

激光增材制造 Ti6Al4V-Inconel718 功能梯度材料的成分变化和微观结构演变

黄金鑫¹, 孙中刚¹, 常 辉^{1,3}, 唱丽丽², 邢 飞², 周 廉¹

(1. 南京工业大学, 江苏 南京 210009)

(2. 南京中科煜宸激光技术有限公司, 江苏 南京 210038)

(3. 南京尚吉增材制造研究院有限公司, 江苏 南京 210038)

摘 要: 利用激光增材制造技术制备了 Ti6Al4V/Inconel718 功能梯度材料, 研究了该梯度材料的成分及相组成、显微组织和显微硬度的变化。研究表明: 沿组成梯度方向发生了一系列相变: $\alpha+\beta \rightarrow \beta+\text{Ti}_2\text{Ni}+\text{TiCr}_2+\text{Ti-Fe} \rightarrow \beta+\text{TiNi}+\text{TiCr}_2+\text{Ti-Fe} \rightarrow \gamma+\text{Laves}$, 过渡层主要是由 TiNi 和 Ti_2Ni 以及 Ti-Cr 和 Ti-Fe 等二元相组成的混合物; 沿材料底部至顶部微观组织发生了由魏氏 α 片层组织转变为等轴 β 晶组织, 再由等轴 β 晶组织外延生长为细小树枝晶组织; 显微硬度结果表明: 硬度的增加主要与 α 相体积分数的减少, β 相及 Ti-Ni、Ti-Cr 和 Ti-Fe 析出相的增加, 以及固溶硬化和晶粒细化作用有关, 本研究中最大值为 8230 MPa。

关键词: 激光增材制造; 功能梯度材料; Ti6Al4V/Inconel718; 成分; 微观结构

中图分类号: TB331

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2020)08-2813-07

由钛合金制造的大型金属结构件 (large metallic structural components, LMSCs) 用作承载部件, 由于其具有非常良好的性能, 如高的比强度, 在航空航天中发挥着重要作用^[1]。然而在实际应用中, 航空航天热端部件并非在恒定温度下工作, 同一部件不同部位承受的温度和力学性能不同, 因此 LMSCs 受此问题的影响很大。然而, 具有组成和微观结构空间梯度的材料为这一问题提供了可能的解决方案, 因为它们具有许多特性, 例如性能的梯度, 这是传统材料无法实现的。具有高强度的材料在应力高的地方使用, 反之亦然, 这种承载部件的设计称为功能梯度材料 (functionally graded materials, FGMs)^[2]。通过这种方式, 可以显著降低成本, 提高承载部件的综合性能并减少部件最终质量。目前, FGM 的制备方法很多, 常用的有粉末冶金法、等离子喷涂法、自蔓延高温合成法、气相沉积法、离心铸造法、增材制造工艺等^[3]。

目前, 国内外已有大量关于激光沉积增材制造功能梯度材料的报导。Abioye^[4]等人使用激光金属沉积技术同时进给 Ni 粉和商业纯钛, 制造出成分连续变化的 Ti-Ni 梯度层, 分析了微观结构、相组成和显微硬度。Bobbio^[5]等人通过逐层定向能量沉积增材制造技术并

结合实验表征和计算分析研究了从 Ti-6Al4V 到 Invar 36 (64%Fe, 36%Ni, 质量分数) 分级的材料, 确定了微观结构、组成、相和显微硬度作为 FGM 内位置的函数, 指出过渡层中生成的 FeTi, Fe_2Ti , Ni_3Ti 和 NiTi_2 相是 FGM 制造过程中开裂的主要原因。Lin^[6-8]等人研究了激光增材制造制备的 Ti/Rene88DT 合金、Ti6Al4V/Rene88DT 合金和 Ti/Ni 合金的组织 and 相演变。

在本研究中, 由 Ti6Al4V 和 Inconel718 制造功能梯度材料。Ti6Al4V 为 $\alpha+\beta$ 型双相钛合金, 由于其比强度高, 高温性能好, 在航空航天领域有广泛应用。Inconel718 是含铌、钼的镍铬铁合金, 在 650 °C 以下时具有高强度、良好的韧性以及在高低温环境均具有耐腐蚀性, 可广泛应用于各种高要求的场合。设计此 FGM 不仅可以降低结构质量和制造成本, 还可以突破钛合金规格和品种的限制。因此, 研究 Ti6Al4V/Inconel718 功能梯度材料是有价值的^[9]。本研究主要通过激光增材制造 (laser additive manufacturing, LAM) 技术制备 FGM。LAM 是以激光为热源, 通过高功率激光将粉末与基体表面加热并熔化快速凝固后形成沉积层, 过程中通过连续改变双桶送粉器中 Ti6Al4V 和 Inconel718 粉末的配比, 制造出层间元素含量连续变

收稿日期: 2019-08-18

基金项目: 国家自然科学基金 (51875274)

作者简介: 黄金鑫, 男, 1994 年生, 硕士生, 南京工业大学先进金属材料研究院, 材料科学与工程学院, 江苏 南京 210009, E-mail: 1021848291@qq.com

化的梯度沉积层。研究了 Ti6Al4V 沉积层、Inconel718 沉积层和梯度区域的化学成分、微观结构和显微硬度，揭示了它们之间的关系，这对 FGM 的设计和应用具有重要意义。

1 实验

实验使用 RC-LDM-8060 大型激光增材制造设备制造 Ti6Al4V/Inconel718 功能梯度材料，该系统由 YLS-3000 光纤激光器、同轴送粉激光头、双桶送粉器以及 3 轴数控机床等组成。实验在氩气保护的手套箱内进行，控制氧含量低于 50 μL/L，激光功率 1800 W，激光扫描速度 360 mm/min，送粉速率 10 g/min，光斑直径 3 mm，多道搭接率 50%，每层抬升高度 0.8 mm。实验选用粒径 100~200 μm 的 Ti6Al4V 球形粉末和粒径 53~150 μm 的 Inconel718 球形粉末，化学成分见表 1。基板材料选用 Ti6Al4V，打印试样尺寸为 25 mm×15 mm×15 mm。打印策略为：首先，将纯 Ti6Al4V 粉末沉积 5 层到基板上，调节送粉量为 90%Ti6Al4V+10% Inconel718，沉积 2 层，以此类推直到加到 30%Inconel718 为止，最后 4 层沉积纯 Inconel718，沉积示意图如图 1 所示，本实验粉末比例均为体积比。

通过电火花线切割加工从试样中部切取若干尺寸为 5 mm×5 mm×5 mm 的金相试样，金相试样经镶嵌、预磨和抛光后对其进行腐蚀，腐蚀液为 Kroll’s 试剂

(HF:HNO₃:H₂O=1:2:7)。采用 ZEISS 光学金相显微镜 (OM) 和带能谱 (EDS, XMS60) 的 JSM-6360LV 扫描电子显微镜 (SEM) 分析梯度涂层金相组织及相组成。通过 SmartLabTM 3KW 型 X 射线衍射仪 (XRD) 对 FGM 不同组分进行物相分析。

采用 HVS-1000A 型显微硬度计沿成分梯度方向测量梯度涂层的显微硬度，载荷为 0.98 N，保压时间为 10 s。

2 结果与分析

2.1 组成梯度方向上的成分变化及相组成

通过 EDS 能谱分析仪沿组成梯度方向以 0.25 mm 的间隔做一系列的点扫描。图 2a 和 2b 为沿垂直方向由基材到梯度涂层顶部的 EDS 分析的结果。其中，Ti6Al4V 合金和 Inconel718 合金的主要元素，即 Ti、Ni、Fe、Cr，在过渡区沿组成梯度的方向呈现出相当好的线性关系，Ti 元素含量越来越少，而 Ni、Fe、Cr 元素含量随之缓慢升高；对于其他微量合金元素，如 Al、Mo、Nb、V 等，得到的元素含量表现出一定程度的非线性关系，一方面可能是由于激光重熔过程中元素烧损导致的，另一方面可能是由于激光功率存在一定的波动引起的^[10]。

本研究通过激光增材制造技术 (LAM)，使用了 5 组不同含量的合金粉末分别制备出涂层，并进行了 X

表 1 Ti6Al4V 和 Inconel718 的化学成分

Table 1 Chemical composition of Ti6Al4V and Inconel718 powder (ω/%)

Powder	Fe	Al	Cr	Nb	Mo	V	O	C	Si	Ti	Ni
Ti6Al4V	0.15	6.02	-	-	-	4	0.16	0.06	0.04	Bal.	-
Inconel718	17.32	0.54	19.2	5.16	3.17	0.01	0.03	0.03	0.33	1	Bal.

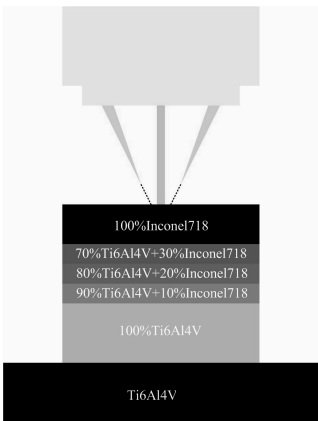


图 1 激光增材制造 FGM 示意图

Fig.1 Schematic diagram of laser additive manufacturing FGM

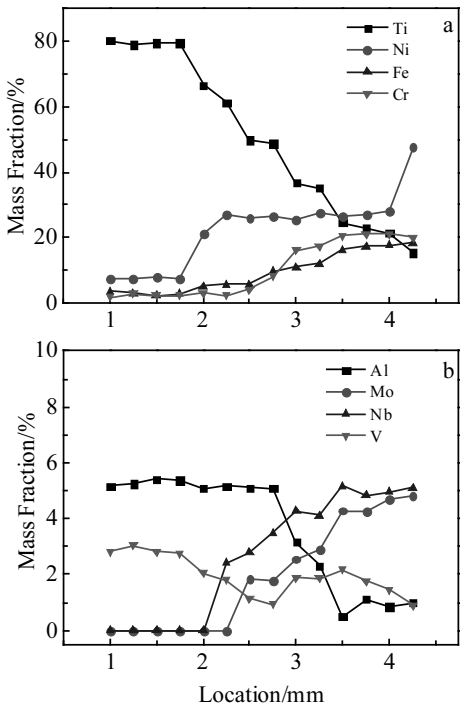


图 2 Ti6Al4V/Inconel718 梯度涂层元素含量

Fig.2 Element content of Ti6Al4V/Inconel718 gradient coating

射线衍射图谱分析, 结果如图 3 所示。实验确定了沉积层中存在 TiNi 和 Ti₂Ni 相。XRD 分析结果表明 5 组不同含量涂层的相变为 $\alpha + \beta \rightarrow \alpha + \beta + \text{Ti}_2\text{Ni} \rightarrow \beta + \text{TiNi} \rightarrow \gamma + \text{Laves}$ 。然而, Ti6Al4V 与 Inconel718 粉末中的合金元素种类繁多, 在激光沉积梯度涂层过程中, 多种元素扩散熔入沉积层, 各种元素相互反应可能生成各种金属间化合物, 镍、铬、铁都是钛的 β 稳定元素, 可以与钛发生共析反应, 生成金属间化合物。根据 Ti-Cr 和 Ti-Fe 二元合金相图可知, Ti 与 Cr 可生成 TiCr₂, Ti 与 Fe 可生成 TiFe₂、TiFe 等化合物, 但 XRD 结果并没有显示出这几种相, 后面通过 SEM 及 TEM 分析。

2.2 Ti6Al4V/Inconel718 梯度材料的微观组织结构

图 4 显示了从纯 Ti6Al4V 到纯 Inconel718 的组成梯度沿垂直于激光扫描方向的整体微观结构。结果表明, 纯 Ti6Al4V 的沉积层中表现为粗大的柱状 β 晶生长, 在沉积过程中, 逐渐形成了沿堆积方向的优选晶体

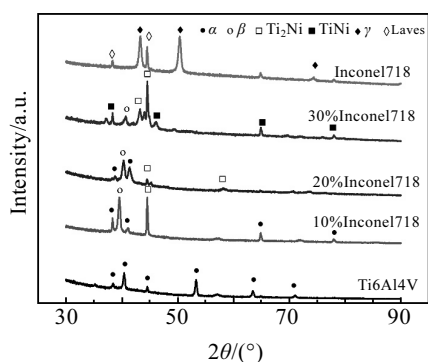


图 3 Ti6Al4V/Inconel718 梯度涂层的 XRD 图谱

Fig.3 XRD patterns of Ti6Al4V/Inconel718 gradient coating

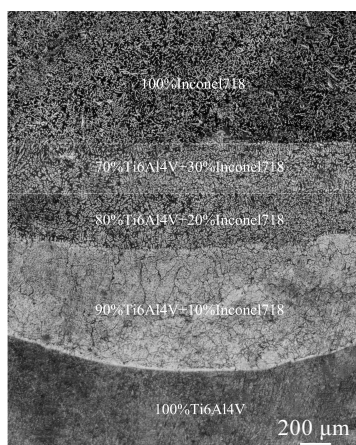


图 4 Ti6Al4V/Inconel718 沿梯度方向的整体宏观结构

Fig.4 Overall macrostructure of Ti6Al4V/Inconel718 along the gradient direction

取向, 其生长方向基本垂直于基底。沿组成梯度方向, 各过渡层之间结合良好, 组织由粗大的柱状晶转变为等轴晶再转变为树枝晶。随着 Inconel718 含量的增加, 液相熔池中合金元素数量增多, 溶质浓度升高, 导致成分过冷, 形核率增大, 凝固过程中形成更细小的枝晶^[1]。

图 5 显示了从纯 Ti6Al4V 到纯 Inconel718 的组成梯度各个位置处的微观结构。如图 5a 所示, 纯 Ti6Al4V 沉积层中微观组织为细小的网篮组织, 组织中存在部分 α 集束, 合金组织由细长状 α 相和板条间 β 相组成, 组织较为均匀, 并且随着打印厚度的增加, β 晶粒尺寸减小。图 5b 为纯 Ti6Al4V 向 10%Inconel718 发生转变的部分, 可以看出两者结合良好且有一条明亮的冶金结合层。当开始添加 10%Inconel718 时, 沉积层中网篮组织消失, 取而代之的是等轴组织, 且有大量二次相析出。图 5c 为 10%Inconel718 向 20%Inconel718 发生转变的部分, 随着打印高度及 Inconel718 含量的增加, 现有的 β 晶胞的微观结构发生显著变化: 过渡区域为连续均匀变化, 晶胞尺寸由平均 74 μm 减小为 32 μm , 且 β 相含量增多。晶胞间距的减小可能是由于组合物已达到等轴晶向树枝晶转变的条件, 因为已知的这种转变主要伴随着晶胞间距的减小。当继续增加 Inconel718 含量至 30%时, β 等轴晶开始向树枝晶转变, 如图 5d 所示。具体而言, 在 LAM 过程中, 粉末里 Inconel718 含量增加至 30%时, 细小的 β 等轴晶外延生长为细条状, 并随着打印高度的增加形成了 β 枝晶组织。图 5e 为 30%Inconel718 向纯 Inconel718 过渡的部分, 其变化过程是由细小的枝晶结构逐渐转变为等轴的树枝晶结构。当 Inconel718 增加到 100%, TiNi 相的体积分数逐渐增加, 并且最终获得了等轴的 TiNi 树枝状晶体 (图 5f)。

为了更详细和系统地研究 Ti6Al4V/Inconel718 梯度材料的组织演变, 使用 SEM 研究了沿组成梯度的主要微观结构变化。图 6 显示了沿纯 Ti6Al4V 至纯 Inconel718 的各组成梯度之间的微观结构。图 6a 为纯 Ti6Al4V 沉积层的截面的微观结构, 从整体看为大量灰色长条状的初生 α 相相互交错编织成的网篮组织, α 相长度在 6 μm 左右, 宽度在 1 μm 左右, 中间也有短细的 α 相, 这是由于在后续沉积过程中对已沉积层产生退火作用而析出的二次相。另外, 随着打印高度的增加, α 板条间的浅色相 (β -Ti) 量增多。图 6b 显示了由纯 Ti6Al4V 向 10%Inconel718 过渡区域的微观结构。随着 Inconel718 的添加, 结构由网篮组织转变为等轴组织, 中间熔合区为一条致密、无裂纹的冶金带。 β 相中有棒状物质及圆形物质析出, EDS 能谱分析表明为 Ti-7.2Ni-5.3Al-3.1V。图 6c 为 10%Inconel718 向

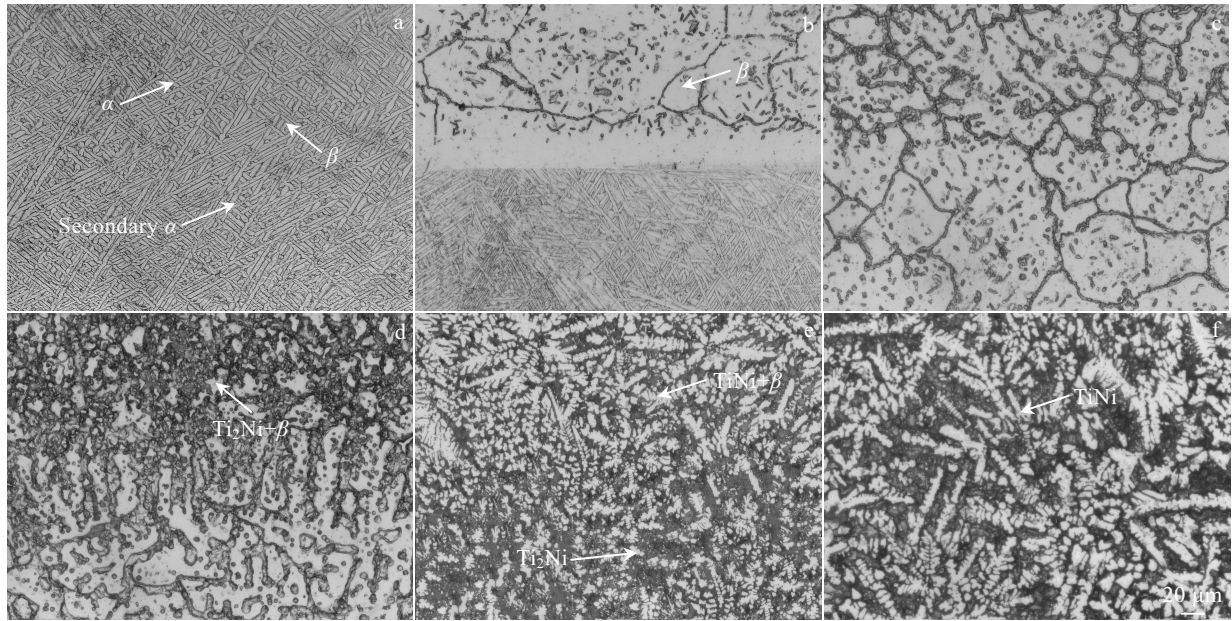


图 5 沿组成梯度各个位置处的微观结构

Fig.5 Microstructures at various locations along the composition gradient: (a) 100%Ti6Al4V, (b) 100%Ti6Al4V-10%Inconel718, (c) 10%Inconel718-20%Inconel718, (d) 20%Inconel718-30%Inconel718, (e) 30%Inconel718-100%Inconel718, and (f) 100%Inconel718

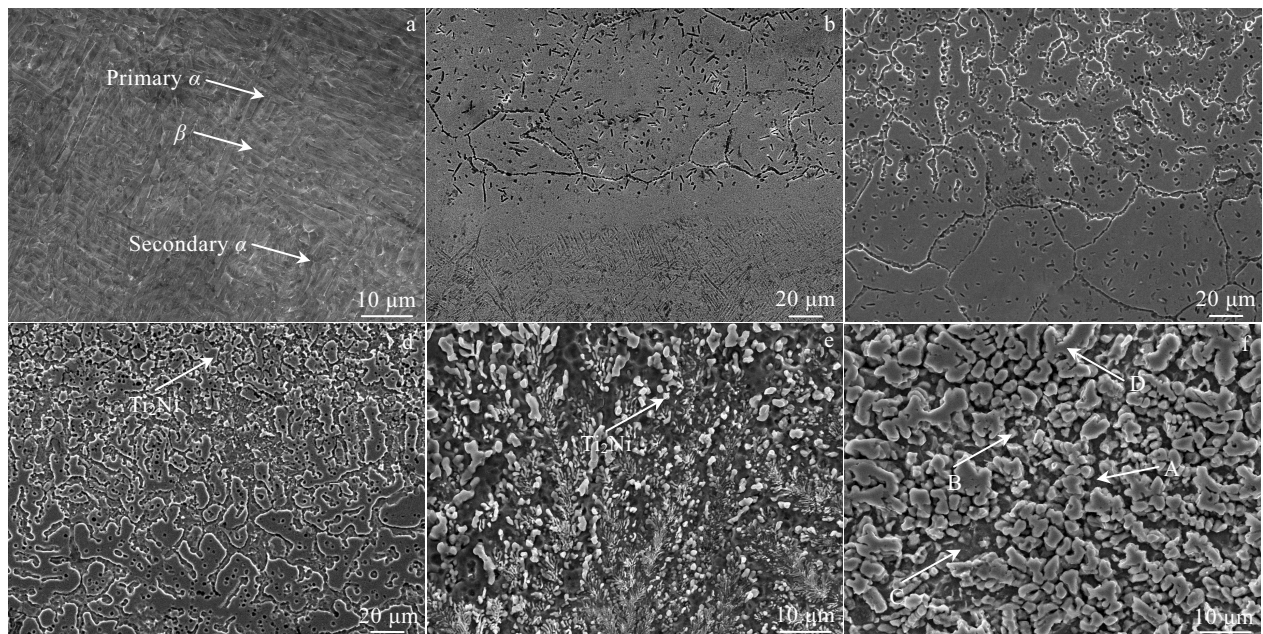


图 6 沿组成梯度各个比例的 SEM 照片

Fig.6 SEM images along the composition gradient: (a) 100%Ti6Al4V, (b) 100%Ti6Al4V-10%Inconel718, (c) 10%Inconel718-20%Inconel718, (d) 20%Inconel718-30%Inconel718, (e) 30%Inconel718, and (f) 100%Inconel718

20%Inconel718 转变的部分, 微观结构发生显著变化, β -Ti 等轴组织逐渐转变为树枝晶组织, 图中亮色的 β 相含量明显增多。随着 Inconel718 增加至 30%, β 树枝

晶含量增加且发生了细化, 且树枝状的 β -Ti 沉淀物被一种细小的 Ti_2Ni 立方沉淀物代替, 在基质中非常均匀地分散, 同时在前面的 β 晶界处形成了一些离散的

Ti₂Ni 颗粒, 如图 6d, 6e 所示。图 6f 为 100%Inconel718 的扫描电镜图, β 晶胞生长已经完全变为 β 树枝状生长, Ti₂Ni 析出物的量急剧减少。随着打印高度的进一步增加, 发现一些 Ti₂Ni 板条和 Ti₂Ni 颗粒在 β 树枝晶中沉淀, 当组合物达到 Ti-23.9Ni-17.4Fe-22.6Cr (at%) 时, 得到了稳定的 β 树枝状结构。

表 2 为图 6f 中 4 种不同的相分别进行 5 次 EDS 点扫描测试结果。在标记为“A”的相中发现 Ti、Ni、Cr、Fe 的原子分数相差不大, 推测可能含 TiNi 相以及 TiCr₂、Ti-Fe 相。在标记为“B”的相中发现 Ti 与 Ni 的原子比接近 2:1, 推测 B 相为 Ti₂Ni 相。C 点是在固溶体组织的晶粒内, 元素成分表明, 此处的 Ti 比较少, Ni、Cr、Fe 占多数, 而这 3 种元素正是 Inconel 718 的主要成分, 说明这种相是以 Inconel718 的基体 γ 相为基

本成分, 属于 Ni-Cr-Fe 基固溶体。在标记为“D”的相中发现 Ti 与 Ni 的原子分数几乎相等, 因此被确定为 TiNi 相^[4]。

图 7 为 Ti6Al4V/Inconel718 功能梯度材料透射电镜像和选区电子衍射花样。结果表明: 纯 Ti6Al4V 沉积层的微观组织为片条状 α 组织, 内部以位错为主, 如图 7a 所示。当加入 10%的 Inconel718 时, 片层状 α 组织发生溶解破碎, 有等轴化趋势, 如图 7b 所示。在 SEM 中没有清楚地分辨出的一相, 通过 TEM 中的选区电子衍射和成像得到了结论。图 7c 是 30%Inconel718 含量的明场 (BF) 显微照片, 其中可以观察到 NiTi 枝晶臂之间形成的 Ti₂Ni 晶粒; 图 7d 显示了白色颗粒的选区电子衍射花样 (SAED), 并且它可以被指为 Ti₂Ni 的 [001] 区轴花样。

2.3 成分梯度变化对涂层显微硬度的影响

Ti6Al4V/Inconel718 梯度涂层硬度如图 8 所示, 硬度变化的整体趋势为先增大后减小。在 Ti6Al4V 沉积中, 合金的硬度变化不明显, 当靠近梯度层时, 激光熔合金元素使其与 Ti 发生反应生成脆性相导致硬度有所增加。开始加入 Inconel718 时, 可以观察到硬度明显增加, 直至 Inconel718 的含量增加到 20% 时, 合金硬度 (HV) 达到最大值 8230 MPa。随着

表 2 图 6f 中标记点的相的元素组成

Table 2 Elemental composition of the phases labeled in Fig.6f (at%)

Symbol	Ti	Ni	Cr	Fe
A	25.6	24.0	22.7	17.3
B	40.6	21.8	16.2	10.1
C	8.5	47.0	20.0	15.0
D	35.0	38.8	6.7	9.6

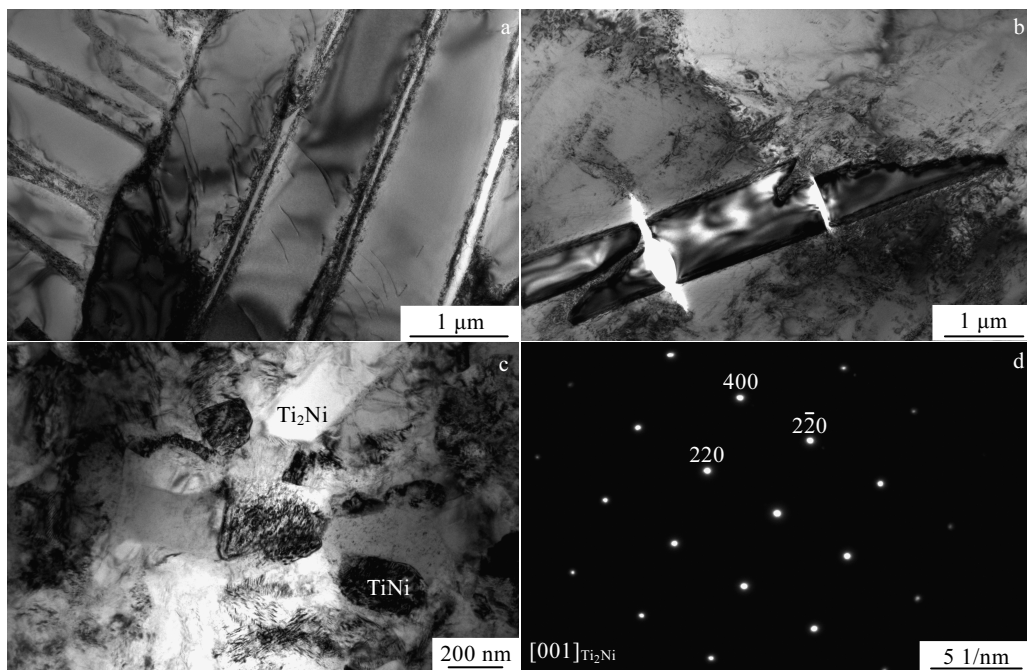


图 7 Ti6Al4V/Inconel718 功能梯度材料透射电镜明场像

Fig.7 TEM bright field images of the Ti6Al4V/Inconel718 FGMs: (a) 100%Ti6Al4V, (b) 10%Inconel718, (c) 30%Inconel718; (d) SAED pattern of the [001] zone from the Ti₂Ni grain

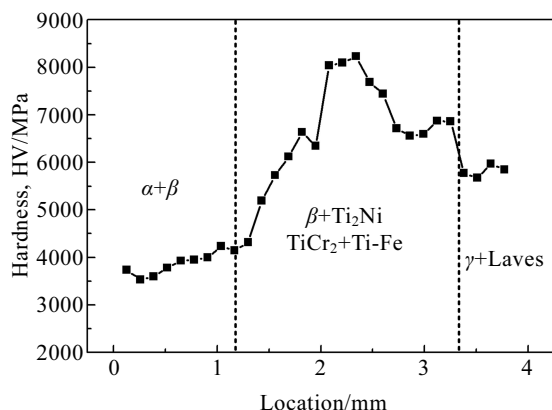


图 8 Ti6Al4V/Inconel718 梯度涂层沿梯度方向的硬度

Fig.8 Hardness along the gradient direction of Ti6Al4V/Inconel718 gradient coating

Inconel718 含量的继续增加, 硬度逐渐降低, 直至达到 100%Inconel718 时, 硬度不再降低, 趋于稳定。根据组合物的成分变化和微观结构演变结果分析, 认为随着 Inconel718 的增加, 合金硬度增加的主要原因是:

(1) 随着 Ni、Cr、Fe 含量的增加, α 相体积分数逐渐减少, β 相和 Ti-Ni、Ti-Cr 和 Ti-Fe 析出相不断增加;
 (2) 随着 Ni、Cr、Fe 含量的增加, α 相不断得到细化;
 (3) 随着 Ni、Cr、Fe 含量的增加, 固溶硬化作用得到增强;
 (4) 在激光增材制造持续重复的快冷条件下得到了较为细小的晶粒组织。当 Inconel718 含量增加至 30% 时, 根据 XRD 及 SEM 分析结果可知, 沉淀物中 TiCr_2 和 Ti-Fe 析出相减少, 以及 β 等轴晶已经转变为枝晶, Ti_2Ni 相主要以颗粒的形式存在于 β 枝晶周围, 具体表现为 Ti_2Ni 相减少, 所以硬度下降。距基材约 3.4 mm 处硬度降到最小值, 此沉积层为纯 Inconel718, XRD 结果表明此层由 γ 和 Laves 相组成, 硬度应在 3000~3500 MPa 范围内波动, 但在激光沉积过程中, 熔池内各种元素发生重熔, 在凝固过程中 Ti 与 Ni、Cr 和 Fe 反应生成少量二次相, 会使硬度提高至 5500~6000 MPa。

3 结 论

1) 通过激光增材制造技术成功制备了从 100%Ti6Al4V 到 100%Inconel718 的功能梯度材料。沿着成分梯度方向, 随着 Inconel718 含量的增加, 合金元素呈一定的线性变化, 且发生了一系列相变:

$\alpha+\beta \rightarrow \beta+\text{Ti}_2\text{Ni}+\text{TiCr}_2+\text{Ti-Fe} \rightarrow \beta+\text{TiNi}+\text{TiCr}_2+\text{Ti-Fe} \rightarrow \gamma+\text{Laves}$ 。

2) 沿成分梯度方向, 各沉积层结合良好, 随着 Inconel718 含量的增加, 微观组织由纯 Ti6Al4V 中细小的网篮组织转变为等轴 β 晶组织并伴有二次相的析出; 继续增加 Inconel718 含量, 等轴 β 晶胞尺寸减小, 并且 β 晶胞外延生长形成了 β 枝晶组织, 且树枝状的 β -Ti 沉淀物被一种细小的 Ti_2Ni 立方沉淀物代替; 最后 β 晶胞完全变为细小的 TiNi 等轴树枝晶组织。

3) 梯度材料的硬度主要取决于沉积过程中生成的相的量和形态。随着 Inconel718 含量的增加, 沉积层中 α 相的体积分数减少, β 相及 Ti-Ni、Ti-Cr 和 Ti-Fe 析出相增加, 并且固溶硬化以及晶粒细化作用得到增强, 导致硬度升高; Laves 相的生成和脆性相的减少则导致了硬度的降低。

参考文献 References

- [1] Li J, Wang H M. *Materials Science & Engineering A*[J], 2013, 560: 193
- [2] Guo Cheng(郭 成), Zhu Weidou(朱维斗), Jin Zhihao(金志浩). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 1995, 24(3): 18
- [3] Li Xin(李 信), Liu Haichang(刘海昌), Teng Yuancheng(滕元成) et al. *Materials Review*(材料导报)[J], 2012, 26(S1): 370
- [4] Abioye T E, Farayibi P K, Kinnel P et al. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2015, 79: 843
- [5] Bobbio L D, Otis R A, Borgonia J P et al. *Acta Materialia*[J], 2017, 127: 133
- [6] Lin X, Yue T M, Yang H O et al. *Acta Materialia*[J], 2006, 54(7): 1901
- [7] Lin X, Yue T M, Yang H O et al. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2007, 38(1): 127
- [8] Lin X, Yue T M, Yang H O et al. *Journal of Engineering Materials and Technology*[J], 2009, 131(4): 041 002
- [9] Onuikie B, Bandyopadhyay A. *Additive Manufacturing*[J], 2018, 22: 844
- [10] Qian Tingting, Liu Dong, Tian Xiangjun et al. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2014, 24(9): 2729
- [11] Liang Yaojian, Tian Xiangjun, Zhu Yanyan et al. *Materials Science & Engineering A*[J], 2014, 599: 242

Compositional Changes and Microstructure Evolution of Ti6Al4V-Inconel718 Functionally Graded Materials by Laser Additive Manufacturing

Huang Jinxin¹, Sun Zhonggang¹, Chang Hui^{1,3}, Chang Lili², Xing Fei², Zhou Lian¹

(1. Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China)

(2. Nanjing Zhongke Raychem Laser Technology Co. Ltd, Nanjing 210038, China)

(3. Shangji Institute for Advanced Materials (Nanjing) Co. Ltd, Nanjing 210038, China)

Abstract: Ti6Al4V/Inconel718 functionally graded materials were fabricated by laser additive manufacturing technology. The composition, phase composition, microstructure and microhardness of the gradient materials were studied. The results show that a series of phase transitions occur along the composition gradient direction: $\alpha+\beta\rightarrow\beta+\text{Ti}_2\text{Ni}+\text{TiCr}_2+\text{Ti-Fe}\rightarrow\beta+\text{TiNi}+\text{TiCr}_2+\text{Ti-Fe}\rightarrow\gamma+\text{Laves}$. The transition layer is mainly composed of binary phases including TiNi, Ti₂Ni, Ti-Cr, Ti-Fe, etc; the microstructure from the bottom to the top of the material changes from the Widmanstätten α -laths structure to the equiaxed β structure, and then it is epitaxially grown from equiaxed β structure into fine dendritic structure. The results of microhardness test show that the increase of hardness is mainly related to the decrease of α phase volume fraction, the increase of β phase, Ti-Ni, Ti-Cr and Ti-Fe phase, solid solution hardening and grain refinement. The maximum value in this study is 8230 MPa.

Key words: laser additive manufacturing; functionally graded material; Ti6Al4V/Inconel718; composition; microstructure

Corresponding author: Sun Zhonggang, Ph. D., Associate Professor, Institute for Advanced Metallic Materials, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, P. R. China, E-mail: sunzgg@njtech.edu.cn