

引文格式:

代轶励, 吴息明, 黄逸凡, 等. 等离子体电弧 3D 打印 Ti-6Al-4V 成形工艺与性能研究 [J]. 集成技术, 2022, 11(6): 75-84.
Dai YL, Wu XM, Huang YF, et al. Research on processing and mechanical properties of Ti-6Al-4V by plasma arc 3D printing [J]. Journal of Integration Technology, 2022, 11(6): 75-84.

等离子体电弧 3D 打印 Ti-6Al-4V 成形工艺与性能研究

代轶励 吴息明 黄逸凡* 喻学峰 康翼鸿

(中国科学院深圳先进技术研究院材料界面研究中心 深圳 518055)

摘 要 针对等离子体电弧 3D 打印成形钛合金表面精度低、组织性能难以调控的技术难题, 该文利用控制变量法, 研究了工艺参数对堆积金属的尺寸参数与形状参数的影响规律, 并通过优化得到最适宜的堆积工艺参数。堆积得到的 Ti-6Al-4V 构件可分为 3 个区域: 顶层区域主要由粗大的 α_{GB} 和 α_M 构成; 中间层区域的 α_M 长宽比明显减小, 出现少量片层状组织 (α colony); 底层区域主要由相对均匀的网篮状 $\alpha+\beta$ 组成。通过实验测试, 等离子体电弧 3D 打印得到的钛合金构件的尺寸误差小于 2%, 拉伸强度为 1 150 MPa, 构件的成形精度和力学性能均满足使用要求。

关键词 等离子体电弧 3D 打印; Ti-6Al-4V; 工艺参数; 微观组织; 力学性能

中图分类号 TC 43; TG 444 **文献标志码** A **doi**: 10.12146/j.issn.2095-3135.20220225002

Research on Processing and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V by Plasma Arc 3D Printing

DAI Yili WU Ximing HUANG Yifan* YU Xuefeng KANG Yihong

(Materials Institutes Center, Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

*Corresponding Author: yf.huang@siat.ac.cn

Abstract Aiming at the technical problems of low surface precision and difficulty to control the microstructure and properties of titanium alloys formed by plasma arc 3D printing, the influence of process parameters on the size and shape parameters of the deposited metal was studied through the control variable method, and the most suitable deposition process parameters were obtained by optimization. The Ti-6Al-4V component can be divided into three regions, the top region is mainly composed of coarsen α_{GB} and α_M , and the middle layer region includes a small amount of lamellar structure (α colony) and α_M , the size of which decreased significantly, and the bottom area was mainly composed of relatively uniform basket-like $\alpha+\beta$; The dimensional error of the titanium alloy components obtained by plasma arc 3D printing does not exceed 2%,

收稿日期: 2022-02-25 修回日期: 2022-08-25

基金项目: 深港创新圈联合研发项目 (SGLH20181109110802117)

作者简介: 代轶励, 博士, 助理研究员, 研究方向为等离子体电弧 3D 打印; 吴息明, 硕士, 助理工程师, 研究方向为等离子体电弧 3D 打印; 黄逸凡 (通讯作者), 正高级工程师, 博士研究生导师, 研究方向为高电压与放电等离子体技术, E-mail: yf.huang@siat.ac.cn; 喻学峰, 研究员, 博士生导师, 研究方向为二维材料和等离子体技术; 康翼鸿, 高级工程师, 研究方向为金属氧化机理与界面科学。

and the tensile strength is 1 150 MPa. The forming accuracy and mechanical properties of the components meet the requirements for use.

Keywords plasma arc 3D printing; Ti-6Al-4V; processing parameters; microstructure; mechanical properties

Funding This work is supported by Shenzhen-Hong Kong Innovation Circle Joint R&D Project (SGLH20181109110802117)

1 引 言

钛金属及其合金材料,因密度低、比强度高和耐高温性能优良等优点,自 20 世纪 50 年代以来,其逐渐成为航空航天领域关键构件的主要成形材料^[1],2022 年交付的我国首款大飞机 C919 的关键构件中,钛合金所占比例达 9% 以上^[2]。目前,应用最广泛的钛合金为 Ti-6Al-4V 双相($\alpha+\beta$)钛合金,其组织稳定性好,具有良好的机加工性能,但还原性较强,在高温环境中易与氧发生氧化反应^[3]。此外,使用传统的铸、锻、焊及机加工方式制造 Ti-6Al-4V 构件的制造工艺与流程复杂,生产效率低,且传统加工方式的低材料利用率,会大大增加构件的制造成本^[4]。

近年来,等离子体电弧 3D 打印技术成为发展迅速的零件制造技术之一,其通过等离子体电弧熔化金属丝材或粉材,按照既定路径进行层层堆积,可实现金属构件的直接成形^[5]。与传统制造技术相比,等离子体电弧 3D 打印技术具有成形效率高、成形构件组织性能均匀可控、可实现任意复杂构件成形等优点^[6]。目前,等离子体电弧 3D 打印技术是实现 Ti-6Al-4V 高效率、高质量制造的有效方式。

近年来,大量国内外学者和研究机构开始着力于等离子体电弧 3D 打印钛合金构件的研究^[7-10]。然而,等离子体电弧 3D 打印是一个往复堆积的过程,往复加热会引发热积累现象,使构件表面形成“阶梯效应”,大大降低了构件的

表面精度^[11];此外,等离子体电弧 3D 打印的小熔池中液态金属冷却速度极快,成形构件内部易产生粗大的柱状晶组织^[12-13],降低了钛合金构件的强韧性。固液界面流动逆转时,熔池残留物形成的独特偏析结构也会影响构件的力学性能^[14]。因此,如何保证等离子体电弧 3D 打印钛合金构件的成形精度和力学性能是当前亟待解决的关键问题。

Wang 等^[15]深入研究了等离子体电弧 3D 打印堆积电弧形貌与构件成形质量的关系;刘宁^[16]通过正交试验设计的方法,深入分析了等离子体电弧 3D 打印 Ti-6Al-4V 成形尺寸参数与工艺参数之间的关系模型;Merreddy 等^[17]研究发现,等离子体电弧 3D 打印的 Ti-6Al-4V 构件内部易形成粗大的柱状晶组织,造成构件的力学性能下降;Lin 等^[18]深入研究了热输入量、热循环参数对等离子体电弧 3D 打印 Ti-6Al-4V 构件微观组织和显微硬度的影响规律,提出可通过改变工艺参数实现对组织性能的调控。由此可见,等离子体电弧 3D 打印工艺参数是影响 Ti-6Al-4V 成形质量及力学性能的关键因素。

基于上述研究背景,本文深入研究了等离子体电弧 3D 打印工艺参数对堆积金属的成形尺寸(熔宽、余高等)及形状参数(润湿角、圆弧半径等)的影响,优化得到最佳成形工艺参数;然后利用该参数进行单道多层、多道多层 Ti-6Al-4V 长方体构件的直接堆积,并对成形构件的微观组织、力学性能以及断口形貌进行观察和分析,为

实现等离子体电弧 3D 打印高质量、高性能 Ti-6Al-4V 构件积累数据。

2 试验装备与方法

2.1 试验装备及材料

本试验使用的装备是以 LHM-315 等离子弧电源与 FSL80 三轴移动平台为主的等离子体电弧 3D 打印装备系统(如图 1 所示)。堆积成形的材料为直径 1.0 mm 的 TC4 钛合金丝材, 堆积成形时的基板为轧制态的 TC4 钛合金板, TC4 熔敷金属以及基板的化学成分如表 1 所示。堆积成形时, 后置保护气装置可对已成形部分进行保护, 保护气体为氩气。



图 1 等离子电弧增材制造装备系统

Fig. 1 Plasma arc additive manufacturing equipment system

2.2 试验方法

2.2.1 金相试样制备与组织观察

利用电火花线切割机沿堆积方向进行切取, 得到用于微观组织观察的金相试样; 将金相试样置于金相抛磨机上, 利用 Si-C 水墨砂纸进行抛磨处理; 磨样完成后, 利用金刚石液态抛光

表 1 Ti-6Al-4V 金属丝材堆积金属以及成形基板化学成分
Table 1 Chemical composition of Ti-6Al-4V depositing metal and substrate

元素	堆积金属	基板
Al	6.52	4.94
V	3.14	3.48
Si	0.12	0.10
C	10.5	4.77
N	0	0
O	0	0
Ti	Bal.	Bal.

膏进行抛光处理, 抛光膏粒度为 1.5 μm , 抛光时间 3~5 min。抛光完成后, 利用 Kroll 试剂 (1%~3% HF, 2%~6% HNO₃, 余量为无水乙醇) 对钛合金试样进行金相腐蚀处理, 腐蚀时间为 30~60 s, 腐蚀完成后立即用大量清水清洗表面, 并用无水乙醇进行擦拭后吹干。

金相试样制备完成后, 利用光学显微镜对钛合金的微观组织进行观察和分析, 利用场发射扫描电子显微镜以及色散 X 射线光谱仪对钛合金的微观结构、断口形貌以及化学成分进行观察和测量。

2.2.2 尺寸参数与形状参数测量

堆积完成后, 利用电火花线切割机切取试样, 利用体式显微镜测量堆积金属的尺寸参数与形状参数, 测量原理图如图 2 所示。其中, 尺寸参数包括熔池宽度 (W , mm)、熔池高度 (H , mm)、熔池宽高比 (R); 截面参数包括圆弧高度 (Φ , °)、圆弧半径 (D , mm)、润湿角 (φ_1 和 φ_2 , °)。在单一堆积试样上截取 3 个位置进行测量后取平均值。

2.2.3 力学性能测量

为测量分析堆积成形构件的力学性能, 本实验利用电火花线切割机在堆积成形试样上切取拉伸试样, 拉伸试样尺寸参考国标 GB/T 228.1—2021《金属材料拉伸试验第 1 部分: 室温试验方法标准》, 拉伸试样示意图和相关尺寸如图 3 所示。

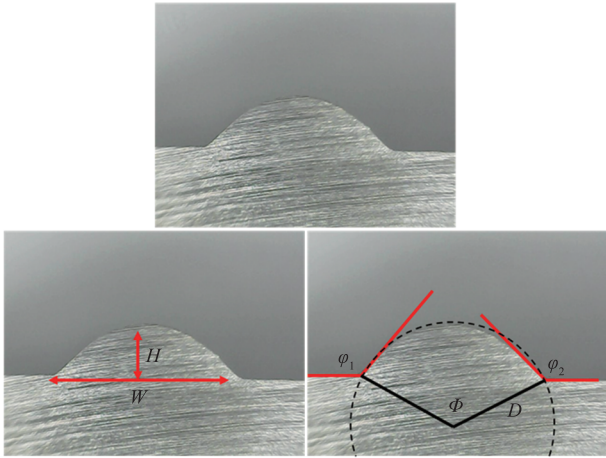
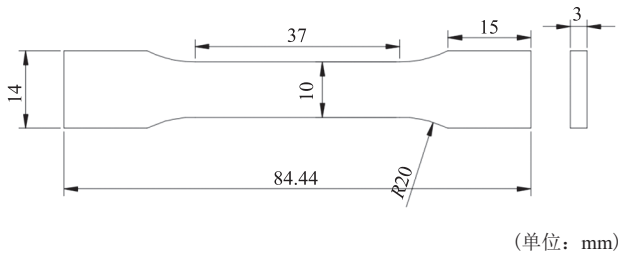


图2 堆积金属尺寸参数与截面参数测量原理图

Fig. 2 Schematic diagram of the shape and cross-section parameters measurement of the depositing metal



(单位: mm)

图3 拉伸试样及相关尺寸参数

Fig. 3 Tensile specimen and related size parameters

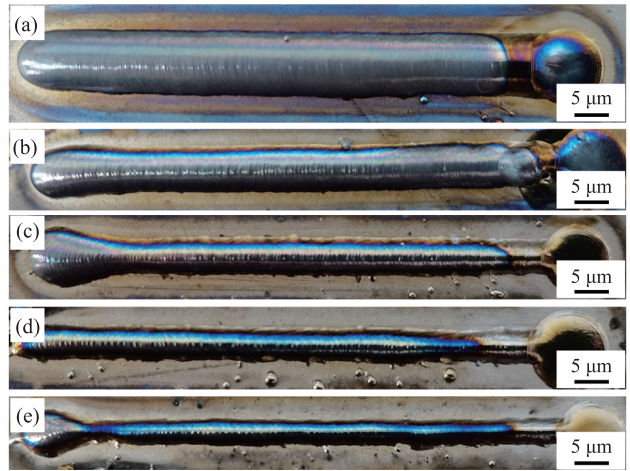
3 结果与讨论

3.1 工艺参数对等离子体电弧 3D 打印 Ti-6Al-4V 成形质量的影响

3.1.1 枪体移动速度的影响

图4为不同枪体移动速度下堆积金属的宏观形貌。由图4可知,在不同枪体移动速度下,堆积金属的成形质量均良好,无明显缺陷。图5为尺寸参数和截面参数的变化曲线图。由图5可知,随着枪体移动速度的增加,堆积金属的熔宽、熔高减小,而宽高比保持稳定,波动值为 $\pm 10\%$;在形状参数方面,随着枪体移动速度的增加,圆弧角度(Φ)由 106.78° 增加至 124.75° ,圆弧半径(D)由 5.92 mm 减小至

2.25 mm ,润湿角 φ_1 与 φ_2 的数值基本保持一致,且呈现不断增加的趋势。究其原因:当其他工艺参数一定时,随着枪体移动速度的增加,单位时间内、单位长度熔敷金属的量减小,堆积金属的熔高与熔宽同时减小,由于堆积电流并未变化,所以宽高比保持一定的稳定性;此外,由于枪体移动速度增加,等离子体电弧的作用时间减小,使得堆积金属与基板之间难以充分扩散,圆弧角度增加,圆弧直径减小,润湿角逐渐增大,



注:从上至下,枪体的移动速度依次为 2 mm/s 、 4 mm/s 、 6 mm/s 、 8 mm/s 、 10 mm/s

图4 不同枪体移动速度下堆积金属形貌

Fig. 4 Macroscopic morphology of depositing metal under different moving speeds

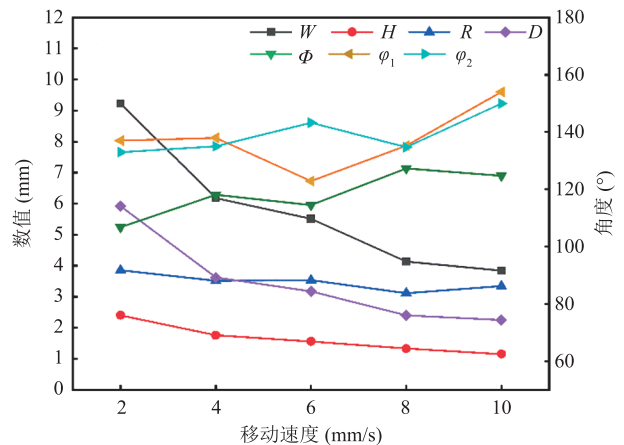


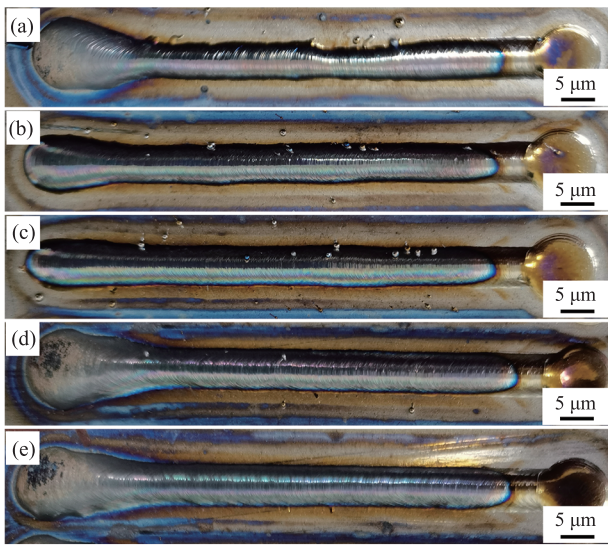
图5 枪体移动速度对堆积金属尺寸参数与截面参数的影响

Fig. 5 The influence of moving speed on the shape and cross-section parameters of the depositing metal

截面形貌由平缓的圆弧逐渐向陡峭的圆弧转变。

3.1.2 送丝速度的影响

图 6 为不同送丝速度下堆积金属的宏观形貌照片。由图 6 可知, 在不同送丝速度下, 堆积金属的成形质量均良好, 无明显缺陷。图 7 为相关参数随送丝速度的改变而发生的变化趋势, 由图 7 可知, 当送丝速度低于 280 cm/min



注: 从上至下, 送丝速度依次为 240 cm/min、260 cm/min、280 cm/min、300 cm/min、320 cm/min

图 6 不同送丝速度下堆积金属形貌

Fig. 6 Macroscopic morphology of depositing metal under different wire feeding speeds

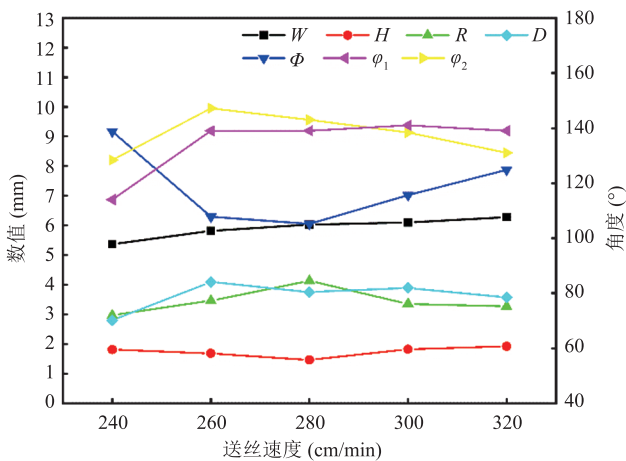


图 7 送丝速度对堆积金属尺寸参数与截面参数的影响

Fig. 7 The influence of wire feeding speed on the shape and cross-section parameters of the depositing metal

时, 随着送丝速度的增加, 熔宽 (W) 增加, 熔高 (H) 减小, 宽高比 (R) 增加; 当送丝速度高于 280 cm/min 时, 随着送丝速度的增加, 熔宽增加, 熔高增加, 宽高比趋于稳定。究其原因: 随着送丝速度的增加, 单位时间内熔敷金属的量增加, 熔宽增加。当送丝速度低于 280 cm/min 时, 单位时间内丝材的送给量低于可熔化量, 随着送丝速度的增加, 其熔高减小, 宽高比增加; 随着送丝速度继续增加, 单位时间内熔敷金属的量增加, 当单位时间内丝材的送给量达到或超过可熔化量时, 其熔高开始增加, 宽高比趋于稳定。

在形状参数方面, 当送丝速度低于 280 cm/min 时, 圆弧半径 (D) 增加, 圆弧角度 (Φ) 减小, 润湿角 (φ) 数值增加; 当送丝速度高于 280 cm/min 时, 随着送丝速度的增加, 圆弧半径先减小后趋于稳定, 圆弧角度则缓慢增加后趋于稳定, 润湿角数值始终处于稳定状态。其原因是: 在其他参数一定的条件下, 当送丝速度低于 280 cm/min 时, 单位时间内送丝量低于熔化量, 堆积金属不能充分扩散, 整体截面呈窄高形, 随着送丝速度增加, 圆弧半径增大, 圆弧角度减小, 整体界面趋于宽低形, 润湿角也随之增加; 当送丝速度高于 280 cm/min 时, 随着送丝速度增加, 单位时间内熔敷量趋于稳定, 电弧作用时间一定的条件下, 圆弧半径先减小后趋于稳定, 圆弧角度则缓慢增加后趋于稳定, 润湿角数值始终处于稳定状态。

3.1.3 峰值电流的影响

图 8 为不同峰值电流条件下堆积金属的宏观照片, 由图 8 可知, 在不同峰值电流下, 堆积得到的钛合金成形质量均良好, 无明显缺陷。图 9 为不同峰值电流 (I_p) 条件下堆积金属尺寸参数和界面参数的变化趋势。由图 9 可知, 在其他工艺参数一定的条件下, 当峰值电流由 230 A 增加至 310 A 时, 堆积金属的熔宽 (W) 增加, 熔高 (H) 基本保持不变, 宽高比 (R) 也随之增加。究



注：从上至下，峰值电流依次为 230 A、250 A、270 A、290 A、310 A

图 8 不同峰值电流下堆积金属形貌

Fig. 8 Macroscopic morphology of depositing metal under different peak currents

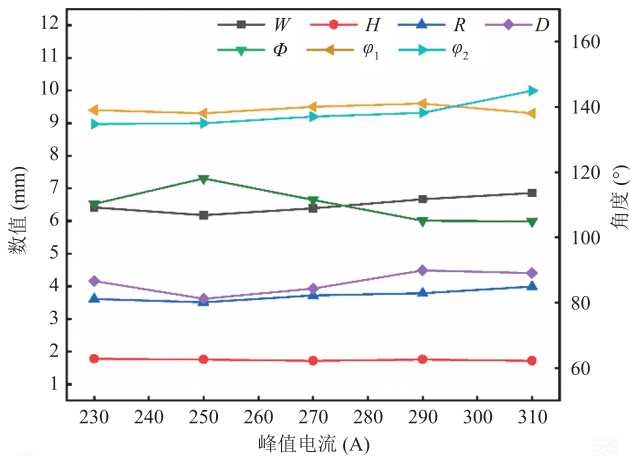


图 9 峰值电流对堆积金属尺寸参数与截面参数的影响

Fig. 9 The influence of peak current on the shape and cross-section parameters of the depositing metal

其原因是：随着电流的增加，单位时间内熔敷金属的量增加，熔宽增加，然而电弧电压并未发生变化，所以熔高基本保持不变，宽高比也就随之增加。

在形状参数方面，随着峰值电流的增加，其圆弧角度(Φ)先增加后减小，圆弧半径(D)先减小后增加，润湿角(φ)则基本保持不变。究其原因是：当峰值电流低于 250 A 时，随着峰值电流的增加，熔敷量增加，熔宽增加，熔敷金属充分

扩散，圆弧半径减小，圆弧角度增加；当峰值电流高于 250 A 时，随着峰值电流继续增加，熔敷金属量增加，在电弧作用时间一定的情况下，熔敷金属开始出现难以充分扩散的情况，单位长度熔敷金属出现“冗余”现象，使得其圆弧半径增加，圆弧角度减小。此外，虽然熔敷金属出现“冗余”现象，但由于熔宽的增加，其润湿角仍可在一定的范围内保持基本不变。

国内对等离子弧增材制造钛合金熔覆层成形的研究较少。Lin 等^[18]指出影响脉冲等离子弧增材制造 Ti-6Al-4V 的因素主要为峰值电流、焊接速度和送丝速度，其利用回归分析和二次回归分析处理、优化工艺参数，发现当峰值电流为 250 A、焊接速度为 4.1 mm/s 和送丝速度为 300 cm/min 时，Ti-6Al-4V 的成形高度和宽度最好。本文优化后的等离子电弧增材制造 Ti-6Al-4V 的工艺参数为：枪体移动速度 6 mm/s 左右，送丝速度 280 cm/min 左右，峰值电流 250 A 左右，该工艺参数组合可在较低的送丝速度下提高打印速度。

3.2 等离子体电弧增材制造 Ti-6Al-4V 组织特征

图 10 为等离子体电弧 3D 打印堆积得到的 Ti-6Al-4V 构件金相组织照片，由图 10(a)可知，堆积得到的 Ti-6Al-4V 构件存在贯穿堆积层的粗大晶界 α 相 (α grain boundary, α_{GB})，且沿堆积方向从上到下，其微观组织存在明显的差异，如图 10(b)~(d) 所示。根据微观组织的构成不同，可将堆积得到的 Ti-6Al-4V 构件分为 3 个大区域：顶层区域、中间层区域和底层区域。如图 10(a) 所示，其中，顶层区域主要为粗大的 α_{GB} 和马氏体 (α martensitic, α_M)， α_M 呈明显的长针状结构，该区域值的微观特征与 Bermingham 等^[12]利用电弧增材制造钛合金微观组织相近，都具有明显的柱状晶特征；中间层区域虽然也存在 α_M ，但其长宽比明显减小，且 α_M 所占比例明显减小，在部分区域内有少量片层状组织 (α colony) 出

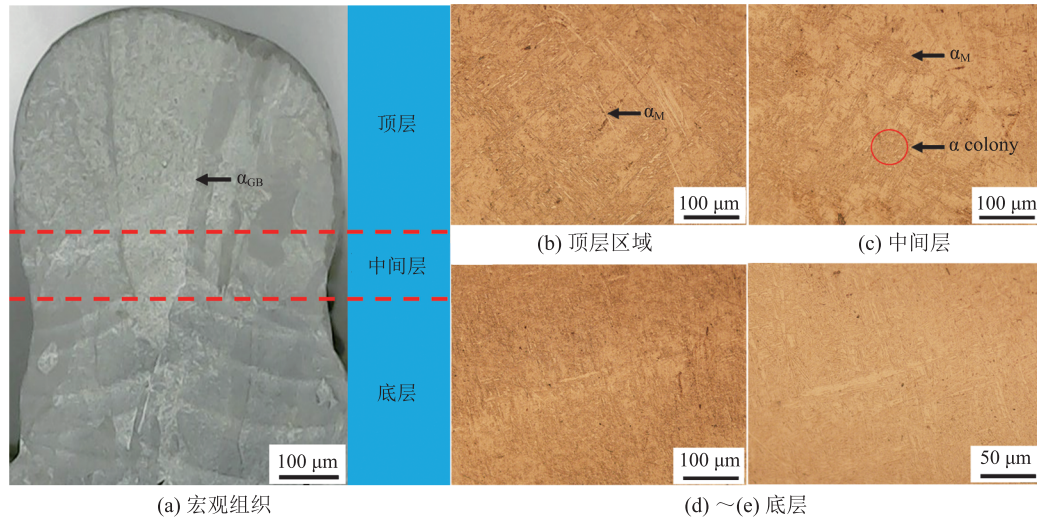


图 10 等离子体电弧 3D 打印 Ti-6Al-4V 构件组织

Fig. 10 Metallographic microstructure of Ti-6Al-4V deposited by plasma arc 3D printing

现; 底层区域的微观组织相对均匀, 主要由网篮状的 $\alpha+\beta$ 组成, 组织中很难观测到 α_M , 部分区域可能存在少量的 α_M , 如图 10(d)~(e)所示。底层网篮状 $\alpha+\beta$ 组织与 Mereddy 等^[17]利用 Si 细化得到的增材制造钛合金的微观组织相近, 其为增材制造钛合金构件优良性能的最有利组织。

等离子体电弧 3D 打印的热循环具有两大特点: 快速加热和快速冷却, 最大冷却速度可达 $50\text{ }^\circ\text{C/s}$ (相变温度以上); 往复堆积成形会使得已成形部分经受多次的热循环作用。由 Ti-6Al-4V 的相变图可知, Ti-6Al-4V 的马氏体转变温度为 $580\text{ }^\circ\text{C}$, 当冷却速度大于 $20\text{ }^\circ\text{C/s}$ 时, Ti-6Al-4V 即可析出 α_M , 顶层区域由熔融金属凝固形成, 在凝固过程中, 液态金属快速凝固首先形成粗大的 α_{GB} ; 当温度降至 $580\text{ }^\circ\text{C}$ 以下时, Ti-6Al-4V 开始逐渐由 β 相直接形成针状的 α_M , 如图 11(a)所示, 因此, 顶层区域的组织基本上由粗大的 α_{GB} 和细长的 α_M 构成。

中间层组织为热循环后的凝固组织, 往复加热使部分 α_M 再次转变为 β 相, 但随着堆积层数的增加, 冷却速度下降, β 相开始逐渐转变为片层状的 α 相, 并在部分区域形成 $\alpha+\beta$ 相, 如

图 11(b)所示。

底层区域为多次热循环后能够保持温度的部分, 其在经历多次相变温度以上的热循环后, 还会经历多次的再加热过程。在实际的堆积成形过程中, 多次的热循环会使已成形部分产生大量的热量积累, 降低已成形部分的温度分布, 可使已成形部分的组织逐渐稳定化与均匀化; 多次的再加热过程, 使片层状的 α 相及部分残留的 β 相逐渐转变为交错排列网篮状组织 ($\alpha+\beta$ 相), 如图 11(c)所示。

3.3 等离子体电弧 3D 打印 Ti-6Al-4V 薄壁构件成形与组织性能分析

3.3.1 成形质量分析

在 $200\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 12\text{ mm}$ 的 TC4 钛合金板上, 堆积得到薄壁圆柱体如图 12(a)所示, 圆柱体的直径为 80 mm , 壁厚为 10 mm , 堆积得到的构件实际尺寸如表 2 所示。由表 2 可知, 堆积得到的薄壁圆柱体尺寸误差不超过 2% , 成形精度满足要求。利用铣床对圆柱体进行铣削加工, 得到的构件如图 12(b)所示, 由图 12(b)可知, 机加工后的成形构件表面呈金属光泽, 无明显缺陷, 成形质量优良。

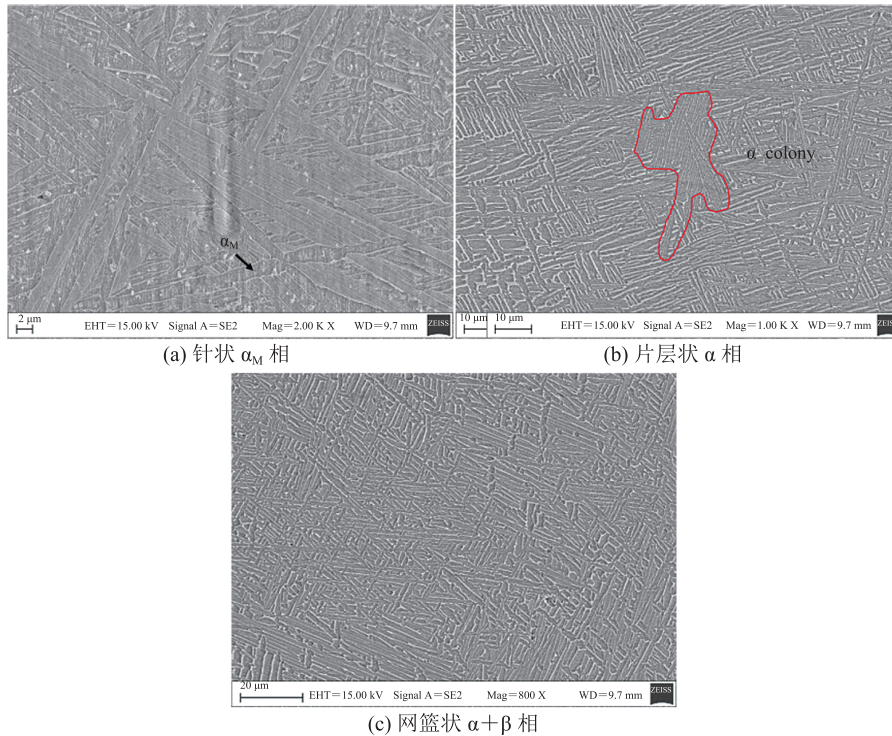
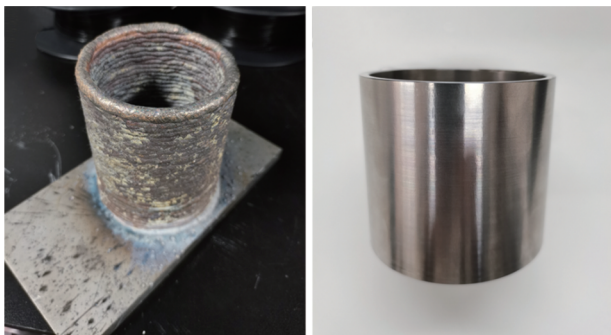


图 11 Ti-6Al-4V 构件 SEM 组织照片

Fig. 11 SEM micrograph of Ti-6Al-4V



(a) 未处理构件

(b) 机加工后构件

图 12 薄壁圆柱体构件

Fig. 12 Thin-walled cylindrical components

表 2 薄壁圆柱体构件尺寸参数

	设计值 (mm)	实测值 (mm)	误差 (%)
直径	80	81.23	1.53
厚度	10	10.05	0.05

3.3.2 力学性能检测与断口分析

在堆积得到的单道多层堆积金属试样中，截

取力学性能试样进行分析检测，测量得到堆积金属的拉伸强度为 1 150 MPa，高于 TC4 钛合金的力学性能 (895 MPa)。利用非熔化极气体保护焊 (Tungsten Inert Gas, TIG) 堆积得到的 TC4 钛合金在 X 方向、 Z 方向的最大拉伸强度分别为 947.14 MPa、926.85 MPa^[16]，与传统的 TIG 堆积金属相比，等离子体电弧 3D 打印的拉伸强度有明显提高；对断口进行扫描电镜 SEM 观察发现，断口形貌呈明显的韧窝状结构，为韧性断裂，如图 13 所示。综上所述，等离子体电弧 3D 打印的钛合金构件的性能满足使用要求。

4 结论

本文研究了等离子体电弧 3D 打印工艺参数对堆积金属成形尺寸以及形状参数的影响规律，并对成形构件的微观组织、力学性能以及断口形貌进行观察和分析，得到的主要结论如下：

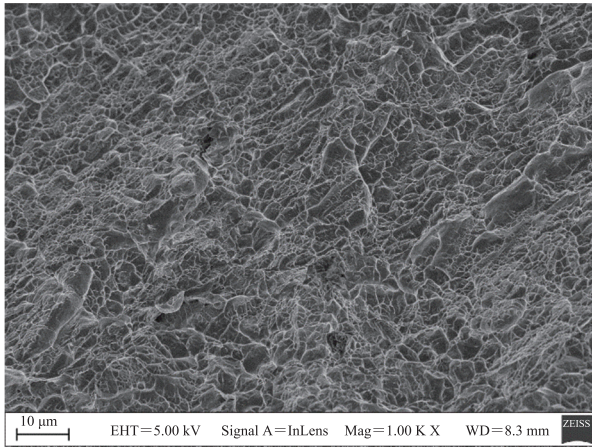


图 13 堆积金属断口形貌 SEM 照片

Fig. 13 SEM photograph of fracture morphology

(1) 本文优化后的实验装置工艺参数为: 枪体移动速度 6 mm/s 左右, 送丝速度 280 cm/min 左右, 峰值电流 250 A 左右。随着枪体移动速度的增加, 单位长度熔敷金属的量减小, 堆积金属的熔宽与熔高不断减小, 宽高比保持稳定, 圆弧角度增加, 圆弧半径减小, 润湿角增加; 随着送丝速度的增加, 熔宽增加, 熔高先减小后增加, 宽高比先增加后趋于稳定, 圆弧半径先增加后减小并趋于稳定, 圆弧角度则先减小后缓慢增加并趋于稳定, 润湿角数值先增加后趋于稳定; 随着峰值电流的增加, 堆积金属的熔宽增加, 熔高基本保持不变, 宽高比增加, 圆弧角度先增加后减小, 圆弧半径先减小后增加, 润湿角则基本保持不变。

(2) 等离子体电弧 3D 打印的 Ti-6Al-4V 构件分为 3 个大区域: 顶层区域、中间层区域以及底层区域。其中, 顶层区域主要由粗大的 α_{GB} 和 α_M 组成, α_M 为明显的长针状结构; 中间层区域虽然存在 α_M , 但其长宽比明显减小, α_M 所占比例也明显减小, 在部分区域出现了少量的片层状组织 (α colony); 底层区域的微观组织则相对均匀, 主要由网篮状组织 ($\alpha + \beta$) 组成。

(3) 等离子体电弧 3D 打印的薄壁圆柱体尺寸误差不超过 2%, 成形尺寸精度与成形质量均满

足要求, 其微观组织主要由 α 、 β 相组成, 晶粒细小, 堆积金属的拉伸强度为 1 150 MPa, 满足使用要求。

参 考 文 献

- [1] 刘世锋, 宋玺, 薛彤, 等. 钛合金及钛基复合材料在航空航天的应用和发展 [J]. 航空材料学报, 2020, 40(3): 77-94.
Liu SF, Song X, Xue T, et al. Application and development of titanium alloy and titanium matrix composites in aerospace field [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2020, 40(3): 77-94.
- [2] 余绍伟, 罗杰, 张明蕾, 等. 钛合金在航空领域的应用及其先进连接技术的相关探讨 [J]. 内燃机与配件, 2020, (6): 30-31.
Yu SW, Luo J, Zhang ML, et al. Discussion on the application of titanium alloy in aviation field and its advanced connection technology [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2020, (6): 30-31.
- [3] 刘全明, 张朝晖, 刘世锋, 等. 钛合金在航空航天及武器装备领域的应用与发展 [J]. 钢铁研究学报, 2015, 27(3): 1-4.
Liu QM, Zhang CH, Liu SF, et al. Application and development of titanium alloy aerospace and military hardware [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2015, 27(3): 1-4.
- [4] 余圣甫, 禹润缜, 何天英, 等. 电弧增材制造技术及其应用的研究进展 [J]. 中国材料进展, 2021, 40(3): 198-209.
Yu SF, Yu RZ, He TY, et al. Wire arc additive manufacturing and its application: research progress [J]. Materials China, 2021, 40(3): 198-209.
- [5] Dai YL, Yu SF, Huang AG, et al. Microstructure and mechanical properties of high building multi-directional pipe joint by wire and arc additive manufacturing [J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2020, 27(7): 933-942.
- [6] Biswal R, Zhang X, Syed AK, et al. Criticality of porosity defects on the fatigue performance of wire + arc additive manufactured titanium alloy [J]. International Journal of Fatigue, 2019, 122: 208-217.

- [7] Martina F, Mehnen J, Williams SW, et al. Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti-6Al-4V [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212(6): 1377-1386.
- [8] Gu DD, Shi XY, Poprawe R, et al. Material-structure-performance integrated laser-metal additive manufacturing [J]. *Science*, 2021, 372(6545): eabg1487.
- [9] 吴随松, 郭纯, 刘武猛. 钛合金电弧增材制造国内外研究的发展现状 [J]. *现代制造技术与装备*, 2021, 57(3): 204-205.
Wu SS, Guo C, Liu WM. Research status and prospect of wire and arc additive manufactured titanium alloy [J]. *Modern Manufacturing Technology and Equipment*, 2021, 57(3): 204-205.
- [10] 夏玉峰, 滕海灏, 张雪, 等. Ti-6Al-4V 合金电弧熔丝增材的组织性能研究进展 [J]. *重庆大学学报*, 2022, 45(4): 87-99.
Xia YF, Teng HH, Zhang X, et al. A review of the wire arc additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy: properties, defects and quality improvement [J]. *Journal of Chongqing University*, 2022, 45(4): 87-99.
- [11] 张海鸥, 熊新红, 王桂兰. 等离子熔积/铣削复合直接制造高温合金双螺旋整体叶轮 [J]. *中国机械工程*, 2007, 18(14): 1723-1726.
Zhang HO, Xiong XH, Wang GL. Directly manufacturing of superalloy double helix integrated impeller by hybrid plasma deposition & milling [J]. *China Mechanical Engineering*, 2007, 18(14): 1723-1726.
- [12] Bermingham MJ, StJohn DH, Krynen J, et al. Promoting the columnar to equiaxed transition and grain refinement of titanium alloys during additive manufacturing [J]. *Acta Materialia*, 2019, 168: 261-274.
- [13] Zou ZY, Simonelli M, Katrib J, et al. Microstructure and tensile properties of additive manufactured Ti-6Al-4V with refined prior- β grain structure obtained by rapid heat treatment [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2021, 814: 141271.
- [14] Liu ZY, Zhao DD, Wang P, et al. Additive manufacturing of metals: microstructure evolution and multistage control [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, 100: 224-236.
- [15] Wang YP, Qi BJ, Cong BQ, et al. Arc characteristics in double-pulsed VP-GTAW for aluminum alloy [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 249: 89-95.
- [16] 刘宁. TC4 钛合金 TIG 填丝堆焊成型技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
Liu N. Research on Ti-6Al-4V shape metal deposition by TIG welding with wire [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [17] Mereddy G, Bermingham MJ, StJohn DH, et al. Grain refinement of wire arc additively manufactured titanium by the addition of silicon [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 695: 2097-2103.
- [18] Lin JJ, Lv YH, Liu YX, et al. Microstructural evolution and mechanical property of Ti-6Al-4V wall deposited by continuous plasma arc additive manufacturing without post heat treatment [J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2017, 69: 19-29.