

文章编号: 0258-7025(2010)10-2684-05

# 激光熔化沉积 $\gamma$ -TiAl 合金的组织及力学性能

张永忠<sup>1</sup> 黄 灿<sup>1</sup> 吴复尧<sup>2</sup> 刘黎明<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 北京有色金属研究总院复合材料中心, 北京 100088  
<sup>2</sup> 中国航天科工集团航天特种材料及工艺技术研究所, 北京 100074)

**摘要** 通过激光熔化同步输送的 Ti-47Al-2Cr-2Nb-0.5W-0.15B 合金粉末, 在 TC4 钛合金基板上逐层沉积制备出  $\gamma$ -TiAl 合金的薄壁样品, 分析了所沉积材料的开裂行为、微观组织、相组成及力学性能。结果表明, 激光熔化沉积的  $\gamma$ -TiAl 合金具有较高的开裂倾向, 缩短激光扫描沉积的长度及引入具有较高韧性的钛合金作为过渡材料, 可大大减缓薄壁沉积时的温度梯度和热应力, 从而避免开裂的发生; 激光熔化沉积  $\gamma$ -TiAl 合金的内部组织致密, 由  $\alpha_2 + \gamma$  的层片状晶团及少量  $\gamma$  相组成, 层片晶团的尺寸约  $10 \mu\text{m}$ ; 沉积状态下, 沿薄壁长度及高度方向的室温抗拉强度分别为 810 MPa 和 575 MPa, 沿高度方向  $750 \text{ }^\circ\text{C}$  下和长度方向  $850 \text{ }^\circ\text{C}$  下的高温拉伸强度分别为 550 MPa 和 625 MPa。

**关键词** 激光技术; 激光熔化沉积;  $\gamma$ -TiAl 合金; 微观组织; 力学性能

**中图分类号** TN249; TF124 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103710.2684

## Microstructure and Mechanical Properties of Laser Direct Deposited $\gamma$ -TiAl Alloy

Zhang Yongzhong<sup>1</sup> Huang Can<sup>1</sup> Wu Fuyao<sup>2</sup> Liu Liming<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Center for Composites, General Research Institute for Non-Ferrous Metals, Beijing 100088, China  
<sup>2</sup> Research Institute of Aerospace Special Material & Technology, China Aerospace Science and Industry Corporation, Beijing 100074, China)

**Abstract** Thin wall samples from  $\gamma$ -TiAl(Ti-47Al-2Cr-2Nb-0.5W-0.15B) alloy are prepared on substrate of TC4 titanium alloy by laser direct deposition of coaxially fed metallic powders. The cracking behavior, microstructure, phase constitution, and mechanical properties of the deposited materials are investigated. The results indicate that the deposited  $\gamma$ -TiAl alloy presents high tendency for cracking. Decreasing the deposited wall length or introducing ductile titanium alloy as transition materials will mitigate the temperature gradient and thermal stress during deposition, thus avoid cracking. Laser direct deposited  $\gamma$ -TiAl alloy are full dense, composed of  $\alpha_2 + \gamma$  lamellar colony and small amount of  $\gamma$  single phase. The size of the lamellar colony is about  $10 \mu\text{m}$ . For as-deposited  $\gamma$ -TiAl alloy, the room-temperature tensile strengths are 810 MPa and 575 MPa along the longitude and build-up direction respectively, and the tensile strength under  $750 \text{ }^\circ\text{C}$  along the build-up direction is 550 MPa and under  $850 \text{ }^\circ\text{C}$  along longitude direction is 625 MPa.

**Key words** laser technique; laser direct deposition;  $\gamma$ -TiAl alloy; microstructure; mechanical properties

## 1 引 言

$\gamma$ -TiAl 基合金具有密度低、高弹性模量、高温强度高和抗氧化性能好及阻燃等优点, 是一种在航空航天、汽车等领域具有重要发展潜力的高温结构材料<sup>[1]</sup>。但  $\gamma$ -TiAl 基合金室温延性很低, 加工成形

非常困难, 限制了其使用的广泛性, 为此, 研究人员正积极发展其近净成形技术, 如粉末冶金<sup>[2,3]</sup>、精密铸造<sup>[4]</sup>、定向凝固<sup>[5]</sup>和激光熔化沉积等<sup>[6~9]</sup>。激光熔化沉积技术是一种先进的数字化添加材料成形技术, 该技术通过高功率激光熔化同步输送的合金粉

收稿日期: 2010-01-25; 收到修改稿日期: 2010-02-23

基金项目: 国家 973 计划(2006CB605206-1)和国家自然科学基金(50871023)资助课题。

作者简介: 张永忠(1970—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事高性能金属零件及梯度复合材料的激光熔化沉积成形等方面的研究。E-mail: yyzhang@grinm.com

末,在成形基板上逐层堆积材料,可以直接由 CAD 模型得到近终形零件,在小批量零件的直接制造、高附加值零件的修复以及梯度复合材料的制备等方面具有明显优势<sup>[10,11]</sup>。TiAl 金属间化合物合金在激光熔化沉积过程中由于较高热应力的存在,极易发生开裂,且很难通过改变工艺参数来解决<sup>[6]</sup>,将钛合金基体适度预热可以避免开裂的发生<sup>[8]</sup>,但预热会使得工艺变得复杂。H. P. Qu 等<sup>[9]</sup>通过激光熔化沉积技术制备出具有定向柱晶的 Ti-47Al-2.5V-1Cr (合金粉末成分中元素前的数字代表该元素在合金中的原子数分数,%)合金薄壁并分析了组织及室温拉伸性能,没有对该沉积材料的开裂行为进行分析和说明。本文通过激光熔化沉积制备出  $\gamma$ -TiAl 合金(Ti-47Al-2Cr-2Nb-0.5W-0.15B)样品,着重分析其开裂行为及控制方法、凝固组织及室温和高温下的力学性能。

## 2 材料及试验过程

激光熔化沉积用  $\gamma$ -TiAl 合金粉末采用等离子体感应熔炼气体雾化工艺制备,由中国科学院金属研究所提供,粉末粒度为 -60 目(250  $\mu\text{m}$ ), $\gamma$ -TiAl 合金粉末的名义成分为 Ti-47Al-2Cr-2Nb-0.5W-0.15B。激光熔化沉积在配有 5 kW CO<sub>2</sub> 横流激光器的专用系统上进行,采用焦距为 350 mm 的铜反射聚焦镜对激光束进行聚焦,光斑直径约为 3.0 mm;采用同轴方式送粉,送粉载气为氩气,载气流量为 2.5 L/min。激光熔化沉积在保护气氛箱内进行,沉积前通过预抽真空、充氩气清洗将箱体内氧体积分数降低至  $2 \times 10^{-5}$  以下。沉积基板为 TC4 钛合金板,尺寸为 120 mm  $\times$  120 mm  $\times$  6 mm,表面经 400# 砂纸打磨后用乙醇擦拭干净。沉积过程中送粉速率设定为 3.2 g/min,激光功率为 2.0 kW,激光头沿高度方向的移动距离可根据观测实际沉积情况实时加以调整,以保证粉末的汇聚点与激光熔池相重合。

沉积后沿平行和垂直于激光扫描方向切取样品,制成金相试样,采用 Axiovert 200 MAT 光学显微镜(OM)及 S-4800 扫描电镜(SEM)观察其微观组织,采用 D/max-2200 PC X 射线衍射(XRD)仪分析经加工的沉积材料表面。将激光沉积的薄壁在箱式电阻炉中 650  $^{\circ}\text{C}$  保温 2 h 后进行空冷的去应力退火处理,沿薄壁的高度及长度方向切取试样,加工成如图 1 所示的拉伸试样,在 Instron 拉伸试验机上进行室温及高温拉伸试验,加载速率为 0.3 mm/min,用 S-4800 扫描电镜观察断口形貌。

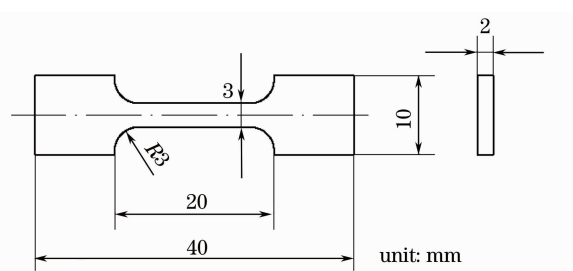


图 1 拉伸性能测试样品尺寸图

Fig. 1 Dimensional drawing of the sample for tensile testing

## 3 试验结果与分析

### 3.1 激光熔化沉积工艺

首先尝试采用单道往复沉积方式和不同的扫描速度沉积制备出长度为 80 mm 的薄壁,实验发现,在沉积数层后,在薄壁长度方向约每隔 10 mm 就出现一条垂直于基板的裂纹,改变扫描速度(3~6 mm/s)均不能避免开裂的发生,这主要与沉积时材料内部存在较高的热应力有关。有限元分析表明,在沉积层顶部及界面结合区存在拉应力区,且在沉积初期阶段随层数增加拉应力存在累积增大并趋于平衡和逐渐降低的过程,当累积瞬时热应力超过沉积材料的高温强度时将导致热裂纹的产生<sup>[12]</sup>。沉积裂纹形成后将释放沉积材料内部的热应力,在裂纹尖端应力的作用下,继续沉积时裂纹会沿高度方向有一定的延伸,随后裂纹逐渐愈合。在沉积材料出现开裂后,继续沉积一定高度后,由于沉积材料的凝固收缩作用,会导致沉积薄壁两端与基板结合处脱开,从而使得沉积时通过基体传热的能力下降和温度梯度的下降,相应的热应力水平逐渐下降,继续沉积时材料裂纹渐渐愈合。图 2 给出了激光熔化沉积 80 mm 长薄壁的情况,共连续沉积 180 层,在沉积 10 层左右开始形成垂直于基板的裂纹,沉积到 100 层后裂纹完全消除,薄壁底部两端与基板已经完全脱开。薄壁顶部出现的高低起伏与薄壁的开裂和界面剥离有关,这是由于沉积过程中,沉积头沿高度方向的移动量参照薄壁端部的沉积情况进行调节,使得界面未脱开处所对应薄壁顶部沉积点与送粉头的距离有所变大,同时,相对于界面已脱开位置,此处向基板的传热更快,最终导致与基板良好结合位置对应处薄壁顶部稍低(如图 2 中箭头所指)。所沉积薄壁具有光亮的表面,表明沉积时材料得到了有效的保护,图 2 所示薄壁底部的空缺部分是薄壁从基板上取下时,与基板结合良好的部分被遗留

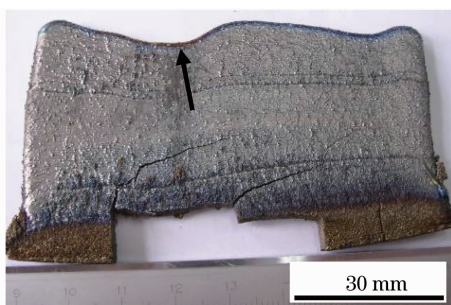


图2 激光熔化沉积 80 mm 长  $\gamma$ -TiAl 合金薄壁的外观  
Fig. 2 Appearance of laser direct deposited 80 mm length  $\gamma$ -TiAl alloy thin wall

在基板表面所致。

在沉积单道薄壁时,激光熔池的温度梯度及热应力大小随薄壁长度的缩短而降低,因此,缩短薄壁的长度可以降低激光熔化沉积材料的开裂倾向。尝试采用如图 2 所示薄壁沉积时的工艺(扫描速度为 6 mm/s,每层高度为 0.22 mm),成功制备出 42 mm×88 mm×3.5 mm 的薄壁样,如图 3 所示。薄壁表面出现的平行痕迹是每扫描沉积 50 层后短暂停留引起的,所沉积薄壁没有出现开裂现象。

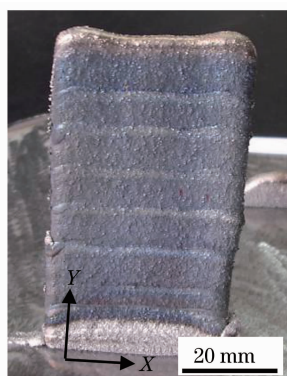


图3 激光熔化沉积的 42 mm 长无裂纹  $\gamma$ -TiAl 合金薄壁  
Fig. 3 Laser direct deposited 42 mm length  $\gamma$ -TiAl alloy thin wall without cracks

在尝试采用激光熔化沉积制备直径 45 mm 的  $\gamma$ -TiAl 合金圆形薄壁零件时,同样出现严重的沿周向开裂现象,将基板预热至 300 °C 亦无法消除,这主要与沉积时圆形薄壁受到基板的约束作用及热应力有关。鉴于激光熔化沉积薄壁时热应力的变化规律以及钛合金激光熔化沉积时不容易开裂的特性<sup>[13]</sup>,先采用激光熔化沉积方法在 TC4 钛合金基板上沉积 20 层 TA12 钛合金<sup>[13]</sup>,随后连续沉积  $\gamma$ -TiAl 合金,成功制备出具有良好尺寸精度和表面质量的圆形薄壁零件,如图 4(a)所示。所沉积圆形薄壁的高度为 45 mm,共沉积 200 层,无开裂发生。由于 TA12 钛合金具有高的强度和韧性,沉积时的热应

力累积水平不足以引起开裂,沉积 TA12 所产生的热累积作用显著降低了随后沉积  $\gamma$ -TiAl 合金时的温度梯度和热应力水平,从而解决了直接沉积  $\gamma$ -TiAl 合金的开裂难题。基于上述经验,通过在 TC4 钛合金基板的侧壁先沉积 200 层 TA12 钛合金(高约 55 mm),然后紧接着沉积 300 层  $\gamma$ -TiAl 合金(约 75 mm 高),成功制备出具有良好质量的 TC4/TA12/ $\gamma$ -TiAl 合金复合的薄壁样品,如图 4(b)所示。TC4 合金与 TA12 合金以及 TA12 合金与  $\gamma$ -TiAl 合金的结合界面良好,沉积材料无开裂。

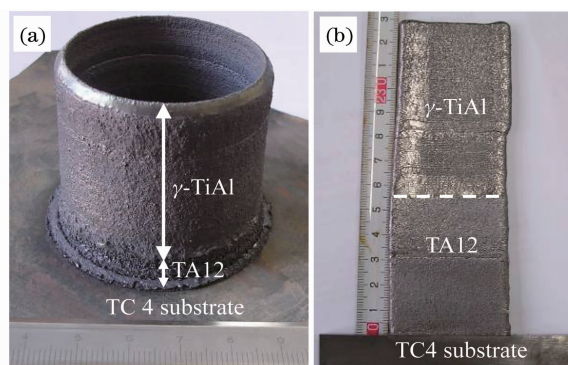


图4 激光熔化沉积的 TA12/ $\gamma$ -TiAl 合金复合圆形薄壁(a)及直薄壁(b)

Fig. 4 Laser direct deposited TA12/ $\gamma$ -TiAl alloy circular thin wall (a) and straight thin wall (b)

### 3.2 组织性能分析

图 5(a)为激光熔化沉积  $\gamma$ -TiAl 合金薄壁沿沉积高度截面的微观组织,可以看出沉积材料内部组织致密,在低倍下能大致分辨出沉积的每一层,层间颜色较亮区域为上层沉积时对已沉积层表面重熔和热影响所致,在高度截面上未出现明显的柱晶组织<sup>[9]</sup>。这可能与所采用的工艺及合金成分的不同有

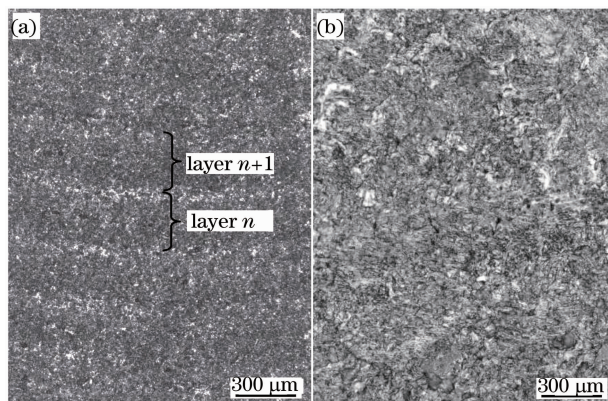


图5 激光熔化沉积的  $\gamma$ -TiAl 合金薄壁高度截面的金相组织照片

Fig. 5 OM microstructure of laser direct deposited  $\gamma$ -TiAl alloy thin wall on transverse section

关。图 5(b)为其高倍组织,已很难分辨沉积的每一层,沉积材料内部组织均匀,主要由不同取向的层片状晶团组成。图 6 为所沉积薄壁沿垂直和平行于基板截面的 SEM 组织照片,可见,激光熔化沉积  $\gamma$ -TiAl 合金主要为片层结构,在层片晶团交界处存在少量的基体相(如图 6 中箭头所示),此结构特征与文献[6]所报道的相一致,层片晶团的尺寸约  $10\ \mu\text{m}$ 。图 7 为激光熔化沉积  $\gamma$ -TiAl 合金的 XRD 分析结果,所沉积材料主要由  $\gamma$ -TiAl 和  $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al 两

相组成。由 Ti-Al 二元相图可知, $\gamma$ -TiAl 合金在激光熔化沉积过程中将经历由  $L \rightarrow \alpha \rightarrow \alpha + \gamma \rightarrow \alpha_2 + \gamma$  的变化过程,其中 L 代表液相, $\alpha$  代表高温亚稳过渡相, $\gamma$  代表从亚稳过渡相中先析出的  $\gamma$ -TiAl 相,该相具有 L1<sub>0</sub> 结构, $\alpha_2$  代表后析出相,为 Ti<sub>3</sub>Al,具有 DO<sub>19</sub> 结构。片层晶团之间的基体相为  $\gamma$ -TiAl 相,激光熔化沉积过程较快的冷却速率( $10^3 \sim 10^4\ \text{K/s}$ )导致上述细小层片状组织的形成,片层晶团由相互平行的  $\gamma$ -TiAl 和  $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al 两相组成。

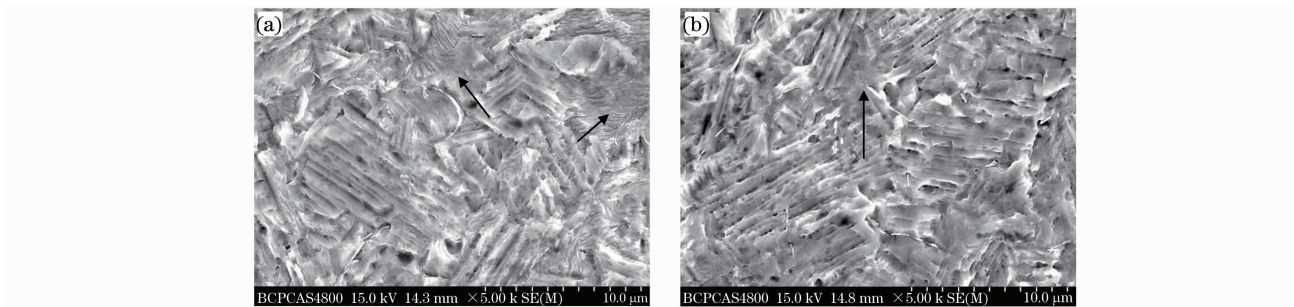


图 6 激光熔化沉积的  $\gamma$ -TiAl 基合金薄壁在横向(a)和纵向(b)的 SEM 组织照片

Fig. 6 SEM microstructure of laser direct deposited  $\gamma$ -TiAl alloy thin wall on transverse (a) and longitude (b) sections

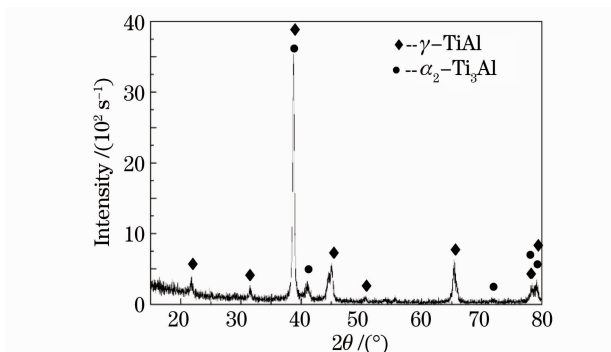


图 7 激光熔化沉积  $\gamma$ -TiAl 合金的 X 射线衍射分析结果

Fig. 7 XRD results of laser direct deposited  $\gamma$ -TiAl alloy

表 1 给出了激光熔化沉积  $\gamma$ -TiAl 合金在室温及高温下的拉伸力学性能,拉伸方向如图 3 所示,表中同时给出了熔模铸造 Ti-48Al-2Nb-2Cr 的相应性能<sup>[14]</sup>。可以看出,室温下激光熔化沉积  $\gamma$ -TiAl 合金在水平及高度方向的强度有很大差别,分别为 810 MPa 和 575 MPa,这可能与沿高度方向层与层之间热影响区的存在有关。通过比较可以看出,激光熔化沉积 Ti-47Al-2Cr-2Nb-0.5W-0.15B 合金的室温及高温强度均高于熔模铸造的 Ti-48Al-2Nb-2Cr 合金。沉积材料沿高度方向 750  $^{\circ}\text{C}$  的强度达 550 MPa,接近室温下的强度,沿水平方向 850  $^{\circ}\text{C}$  的高温拉伸强度达 625 MPa,显示出优异的高温力学性能,细小的片层状结构及晶团有助于提高  $\gamma$ -TiAl 合金的高温蠕变强度。

表 1 激光熔化沉积  $\gamma$ -TiAl 合金的力学性能

Table 1 Mechanical properties of laser direct deposited  $\gamma$ -TiAl alloy

| Sample  | Layer orientation with respect to tensile direction | Test condition         | Tensile strength      | Yield strength            | Elongation |
|---|---|------------------------|-----------------------|---------------------------|------------|
|   |   |                        | $\sigma_b/\text{MPa}$ | $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$ |            |
| Laser direct deposited Ti-47Al-2Cr-2Nb-0.5W-0.15B | Parallel  | Room temperature       | 810                   | —                         | —          |
|   | Perpendicular                                       | Room temperature       | 575                   | —                         | —          |
|   | Perpendicular                                       | 750 $^{\circ}\text{C}$ | 550                   | 330                       | —          |
|   | Parallel  | 850 $^{\circ}\text{C}$ | 625                   | 407                       | —          |
| Investment cast Ti-48Al-2Nb-2Cr                   |   | Room temperature       | 413                   | 331                       | 2.3        |
|   |   | 760 $^{\circ}\text{C}$ | 430                   | 310                       | —          |

图 8 给出了激光熔化沉积  $\gamma$ -TiAl 合金室温及高温拉伸断口的 SEM 照片。可见,在所有测试条件下,所沉积的  $\gamma$ -TiAl 合金均表现出明显的脆性断裂特征,具有典型的沿晶解理断裂形貌,750 °C 下为片层区域的穿晶解理断裂和  $\gamma$  相区的沿晶断裂,850 °C 下为穿晶解理断裂。激光熔化沉积的 Ti-

48Al-2Mn-2Nb 合金在 700 °C 下具有长期的组织稳定性,经 200 h 的 800 °C 退火处理发生完全再结晶<sup>[6]</sup>。因此可以推断,在 850 °C 的高温拉伸过程中,沉积材料内部发生了部分再结晶,使得断口表面片层更加清晰,且片层的厚度有所增加,如图 8(c) 所示。

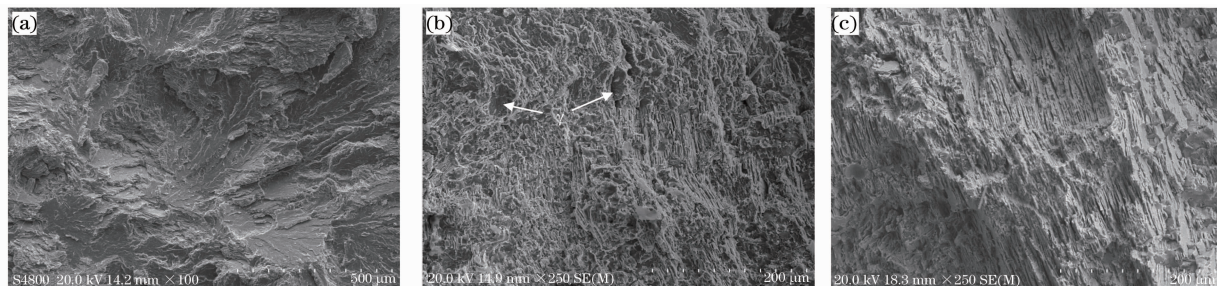


图 8 激光熔化沉积  $\gamma$ -TiAl 合金拉伸断口的 SEM 形貌。(a)室温,(b)750 °C下,(c)850 °C下

Fig. 8 SEM images of tensile fracture surface for laser direct deposited  $\gamma$ -TiAl alloy at (a) room temperature, (b) 750 °C, (c) 850 °C

## 4 结 论

1) 激光熔化沉积 Ti-47Al-2Cr-2Nb-0.5W-0.15B 合金具有较高的开裂倾向,通过缩短激光往复扫描沉积的长度及引入具有较高韧性的 TA12 钛合金作为过渡材料,可大大减缓薄壁沉积时的温度梯度和热应力,成功制备出无开裂和良好质量的薄壁样件;

2) 激光熔化沉积  $\gamma$ -TiAl 基合金的内部组织致密,由  $\alpha_2 + \gamma$  相组成的层片状晶团及少量  $\gamma$  相构成,层片晶团的尺寸约 10  $\mu\text{m}$ ;

3) 激光熔化沉积的  $\gamma$ -TiAl 基合金具有较高的室温及高温强度,沿薄壁长度及高度方向的室温抗拉强度分别为 810 MPa 和 575 MPa,沿高度方向 750 °C 下和长度方向 850 °C 下的高温拉伸强度分别为 550 MPa 和 625 MPa。

## 参 考 文 献

- Li Baohui, Kong Fantao, Chen Yuyong *et al.*. Alloying design of titanium aluminum intermetallics and research progress [J]. *J. Aeronautical Materials*, 2006, **26**(2): 72~78  
李宝辉,孔凡涛,陈玉勇等. TiAl 金属间化合物的合金设计及研究现状 [J]. *航空材料学报*, 2006, **26**(2): 72~78
- L. M. Hsiung, T. G. Nieh. Microstructure and properties of powder metallurgy TiAl alloys [J]. *Mater. Sci. Eng. A*, 2004, **364**(1-2): 1~10
- Lu Xin, Zhao Liming, Qu Xuanhui. Advances in powder metallurgy of TiAl intermetallics [J]. *Materials Review*, 2006, **20**(8): 69~71, 79  
路新,赵丽明,曲选辉. 粉末冶金 TiAl 金属间化合物的研究进展 [J]. *材料导报*, 2006, **20**(8): 69~71, 79
- M. T. Jovanovic, B. Dimcic, I. Bobic. Microstructure and mechanical properties of precision cast TiAl turbocharger wheel [J]. *J. Mater. Proc. Technol.*, 2005, **167**(1): 14~21
- Fu Hengzhi, Ding Hongsheng, Chen Ruirun *et al.*. Directional solidification technology based on electromagnetic cold crucible to

prepare TiAl intermetallics [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2008, **37**(4): 565~570

傅恒志,丁宏升,陈瑞润等. 钛铝合金电磁冷坩埚定向凝固技术的研究 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2008, **37**(4): 565~570

- D. Srivastava, I. T. H. Chang, M. H. Loretto. The effect of process parameters and heat treatment on the microstructure of direct laser fabricated TiAl alloy samples [J]. *Intermetallics*, 2001, **9**(12): 1003~1013
- X. D. Zhang, C. Brice, D. W. Mahaffey *et al.*. Characterization of laser-deposited TiAl alloys [J]. *Scripta Materialia*, 2001, **44**(10): 2419~2424
- W. P. Liu, J. N. DuPont. Fabrication of carbide-particle-reinforced titanium aluminide-matrix composites by laser-engineered net shaping [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2004, **35**(3): 1133~1140
- H. P. Qu, H. M. Wang. Microstructure and mechanical properties of laser melting deposited  $\gamma$ -TiAl intermetallic alloys [J]. *Mater. Sci. Eng. A*, 2007, **466**(1-2): 187~194
- Lijue Xue. Direct manufacturing of net-shape functional components by laser consolidation process [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3179~3191
- Wang Huaming, Zhang Shuquan, Wang Xiangming. Progress and challenges of laser direct manufacturing of large titanium structural components [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3204~3209  
王华明,张述泉,王向明. 大型钛合金结构件激光直接制造的进展与挑战 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(12): 3204~3209
- Shi Likai, Gao Shiyong, Xi Mingzhe *et al.*. Finite element simulation for laser direct depositing processes of metallic vertical thin wall parts: II. the simulation for thermal stress field during depositing processes [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2006, **42**(5): 454~458  
石力开,高士友,席明哲等. 金属直薄壁件激光直接沉积过程的有限元模拟 II. 沉积过程中热应力场的模拟 [J]. *金属学报*, 2006, **42**(5): 454~458
- Zhang Yongzhong, Huang Can, Wu Fuyao *et al.*. Microstructure and properties of laser direct deposited TA12 titanium alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3215~3219  
张永忠,黄灿,吴复尧等. 激光熔化沉积 TA12 钛合金的组织及性能 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(12): 3215~3219
- London, D. E. Larsen Jr, D. A. Wheeler *et al.*. Investment cast gamma titanium aluminide alloys: processing, properties and promise [C]. *Structural Intermetallics*, Champion, 1993. 151~157