

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2022.03.008

激光沉积预置 TC4 线材的显微组织研究

林俊宇, 徐培全*, 马一帆

(上海工程技术大学材料工程学院, 上海 201620)

摘要: 为了降低工业生产中钛合金激光沉积的成本, 提高材料的利用率与形状自由度, 课题组使用光纤激光器以通过电阻点焊方式预置的 TC4 金属条为原料进行了单层与多层的激光沉积, 并通过超景深光学显微镜观察分析沉积层中的显微组织。研究表明: 单层试样(A1)与多层试样(A2)的沉积层与基体间均实现了良好的冶金结合, 结合处无明显缺陷; 单层与多层试样中出现的多种组织相似但含量有所不同, A1 的沉积层组织中出现最多为长针状 α' 相、条状 α 相以及晶间 β 相; A2 中出现最多组织则为呈鱼骨状生长的 α 相与针状 α' 相及晶间 β 相, 此外 A2 中有少量偏析情况出现。总体而言 A2 试样显微组织更为优异, 但沉积层中存在由于多层堆叠形成的少量气孔与冷裂纹。

关键词: 增材制造; 钛合金; 激光金属沉积; 显微组织

中图分类号: TG146.23; TG665; TH742 文献标志码: A 文章编号: 1005-2895(2022)03-0050-05

Microstructure of Laser Deposition TC4 Based on Preseted Metal Strip

LIN Junyu, XU Peiquan*, MA Yifan

(School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: In order to reduce the cost of laser deposition of titanium alloy in industrial production and improve utilization and shape free degree of material, single layer and multi-layer laser deposition layers were prepared by using fiber laser with TC4 metal strips preseted on the substrate by resistance spot welding as raw material. Microstructure of the deposited layer was observed and analysed by ultra depth of field optical microscope. The results show that good metallurgical bonding is achieved between the deposited layer and the substrate both of single-layer sample (A1) and multi-layer sample (A2), and no obvious defects appear in the joint. Various similar structures appear in single-layer and multi-layer samples but with different content. Long acicular α' phase, strip α phase and intergranular β are the main structure in the A1 sample. And fish-bone-like α phase and acicular α' phase and intergranular β are the main structure in the A2 sample, and minor segregation is observed in A2 sample. The microstructure of A2 sample shows better morphology on the whole, however there are some pores and cold cracks in the deposited layer due to multi-layer stacking.

Keywords: additive manufacturing; titanium alloy; laser metal deposition; microstructure

钛合金发展自 20 世纪 50 年代, 具有高耐蚀性、比强度以及良好的生物相容性等优异性能, 在航空航天^[1]、医疗植入物^[2]和汽车船舶等领域都得以广泛应用^[3]。Ti-6Al-4V 合金又称 TC4, 属于 $\alpha + \beta$ 型钛合金, 因其各项性能均衡, 使用量占钛合金中的 75% ~ 85%^[4], 被冠以钛合金中的“王牌合金”的名号。传统

加工工艺在制造 TC4 合金零部件时, 常受限于钛合金较差的切削加工性, 加工繁琐^[5-6]且周期长, 而激光金属沉积技术的特性能够很好地规避这些问题^[7]。目前对 TC4 激光金属沉积研究中, 绝大多数以 TC4 粉末作为原材料^[8], 少数采用商用焊丝作为沉积材料^[9]。粉材利用率不高, 价格昂贵, 且在开放环境中 Ti 粉的

收稿日期: 2021-09-28; 修回日期: 2022-03-23

基金项目: 上海市自然科学基金资助项目(20ZR1422700)。

第一作者简介: 林俊宇(1996), 男, 浙江永康人, 硕士研究生, 主要研究方向金属激光增材制造。通信作者: 徐培全(1978), 男, 山东乐陵人, 博士, 教授, 主要从事界面科学的研究。E-mail: pqxu@sues.edu.cn

激光金属沉积具有一定的危险性。而基于熔丝的激光沉积工艺具有速率快,材料利用率近 100%,及制备成本低的特点^[10],预置金属条的方式省略了送丝设备,简化了生产过程与参数。课题组采用预置法在基体上通过电阻点焊固定预铺金属条后进行单层与多层激光金属沉积,并分别对单层与多层试样的组织进行了分析。

1 实验材料与方法

实验以 6 mm 厚度、经退火处理后的 Ti6Al4V 合

金板材作为基体进行激光金属沉积,沉积材料为通过线切割加工而成的截面形状为 3 mm × 1 mm 矩形的 Ti6Al4V 金属条。基体与金属条的化学成分如表 1 所示。在进行试样前基体与金属条均依次用颗粒度为 64 μm(240 目),39 μm(480 目),15 μm(800 目)的碳化硅砂纸打磨,去除表面的氧化层与加工痕迹,随后用乙醇作为清洗剂超声清洗 10 min 去除表面油污并烘干备用。

表 1 基体及沉积材料化学成分

Table 1 Chemical composition of substrate and deposition material

| 类别 | Al | V | Fe | O | C | N | H | Ti |
|------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|----|
| 基体 | 6.350 | 4.050 | ≤0.180 | ≤0.150 | ≤0.020 | ≤0.010 | ≤0.004 | 余量 |
| 沉积材料 | 6.350 | 4.050 | ≤0.180 | ≤0.150 | ≤0.020 | ≤0.010 | ≤0.004 | 余量 |

由于钛合金热传导性差,金属条受激光辐照时易发生严重的翘曲和变形,因此使用 hotspot II 点焊机以电阻点焊的方式将金属条预置在基板上再进行单层与多层的 Ti6Al4V 合金增材制造,其固定方式如图 1 所示。对于多层试样,在当前层激光扫描完成后再次进行下一层的金属条电阻点焊预置,随后进行下一层激光扫描,重复这个过程直至试样达到目标层数。

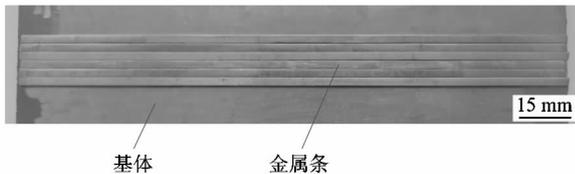


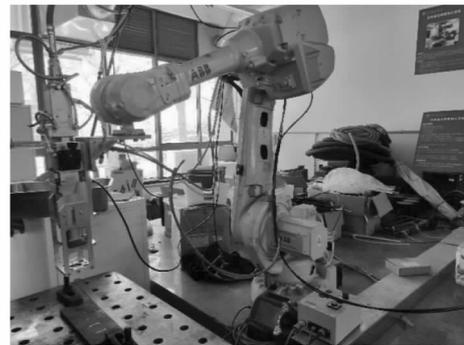
图 1 试样中金属条预置方式

Figure 1 Preset way of metal strip in sample

图 2(a) 所示为本试验中采用的美国 IPG 公司生产的光纤激光器与激光控制平台,图 2(b) 所示为德国 HIGHYAG 公司制造的 BIMO QBH 激光头。该激光头夹持在瑞士 ABB 的 ABB-IRB 4600 型机器人上,通过在 ABB 机器人中设定路径与速度等参数后由机器人控制完成增材制造。激光器相应参数如表 2 所示。单层试样(A1)与多层试样(A2)的激光金属沉积根据表 3 所示的工艺参数进行。在增材制造过程中选用氩气作为保护气体,气体流量为 25 L/min,激光扫描路径设定为往复式扫描。



(a) 激光器及激光控制平台



(b) 激光头及 ABB 机器人

图 2 激光金属沉积所用设备

Figure 2 Equipment used in laser metal deposition

表 2 激光器设备参数

Table 2 Parameters of laser equipment

| 型号 | 最大平均 功率/kW | 中心波 长/nm | 功率稳 定性/% | 光斑尺寸/ (mm × mm) |
|-----------|---------------|-------------|-------------|--------------------|
| YLS-5000W | 5 | 1 075 ± 5 | ± 1 | 5 × 5 |

表 3 激光金属沉积工艺参数

Table 3 Processing parameters of laser metal deposition

| 试样名称 | 激光功率/kW | 扫描速度/(mm·s ⁻¹) | 搭接率/% | 沉积方式 |
|------|---------|----------------------------|-------|------|
| A1 | 2.5 | 6.00 | 45 | 单层 |
| A2 | 2.5 | 4.05 | 45 | 3层 |

激光金属沉积增材制造结束后,将得到的单层与多层试样沿横截面切开,依次用颗粒度为 64.0 μm (240 目),39.0 μm (480 目),15.0 μm (800 目),10.5 μm (1 200 目),8.5 μm (1 600 目),7 μm (2 000 目)的 SiC 砂纸打磨后用颗粒度为 3.5,1.5 和 0.5 μm 的 Al₂O₃ 粉末依次进行抛光。选用 Kroll 试剂 (HF:HNO₃:H₂O = 2:5:93) 腐蚀试样横截面 15 s 后用超景深三维显微镜观察分析沉积层及其与基体结合界面处的显微组织形貌。

2 试验结果与讨论

2.1 单层沉积层显微组织

单层沉积试样 A1 的横截面显微组织及沉积层/基体间界面如图 3 所示。由于 Kroll 试剂会优先腐蚀钛合金中 β 相,因此 α 相与 β 相在光学显微镜下有衬度的存在,造成 α 相颜色稍浅,β 相颜色更深。由于钛合金导热系数低,不同区域冷却速率不同,在沉积层有多种组织的存在。图 3(c) 所示沉积层的顶部为取向相似的竖直方向的条状 α,条状的 α 表现出枝晶生长的趋势,条状 α 之间则为片层状的次生 α + 晶间 β 相。图 3(d) 所示组织为细长的针状,针与针之间为次生 α 相与晶间 β 相,其中次生 α 相以片层状和长宽比较小的条状 2 种形态出现。在沉积层靠近基体的界面处可以观察到完全 β 转变组织 α' 相,该组织以片层状交错分布在原始 β 晶界内侧,形成魏氏组织,此类组织一般对合金塑性、疲劳强度和热稳定性等性能有不好的影响^[11],如图 3(f) 所示。此外,在长针状 α' 相与全片层状 β 转变组织之间还存在一个过渡区域,过渡区中针状 α' 相的长宽比减小变为短针与小块状的 α 相与晶间 β 组织,如图 3(e) 所示。

2.2 多层沉积层显微组织

图 4 所示为低倍光学显微镜下的多层沉积试样 A2 的横截面及沉积层/基体之间界面的显微组织图。从图中可以看到在多层沉积层中有少量气孔和裂纹。在多层增材制造的过程中,由于多层的金属条的

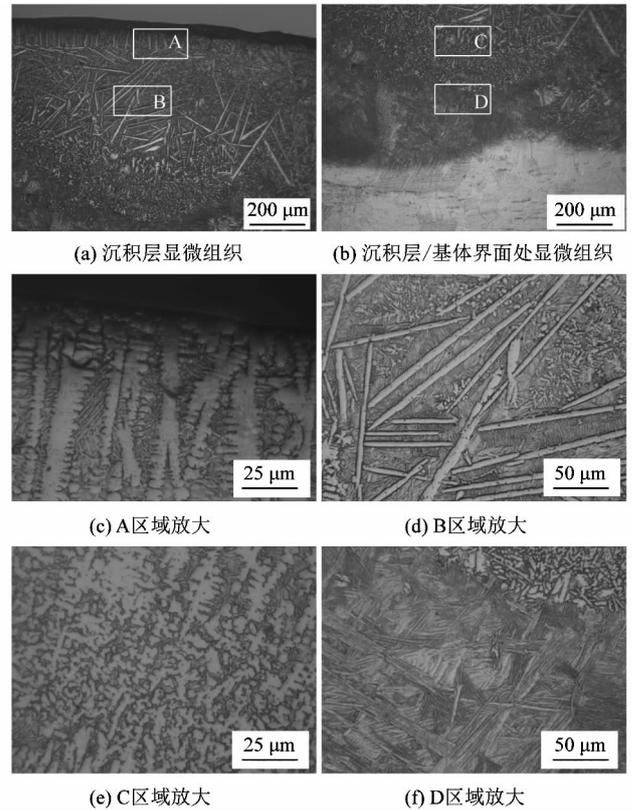


图 3 单层沉积层和界面的显微组织
Figure 3 Microstructure of single-layer deposited sample and interface

逐层堆叠,易对试样表层的不平整度起到一个累加的效果。而在某一层表层上继续预置金属条时,新预置的金属条与试样的表面就会存在一定的缝隙,若沉积过程中熔池存在时间过短,缝隙中的气体未能及时从熔池中溢出就会导致气孔的形成。

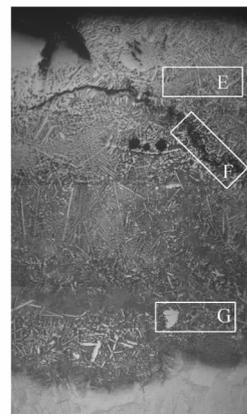


图 4 低倍显微镜下多层沉积层和界面的显微组织
Figure 4 Microstructure of multi-layer deposited sample and interface under low power microscope

图 5(a),(b)和(c)分别为图 4 中方框所标 E,F 和 G 区域的高倍放大图。图 5(a)所示为沉积层顶部条状 α 相与晶间 β ,与单层试验相比顶部的条状 α 相表现出明显的枝晶生产的特性,呈现为鱼骨状。图 5(b)为沉积层中冷裂纹区域的放大图,多层多道的激光扫描增大了热输入,在过大的热输入和钛合金相对较差的导热性双重影响下易使基板发生变形,产生内应力,在随后的冷却过程中发生开裂形成裂纹。解决方法是通过去应力退火方式消除内应力,防止此类裂纹的产生^[12]。此外在多层沉积试样中有少量偏析的情况出现,如图 4 顶部以及图 5(c)中都观察到了粗大 α 块。由于此类位置出现 α 稳定元素富集与偏析,在富集处 α 相首先析出,并沿晶界向晶内生长,从而形成了偏析引起的大块 α 相的出现。图 5(d)为图 5(c)的进一步放大图,从图中我们可以发现多层沉积试样中的针状 α' 相相对于单层沉积试样而言数量与长宽比都有所减小;针状 α' 相之间的片层状 α 与短条 α 数量增多。图 5(e)为多层沉积试样中较为典型的由交错的片层 α 构成的魏氏组织,相比单层沉积试样,这一类组织在多层沉积试样中的含量大大减少,仅在沉积层与界面处有少部分存在。图 5(f)为多层沉积试样中典型的网篮组织,原始的晶界基本破碎, α 与晶间的 β 小片呈现短且歪扭的形状并具有较小的纵横比;由于各 α 集束交错排列,在多层沉积试样中此类组织出现的相对更多。

3 结论

课题组采用电阻点焊预置 TC4 金属条后激光扫描的方式,实现了基于预置 TC4 线材的单层与多层激光沉积,并对沉积层的组织进行了研究,得到以下结论:

1) 沉积层中组织主要为长针状 α' 相,条状 α 相及晶间 β ,多层的堆叠增大了组织中条状 α 相枝晶生长的趋势,也极大地减小了沉积层中魏氏组织的含量。

2) 在组织上 A2 试样更佳,但也存在少量的裂纹与气孔。原因是在多层沉积放大了试样表面起伏,气孔容易在表面凹陷较大处出现;而成型过程中多道多层的激光扫描提升了热输入量,在冷却过程容易形成较大的内应力使工件开裂,在实际生产中应注意防控此类问题。

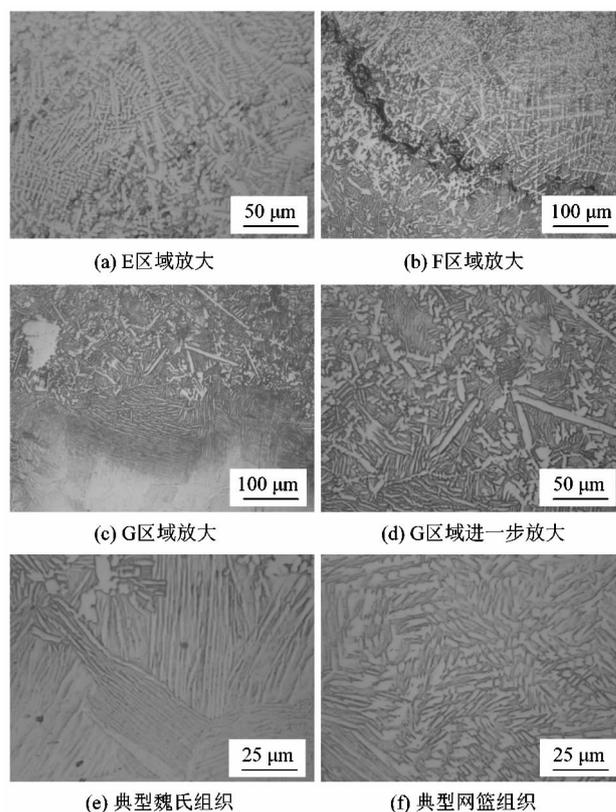


图 5 多层沉积层中典型显微组织

Figure 5 Typical microstructure in multi-layer deposited sample

本研究中降低了激光沉积技术对设备及材料的要求,显著降低了生产成本,对于工业化生产中中型和大型零部件的激光沉积制造有积极影响和重要意义。在此研究的基础上可进一步研究如工艺参数对组织及性能的影响,或是预置不同成分与形状的金属条以实现梯度材料的制造。

参考文献:

- [1] 顾俊,刘钊鹏,徐友钧,等. 钛合金及其激光加工技术在航空制造中的应用[J]. 应用激光,2020,40(3):547-555.
- [2] 王培,杨理京,何飞. 钛及钛合金植入体表面微纳结构制备技术及生物性能研究进展[J]. 钛工业进展,2020,37(6):41-48.
- [3] 陈军,王廷询,周伟,等. 国内外船用钛合金及其应用[J]. 钛工业进展,2015,32(6):8-12.
- [4] 张世凯,马盼,柯林达,等. 增材制造钛合金微观组织及性能研究进展[J]. 轻工机械,2019,37(2):1-5.
- [5] 陈五一,袁跃峰. 钛合金切削加工技术研究进展[J]. 航空制造技术,2010(15):26-30.

(下转第 65 页)