

激光增材制造 TC4/GH4169 梯度结构 微观组织分析

宋晨晨¹, 蔡昱陈¹, 朱禹昊¹, 马广义¹, 刘士博², 吴东江¹

(1.大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024;
2.Singapore Institute of Manufacturing Technology, Nanyang Drive 637662, Singapore)

摘要:目的 提高 TC4/GH4169 梯度过渡界面的元素分布均匀性, 削弱界面效应, 制备二维 TC4/GH4169 梯度结构。方法 利用激光增材制造技术, 采用 TC4-90%TC4+10%GH4169-GH4169 的梯度过渡方式制备 TC4/GH4169 一维梯度材料, 并在一维梯度的基础上设计二维梯度结构, 制备 TC4/GH4169 二维梯度材料。利用场发射扫描电子显微镜对 TC4/GH4169 一维和二维梯度材料内的析出相以及各梯度过渡界面的组织形态进行分析, 利用能谱仪对各梯度过渡界面处的元素分布进行分析。结果 一维梯度 90%TC4+10%GH4169-GH4169 界面相比于 TC4-90%TC4+10%GH4169 界面材料相互渗透程度更高。由于 TC4 内 Ni 元素的加入, 在 90%TC4+10%GH4169 内生成了较多的呈交联网状分布的 Ti_2Ni 析出相。二维梯度样件在水平方向的界面波动程度以及材料相互渗透程度相比于沉积方向更高, 其中二维梯度水平方向 TC4-90%TC4+10%GH4169 界面两侧元素充分扩散, 相比于一维梯度 TC4-90%TC4+10%GH4169 界面处的元素分布均匀性显著提高。结论 通过合适的梯度过渡方式以及二维梯度结构设计有效提高了梯度材料过渡界面的元素分布均匀性, 显著削弱了界面效应, 对梯度材料的制备具有指导意义。

关键词: 钛合金; 高温合金; 梯度材料; 激光增材制造; 微观组织

中图分类号: V261.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)03-0326-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.03.035

Microstructure Analysis of TC4/GH4169 Gradient Structure by Laser Additive Manufacturing

SONG Chen-chen¹, CAI Yu-chen¹, ZHU Yu-hao¹, MA Guang-yi¹, LIU Shi-bo², WU Dong-jiang¹

(1. Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Singapore Institute of Manufacturing Technology, Nanyang Drive 637662, Singapore)

ABSTRACT: This paper aims to improve the uniformity of element distribution at the TC4/GH4169 gradient transition interface, weaken the interface effect, and prepare a two-dimensional TC4/GH4169 gradient structure. Using laser additive manufacturing technology, the TC4/GH4169 one-dimensional gradient material is prepared by the gradient transition method of

收稿日期: 2021-05-09; 修订日期: 2021-05-28

Received: 2021-05-09; Revised: 2021-05-28

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金 (DUT19LAB06)

Fund: Supported by Fundamental Research Funds for the Central University (DUT19LAB06)

通讯作者: 马广义 (1982—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为激光增材制造、激光焊接。

Corresponding author: MA Guang-yi (1982—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: laser additive manufacturing, laser welding.

引文格式: 宋晨晨, 蔡昱陈, 朱禹昊, 等. 激光增材制造 TC4/GH4169 梯度结构微观组织分析[J]. 表面技术, 2022, 51(3): 326-332.

SONG Chen-chen, CAI Yu-chen, ZHU Yu-hao, et al. Microstructure Analysis of TC4/GH4169 Gradient Structure by Laser Additive Manufacturing[J]. Surface Technology, 2022, 51(3): 326-332.

TC4-90wt.%TC4+10wt.%GH4169-GH4169, and the two-dimensional gradient structure is designed on the basis of the one-dimensional gradient to prepare TC4/GH4169 two-dimensional gradient material. The field emission scanning electron microscope is used to analyze the precipitates and the microstructure morphology of each gradient transition interface in the TC4/GH4169 gradient material, and the Energy Dispersive Spectrometer is used to analyze the element distribution at each gradient transition interface. The one-dimensional gradient 90wt.%TC4+10wt.%GH4169-GH4169 interface has a higher degree of interpenetration of materials than the TC4-90wt.%TC4+10wt.%GH4169 interface; due to the addition of Ni in TC4, more Ti_2Ni precipitates with intersecting network distribution are formed in 90wt.%TC4+10wt.%GH4169; the degree of interface fluctuation and material interpenetration of the two-dimensional gradient sample in the horizontal direction is higher than that of the deposition direction. Among them, the two-dimensional gradient horizontal direction TC4-90wt.%TC4+10wt.%GH4169 interface is fully diffused on both sides of the interface. Compared with the one-dimensional gradient TC4-90wt.%TC4+10wt.%GH4169, the uniformity of element distribution at the interface is significantly improved. Appropriate gradient transition methods and two-dimensional gradient structure design can effectively improve the uniformity of element distribution at the transition interface of gradient materials, significantly weaken the interface effect, and have guiding significance for the preparation of gradient materials.

KEY WORDS: titanium alloy; superalloy; gradient material; laser additive manufacturing; microstructure

功能梯度材料 (Functionally Gradient Materials, FGM) 是指内部组分的均匀或者非均匀变化, 使材料的微观组织、性能等要素相应改变的一种功能性复合材料。功能梯度材料能够满足航空航天极端苛刻环境下的使役需求, 具有广阔的应用前景^[1]。TC4 密度低, 比强度高, 但其高温性能差, 可靠工作温度为 500 ℃ 以下^[2-6]。GH4169 合金高温强度优异、韧性良好, 但密度大, 比强度低^[7-10]。TC4/GH4169 梯度材料能够结合 2 种材料的优势, 充分满足航空航天关键零部件耐高温-轻量化的使役要求。

Carroll 等人^[11]采用激光直接能量沉积制备了 SS304/Inconel625 功能梯度材料, 结合实验及热力学模型, 发现梯度区产生的二次相是导致材料开裂的主要原因。Li 等人^[12]采用激光金属沉积制备 Ti6Al4V 与 SS316 梯度材料, 梯度层产生开裂的主要原因是由于产生了 2 种脆性和硬度不同的金属间相 (Fe_2Ti 和 FeTi), 设计了新的过渡路径 ($\text{Ti6Al4V} \rightarrow \text{V} \rightarrow \text{Cr} \rightarrow \text{Fe} \rightarrow \text{SS316}$), 减少了金属间相的产生。黄卫东等人^[13]采用快速激光成形技术制备 TC4/Rene88DT 功能梯度材料, 材料沿着梯度方向发生了 $\alpha+\beta \rightarrow \alpha+\beta+\text{Ti}_2\text{Ni} \rightarrow \beta+\text{Ti}_2\text{Ni}$ 一系列复杂相变。此外, 该实验室还针对 Ti60/Ti₂AlNb、Ti/Ti₂AlNb 等梯度材料进行了相关研究^[14-15]。季霄等人^[16]通过激光熔融沉积技术制备 Ti6Al4V/Inconel 625 梯度涂层, 采用合适成分的 Ti6Al4V/Inconel 625 复合材料作为过渡层, 发现显微组织从片层组织转化为等轴组织, 晶间区域内析出较多的 Ti_2Ni 和 CrNi_2 相。

目前激光增材制造金属/金属功能梯度材料的制备大多保持在一个维度内, 在过渡界面特征、元素过渡规律以及析出相的生成方面的研究仍不够深入。本文设计了有效的梯度过渡路径, 采用激光增材制造技

术成形了 TC4/GH4169 一维及二维度梯度材料, 实现材料成分的渐变与均匀过渡, 分析了成形样件过渡界面的微观组织特征, 揭示了不同结合界面间的元素过渡规律。

1 实验材料与方法

成形所用粉末为 TC4 和 GH4169 球形粉末, 粒度约为 45~90 μm, 成形实验前将粉末置于 120 ℃ 烘干箱中烘烤 4 h。粉末内各元素含量如表 1 和表 2 所示。成形基板选用 TC4 基板, 尺寸为 130 mm×130 mm×8 mm。成形前, 用砂纸对基板进行打磨去除表面氧化层。激光增材制造成形系统主要包括: JK1002 型 ND: YAG 连续激光器 (GSI)、数控五轴机床 (RESEM)、DPSF-3D 送粉器 (中航工业) 以及高纯氩气。激光增材制造系统如图 1 所示。

表 1 GH4169 粉末内各元素含量
Tab.1 Elements content in GH4169 powder

wt. %				
Ni	Cr	Fe	Nb	Mo
52.44	18.40	Bal.	4.96	3.03

表 2 TC4 粉末内各元素含量
Tab.2 Elements content in TC4 powder

wt. %				
Ti	C	V	Fe	Al
Bal.	0.01	4.02	0.02	6.17

作为二维梯度材料成形实验的基础与对比, 首先进行一维梯度材料成形, 激光工艺参数为: 激光功率 400 W, 扫描速度 300 mm/min, Z 轴提升量 0.5 mm。一维梯度成形样件为薄壁件。在 TC4 基板上依次成

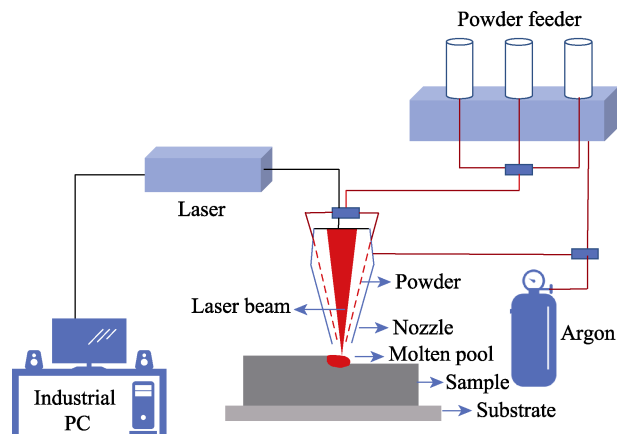


图1 激光增材制造系统示意图
Fig.1 Schematic diagram of laser additive manufacturing system

形3种组分材料,分别为:100%TC4(A)、90%TC4+10%GH4169(B)、100%GH4169(C)。

二维梯度成形样件为块体样件,梯度构建方式如图2a所示,3种材料(A、B、C)成分与一维梯度材料相同,从X、Z横截面可将二维梯度材料划分为9个成形区域,成形路径为: $A_{1,1} \rightarrow B_{1,2} \rightarrow C_{1,3} \rightarrow B_{2,1} \rightarrow B_{2,2} \rightarrow C_{2,3} \rightarrow C_{3,1} \rightarrow C_{3,2} \rightarrow C_{3,3}$,每个成形区域由5个单道单层搭接构成,搭接率为60%,5个单道单层成形时采用往复扫描的形式。激光工艺参数为:激光功率400 W,扫描速度300 mm/min,Z轴提升量1 mm。实验中扫描路径以及工艺参数的选取主要以块体样件的形貌为评价依据,当采用以上扫描路径和工艺参数时,样件形貌平整,无明显氧化和表面粘粉现象,成形样件如图2b所示。

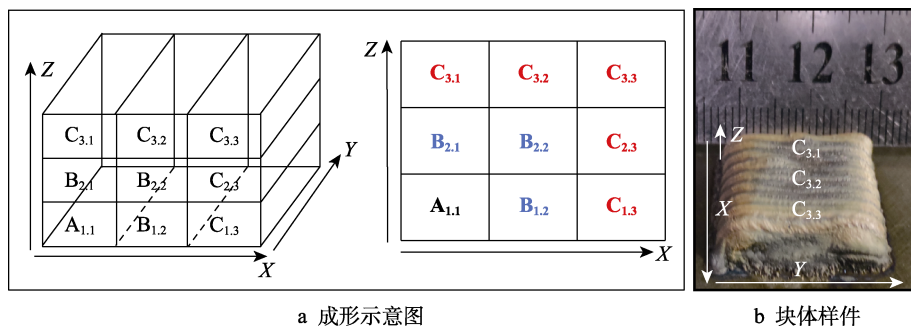


图2 二维梯度块体
Fig.2 Two-dimensional gradient block: a) forming diagram; b) block samples

使用线切割机对一维梯度薄壁样件、二维梯度块体样件所需观察截面进行切割。使用SiC砂纸以及金刚石研磨膏对截面进行磨抛处理,之后使用Kroll试剂(2 mL氢氟酸,5 mL浓硝酸,100 mL水)对样件腐蚀40~60 s。利用扫描电子显微镜(德国蔡司SUPEA55)对组织形态、过渡界面进行观察。使用扫描电镜配备的EDS对组织内不同区域及过渡界面处进行点、线、面的元素分析。

2 结果与讨论

2.1 微观组织特征

图3为一维梯度样件截面微观组织。由图3a可以清楚地分辨出A、B、C3种材料以及A-B、B-C过渡界面,过渡界面形成了良好的冶金结合,其中A-B过渡界面整齐锐利,界限分明,而B-C过渡界面与A-B过渡界面反差明显,界面处出现明显波动,大量的GH4169材料向下扩散渗透。2种过渡界面产生较大区别的主要原因是由于材料成分差异程度的不同,A-B过渡界面是由100%TC4过渡到90%TC4+10%GH4169,2种材料成分差异较小,热物性参数较为接近,而B-C过渡界面是由90%TC4+10%GH4169过渡至100%GH4169,界面两侧材料成分差异较大,

热物性参数产生了较大变化,从而使得两过渡界面出现了明显的差异。

如图3b所示,A-B过渡界面两侧组织特征呈现出明显的区别,在TC4一侧组织为典型的马氏体板条状组织,马氏体板条是由 β -Ti经过马氏体转变形成的 α -Ti,该组织为典型的激光增材制造TC4组织。在90%TC4+10%GH4169一侧组织内出现了粗大的且呈网状交联分布的析出相。在2种材料过渡界面处产生了平面生长带,该平面生长带的形成与熔池的凝固速率以及温度梯度有关^[17-18],在激光增材制造过程中熔池底部往往具有较高的温度梯度,而凝固速率很低,导致温度梯度与凝固速率的比值很高,从而产生了一定厚度的平面生长带^[19]。在90%TC4+10%GH4169与100%GH4169的过渡界面处出现了明显的界面波动,GH4169向90%TC4+10%GH4169一侧发生了大量渗透。出现该界面特征的原因:一方面,TC4的密度为4.44 g/cm³,GH4169的密度为8.2 g/cm³,由于90%TC4+10%GH4169材料内的GH4169含量依然较少,所以其密度与纯GH4169依然相差较大,在成形GH4169时,上一层90%TC4+10%GH4169材料在激光能量作用下发生重熔,这时上层GH4169由于密度较大在重力作用下向下扩散,在扩散一定距离后凝固,从而使得过渡界面起伏;另一方面,在马兰戈尼

对流作用下^[20]，熔池内熔融状态的液态金属处于对流状态，同时由于激光增材制造过程中激光束对于熔池具有一定的搅拌作用，从而进一步促进熔池对流，致使 GH4169 向下层渗透。如图 3a 所示，出现大量 GH4169 块体脱离上层沉积层，凝固后进入到下层材料当中。此外，由图 3a 可以进一步发现，在相同激光功率（400 W）下 GH4169-90%TC4+10%GH4169 界面相比于 90%TC4+10%GH4169-TC4 界面的渗透程度更高，说明密度对于界面波动程度的影响较大。

由于钛合金与高温合金结合过程中所产生的析出相往往对梯度材料的性能不利，当析出相含量过高时，甚至直接导致样件开裂^[21-24]，因此明确析出相的组成及相变路径对于梯度材料研究至关重要。图 3c 为 90%TC4+10%GH4169 材料内析出相的电子显微镜图像。当 GH4169 加入后，TC4 的组织形态变化明显，

基体板条状组织消失，析出相开始大量形成。如图 3c 所示，析出相已经占据了组织内的较大面积，呈链状分布，且链状析出相存在交互连接的趋势，此外组织内还存在析出相的聚集区域。对材料的基体与析出相部位进行元素定量分析，结果如表 3 所示，析出相部位相比于基体部位，Ti 含量降低 19.30%，Ni 升高 299.56%，V 降低 74.45%，Fe 升高 50.34%，Al 降低 55.56%，Cr 升高 62.18%，加入到 TC4 内的 Ni 元素大部分位于析出相内，钛镍原子含量比例约为 2.6:1，而该材料体系内钛镍相主要有 3 种，分别为 TiNi、Ni₃Ti 以及 Ti₂Ni，由析出相的原子比例可以判断该析出相大部分为 Ti₂Ni 相。90%TC4+10%GH4169 材料的相变路径可由钛-镍相图（图 4）进行判断，熔池内的金属在凝固时首先析出 β-Ti，发生 L→β-Ti 反应，之后随温度下降 β-Ti 发生共析反应 β-Ti→α-Ti+Ti₂Ni，Ti₂Ni 相由此大量生成。

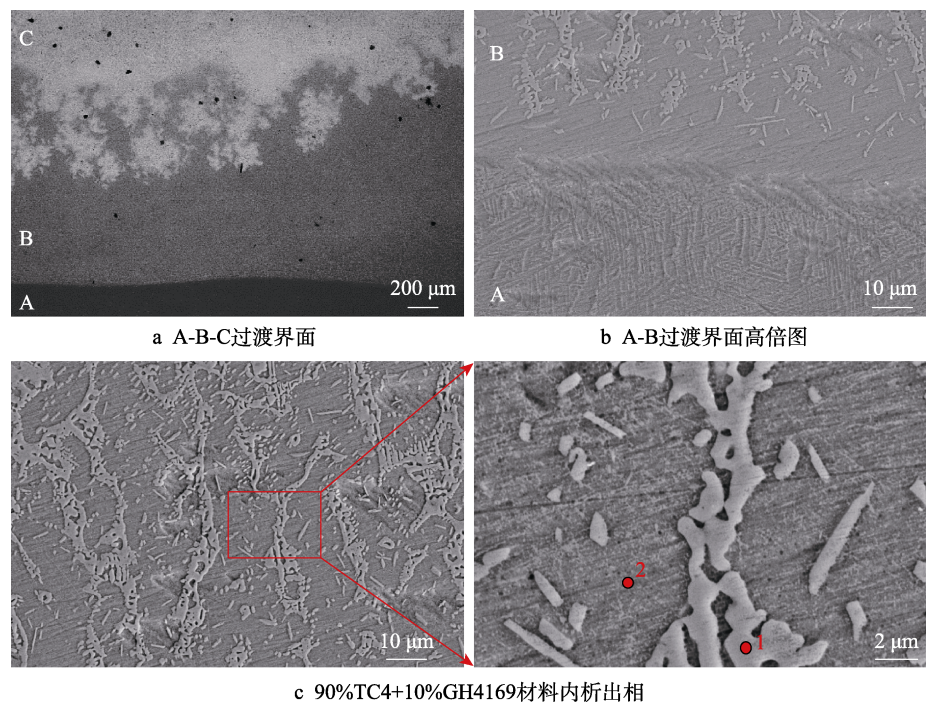


图 3 一维梯度样件微观组织
Fig.3 Microstructure of one-dimensional gradient sample: a) A-B-C transition interface;
b) high-power image of A-B transition interface; c) precipitated phase in 90wt.%TC4+10wt.%GH4169 material

表 3 元素检测结果
Tab.3 Element detection results

Position	Ti	Ni	Fe	Cr	Al	V
1	47.43	18.34	4.39	1.49	3.44	0.81
2	58.77	4.59	2.92	3.94	7.74	3.17

图 5 为二维梯度样件微观组织，其中图 5a 为 X 方向 A-B 过渡界面，过渡界面轮廓清晰可见，2 种材料相互渗透扩散，且扩散深度较深，界面整体呈锯齿状轮廓。TC4 与 90%TC4+10%GH4169 成分较为接近，热物性参数相差不大，在激光增材制造搭接成形时，

上一道沉积层在激光作用下部分重熔，在过渡界面位置处这种重熔现象会使得 2 种材料共同处于熔融状态，同时由于热物性参数相近，在激光搅拌冲击作用以及熔池内的马兰戈尼对流效应的作用下，促使 2 种材料之间充分扩散。此外，二维梯度样件成形过程中搭接率较高，为 60%，使得上一道次沉积层的重熔比例维持在较高水平，这同样有助于增大 2 种材料之间的相互扩散深度。

图 5b 为 X 方向 B-C 过渡界面，相比于 A-B 过渡界面，界面结合处更加锐利清晰，两侧材料特征明显，界面相互渗透程度远小于 A-B 过渡界面。B-C 过渡界

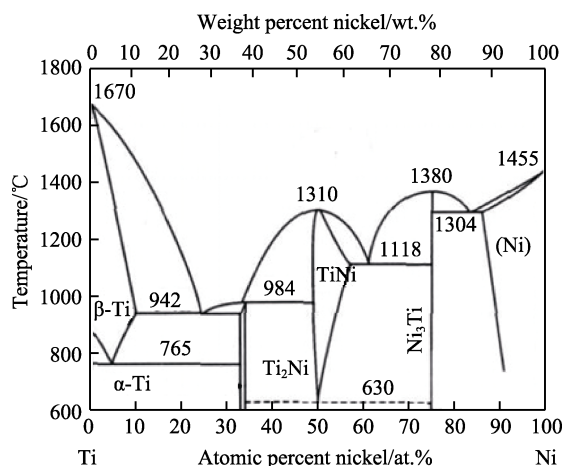


图4 钛-镍二元相图

Fig.4 Ti-Ni binary phase diagram

面两侧材料为 90%TC4+10%GH4169 和纯 GH4169, 2 种材料在密度以及热膨胀系数 (在 20~300 °C 下 TC4 为 $9.30 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, GH4169 为 $13.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) [25] 等材料特性方面均差别较大, 致使 2 种材料在熔融状态

下相互扩散程度明显降低, 凝固后的过渡界面组织波动程度小于 A-B 过渡界面。

图 5c 为 Z 方向 (沉积方向) A-B-C 过渡界面, 同样可以清晰地分辨出 3 种材料以及 2 个过渡界面, 其中 B-C 过渡界面较 A-B 过渡界面更加平整, 波动程度更小。二维梯度 Z 方向各过渡界面形态与一维梯度过渡界面形态相近, 但二维梯度 B-C 过渡界面的波动程度较一维梯度更低, 且无大块的 GH4169 材料向下渗透现象。主要原因是由于二维梯度块体成形时搭接率较高, 用于重熔的激光能量大部分作用于同一沉积高度上的搭接层, 而一维梯度成形时样件为薄壁件, 用于重熔的激光能量全部作用于位于下方的前一沉积层, 使一维梯度样件成形时下方沉积层所受到的激光冲击搅拌作用相比于二维梯度样件更加剧烈, 使得密度较大的 GH4169 更易向下方扩散, 出现大面积 GH4169 渗透现象。而二维梯度样件成形时, 由于高搭接率的工艺削弱了激光对下方沉积层的重熔作用, 使得大面积 GH4169 渗透现象消失。

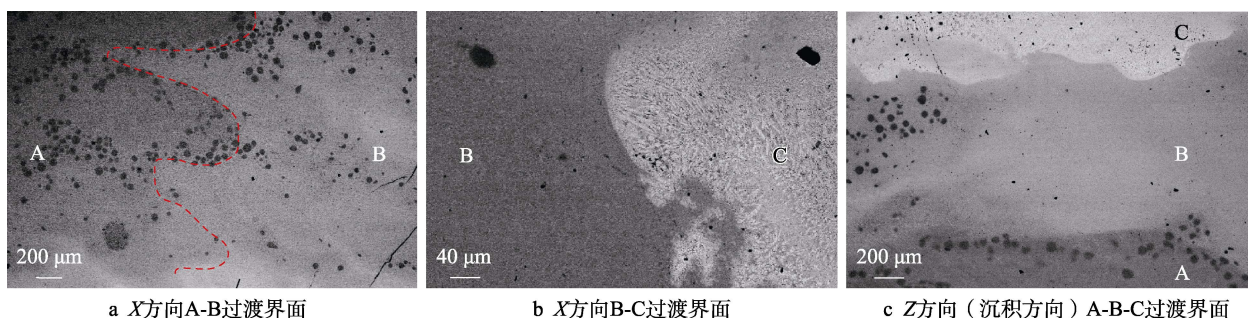


图5 二维梯度样件微观组织 (X-Z 截面)

Fig.5 Microstructure of 2D gradient sample (X-Z cross section): a) A-B transition interface in X direction; b) B-C transition interface in X direction; c) A-B-C transition interface in Z-direction (deposition direction)

2.2 元素分布

图 6 为一维梯度样件主要元素线扫描及面扫描检测结果。由线扫描结果可知, 从 GH4169 向 TC4 过渡过程 (由上到下) 中, Ti 元素含量逐步上升, Ni 元素含量逐步下降。Ti 元素上升以及 Ni 元素下降过程中存在较大波动, 主要原因是由于 GH4169 加入到 TC4 中, 在过渡区域产生了较多的析出相, 由表 3 元素检测结果可知, 基体与析出相之间的 Ti、Ni 元素含量差异明显, 元素扫描过程中交替检测基体与析出相部位, 从而使得线扫描元素含量曲线存在明显的波动。由元素面扫描结果可以发现, 在 B-C 过渡界面附近, 上方 GH4169 区域仍然具有一定含量的 Ti 元素, 在下方 90%TC4+10%GH416 内同样含有较多的 Ni 元素, 这表明过渡界面两侧的 GH4169 以及 90%TC4+10%GH4169 2 种材料内的元素进行了充分的扩散, 削弱了界面效应。

二维梯度样件元素检测结果如图 7 所示。图 7a 为 X 方向 A-B 过渡界面以及该区域对应的 Ti、Ni、

Fe、Cr 元素的面扫描结果, 由 A 至 B, Ti 元素略有减少, Ni、Fe、Cr 元素略有增多。对比一维梯度 A-B 过渡界面元素面扫描结果 (图 6), 二维梯度的 A-B 界面元素过渡显著均匀, 无明显的元素突变界线。一方面, 块体成形过程中较高的搭接率增大了上一沉积层的重熔体积以及相邻两沉积层之间的叠加区域面积, 从而促进了 2 种材料之间元素的充分扩散。另一方面, 在块体成形过程中, 相比于单道多层薄壁件具有更大的热积累, 使样件整体保持在更高的温度, 进一步增大了元素的扩散程度, 从而使得元素突变界线消失, 实现了元素的均匀过渡, 有利于保障 2 种材料之间的结合质量。图 7b 为 X 方向 B-C 过渡界面以及该区域对应的 Ti、Ni、Fe、Cr 元素的面扫描结果, 相比于 A-B 过渡界面, B-C 过渡界面处元素过渡界线较为明显, 主要原因是由于 90%TC4+10%GH4169 和 GH4169 2 种材料之间的元素含量差异较大, 同时 2 种材料间的热物性参数相差较大, 材料之间相互渗透程度不及 A-B 界面, 使得界面处的元素分布均匀性不及 A-B 界面。图 7c 为 Z 方向 (沉积方向) A-B-C

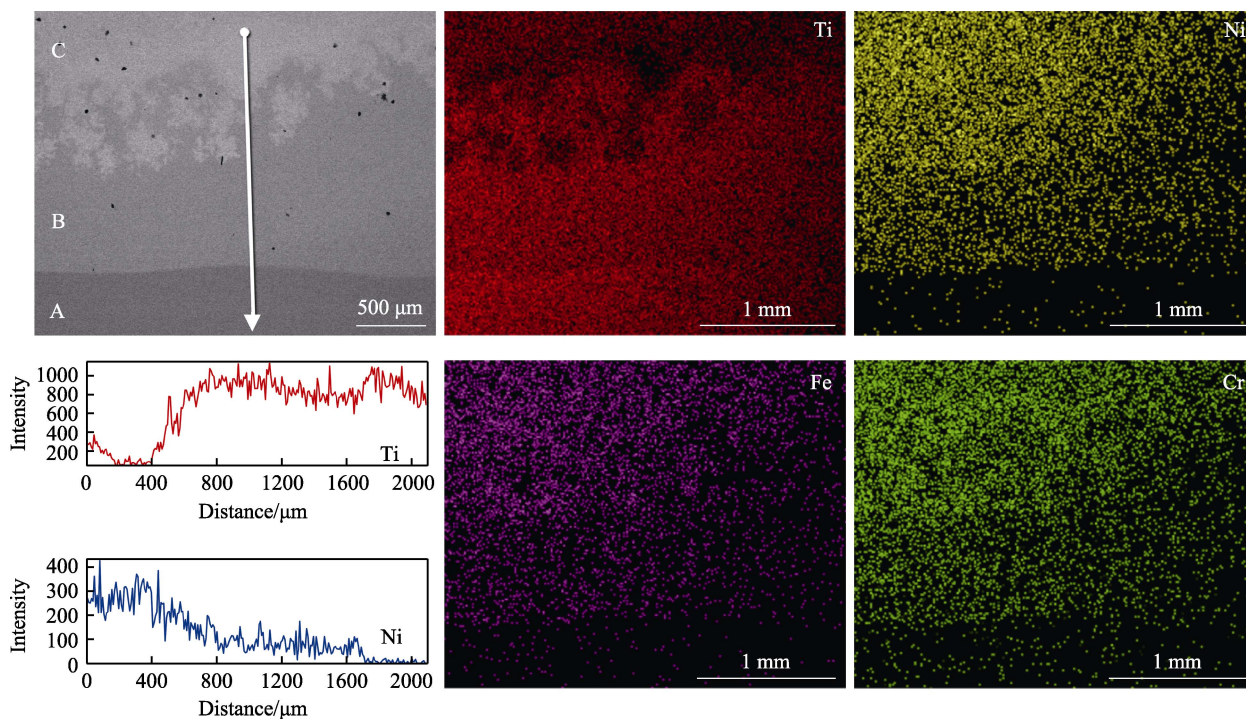


图 6 一维梯度样件组织元素线扫描及面扫描结果

Fig.6 The results of line and plane scanning of the one-dimensional gradient sample

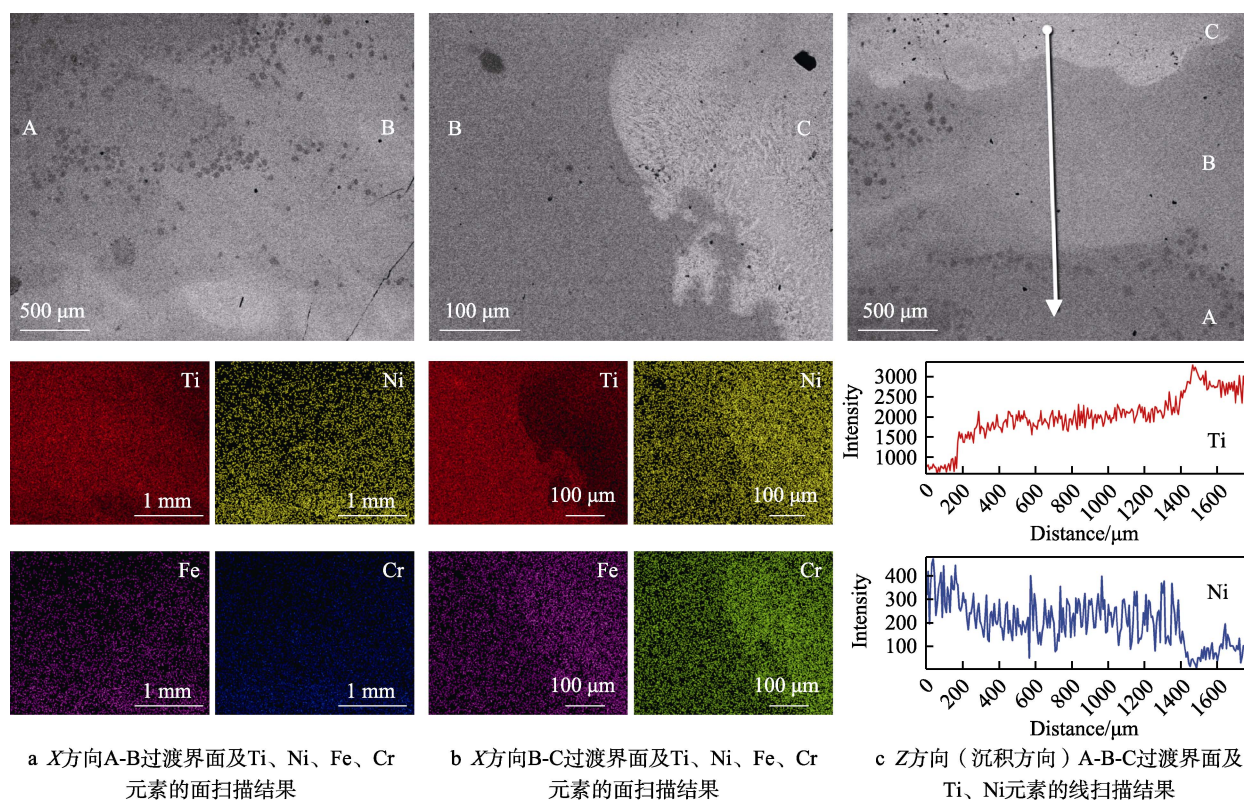


图 7 二维梯度样件组织元素线扫描及面扫描结果 (X-Z 截面)

Fig.7 Two-dimensional gradient sample element detection results (X-Z section): a) the image of the A-B transition interface in the X direction and the surface scan results of Ti, Ni, Fe, and Cr elements; b) the image of the B-C transition interface in the X direction and the surface scan results of Ti, Ni, Fe, and Cr elements; c) the image of the A-B-C transition interface in the Z direction (deposition direction) and the line scan results of Ti and Ni elements

过渡界面及 Ti、Ni 元素的线扫描结果, 元素变化趋势与一维梯度样件基本相同。

3 结论

利用激光增材制造技术制备了 TC4/GH4169 一维和二维功能梯度材料, 重点对不同材料过渡界面处的形态特征以及元素分布规律进行分析, 结论如下:

1) 采用 TC4-90%TC4+10%GH4169-GH4169 的梯度过渡方式, 成功制备了一维梯度薄壁件, 在此基础上设计了二维梯度结构, 采用 60%的搭接率, 成功制备了二维梯度块体样件, 实现了 TC4-GH4169 的二维梯度过渡。

2) TC4-90%TC4+10%GH4169 过渡界面两侧组织特征呈现出明显的区别。TC4 一侧组织为典型的马氏体板条状 α -Ti 组织; 90%TC4+10%GH4169 一侧由于 Ni 元素的加入生成了网状交联分布的 Ti_2Ni 相, 在液相凝固过程中首先析出 β -Ti, 之后发生 β -Ti \rightarrow α -Ti+ Ti_2Ni 反应, 生成 Ti_2Ni 相。

3) 一维梯度 90%TC4+10%GH4169-GH4169 界面相比于 TC4-90%TC4+10%GH4169 界面波动程度更大, 材料相互渗透程度更高, 元素分布更加均匀。二维梯度样件由于较高搭接率的影响, 使得 X 方向(水平方向)的界面波动程度相比于 Z 方向(沉积方向)更高, 其中 X 方向 TC4-90%TC4+10%GH4169 界面由于两侧材料特性差异较小, 元素分布均匀性最高, 显著削弱了界面效应。

参考文献:

- [1] 刘伟, 李能, 周标, 等. 复杂结构与高性能材料增材制造技术进展[J]. 机械工程学报, 2019, 55(20): 128-151, 159.
LIU Wei, LI Neng, ZHOU Biao, et al. Progress in Additive Manufacturing on Complex Structures and High-Performance Materials[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(20): 128-151, 159.
- [2] 战金明, 梁志刚, 黄进钰, 等. TC4 钛合金表面单道激光熔覆工艺研究[J]. 应用激光, 2020, 40(6): 955-961.
ZHAN Jin-ming, LIANG Zhi-gang, HUANG Jin-yu, et al. Study on the Single Laser Cladding Process on TC4 Titanium Alloy Surface[J]. Applied Laser, 2020, 40(6): 955-961.
- [3] SABBAN R, BAHL S, CHATTERJEE K, et al. Globularization Using Heat Treatment in Additively Manufactured Ti-6Al-4V for High Strength and Toughness[J]. Acta Materialia, 2019, 162: 239-254.
- [4] 张冬冬, 史昆玉, 汤皓晨. TC4 钛合金表面沉积 TiCN 涂层及其耐磨耐腐蚀性能研究[J]. 表面技术, 2020, 49(6): 297-304.
- [5] ZHANG Dong-dong, SHI Kun-yu, TANG Hao-chen. TiCN Coating Deposited on TC4 Titanium Alloy and Its Wear and Corrosion Resistance[J]. Surface Technology, 2020, 49(6): 297-304.
- [6] THIJS L, VERHAEGHE F, CRAEGHS T, et al. A Study of the Microstructural Evolution during Selective Laser Melting of Ti-6Al-4V[J]. Acta Materialia, 2010, 58(9): 3303-3312.
- [7] SUPROBO G, PARK N, BAEK E R. Effect of Double Stage Solution Treatment on the Volume Fraction of Massive Phase as a New Method to Obtain a Fine Lamellar α/β in Ti-6Al-4V Alloy[J]. Intermetallics, 2019, 113: 106581.
- [8] 张国会, 郭绍庆, 黄帅, 等. 激光选区熔化制备 GH4169 合金高温疲劳行为研究[J]. 应用激光, 2020, 40(6): 984-990.
ZHANG Guo-hui, GUO Shao-qing, HUANG Shuai, et al. High Temperature Fatigue Behavior of GH4169 Superalloy Prepared by Selective Laser Melting[J]. Applied Laser, 2020, 40(6): 984-990.
- [9] SONG Xin-ling, LEI Jian-bo, GU Zhen-jie, et al. Boosting Wear Properties of Inconel718 Superalloy by Uniform Dispersing Graphene Nanoplatelets through Laser Melting Deposition[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 834: 155086.
- [10] 刘奋成, 任航, 王晓光, 等. 激光增材制造高 Nb 含量 GH4169 合金微观偏析行为研究[J]. 表面技术, 2019, 48(5): 123-131.
LIU Fen-cheng, REN Hang, WANG Xiao-guang, et al. Dendritic Segregation of Nb Modified GH4169 Superalloy Fabricated by Laser Additive Manufacturing[J]. Surface Technology, 2019, 48(5): 123-131.
- [11] WANG Xiao-qing, GONG Xi-bing, CHOU K. Review on Powder-Bed Laser Additive Manufacturing of Inconel 718 Parts[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2017, 231(11): 1890-1903.
- [12] CARROLL B E, OTIS R A, BORGONIA J P, et al. Functionally Graded Material of 304L Stainless Steel and Inconel 625 Fabricated by Directed Energy Deposition: Characterization and Thermodynamic Modeling[J]. Acta Materialia, 2016, 108: 46-54.
- [13] LI Wei, YAN Lei, KARNATI S, et al. Ti-Fe Intermetallics Analysis and Control in Joining Titanium Alloy and Stainless Steel by Laser Metal Deposition[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 242: 39-48.
- [14] LIN X, YUE T M, YANG H O, et al. Solidification Behavior and the Evolution of Phase in Laser Rapid Forming of Graded Ti6Al4V-Rene88DT Alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2007, 38(1): 127-137.

(下转第 379 页)