

# 激光同轴送粉增材制造 TiAl 合金的性能

刘占起<sup>\*\*</sup>, 徐国建<sup>\*</sup>, 马瑞鑫, 郑文涛, 胡方, 杭争翔

沈阳工业大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110870

**摘要** 将 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金粉和铌粉进行机械混合, 然后采用激光增材制造工艺成功制备出  $\gamma$ -TiAl 合金样品, 研究了激光功率、扫描速率和送粉量对沉积成形的影响规律, 分析了沉积层的显微组织、相组成、断口形貌及沉积层的硬度分布。研究结果表明: 随着激光功率增大, 沉积层宽和层高均增大; 随着扫描速率增大, 沉积层宽和层高均减小; 随着送粉量增大, 沉积层的宽度增大, 沉积层的高度基本不变; 最佳工艺参数下得到的沉积试样成形良好, 无冶金缺陷存在, 沉积层由大量  $\gamma$  相和少量  $\alpha_2$  相组成; 沿沉积试样 Z 方向的室温压缩屈服强度为 905 MPa, 抗压强度为 1542 MPa, 压缩率 14.7%, 抗拉强度为 425 MPa, 断后伸长率为 3.3%; 压缩试样和拉伸试样的断口均为准解理断口。

**关键词** 激光技术; 激光增材制造;  $\gamma$ -TiAl 合金; 工艺参数; 显微组织; 力学性能

中图分类号 TG146.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0302016

## Properties of TiAl Alloy Prepared by Additive Manufacturing with Laser Coaxial Powder Feeding

Liu Zhanqi<sup>\*\*</sup>, Xu Guojian<sup>\*</sup>, Ma Ruixin, Zheng Wentao, Hu Fang, Hang Zhengxiang

School of Material Science and Engineering, Shenyang University of Technology,

Shenyang, Liaoning 110870, China

**Abstract** The alloy powders containing Ti-48Al-2Cr-2Nb and niobium are mechanically mixed, and  $\gamma$ -TiAl alloy samples are successfully prepared with the laser additive manufacturing technique. The influence rules of laser power, scanning speed and powder feeding amount on deposition forming are studied, and the microstructure, phase composition, fracture morphology and hardness distribution of the deposited layer are analyzed. The research results indicate that the width and height of the deposited layer increase with the increase of laser power. With the increase of the scanning speed, the width and height of the deposited layer decrease. With the increase of powder feeding amount, the width of the deposited layer increases and the height of the deposited layer is basically unchanged. The deposited samples obtained under the optimum technology parameters are well formed and have no metallurgical defects. The deposited layer consists of a large number of  $\gamma$  phases and a small amount of  $\alpha_2$  phases. The compressive yield strength, compression strength and compression ratio are 905 MPa, 1542 MPa and 14.7% respectively along the Z direction of deposited specimen at room temperature. The tensile strength and elongation are 425 MPa and 3.3%, respectively. The fractures of compressive specimen and tensile specimen are both quasi-cleavage fractures.

**Key words** laser technique; laser additive manufacturing;  $\gamma$ -TiAl alloy; process parameters; microstructure; mechanical properties

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 350.3390

## 1 引言

钛铝(TiAl)合金具有高熔点(超过 1450 °C)、低密度(4 g/cm<sup>3</sup>)、高弹性模量(160~180 GPa)及

高蠕变强度(高达 900 °C)等优点,近年有逐渐代替钛合金、镍基高温合金及耐热钢等材料的发展趋势,在航空航天及车辆发动机制造领域极具发展潜力<sup>[1-4]</sup>。一般,将铌含量在 5%(原子数分数)以上的

收稿日期: 2018-11-19; 修回日期: 2018-12-05; 录用日期: 2018-12-21

基金项目: 智能化增材制造系统平台(2017YFB1103000)

\* E-mail: xuguojian1959@qq.com; \*\* E-mail: 1640754283@qq.com

TiAl 合金称为高铌 TiAl 合金,高铌 TiAl 合金是 TiAl 合金相对较新的发展方向。与传统的 TiAl 合金相比,高铌 TiAl 合金在高温下具有更高的抗氧化性和蠕变强度<sup>[5]</sup>。北京科技大学的方璐<sup>[6]</sup>通过熔模精铸技术在 TiAl 合金中添加 Nb 的方法来提高合金的有序化温度,使其使役温度达到 850 ℃,比传统 TiAl 合金高 200 ℃。

TiAl 合金的室温塑性差、延展性差、脆性大,难以采用常规制造工艺(如锻造、轧制及焊接等)加工成型,这使得 TiAl 合金的应用受到一定限制<sup>[7]</sup>。目前,TiAl 合金的成型方法以近净成形为主,主要包括粉末冶金、精密铸造、定向凝固等。其中,激光增材制造(LDM)技术在 TiAl 合金近净成形方面具有显著优势。粉末在激光束的作用下可以通过优化工艺参数实现对材料组织和性能的有效调控,一次成型密度可达 98.5% 以上<sup>[8]</sup>。目前,已有学者通过 LDM 技术制备出 TiAl 合金,并对其组织与性能进行了研究:Schwerdtfeger 等<sup>[9]</sup>制备出了 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金,通过调节不同的光束参数获得了具有显著细化的显微组织;Qu 等<sup>[10]</sup>通过 LDM 技术制备出了具有定向柱状晶组织的 Ti-47Al-2.5V-1Cr 合金薄壁件,并分析了它的组织及室温拉伸性能;Zhang 等<sup>[11]</sup>的实验表明,基板对沉积层微观结构具有显著影响,通过控制后热处理可获得超细层片状微观结构。目前,利用 LDM 技术制备高铌 TiAl 合金的报道还很少,急需系统性的研究成果。

LDM 技术制备高铌 TiAl 合金和其他 TiAl 合金的主要区别在于能够通过外在添加纯铌的量来控制冶金反应中铌元素的含量,从而达到改善 TiAl 合金的性能。其难点在于纯铌属于高熔点金属,如果控制不好能量输入,金属铌可能会以半熔状态存在于沉积层中。为了使铌能够更好地溶解在沉积层中,可以选取尺寸细小的铌颗粒。

本文以 Ti-48Al-2Cr-2Nb 粉和铌的机械混合粉末为研究对象,通过单道实验研究了 LDM 的激光输出功率、扫描速率及送粉速率对沉积层性能的影响规律。

## 2 实验材料及方法

实验粉末材料为 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金粉(粒度为 53~150 μm)和纯铌粉(粒度为 60~200 μm),它们的化学成分如表 1 所示。将 Ti-48Al-2Cr-2Nb 粉和纯铌粉按原子数分数比为 97:3 进行机械混合,将混合后的合金粉末在 200 ℃下烘干 1 h;基板采用 TC4 钛合金基板,其尺寸为 100 mm×100 mm×10 mm,实验前将基板表面的氧化膜及油污等杂质去除。打印设备为南京中科煜宸激光技术有限公司生产的 LDM8060。半导体激光器(LDF4000-100,科艺仪器有限公司)的额定输出功率为 4 kW,传输光纤的芯径为 1000 μm。实验装置如图 1~2 所示。实验过程中,激光焦斑直径为 3 mm,离焦量为 0 mm,送粉气体(氩气)流量为 8 L·min<sup>-1</sup>,基板预热温度为 300 ℃;密封工作室保护气体为氩气(纯度为 99.99%),密封工作室水和氧的体积分数均不大于 5×10<sup>-5</sup>。



图 1 LDM 设备实物图

Fig. 1 Photo of LDM equipment



图 2 LDF4000-100 型激光器

Fig. 2 LDF4000-100 laser device

表 1 混合粉末的化学成分

Table 1 Chemical composition of mixed powder

Element	Ti	Al	Cr	Nb	C	H	O
Atomic fraction /%	46.5	46.5	2	5			
Mass fraction /%	Balance	32.85	2.89	7.54	0.0077	0.0013	0.046

沉积完成后,沿垂直于激光扫描方向将样品切割成  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  的横截面金相试样,镶嵌后用砂纸(800,1000,1500,2000号)进行研磨,然后用 ET-500 环保型金刚石喷雾抛光剂(粒度依次为  $2.5, 1.5, 0.5\ \mu\text{m}$ )进行抛光。腐蚀液为 Kroll 试剂( $\text{HF}, \text{HNO}_3, \text{H}_2\text{O}$  的体积比为  $2:3:10$ ),腐蚀时间约为  $15\text{ s}$ ,腐蚀后用酒精冲洗,并用风筒吹干。采用 ZX-10 型蔡司显微镜(OM)和日立 S-3400N 扫描电子显微镜(SEM)观察沉积层的显微组织;采用 X-7000 型 X-射线衍射分析仪(日本岛津公司)对沉积层的相组成进行分析;采用 CSS-55100 万能试验机(日本岛津公司)进行压缩实验,压缩性能测试试样的尺寸为  $\phi 4\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ ,加载速率为  $0.5\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,每组试样取 3 个;拉伸试样尺寸如图 3 所示,加工后的拉伸试样如图 4 所示,采用 SLFL-100 KN 拉伸机(日本岛津公司)进行室温拉伸实验,加载速率为  $0.3\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ;用 SEM 观察压缩试样和拉伸试样的断口形貌;用维氏硬度计(HVS-5,莱州华银实验仪器有限公司)测试试样的硬度分布(加载载荷为  $2.94\text{ N}$ ,加载时间为  $10\text{ s}$ )。

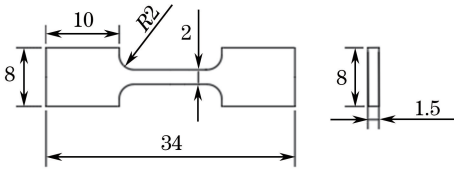


图 3 拉伸试样尺寸示意图

Fig. 3 Schematic of tensile specimen size

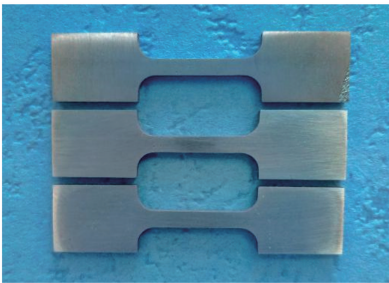


图 4 拉伸试样实物照片

Fig. 4 Photograph of tensile specimens

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 工艺参数对沉积层的影响

在扫描速率为  $7\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,送粉速率为  $5.67\text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ (即粉盘转速为  $0.8\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ )的条件下,当激光输出功率分别为  $1200, 1400, 1600\text{ W}$  时,单道沉积层的外观形貌如图 5 所示,激光输出功率

对沉积层宽、层高的影响规律如图 6 所示。由图 5 可知,沉积层的外观形貌均良好。由图 6 可知:随着激光输出功率增加,沉积层宽和层高均随之增加。这是由于随着激光输出功率增加,热输入量也增加,粉末熔化量增大及基板加热区域扩大,导致熔宽和熔高也随之增加。另外,由图 6 可知,随着激光输出功率增加,沉积层的裂纹敏感性逐渐降低;当激光功率为  $1200\text{ W}$  时,沉积层中有裂纹产生;当激光输出功率为  $1400\text{ W}$  和  $1600\text{ W}$  时,沉积层中没有裂纹存在。这是因为随着激光输出功率增加,沉积层的冷却速率逐渐降低,因此,沉积层中的裂纹逐渐减少。

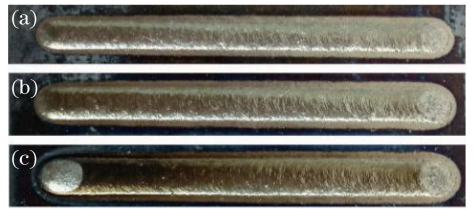


图 5 不同激光输出功率下得到的沉积层外观的形貌。

(a)  $1200\text{ W}$ ; (b)  $1400\text{ W}$ ; (c)  $1600\text{ W}$

Fig. 5 Appearances of sediment layer obtained at different laser output powers. (a)  $1200\text{ W}$ ; (b)  $1400\text{ W}$ ; (c)  $1600\text{ W}$

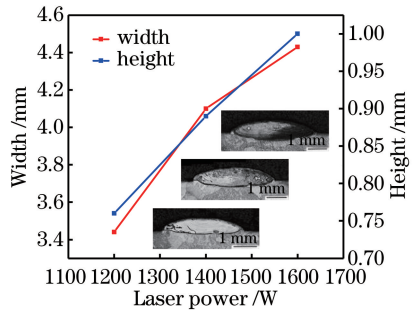


图 6 激光输出功率对沉积层宽、层高的影响

Fig. 6 Effects of laser output power on deposited layer width and height

在激光输出功率为  $1400\text{ W}$ ,送粉速率为  $5.662\text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ (即粉盘转速为  $0.8\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ )的条件下,当扫描速率分别为  $5, 7, 9\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  时,单道沉积层的外观形貌如图 7 所示,沉积层宽和层高的变化规律如图 8 所示。由图 7 可知,沉积层的外观形貌均良好,没有冶金缺陷产生。由图 8 可知,随着扫描速率增加,沉积层高和层宽逐渐减小。这是因为随着扫描速率增加,单位时间内的行走距离增加和热输入量减小,因此,层宽和层高逐渐减小。另外,扫描速率影响着沉积过程中的加热时间和粉末利用率,通常情况下,扫描速率越小,粉末及基板的加热时间越长,粉末的利用率越高<sup>[12]</sup>。

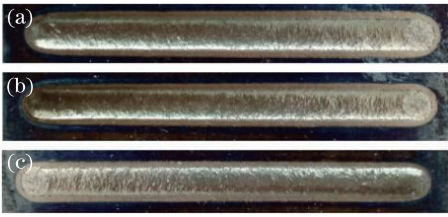


图 7 不同扫描速率下得到的沉积层的外观形貌。

(a)  $5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ; (b)  $7 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ; (c)  $9 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

Fig. 7 Appearances of sediment layer obtained at different scanning speeds. (a)  $5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ; (b)  $7 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ; (c)  $9 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

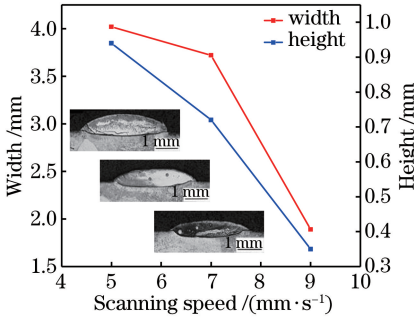


图 8 扫描速率对沉积层宽和层高的影响

Fig. 8 Effects of scanning speed on deposited layer width and height

在激光功率为  $1400 \text{ W}$ , 扫描速率为  $7 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  的条件下, 当送粉速率分别为  $4.25, 5.67, 7.07 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$  (即粉盘转速分别为  $0.6, 0.8, 1.0 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ) 时, 沉积层的外观形貌如图 9 所示, 沉积层宽和层高的变化规律如图 10 所示。由图 9 可知: 沉积层的外观形貌均良好, 在送粉速率为  $5.67 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$  时没有裂纹产生; 在送粉速率为  $4.25 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$  和  $7.07 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$  时有裂纹产生。由图 8 可知, 随着送粉速率增加, 层高逐渐增大, 层宽几乎不变。这是由于随着送粉速率增加, 粉末熔化量增加, 层高也随之增加。另外, 在送粉速率增大过程中, 由于激光输出功率不变, 即激光束在基板上的加热面积基本不变, 所以熔宽基本保持不变。

综上所述可确定最佳的工艺参数如下: 激光功率为  $1400 \text{ W}$ , 扫描速率为  $7 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ , 送粉速率为  $5.67 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$  (即粉盘转速为  $0.8 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ )。

### 3.2 沉积态的显微组织

利用上述最佳工艺参数, 通过多层多道(共沉积 10 层, 每层层厚  $0.8 \text{ mm}$ , 搭接率  $50\%$ ) 制备金相和性能检测试样, 沉积层的显微组织如图 11 所示。从图 11 可知: 多层多道沉积试样由多个沉积层组成, 层间有明显的层带组织; 较粗大的柱状晶可以贯穿多个沉积层, 这是由于上层沉积时会对已沉积的下

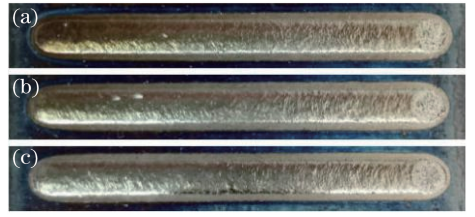


图 9 不同送粉速率下得到的沉积层的外观形貌。

(a)  $4.25 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ ; (b)  $5.67 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ ; (c)  $7.07 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$

Fig. 9 Appearances of sediment layers obtained at different powder feeding speeds. (a)  $4.25 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ ; (b)  $5.67 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ ; (c)  $7.07 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$

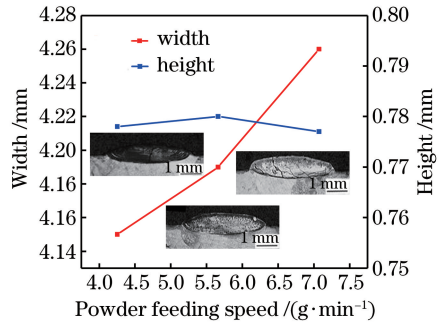


图 10 送粉速率对沉积层宽和层高的影响

Fig. 10 Effects of powder feeding speed on deposited layer width and height

层表面进行重熔, 在随后的冷却过程中, 沉积方向反方向的散热速率最大, 熔池金属以外延结晶(联生结晶)的方式形核并长大, 粗大的柱状晶沿着沉积方向长大, 并可横穿几个沉积层。上层沉积时会对已沉积的下层表面进行重熔, 并形成一个热影响区<sup>[13]</sup>, 因此形成了层带组织。为了进一步分析沉积层的组织, 将图 11(a) 所示组织中的灰色部分 A 和白色部

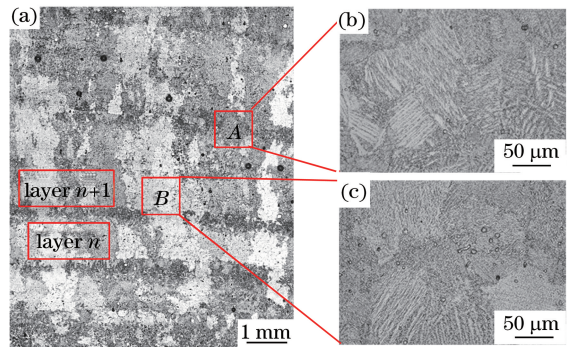


图 11 多层多道沉积试样的显微组织。(a) 宏观组织; (b) A 区域的微观组织; (c) B 区域的微观组织

Fig. 11 Microstructures of multilayer and multichannel deposited sample. (a) Macrostructure; (b) microstructure in area A; (c) microstructure in area B

分 *B* 放大,其显微组织分别如图 11(b)、(c)所示,可见,两者柱状晶中的亚结构基本上均由片层组织构成。

另外,依据能量色散 X 射线光谱仪(EDX)的分

析结果可以确定沉积层中存在着没有分解的铌颗粒,其形态如图 12 所示。沉积层的 SEM 照片如图 13 所示,可知,沉积层是由片层组织构成的,即由大量灰色相及灰色相之间的少量白色相组成。

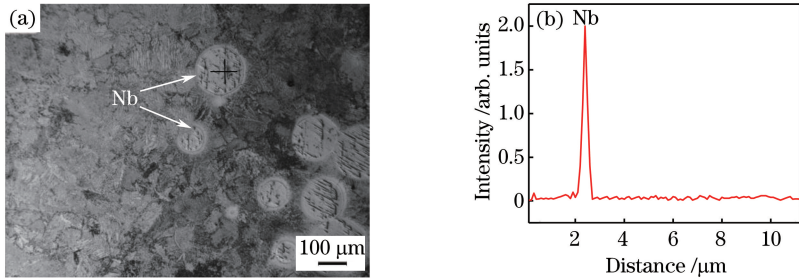


图 12 沉积层中未分解的铌颗粒的形貌及 EDX 谱。(a) SEM 形貌;(b) EDX 谱  
Fig. 12 SEM morphology and EDX spectrum of undecomposed niobium in deposited layer.

(a) SEM topography; (b) EDX spectrum

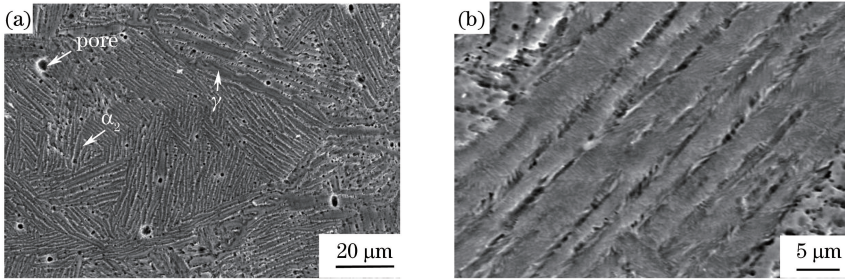


图 13 沉积层的 SEM 照片。(a) SEM 形貌;(b)放大后的 SEM 形貌

Fig. 13 SEM photos of deposited layer. (a) SEM topography; (b) amplified SEM topography

沉积层的面扫描分析结果如图 14 所示,图 14(a)是组织扫描电镜照片,图 14(b)~(e)依次为钛、铝、铌、铬元素的分析结果。可知:各元素分布均匀,没有出现明显的偏析。沉积层的 X 射线衍射分析结果如图 15 所示(纵坐标代表衍射峰值的强

度, $\theta$  代表扫描角度)。可见沉积层由大量  $\gamma$  相、少量  $\alpha_2$  相(即微量未分解的铌)组成。由此可以推断,灰色部分由  $\gamma$  相构成,白色部分由  $\alpha_2$  相构成。在层片组织中, $\alpha_2$  相和  $\gamma$  相的生长方向基本一致,层片组织晶粒的平均直径约为  $40 \mu\text{m}$ 。

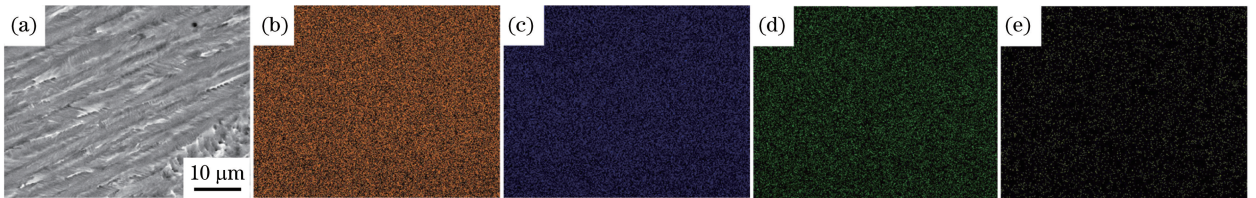


图 14 沉积层的面扫描分析结果。(a) SEM 照片;(b)钛元素扫描结果;(c)铝元素扫描结果;  
(d)铌元素扫描结果;(e)铬元素扫描结果

Fig. 14 Map scanning analysis of deposited layer. (a) SEM photo; (b) titanium element scanning;  
(c) aluminum element scanning; (d) niobium element scanning; (e) chromium element scanning

### 3.3 多层多道沉积试样的硬度

沉积试样的维氏硬度测试结果如图 16 所示。测试方法是以第一个沉积层为测试 0 点,由下到上,每隔  $0.5 \text{ mm}$  测试一个点,每个点测试 3 个硬度值,取其平均值作为最终的硬度测试值。由图 16 可知,

沉积试样的维氏硬度分布范围为  $350 \sim 525 \text{ HV}$ 。在第一层沉积过程中,由于 TC4 母材对 TiAl 合金的稀释作用,沉积层中的钛元素含量会相对增加,导致铝元素的含量相对减少,所以越靠近熔合线附近的沉积层中, $\alpha_2$  相的含量也就越高,故而硬度越高。

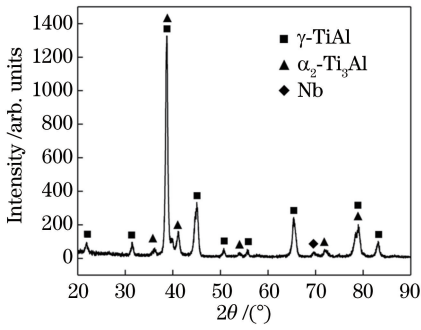


图 15 沉积层的 X 射线衍射分析结果

Fig. 15 X-ray diffraction analysis of deposited layer

另外,沉积态下的冷却速率较快,导致  $\alpha_2$  相主要由马氏体组织构成,所以,随着  $\alpha_2$  相含量增多,硬度值也随之增大<sup>[14]</sup>。沉积层超过 3 层后,由于母材对沉积层的稀释作用消失,所以其硬度基本上维持在 350~400 HV。

### 3.4 沉积试样的力学性能

在沉积方向(Z向)上分别截取压缩和拉伸性

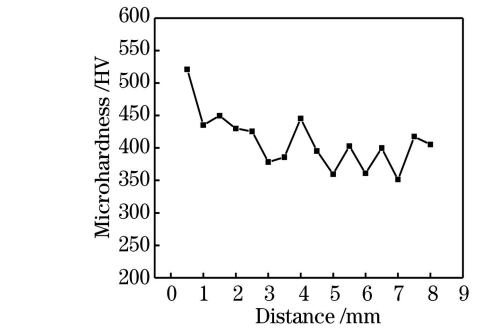
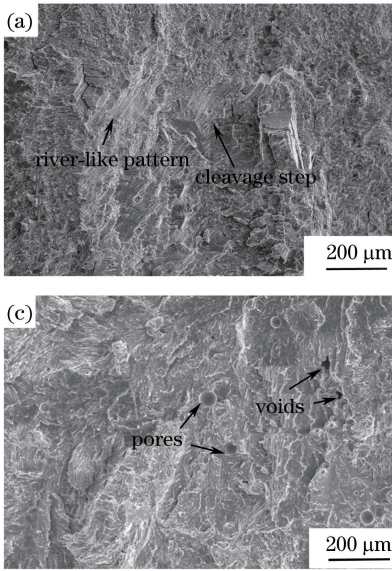


图 16 沉积试样的硬度分布

Fig. 16 Hardness distribution of deposited sample

能检测试样,并在室温下进行实验,实验结果如下:压缩试样的屈服强度为 905 MPa,抗压强度为 1542 MPa,压缩率为 14.7%;拉伸试样的抗拉强度为 425 MPa,断后伸长率为 3.3%。

压缩试样和拉伸试样的断口形貌如图 17 所示,可见,断口上既有小的解理台阶,又存在一定的塑性变形,属于准解理断口。

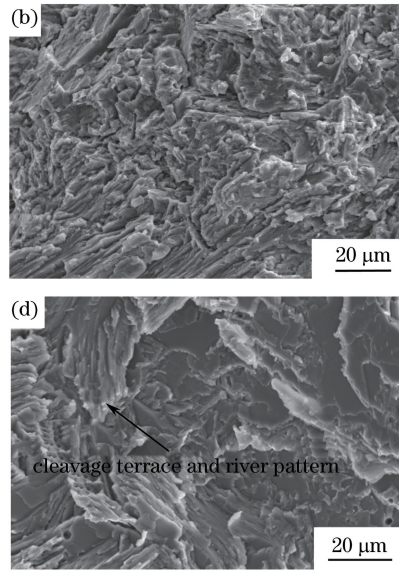


图 17 试样的室温断口形貌。(a)~(b)压缩试样;(c)~(d)拉伸试样

Fig. 17 Fracture of samples at room temperature. (a)-(b) Compressive sample; (c)-(d) tensile sample

## 4 结 论

以 TiAl 合金粉与纯铌粉的机械混合粉为原料,采用激光增材制造技术得到了成形良好的沉积样品,并得到了以下结论:1)当激光功率为 1400 W,扫描速率为  $9 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,送粉速率为  $5.67 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ (即粉盘转速为  $0.8 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ )时,得到的沉积试样最佳;2)沉积层组织细小,晶粒内部由片层组织构成,在  $\gamma$  相基体上分布着少量的  $\alpha_2$  相;3)沉积试样的室温抗

拉强度和塑性都远低于其抗压强度和塑性。

### 参 考 文 献

[1] Qu H P, Li P, Zhang S Q, *et al.* The effects of heat treatment on the microstructure and mechanical property of laser melting deposition  $\gamma$ -TiAl intermetallic alloys[J]. *Materials & Design*, 2010, 31(4): 2201-2210.  
 [2] Liu C T, Schneibel J H, Maziasz P J, *et al.* Tensile properties and fracture toughness of TiAl alloys with

- controlled microstructures[J]. *Intermetallics*, 1996, 4(6): 429-440.
- [3] Karthikeyan S, Viswanathan G B, Gouma P I, *et al.* Mechanisms and effect of microstructure on creep of TiAl-based alloys [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2002, 329/330/331: 621-630.
- [4] Qin L Y, Xu L L, Yang G, *et al.* Effect of annealing method on microstructure and mechanical properties of TA15 titanium alloys by laser deposition manufacturing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(3): 0302004.  
钦兰云, 徐丽丽, 杨光, 等. 退火方式对激光沉积 TA15 钛合金组织及力学性能的影响[J]. *中国激光*, 2018, 45(3): 0302004.
- [5] Yang G. Solidification behavior and microstructure evolution of high Nb containing TiAl alloys [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2016: 4-10.  
杨光. 高铌 TiAl 合金凝固行为及组织演化研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2016: 4-10.
- [6] Fang L. Investigation on the thermal stabilities of microstructure in fully lamellar high Nb containing TiAl alloys [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2017: 6-13.  
方璐. 全片层高 Nb-TiAl 合金显微组织热稳定性研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2017: 6-13.
- [7] Xu Z J. The microstructures and properties of TC11/ $\gamma$ -TiAl bi-materials fabricated by laser powders deposition process [D]. Beijing: General Research Institute for Nonferrous Metals, 2013: 5-9.  
徐志军. 激光熔化沉积 TC11/ $\gamma$ -TiAl 双合金材料的工艺、组织及性能[D]. 北京: 北京有色金属研究总院, 2013: 5-9.
- [8] Shang C. Study on process and microstructure evolution of TiAl alloy fabricated by laser deposition manufacturing [D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2017: 15-25.  
尚纯. 激光沉积制造 TiAl 合金工艺与组织演变研究 [D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2017: 15-25.
- [9] Schwerdtfeger J, Körner C. Selective electron beam melting of Ti-48Al-2Nb-2Cr: microstructure and aluminium loss[J]. *Intermetallics*, 2014, 49(3): 29-35.
- [10] Qu H P, Li P, Zhang S Q, *et al.* Microstructure and mechanical property of laser melting deposition (LMD) Ti/TiAl structural gradient material [J]. *Materials & Design*, 2010, 31(1): 574-582.
- [11] Zhang X D, Brice C, Mahaffey D W, *et al.* Characterization of laser-deposited TiAl alloys [J]. *Scripta Materialia*, 2001, 44(10): 2419-2424.
- [12] Zhang S Y, Lin X, Chen J, *et al.* Influence of processing parameter on the microstructure and forming characterizations of Ti-6Al-4V titanium alloy after laser rapid forming processing[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2007, 36(10): 1839-1843.  
张霜银, 林鑫, 陈静, 等. 工艺参数对激光快速成形 TC4 钛合金组织及成形质量的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2007, 36(10): 1839-1843.
- [13] Zhang Y Z, Huang C, Wu F Y, *et al.* Microstructure and mechanical properties of laser direct deposited  $\gamma$ -TiAl alloy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(10): 2684-2688.  
张永忠, 黄灿, 吴复尧, 等. 激光熔化沉积  $\gamma$ -TiAl 合金的组织及力学性能[J]. *中国激光*, 2010, 37(10): 2684-2688.
- [14] Ma Y, Cuiuri D, Hoye N, *et al.* The effect of location on the microstructure and mechanical properties of titanium aluminides produced by additive layer manufacturing using *in-situ* alloying and gas tungsten arc welding [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2015, 631: 230-240.