.5。图 7~9 为 Schmid 因子的频数分布图，横轴为 Schmid 因子值的大小，纵轴为不同 Schmid 因子值的频数。不同方向试样的 Schmid 因子都存在最大值 0.495，但只有 Schmid 因子大于 0.435 时才为软取向^[23]。90°、45°、0°试样的 Schmid 因子大于 0.435 的占比分别为 22%、10.73%、20.6%，90°试样的占比最高；大于 0.435 的 Schmid 因子的平均值为分别为 0.478、0.462、0.468，说明 90°试样的滑移系更容易开动，塑性最好，其次为 0°试样，45°试样的塑性最差。

90°试样中占比最大的 Schmid 因子值为 0.485，对应的织构为 $(11\bar{2}0)[\bar{1}100]$ ，通过(2)式可得 θ 为 38°，试样首先开动的滑移系为 $(\bar{1}100)[\bar{1}1\bar{2}0]$ ，为柱面滑移系；45°试样中占比最大的 Schmid 因子值为 0.415，对应的织构为 $(0001)[\bar{1}1\bar{2}0]$ ， θ 为 28°，试样首先开动的滑移系是 $(01\bar{1}1)[\bar{2}\bar{1}\bar{1}0]$ ，为锥面滑移系；0°试样中占比最大的 Schmid 因子值为 0.435，对应的织构为 $(0001)[\bar{1}2\bar{1}0]$ ， θ 为 30°，试样首先开动的滑移系为 $(10\bar{1}0)[\bar{1}2\bar{1}0]$ ，属于柱面滑移系。

对于激光沉积制造 TC4 合金，最容易开动的滑移系为柱面滑移系，锥面滑移系不易开动，需要更高的能量，导致 45°试样的塑性最差，但其强度最高。虽然 90°试样和 0°试样都是柱面滑移系，但对比图 4 和图 6 可知，90°试样主要织构的强度为 21.52，0°试样主要织构的强度为 17.39，前者的织构强度比后者高，因此 90°试样的塑性要优于 0°试样。综上，90°试

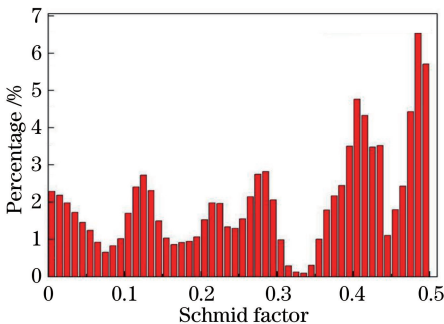


图 7 90°试样的 Schmid 因子频数图

Fig. 7 Schmid factor frequency diagram of 90° sample

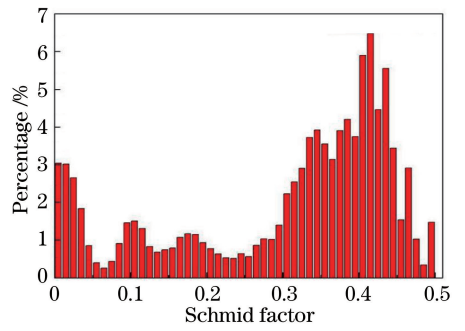


图 8 45°试样的 Schmid 因子频数图

Fig. 8 Schmid factor frequency diagram of 45° sample

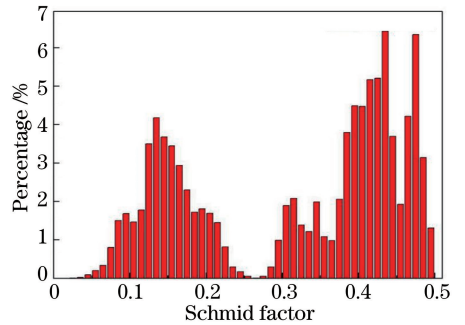


图 9 0°试样的 Schmid 因子频数图

Fig. 9 Schmid factor frequency diagram of 0° sample

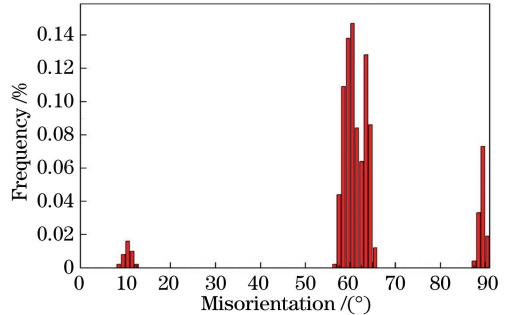


图 10 90°试样中相邻晶界的取向差分布

Fig. 10 Distribution of misorientation between adjacent grain boundaries of 90° sample

样的塑性最好，45°试样的塑性最差，但其强度最高。

3.5 取向差对力学性能的影响

TC4 合金的每个晶粒在变形时都要受到晶界和相邻晶粒的约束，要与周围晶粒发生相适应的变形，以保持晶粒间的结合和体积上的连续性。图 10~12 为 90°、45°、0°试样中 α 相相邻晶界的取向差分布图，定义取向差小于 10°的相邻晶界为小角度晶界。通过数据统计可知，90°、45°、0°试样的小角度晶界占比分别为 1%、29.2%、17%。晶界能主要来自位错能量，而位错能量又取决于晶粒间的相位差，所以晶界能 γ 随着取向差的变化符合公式

$$\gamma = \gamma_0 \theta' (a - \ln \theta'), \quad (3)$$

式中： γ_0 为常数； θ' 为取向差； a 为积分常数，取决于位错中心的原子错排能。其中 $\gamma_0 = g |\mathbf{b}| / 4\pi(1 - \nu)$ ， g 为材料的切变模量， \mathbf{b} 为柏氏矢量， ν 为泊松比。从(3)式可以看出，小角度晶界的界面能较低，因而界面比较稳定。小角度晶界的占比越高，稳定的界面占比就越大，强度也就越高，因此，45°试样中较大的小角度晶界占比是导致其具有较高强度的重要因素之一。

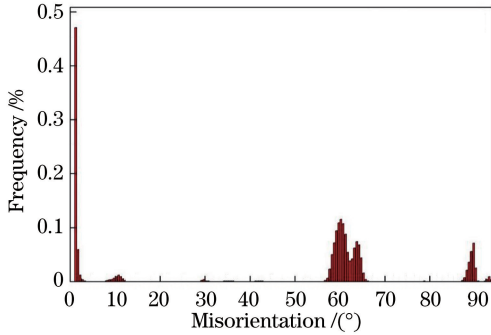


图 11 45°试样中相邻晶界的取向差分布图

Fig. 11 Distribution of misorientation between adjacent grain boundaries of 45° sample

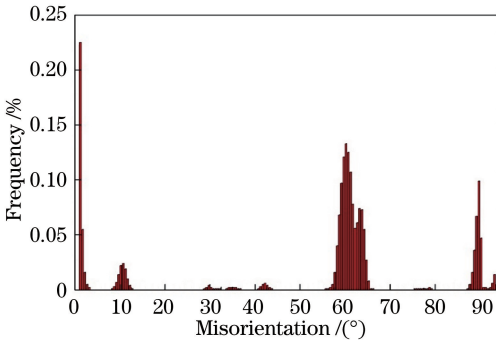


图 12 0°试样中相邻晶界的取向差分布图

Fig. 12 Distribution of misorientation between adjacent grain boundaries of 0° sample

4 结 论

本文对激光沉积制造 TC4 合金不同取样方向的试样进行拉伸性能测试，并采用 EBSD 技术对晶体取向进行研究，分析了激光沉积制造 TC4 合金拉伸性能各向异性产生的机制，得到如下结果。

1) 不同取样角度的试样具有明显的拉伸性能各向异性，90°试样的延伸率为 16.2%，比 45°试样高 32%，比 0°试样高 14%；90°试样抗拉强度和屈服强度分别为 977 MPa 和 889 MPa，略低于 45°试样和 0°试样。

2) 90°试样中 α 相的主要织构为 $(1\bar{1}\bar{2}0)$

$[1\bar{1}00]$ ，对应的 Schmid 因子值为 0.485， $(1\bar{1}00)$ $[11\bar{2}0]$ 柱面滑移系首先开始滑动；45°试样的主要织构为 $(0001)[11\bar{2}0]$ ，Schmid 因子值为 0.415，为 $(01\bar{1}1)[2\bar{1}\bar{1}0]$ 锥面滑移系；0°试样的主要织构为 $(0001)[1\bar{2}10]$ ，Schmid 因子值为 0.435，对应 $(10\bar{1}0)[\bar{1}2\bar{1}0]$ 柱面滑移系首先开始滑动。因此，90°试样的塑性最好，45°试样的塑性最差。

3) 小角度晶界的占比对塑性具有一定影响，对试样进行相邻晶界取向差统计后发现，90°、45°、0°试样中小角度晶界的占比分别为 1%、29.2%、17%。随着小角度晶界占比下降，试样的塑性提高。

参 考 文 献

- [1] Li W, Liu J, Wen S F, et al. Crystal orientation, crystallographic texture and phase evolution in the Ti-45Al-2Cr-5Nb alloy processed by selective laser melting[J]. Materials Characterization, 2016, 113: 125-133.
- [2] Xiao Z N, Liu T T, Liao W H, et al. Microstructure and mechanical properties of TC4 titanium alloy formed by selective laser melting after heat treatment [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44 (9): 0902001.
肖振楠, 刘婷婷, 廖文和, 等. 激光选区熔化成形 TC4 钛合金热处理后微观组织和力学性能[J]. 中国激光, 2017, 44(9): 0902001.
- [3] Agius D, Kourousis K I, Wallbrink C, et al. Cyclic plasticity and microstructure of as-built SLM Ti-6Al-4V: the effect of build orientation [J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 701: 85-100.
- [4] Liu Z. Fatigue properties of Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si alloy produced by laser melting deposition[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2014: 28-30.
刘征. 激光熔化沉积制备 Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si 合金的疲劳性能 [D]. 大连: 大连交通大学, 2014: 28-30.
- [5] Yan Z Y, Zhou Q J, Hou Y F, et al. Effect of interlayer residence time on microstructures and mechanical properties of laser melting deposited TC11 titanium alloys[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(11): 1102003.
严振宇, 周庆军, 侯谊飞, 等. 层间停留时间对激光熔化沉积 TC11 钛合金组织与力学性能的影响[J]. 中国激光, 2018, 45(11): 1102003.
- [6] Li M D. Study on heat treatment process of TC4 titanium alloy by laser deposition manufacturing[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2018:

- 15-20.
李明东. 激光沉积制造 TC4 钛合金的热处理工艺研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2018: 15-20.
- [7] Carroll B E, Palmer T A, Beese A M. Anisotropic tensile behavior of Ti-6Al-4V components fabricated with directed energy deposition additive manufacturing[J]. *Acta Materialia*, 2015, 87: 309-320.
- [8] Zhang Q, Chen J, Zhao Z, et al. Microstructure and anisotropic tensile behavior of laser additive manufactured TC21 titanium alloy [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 673: 204-212.
- [9] Yang J J, Yu H C, Wang Z M, et al. Effect of crystallographic orientation on mechanical anisotropy of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy [J]. *Materials Characterization*, 2017, 127: 137-145.
- [10] Neikter M, Woracek R, Maimaitiyili T, et al. Alpha texture variations in additive manufactured Ti-6Al-4V investigated with neutron diffraction [J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 23: 225-234.
- [11] Yang Y, Xu F, Huang A J, et al. Evolution of microstructure of full lamellar titanium alloy BT18Y solutionized at $\alpha + \beta$ phase field [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2005, 41(7): 713-720.
杨义, 徐锋, 黄爱军, 等. 全片层 BT18Y 钛合金在 $\alpha + \beta$ 相区固溶时的显微组织演化 [J]. *金属学报*, 2005, 41(7): 713-720.
- [12] Waryoba D R, Keist J S, Ranger C, et al. Microtexture in additively manufactured Ti-6Al-4V fabricated using directed energy deposition [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 734: 149-163.
- [13] Bantounas I, Dye D, Lindley T C. The role of microtexture on the faceted fracture morphology in Ti-6Al-4V subjected to high-cycle fatigue[J]. *Acta Materialia*, 2010, 58(11): 3908-3918.
- [14] Bantounas I, Lindley T C, Rugg D, et al. Effect of microtexture on fatigue cracking in Ti-6Al-4V [J]. *Acta Materialia*, 2007, 55(16): 5655-5665.
- [15] Liu J, Meng L, Zhu G H, et al. Analysis on misorientation angle distribution of pipeline steels[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2014, 35(3): 111-116.
- 刘颀, 孟利, 朱国辉, 等. 管线钢中晶界取向差特征分布分析[J]. *材料热处理学报*, 2014, 35(3): 111-116.
- [16] Ji Z S, Yuan J J, Zhang M C. High temperature tensile properties of TC4 alloy and its relationship with texture[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2018, 39(8): 28-37.
姬忠硕, 原菁骏, 张麦仓. TC4 合金高温拉伸性能及其与织构的关联性 [J]. *材料热处理学报*, 2018, 39(8): 28-37.
- [17] Hu G X, Cai X, Rong Y H. Fundamentals of materials science [M]. 3rd ed. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2010: 25.
胡庚祥, 蔡珣, 戎咏华. 材料科学基础 [M]. 3 版. 上海: 上海交通大学出版社, 2010: 25.
- [18] Kou S. Welding metallurgy [M]. Yan J C, Yang J G, Zhang G J, Transl. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2012: 164.
Kou S. 焊接冶金学 [M]. 闫久春, 杨建国, 张广军, 译. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2012: 164.
- [19] Chalmers B. Principles of solidification [M]//Low W, Schieber M. Applied solid state physics. Boston, MA: Springer, 1970: 161-170.
- [20] Hasija V, Ghosh S, Mills M J, et al. Deformation and creep modeling in polycrystalline Ti-6Al alloys [J]. *Acta Materialia*, 2003, 51(15): 4533-4549.
- [21] Liu Z, Zhao Z B, Liu J R, et al. Effect of α texture on the tensile deformation behavior of Ti-6Al-4V alloy produced via electron beam rapid manufacturing [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 742: 508-516.
- [22] Shi J, Guo Z X, Sui M L. Slip system determination of dislocations in α -Ti during *in situ* TEM tensile deformation[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2016, 52(1): 71-77.
石晶, 郭振玺, 隋曼龄. α -Ti 在原位透射电镜拉伸变形过程中位错的滑移系确定 [J]. *金属学报*, 2016, 52(1): 71-77.
- [23] Bantounas I, Dye D, Lindley T C. The effect of grain orientation on fracture morphology during high-cycle fatigue of Ti-6Al-4V [J]. *Acta Materialia*, 2009, 57(12): 3584-3595.