DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2024.4181

激光定向能量沉积 Ti-6Al 合金的组织与性能研究

袁晓慧[1],李瑞迪[1],柯林达[2],候亚平[3],肖　鹏[4]

(1. 中南大学 冶金国家重点实验室,湖南 长沙 410083;2. 上海航天精密机械研究所,上海 201600;3. 湖南省计量检测研究院,湖南 长沙 410000;4. 湖南云箭集团有限公司,湖南 长沙 410100)

摘　要:激光定向能量沉积成形钛合金具有高效快速、材料利用率高等优势,但其较大的冷却速率及温度梯度等固有特性使得成形的钛合金容易出现各向异性,因此有必要对激光定向能量沉积钛合金不同平面及不同方向上的组织与性能进行研究。选定 Ti-6Al 合金作为研究对象,采用光学显微镜、X 射线衍射仪、扫描电镜和电子背散射衍射对激光定向能量沉积 Ti-6Al 合金物相、微观组织形貌和晶粒特征进行研究。结果表明,合金中只存在单一的 α 相,该物相为 HCP 结构;Ti-6Al 合金不同成形高度表现出不同的微观组织特征,即沿着构建方向,底部为细小的等轴晶,中间为柱状晶,顶部为等轴晶/近等轴晶。在 *XOY* 面的平均晶粒尺寸最小,为 22.251 9 μm;*YOZ* 面存在最大的晶粒尺寸,为 38.940 8 μm。在 3 个不同平面中,*XOY* 面的小角度晶界体积分数最高,为 19.5%;*YOZ* 面小角度晶界体积分数最低,为 12.2%。沿 *Z* 方向上,即与建造方向平行时抗拉强度最高,为 669.94 MPa,相应的伸长率为 13.9%;沿 *X* 方向上抗拉强度为 560.55 MPa,其相应的伸长率最低,为 11.4%。

关键词:Ti-6Al 合金;激光定向能量沉积;各向异性;微观组织;力学性能

中图分类号:TG146.2+3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2024)09-0838-09

Microstructure and Mechanical Properties of Ti-6Al Alloy Fabricated via Laser-Directed Energy Deposition

YUAN Xiaohui[1], LI Ruidi[1], KE Linda[2], HOU Yaping[3], XIAO Peng[4]

(1. State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Shanghai Aerospace Precision Machinery Institute, Shanghai 201600, China; 3. Hunan Institute of Metrology and Test, Changsha 410000, China; 4. Hunan Vanguard Group Corporation, Changsha 410100, China)

Abstract: Laser-directed energy deposition (LDED) of Ti alloys has many advantages, such as high efficiency and high material utilisation, but its inherent characteristics, such as a large cooling rate and temperature gradient, make LDED Ti alloys prone to anisotropy. Therefore, it is necessary to study the microstructure in different planes and the mechanical properties in different directions of LDED Ti alloys. In this paper, a Ti-6Al alloy was selected as the object of investigation. The phases, microstructures, and grain characteristics of the LDED Ti-6Al alloys were characterised via optical microscopye (OM), X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopye (SEM) and electron backscattering diffraction (EBSD). The results show that there is only a single α-phase (HCP structure) in the alloy. The Ti-6Al alloy exhibits different microstructural features at different heights, i.e., along the building direction, the bottom is composed of fine equiaxed grains, the middle is composed of columnar grains, and the top is composed of equiaxed/subequiaxed grains. The smallest average grain size of 22.251 9 μm can be observed in the *XOY* plane; the largest grain size of 38.940 8 μm is present in the *YOZ* plane. Among the three different planes, the *XOY* plane has the highest low-angle grain boundaries (LAGBs) volume fraction of 19.5%, whereas the *YOZ* plane has the lowest LAGBs volume fraction of 12.2%. The highest tensile strength of 669.94 MPa, with a corresponding elongation of 13.9%, is observed along the *Z* direction, i.e., parallel to the building direction. In the *X* direction, the elongation is the lowest (11.4%), and the corresponding tensile strength is 560.55 MPa.

Key words: Ti-6Al alloy; laser-directed energy deposition; anisotropy; microstructure; mechanical properties

收稿日期:2024-09-20

基金项目:湖南省自然科学基金(2022JJ90037)

作者简介:袁晓慧,2000 年生,硕士生.研究方向为激光增材制造钛合金.Email: 223311067@csu.edu.cn

通讯作者:李瑞迪,1983 年生,教授,博导.研究方向为金属增材制造.Email: liruidi@csu.edu.cn

引用格式:袁晓慧,李瑞迪,柯林达,候亚平,肖鹏.激光定向能量沉积 Ti-6Al 合金的组织与性能研究[J].铸造技术,2024,45(9):838-846.

YUAN X H, LI R D, KE L D, HOU Y P, XIAO P. Microstructure and mechanical properties of Ti-6Al alloy fabricated via laser-directed energy deposition[J]. Foundry Technology, 838-846.

中国知网　https://www.cnki.net

钛及钛合金因其高比强度、低密度、优异的耐腐蚀性和生物相容性广泛应用于航空航天、能源、汽车和生物医学等领域[1-3]。随着时代的进步，当前社会对金属结构材料提出了更高的要求，不仅要求其具备较高的强度和硬度，还需拥有良好的综合力学性能适应时代发展。

钛合金常用的强化方法有固溶强化、析出强化和细晶强化[4-5]。此外，有研究者在纯钛中添加共析型元素，制备出共析转变钛合金。徐丽娟等[6]研究了二元 Ti-xCr(x=5%, 10%, 15%, 20%，质量分数)合金的显微组织、力学性能及干摩擦磨损性能，结果表明，Ti-10Cr 具有最大的压缩屈服强度和最高的压缩弹性模量，分别为 2 024 MPa 和 30.2 GPa；Ti-15Cr 具有最小的压缩屈服强度和最低的压缩弹性模量，分别为 1 650 MPa 和 26.7 GPa。Thomas 等[7]制备了不同铬含量的 Ti-Cr 合金，提出 Ti-Cr 合金的微观结构受铬含量的影响，分别由亚稳态的 β-Ti(Cr)基体相、α-Ti 和金属间 Laves 相($TiCr_2$)组成。并解释Ti-Cr 合金的相沿成分梯度的演化与下层再加热理论、热梯度效应、冷却速率及 Ti-Cr 粉末混合焓有关。

Al 作为强 α 相稳定元素[8]，是钛合金工业的常用添加剂。在钛合金中加入 Al 后能置换合金中 Ti 原子的位置，形成置换固溶体而产生固溶强化。因此，可通过在钛合金中加入适量 Al 的方式来提升合金强度。Wang 等[9]通过研究发现，铝元素作为一种常用的 α 相稳定元素，其加入会扰乱密排六方基体的晶格稳定性和 c/a 比，从而影响了HCP 基体的变形机理和力学性能。Wu 等[10]指出 Al 原子在{10-10}棱柱面上的优先取代显著削弱了 HCP金属的变形各向异性，当 Al 含量增加到 6.6%(质量分数)时，基底滑移和棱晶滑移的贡献相等，并且刺激有序 Ti_3Al 从过饱和 Ti(Al)固溶体中取向析出。Wei 等[11]通过第一性原理计算研究了降低基面层错能对六方金属孪晶行为的影响，结果表明，添加原子分数为 10%(质量分数约为 6%)Al 元素能够有效降低基面层错能。层错能的降低能够综合调控钛合金、高熵合金[12]等合金的强韧性。综上，添加 6%Al(质量分数)能够稳定 α 相，避免 Ti_3Al 的析出，并且能够有效降低层错能进而同时提高强度和伸长率，因此选取 Ti-6Al(质量分数，下同)作为研究对象。

传统熔铸和粉末冶金为常见的钛合金制备方法，使用熔铸法生产钛合金过程复杂，且在制备过程中容易出现合金组织粗大等问题；粉末冶金法因需要模具的特性，制备具有复杂结构的钛合金时会降低成形精度且提高生产成本。因此亟需寻求一种能够同时满足近净成形、高强性能与较低成本的新技术。激光定向能量沉积(laser directed energy deposition, LDED)是一种采用激光同轴送粉方式成形的增材制造技术[13]，其使用载气将原材料粉末直接输送至熔池进行原位合金化，该技术已广泛应用于成形不锈钢[14]、铝合金[15-17]、钛合金[18-20]及镍基高温合金[21]等。相比于传统熔铸和粉末冶金，激光增材制造技术具有很多优势，基于增材制造原理，对原材料粉末的利用非常充分，不会造成资源浪费；制备过程中无需模具，可成形复杂零部件且成形周期短；可成形的材料种类众多，金属、合金和高分子材料均可应用[22-24]。然而，激光定向能量沉积较大的冷却速率及温度梯度等固有特性[25]，使得成形出的合金在不同方向上可能具有不同的力学性能。因此，选择铝元素作为添加元素，在纯钛中添加质量分数为 6%的铝元素，研究激光定向能量沉积 Ti-6Al 合金不同平面、不同方向上的组织与性能差异。

1　实验材料与方法

1.1　实验原料与样品制备

实验使用的商业纯钛和纯铝粉末分别采购于中航迈特粉冶科技有限公司和秦皇岛一诺高新材料开发有限公司。按照设计的合金元素比例(Ti-6Al)将纯钛和纯铝粉末进行均匀混合制备混合粉末原材料，速度设定为 800 r/min，混粉时间为 8 h。采用扫描电子显微镜(scanning electron microscopy, SEM) 观察混合后粉末的形貌特征，如图 1a 所示。在扫描电子显微镜下对混合粉末进行面扫 (energy dispersive spectrometer, EDS)，如图 1b 所示。结果表明，纯钛和纯铝粉末混合较为均匀，多呈球形或近球形，流动性较好。

采用激光定向能沉积设备(RC-LDM8060，南京 Raycham 高新技术有限公司)制备 Ti-6Al 合金块体，该成形设备配备有 2 kW 二极管光纤激光系统，激光光斑直径为 2.5 mm。在成形样品之前经过文献查阅[19]，确定钛合金激光定向能量沉积成形钛合金的参数为：激光功率 1 200 W，扫描速度 600 mm/min，扫描间距 1.2 mm，送粉速度 0.4 r/min，沿 Y 方向扫描，扫描策略为蛇形往复循环。成形前对成形舱进行洗气，成形过程中使用氩气作为保护气，最大含氧量控制在 0.01%以下。成形示意图、拉伸样品取样示意图及成形后块体样品如图 2 所示，3 个方向的拉伸样品均在同一打印块体上获得。

1.2　测试与表征

采用 X 射线衍射仪(X-ray diffraction, XRD)对

中国知网　https://www.cnki.net

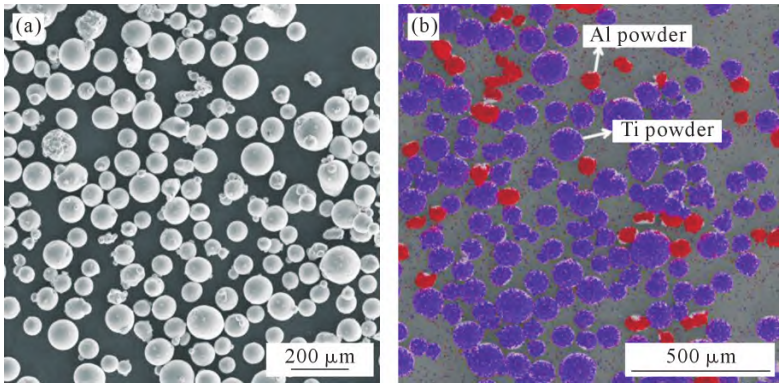


图 1 Ti-6Al 混合粉末形貌与 EDS 面扫：(a) SEM 图；(b) EDS 面扫

Fig.1 The SEM micrography of mixed Ti-6Al powders and the corresponding EDS mapping: (a) SEM image; (b) EDS mapping

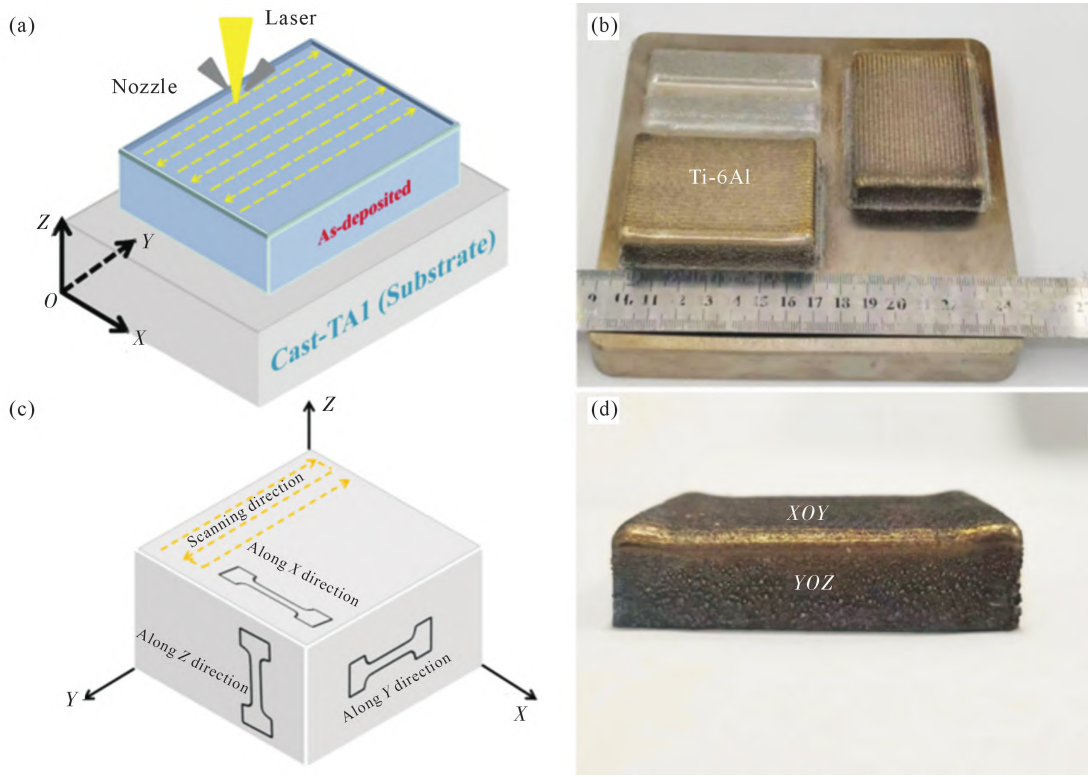


图 2 LDED 成形示意图与 Ti-6Al 合金块体实物：(a) 成形示意图；(b) 取样示意图；(c, d) Ti-6Al 合金块体实物

Fig.2 Schematic of the LDED fabrication process and Ti-6Al alloy block figures: (a) forming schematic; (b) sampling schematic; (c, d) Ti-6Al alloy block figures

Ti-6Al 合金在室温下进行物相分析，扫描速度为 5(°)/min，扫描角度范围为 20°~90°，波长为 0.154 nm。为了观察成形的合金块体不同平面的微观组织结构，使用电火花线切割设备分别切取 *XOY*，*XOZ* 及 *YOZ* 面样品，对样品进行打磨抛光，利用光学显微镜(optical microscopy, OM)、扫描电子显微镜、电子背散射衍射仪(electron backscatter diffraction, EBSD)对样品进行表征。沿扫描方向、垂直扫描方向及构建方向样品的室温拉伸试验在 Instron 3369 电子万能材料试验机上进行，应变速率为 10^{-3} mm/s。采用微压痕硬度试验机测定试样的维氏硬度，试验加载力为 100 g，停留时间为 10 s。

2 实验结果及讨论

2.1 物相组成与微观形貌

图 3 为激光定向能量沉积 Ti-6Al 合金样品 *XOY*、*XOZ*、*YOZ* 面的 XRD 图谱。由图可知，LDED 成形的 Ti-6Al 合金中只存在单一的 α 相，该物相为 HCP 结构；与标准 PDF 卡片相比，发现 LDED 成形 Ti-6Al 合金在 *XOY*、*XOZ*、*YOZ* 面均具有不同的最强衍射峰，呈现出较为明显的各向异性，3 个成形面的最强衍射峰分别为(10-13)(11-20)及(0002)晶面。

为了探究激光定向能量沉积 Ti-6Al 合金在不同成形高度的微观组织，分别选取合金块体 *XOZ* 面

中国知网 https://www.cnki.net

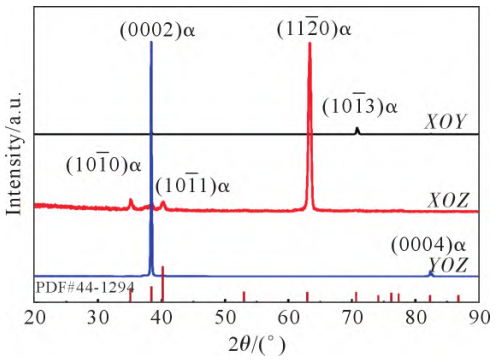


图 3 激光定向能量沉积 Ti-6Al 合金 XRD 图谱

Fig.3 XRD patterns of the LDED Ti-6Al alloy

顶部、中部及底部区域，经过腐蚀后在光学显微镜下进行腐蚀金相观察，如图 4a~c 所示。图 4d 和 e 分别为合金块体 *XOZ* 面顶部及中部区域的电子通道对比成像(electron channeling contrast imaging, ECCI)。可以观察到 Ti-6Al 合金不同成形高度表现出不同的微观组织特征，即沿着构建方向，底部为细小的等轴晶，中间为柱状晶，顶部为等轴晶/近等轴晶。

图 5a~c 为激光定向能量沉积 Ti-6Al 合金 *XOY*、*XOZ* 及 *YOZ* 面的微观组织形貌，图 5d~f 为相应的放大图像。根据图像可知，在 *XOZ* 面(即熔池面)没有观察到明显的熔池特征，Ti-6Al 的晶粒贯穿多个熔池。通过对熔池面的微观形貌观察，该区域晶粒由粗大的柱状晶及较为细小的等轴晶组成，且柱状晶的方向与成形时的建造方向一致。*YOZ* 面的微观形貌与 *XOZ* 面的较为相似，都能观察到平行于建造方向的粗大柱状晶和较为细小的等轴晶。与 *XOZ* 面不同的是，该区域细小的等轴晶较多。*XOY* 面中未观察到粗大的柱状晶，主要由等轴晶和尺寸较小的柱状晶组成。结合图 4 中对沿建造方向熔池面顶部、中部以及底部的 OM 图像，进行 ECCI 的区域为 Ti-6Al 合金样品的中部。

2.2 各向异性分析

为了研究激光定向能量沉积 Ti-6Al 合金的晶粒取向、晶界取向及平均取向差(kernel average misorientation, KAM)，对激光定向能量沉积 Ti-6Al 合金试样的 *XOY* 及 *YOZ* 面进行 EBSD 分析，结果如图 6 所示。图 6a 和 d 分别为 Ti-6Al 合金试样的

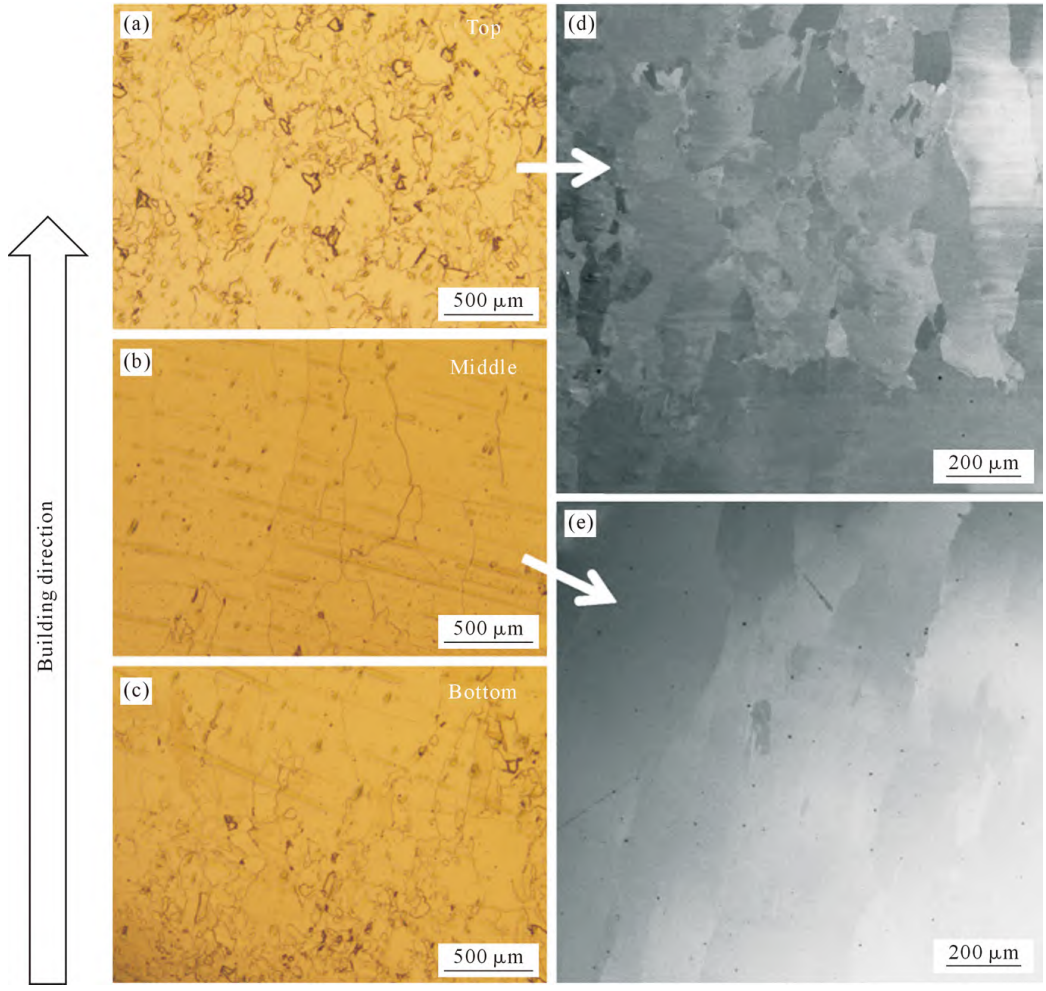


图 4 激光定向能量沉积 Ti-6Al 合金样品 *XOZ* 面微观形貌：(a~c) 沿建造方向 *XOZ* 面顶部、中部、底部的腐蚀金相；(d, e) *XOZ* 面顶部及中部对应 SEM 图像

Fig.4 Microstructures in the *XOZ* plane of the LDED Ti-6Al alloy: (a~c) the corrosion metallographs at the top, middle, and bottom along the building direction, respectively; (d, e) the corresponding SEM images at the top and middle of the *XOZ* plane

中国知网　https://www.cnki.net

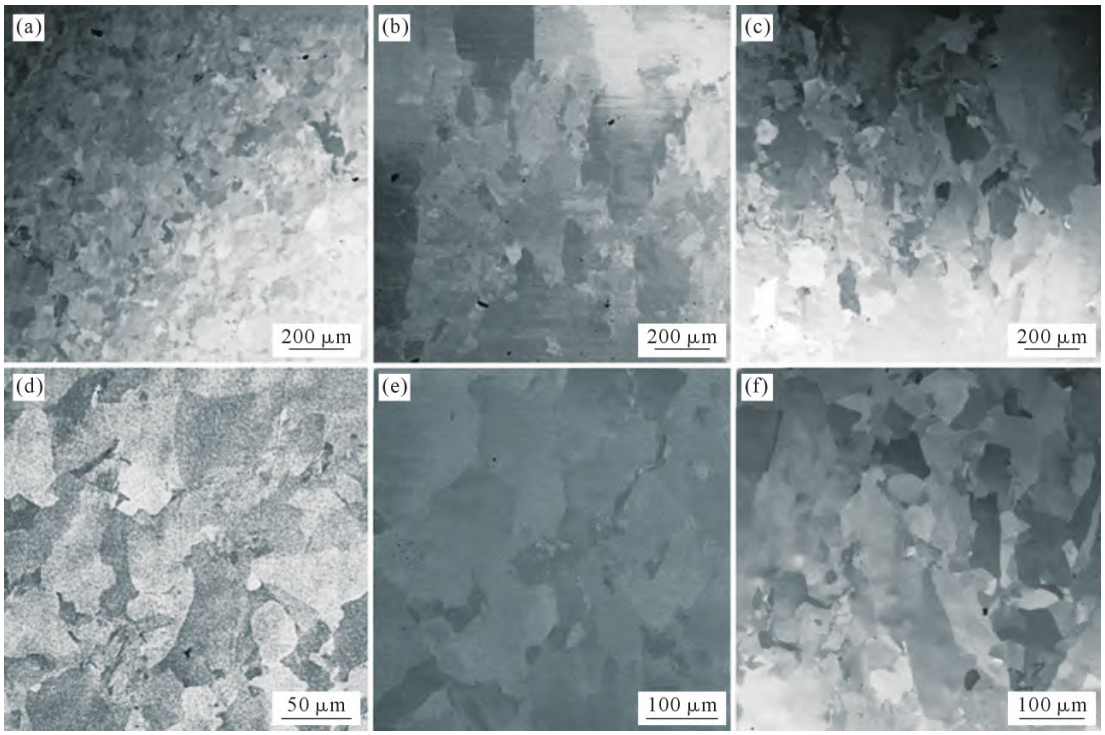


图 5 激光定向能量沉积 Ti-6Al 合金样品 *XOY*、*XOZ*、*YOZ* 面的 ECCI：(a, d) *XOY* 面；(b, e) *XOZ* 面；(c, f) *YOZ* 面

Fig.5 ECCI in the *XOY*, *XOZ* and *YOZ* planes of the LDED Ti-6Al alloys: (a, d) *XOY* plane; (b, e) *XOZ* plane; (c, f) *YOZ* plane

XOY、*YOZ* 面的反极图，能够观察到在 2 个合金试样平面内的晶粒均没有明显的取向，主要由细小的等轴晶及较为粗大的柱状晶组成，这与 SEM 微观组织结果一致。图 6b 和 e 中，红色表示小角度晶界 (low angle grain boundary, LAGBs, 2°~15°)，蓝色表示大角度晶界 (high angle grain boundary, HAGBs, >15°)，由该图可知，大角度晶界主要分布于晶界处，小角度晶界多分布于晶粒内部。

图 7a_1~c_1 分别为激光定向能量沉积 Ti-6Al 合金试样 *XOY*、*XOZ*、*YOZ* 面的晶粒尺寸分布。可以看出，在 *XOY* 面的平均晶粒尺寸最小，为 22.251 9 μm；*YOZ* 面存在最大的晶粒尺寸，为 38.940 8 μm；*XOZ*

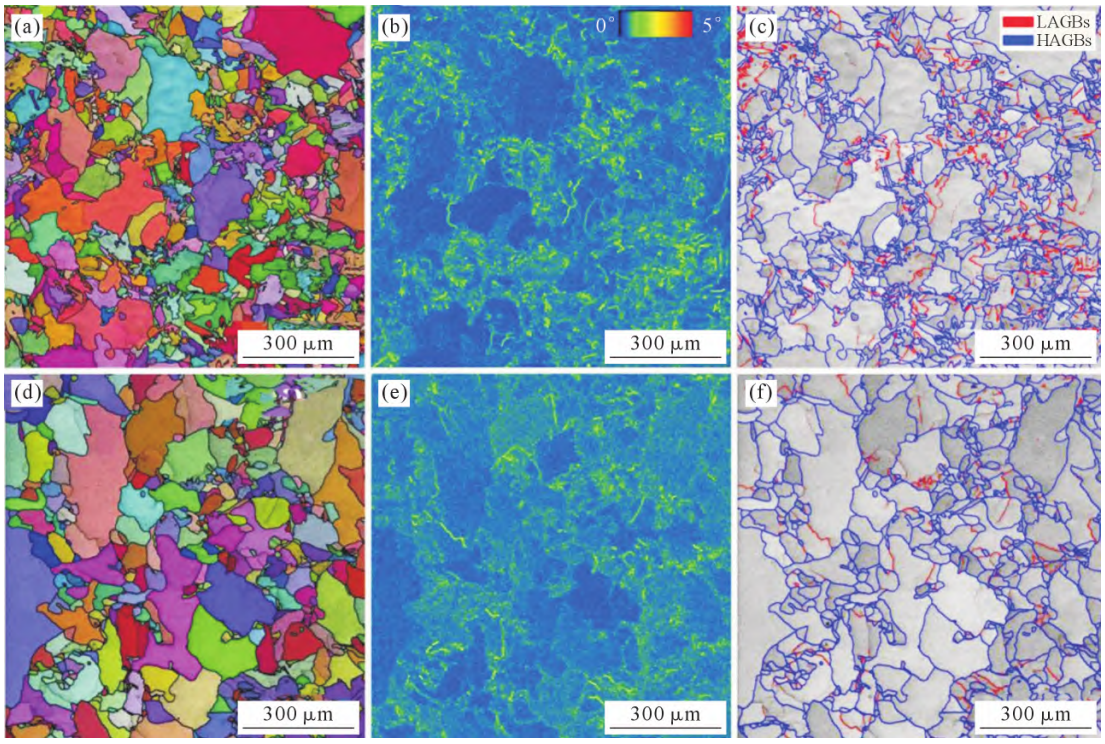


图 6 激光定向能量沉积 Ti-6Al 合金样品 *XOY*、*YOZ* 面的 EBSD 分析：(a, d) IPF 图；(b, e) KAM 图；(c, f) 晶界取向图

Fig.6 EBSD analysis of the *XOY* and *YOZ* planes of the LDED Ti-6Al alloy: (a, d) inverse pole figure (IPF) images; (b, e) kernel average misorientation (KAM) maps; (c, f) grain boundary misorientation distributions

中国知网 https://www.cnki.net

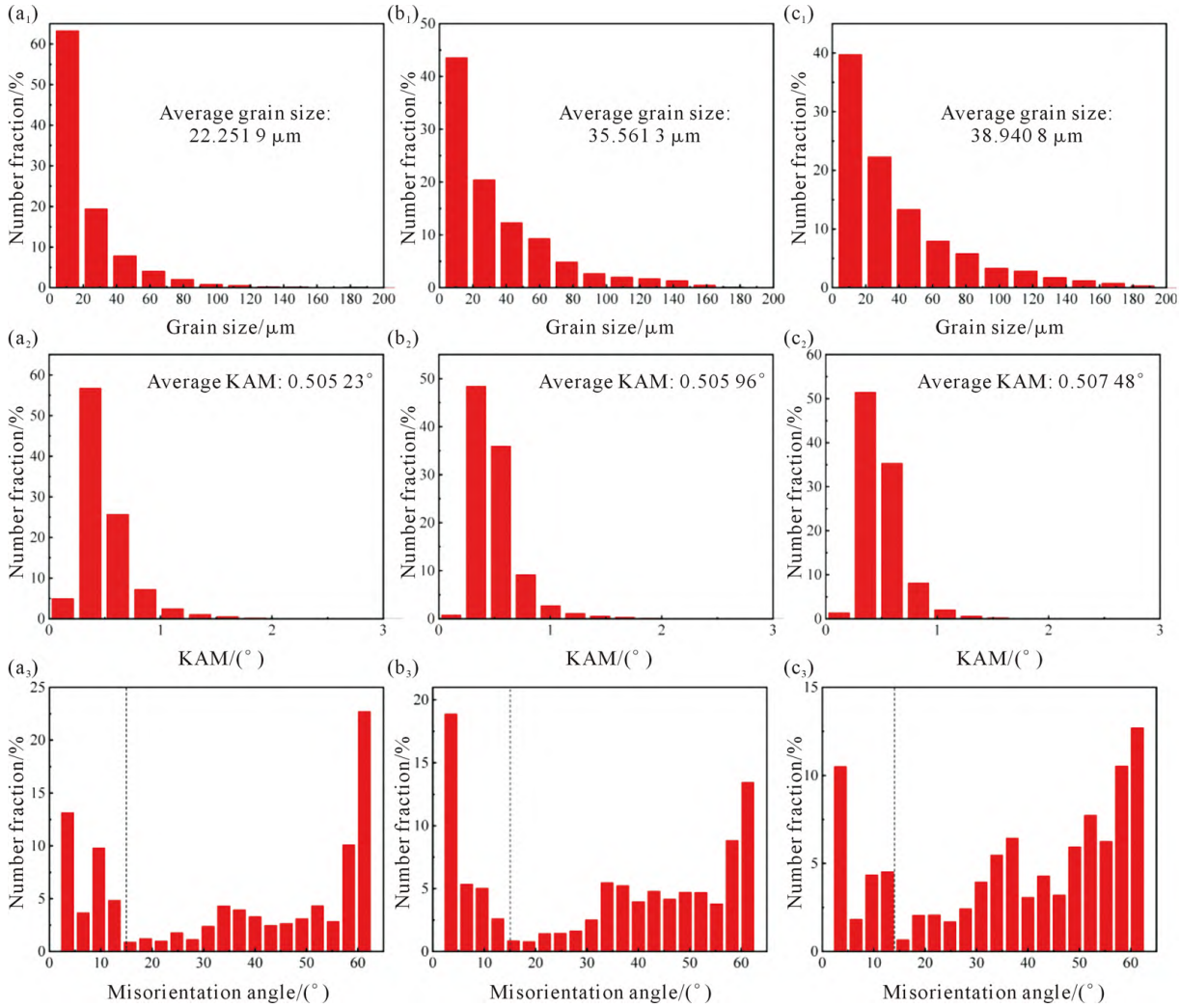


图 7　激光定向能量沉积 Ti-6Al 合金样品晶粒尺寸、平均 KAM 及晶界取向分布：(a_1~a_3) *XOY* 面；(b_1~b_3) *XOZ* 面；(c_1~c_3) *YOZ* 面

Fig.7　The grain size, KAM and grain boundary misorientation distributions of the LDED Ti-6Al alloy: (a_1~a_3) *XOY* plane; (b_1~b_3) *XOZ* plane; (c_1~c_3) *YOZ* plane

面的晶粒尺寸为 35.561 3 μm。相比于激光粉末床熔融，激光定向能量沉积过程中的能量输入较高，因此合金晶粒尺寸较大。对激光定向能量沉积 Ti-6Al 合金样品 *XOY*、*XOZ*、*YOZ* 面的平均取向差进行了统计，如图 7a_2~c_2 所示。KAM 通常用于表示试样内部的应力分布和位错密度，其值越大说明应力越集中，位错密度越大[26-27]。从该图 3 个不同平面的 KAM 图中可以发现，3 个平面内的 KAM 值较为接近，均保持在 0.5°左右；其中，*XOZ* 面的 KAM 值相比于 *XOY* 面的 KAM 值略大，表明建造面的位错密度高于相应扫描面的位错密度，建造面中较高的位错密度是的竖直方向的强度高于水平方向。结合图 6 的大小角度晶界分布，小角度晶界处的 KAM 值较大，即位错主要分布在小角度晶界处，这与 Read-Shockley 模型一致[28]。图 7a_3~c_3 是采用 OIM 软件对该合金晶界取向差角分布情况进行统计。在 3 个不同平面中，*XOY* 面有最高的小角度晶界占比，为 19.5%，其大角度晶界体积分数为 80.5%；*YOZ* 面有最高的大角度晶界占比，为 87.8%，其小角度晶界体积分数为 12.2%。

2.3　力学性能

图 8a 为激光定向能量沉积 Ti-6Al 合金分别沿 *X*、*Y*、*Z* 方向上的工程应力–应变曲线，对 3 个方向上的抗拉强度及相应的伸长率进行了统计(图 8b)。沿 *Z* 方向上，即与建造方向平行时抗拉强度最高，为 669.94 MPa，相应的伸长率为 13.9%；沿 *X* 方向上抗拉强度为 560.55 MPa，其相应的伸长率最低，为 11.4%；沿 *Y* 方向上的抗拉强度为 489.04 MPa，相应的伸长率为 14.8%。对于本文使用激光定向能量沉积成形的 Ti-6Al 合金，沿 *Y* 方向晶粒多为贯穿多个熔池的粗大柱状晶，在拉伸过程中晶界较少，较难发生沿晶断裂，因此抗拉强度和延伸率相比于沿 *X* 方向均较高；此外，且沿 *Y* 方向上的拉伸试样内部的位错密度比沿 *X* 方向上略高，强度会略有提高。但是沿 3 个方向的拉伸试样内部的位错密度较为接近，因此位错密度对抗拉强度的影响极小，可忽略不

中国知网　https://www.cnki.net

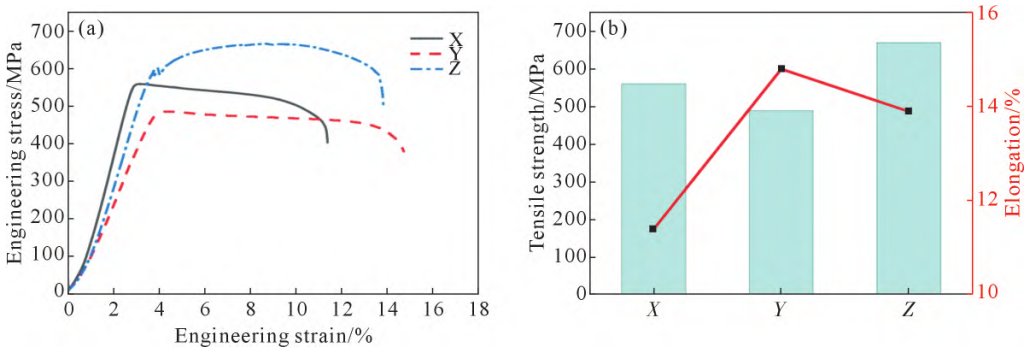


图 8 激光定向能量沉积 Ti-6Al 合金分别沿 *X*、*Y*、*Z* 方向的拉伸性能：(a) 工程应力–应变曲线；(b) 性能统计

Fig.8 Tensile properties of the LDED Ti-6Al alloy along the *X*, *Y* and *Z* directions: (a) engineering stress-strain curves; (b) mechanical property statistics

计。因此，使用激光定向能量沉积成形出的 Ti-6Al 合金，其拉伸性能主要是受晶粒分布影响。图 9 为激光定向能量沉积 Ti-6Al 合金样品 *XOY*、*XOZ*、*YOZ* 面的显微硬度。在 3 个不同的平面内，*XOY* 面显微硬度值最高，为(387.4±0.5) $HV_{0.1}$，*XOZ* 面和 *YOZ* 面的显微硬度值较为接近，分别为(266.3±0.5) $HV_{0.1}$ 和(259.6±0.6) $HV_{0.1}$。由图 7 可知，在 *XOY* 面内的晶粒尺寸最小，晶界最多，因此在该平面内有最高的显微硬度值；在 *YOZ* 平面内的晶粒尺寸最大，因此该平面内的显微硬度值最低。

激光定向能量沉积 Ti-6Al 合金沿 3 个不同方向上的拉伸断口形貌如图 10 所示。可以观察到沿 *X* 和 *Y* 方向上断口形貌几乎没有韧窝，主要是由沿一个方向上的滑移轨迹组成；当沿 *Z* 方向上进行拉伸时，其断口形貌主要是由韧窝组成。韧窝是在相界面或晶界处微孔洞的形核、生长、聚集和最终互连在断口表面留下的痕迹。影响韧窝直径和深度的因素包括第二相的尺寸和密度、基体的塑性变形能力和变形硬化指数。沿 *Z* 方向上进行拉伸出现大量细小韧窝说明该方向塑性变形能力较高。

3 结论

(1)LDED 成形的 Ti-6Al 合金中只存在单一的 α 相，该物相为 HCP 结构；Ti-6Al 合金不同成形高度表现出不同的微观组织特征，即沿着构建方向，底部为细小的等轴晶，中间为柱状晶，顶部为等轴晶/近等轴晶。

(2)在 *XOY* 面的平均晶粒尺寸最小，为 22.251 9 μm；*YOZ* 面存在最大的晶粒尺寸，为 38.940 8 μm。在 3 个不同的平面中，*XOY* 面的小角度晶界体积分数最高，为 19.5%；*YOZ* 面小角度晶界体积分数最低，为 12.2%。

(3)沿 *Z* 方向上，即与建造方向平行时抗拉强度最高，为 669.94 MPa，相应的伸长率为 13.9%；沿 *X* 方向上抗拉强度为 560.55 MPa，相应伸长率最低，为 11.4%；沿 *Y* 方向上的抗拉强度为 489.04 MPa，相应的伸长率为 14.8%。

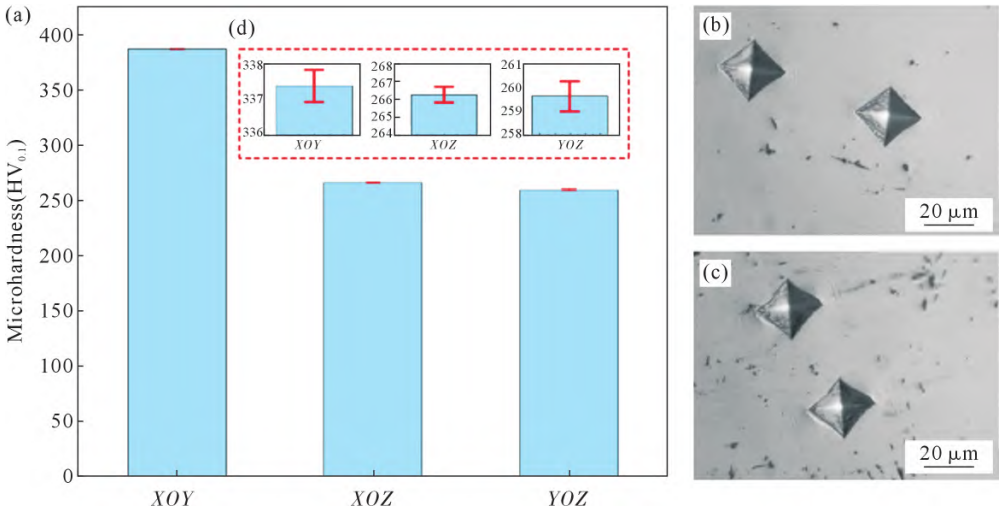


图 9 激光定向能量沉积 Ti-6Al 合金样品 *XOY*、*XOZ*、*YOZ* 面的显微硬度：(a, d) 显微硬度及局部放大图；(b, c) *XOZ*、*YOZ* 面硬度压痕

Fig.9 Microhardness in the *XOY*, *XOZ* and *YOZ* planes of the LDED Ti-6Al alloy: (a) microhardness and corresponding enlarged image; (b, c) hardness indentation in the *XOZ* and *YOZ* planes

中国知网 https://www.cnki.net

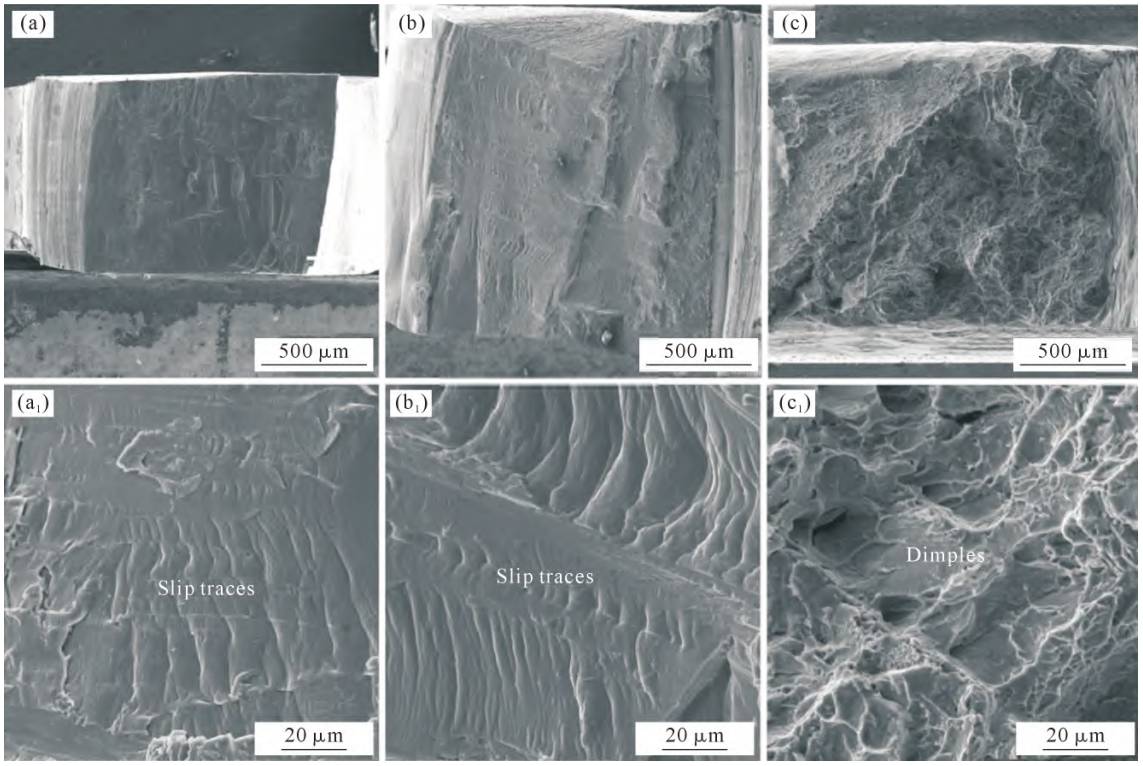


图 10　激光定向能量沉积 Ti-6Al 合金分别沿 *X*、*Y*、*Z* 方向拉伸断口形貌：(a, a$_1$) *X* 方向；(b, b$_1$) *Y* 方向；(c, c$_1$) *Z* 方向

Fig.10　Tensile fracture morphology of the LDED Ti-6Al alloy along the *X*, *Y* and *Z* directions: (a, a$_1$) *X* direction; (b, b$_1$) *Y* direction; (c, c1) *Z* direction

参考文献：

[1] BANERJEE D, WILLIAMS J C. Perspectives on titanium science and technology[J]. Acta Materialia, 2013, 61(3): 844-879.

[2] LAI M J, LI T, RAABE D. ω phase acts as a switch between dislocation channeling and joint twinning- and transformation-induced plasticity in a metastable β titanium alloy[J]. Acta Materialia, 2018, 151: 67-77.

[3] ANIL KUMAR V, GUPTA R K, PRASAD M J N V, NARAYANA MURTY S V S. Recent advances in processing of titanium alloys and titanium aluminides for space applications: A review[J]. Journal of Materials Research, 2021, 36: 689-716.

[4] CHOI G, CHOI W S, HAN J, CHOI P P. Additive manufacturing of titanium-base alloys with equiaxed microstructures using powder blends[J]. Additive Manufacturing, 2020, 36: 101467.

[5] YUE K, LIU J R, ZHANG H J, YU H, SONG Y Y, HU Q M, WANG Q J, YANG R. Precipitates and alloying elements distribution in near α titanium alloy Ti65[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 36: 91-96.

[6] 徐丽娟，于宏宝，黄玉东，肖树龙，陈玉勇. 牙科用 Ti-Cr 合金的显微组织及性能[J]. 中国有色金属学报，2010, 20(S1): 986-991.
XU L J, YU H B, HUANG Y D, XIAO S L, CHEN Y Y. Microstructure and properties of Ti-Cr alloys used for dentistry[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(S1): 986-991.

[7] THOMAS J, MOGONYE J E, MANTRI S A, CHOUDHURI D, BANERJEE R, SCHARF T W. Additive manufacturing of compositionally graded laser deposited titanium-chromium alloys[J]. Additive Manufacturing, 2020, 33: 101132.

[8] 刘畅，董月成，方志刚，王莹，郭艳华，常辉，周廉. 新型高强韧 Ti-Al-Fe-B 系钛合金组织和性能研究[J]. 稀有金属材料与工程，2020, 49(5): 1607-1613.
LIU C, DONG Y C, FANG Z G, WANG Y, GUO Y H, CHANG H, ZHOU L. Microstructure evolution and mechanical properties of new Ti-Al-Fe-B titanium alloy with high strength and ductility [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(5): 1607-1613.

[9] WANG Y N, HUANG J C. Texture analysis in hexagonal materials [J]. Materials Chemistry and Physics, 2003, 81(1): 11-26.

[10] WU H, ZHANG C S, FAN G H, GENG L, WANG G C. Origin of reduced anisotropic deformation in hexagonal close packed Ti-Al alloy[J]. Materials & Design, 2016, 111: 119-125.

[11] WEI B Q, WU W Q, GONG M Y, YU S W, NI S, SONG M, WANG J. Influence of lowering basal stacking fault energy on twinning behaviours[J]. Acta Materialia, 2023, 245: 118637.

[12] NIU P D, LI R D, GAN K F, FAN Z Q, YUAN T C, HAN C J. Manipulating stacking fault energy to achieve crack inhibition and superior strength-ductility synergy in an additively manufactured high-entropy alloy[J]. Advanced Materials, 2024, 36 (34): 2310160.

[13] SVETLIZKY D, DAS M, ZHENG B L, VYATSKIKH A L, BOSE S, BANDYOPADHYAY A, SCHOENUNG J M, LAVERNIA E J, ELIAZ N. Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications [J]. Materials Today, 2021, 49: 271-295.

[14] ANDRADE M F, PEREIRA M V, TEIXEIRA M C, JUNIOR A T, GUTJAR J. Fatigue life assessment in the very high cycle regime of AISI 316L stainless steel processed by L-DED additive manufacturing[J]. Procedia Structural Integrity, 2022, 42: 1008-1016.

[15] WANG Y T, LI J, XIA X Z, ZOU L, YUAN T C, LIU X Y, LAI D, DENG S H, LI R D. A novel Al-Cr-Sc-Zr alloy additively manu-

中国知网　https://www.cnki.net

factured via laser directed energy deposition: Microstructure, phase analysis and mechanical properties[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2023, 322: 118204.

[16] XU R, LI R D, YUAN T C, YU C Z, ZHU H B. Towards the hydrogen pore in additively manufactured AlMgScZr alloy: Influencing factors, formation kinetics mechanism[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2024, 199: 125-144.

[17] YU C Z, CHEN N, LI R D, YUAN T C, HUANG S S, MA X, ZHANG Y, HUANG M, LYU L, LIU R Y, JIANG Y Y, LIU X Y, LAI D. Selective laser melting of GH3536 superalloy: Microstructure, mechanical properties, and hydrocyclone manufacturing[J]. Advanced Powder Materials, 2024, 3(1): 100134.

[18] BHARDWAJ T, SHUKLA M, PAUL C P, BINDRA K S. Direct energy deposition-laser additive manufacturing of titanium-molybdenum alloy: Parametric studies, microstructure and mechanical properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 787: 1238-1248.

[19] ZHANG T M, CHEN C, LI R D, ZHOU K C. Effect of Cr content on the microstructure and mechanical properties of Ti-Cr alloys manufactured by laser directed energy deposition[J]. Materials Science and Engineering: A, 2024, 893: 146143.

[20] AWANNEGBE E, LI H J, SONG T T, NIESSEN F, QIAN M, GAZDER A A, NANCARROW M J B, PERELOMA E. Microstructural characterisation and mechanical evaluation of Ti-15Mo manufactured by laser metal deposition[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 947: 169553.

[21] YANG T, WU W X, ZHAO L, CHEN P C, LIU H, QIU C J. Enhancement of mechanical properties of LDEDed IN738LC alloy by solid-solution strengthening coupled with precipitation-strengthening[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 982: 173679.

[22] MANDAL V, TRIPATHI P, KUMAR A, SINGH S S, RAMKUMAR J. A study on selective laser melting (SLM) of TiC and B_4C reinforced IN718 metal matrix composites (MMCs)[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 901: 163527.

[23] MĚSÍČEK J, ČEGAN T, MA Q P, HALAMA R, SKOTNICOVÁ K, HAJNYŠ J, JUŘICA J, KRPEC P, PAGÁČ M. Effect of artificial aging on the strength, hardness, and residual stress of SLM AlSi10Mg parts prepared from the recycled powder[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 855: 143900.

[24] GARCÍA-COLLADO A, BLANCO J M, GUPTA M K, DORADO-VICENTE R. Advances in polymers based multi-material additive-manufacturing techniques: State-of-art review on properties and applications[J]. Additive Manufacturing, 2022, 50: 102577.

[25] TAN C L, LI R S, SU J L, DU D F, DU Y, ATTARD B, CHEW Y, ZHANG H O, LAVERNIA E J, FAUTRELLE Y, TENG J, DONG A P. Review on field assisted metal additive manufacturing[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2023, 189:104032.

[26] CALCAGNOTTO M, PONGE D, DEMIR E, RAABE D. Orientation gradients and geometrically necessary dislocations in ultrafine grained dual-phase steels studied by 2D and 3D EBSD[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(10-11): 2738-2746.

[27] ZHANG X, XU H, LI Z J, DONG A P, DU D F, LEI L M, ZHANG G D, WANG D H, ZHU G L, SUN B D. Effect of the scanning strategy on microstructure and mechanical anisotropy of hastelloy X superalloy produced by Laser Powder Bed Fusion[J]. Materials Characterization, 2021, 173: 110951.

[28] FENG Y X, SHANG J X, LIU Z H, LU G H. The energy and structure of (110) twist grain boundary in tungsten[J]. Applied Surface Science, 2015, 357: 262-267.

中国知网 https://www.cnki.net