

引用格式:宋洪松,张国会,刘明明,等. 无人机钛合金桁架氩弧焊焊接工艺研究[J]. 热加工工艺, 2026, 55(12):104-113. SONG Hongsong, ZHANG Guohui, LIU Mingming, et al. Research on TIG Welding Process of Titanium alloy Trusses for UAV [J]. Hot Working Technology, 2026, 55(12):104-113.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.26010098

# 无人机钛合金桁架氩弧焊焊接工艺研究

宋洪松<sup>1</sup>, 张国会<sup>1</sup>, 刘明明<sup>2</sup>, 高俊杰<sup>2</sup>, 张继华<sup>2</sup>

(1. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095; 2. 航发优材(镇江)增材制造有限公司, 江苏 镇江 212132)

**摘 要:**针对无人机钛合金桁架,开展 TC4 与 TA18 异种钛合金氩弧焊工艺系统性研究。通过优化焊接电流、保护气流量等工艺参数,获得了成形良好、无缺陷的焊接接头。采用 OM、SEM、XRD 等分析手段对焊接接头的微观组织演变、元素分布、物相组成及力学性能进行分析研究,阐述了焊接接头微观结构与力学性能的关联。结合桁架结构特点及焊接特性,设计专用焊接与热处理工装,有效控制了桁架结构的焊接变形。结果表明,在焊接电流 30 A、保护气流量 10 L/min 条件下,接头显微硬度分布均匀,室温及高温力学性能均满足使用要求,接头强度高于 TA18 母材的 80%;配套工装可有效抑制焊接变形,该工艺具有良好的工程应用前景。

**关键词:**无人机;钛合金;氩弧焊;异种材料焊接;焊接变形控制

中图分类号: TG442

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2026)12-0104-10

## Research on TIG Welding Process of Titanium alloy Trusses for UAV

SONG Hongsong<sup>1</sup>, ZHANG Guohui<sup>1</sup>, LIU Mingming<sup>2</sup>, GAO Junjie<sup>2</sup>, ZHANG Jihua<sup>2</sup>

(1. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2. HFYC (Zhenjiang) Additive Manufacturing Co., Ltd., Zhenjiang 212132, China)

**Abstract:** The argon arc welding process of TC4 /TA18 dissimilar titanium alloys for UAV titanium alloy truss structures was systematically studied. By optimizing process parameters such as welding current and shielding gas flow, weld joints with good formation and no defects were obtained. The microstructure evolution, element distribution, phase composition and mechanical properties of the weld joints were analysed using OM, SEM, XRD and other testing techniques, illustrating the correlation between the microstructure and mechanical properties in different regions of the weld joints. Targeting the welding characteristics of truss structures, specialised welding and heat treatment fixtures were designed to effectively control welding deformation of truss structures. The results show that under the parameters of welding current of 30 A and shielding gas flow of 10 L/min, the microhardness distribution of the joint is uniformly distributed, and the mechanical properties at room and high temperatures meet the service requirements. The joint strength of the welded joint is higher than 80% of the TA18 base material. The fixtures can effectively control the welding deformation. The welding process possesses good prospects for engineering applications.

**Key words:** unmanned aerial vehicle (UAV); titanium alloy; TIG welding; dissimilar material welding; welding distortion control

钛合金因其轻质、高强、耐高温、耐腐蚀等优异性能,被广泛应用于航空航天、海洋工程、化工及压力容器等领域<sup>[1-5]</sup>。随着国内先进飞行器技术持续发展,钛合金逐渐应用于管路系统。相较于传统不锈钢、铝合金管材,钛合金管不仅能够承担更大的工作压力,还能够满足航空航天领域对可靠性及持久性

的要求<sup>[6-9]</sup>。如今,随着钛合金构件向大型化、复杂化方向发展,焊接作为一种高效连接方式,已成为钛合金制造不可或缺的手段,越来越受到重视<sup>[10-14]</sup>。

然而,单一钛合金部件难以在复杂工况下满足性能要求。采用异种钛合金组合结构,既能融合不同钛合金的性能优势,还可有效降低生产成本<sup>[15-16]</sup>。近年来,异种钛合金已在航空航天领域得到大量应用。例如,航空发动机涡轮叶盘,其圆盘和叶片分别采用不同的钛合金制成,以保证整体使用要求<sup>[17-19]</sup>。

Xu 等<sup>[20]</sup>研究发现,异种钛合金焊接接头的显微硬度呈对称分布,其中熔合区(fusion zone, FZ)显微

收稿日期:2026-01-18 修回日期:2026-03-11

基金项目:江苏省科技项目-创新支撑计划国际科技合作/港澳台科技合作-政府间双边创新合作项目(BZ2024011)

作者简介:宋洪松,男,硕士,主要研究方向:航空材料和结构加工工艺开发与应用;E-mail:songhongsong@126.com

硬度最高,TA15 母材的显微硬度最低。屈服强度和抗拉强度依次为:TC4 母材 >TC4/TC4 同种焊接接头 >TA15 母材 >TA15/TA15 同种焊接接头 >TC4/TA15 异种焊接接头。随着应变速率  $1 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$  提高至  $1 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$  时,接头强度随之升高,材料的硬化能力和应变硬化指数均呈下降趋势。微观组织分析显示,FZ 以粗大柱状晶为主,晶内分布大量针状  $\alpha$  相和马氏体  $\alpha'$  相;TC4 侧热影响区存在部分残余  $\alpha$  相和马氏体结构,TA15 侧热影响区为等轴  $\alpha$  相。

Ou 等<sup>[20]</sup>研究发现,钛合金焊接后微观结构出现明显变化:热影响区形成了  $\alpha$  相、 $\alpha'$  马氏体和  $\beta$  相,熔合区以  $\alpha'$  马氏体为主;母材中则为含少量  $\beta$  相的  $\alpha$  相。受化学成分和微观结构的差异影响,接头的显微硬度呈不对称分布。该接头的抗拉强度和屈服强度介于两种母材之间,但因母材强度差异较大,接头伸长率低于两种母材。其中钛合金母材的强度最低,最终接头在热影响区附近发生韧性断裂。

Li 等<sup>[22]</sup>也发现,异种钛合金焊接接头不同区域的显微组织存在明显差异。熔合区主要由细小的  $\alpha'$  马氏体组成。TC4 侧热影响区由马氏体、块状  $\alpha$  相、原  $\alpha$  相和  $\beta$  相组成,TA7 侧的热影响区由少量马氏体、块状  $\alpha$  相和原始  $\alpha$  相组成。透射电镜(TEM)结果显示,由于改性焊接的作用,接头上部的马氏体晶粒变粗,熔合区内部产生位错。元素线扫描和面分布表明,合金元素在接缝界面处分布较为均匀,无明显的偏析。该异种接头抗拉强度略高于 TA7 母材,伸长率略低于两种母材。拉伸过程失效位置位于 TA7 母材侧,断口呈现韧性断裂特征。现阶段,尽管异种钛合金氩弧焊的组织、性能研究已较多,但 3D 打印钛合金构件与锻造/铸造钛合金构件的异种焊接相关研究较少。随着 3D 打印技术逐步成熟和推广,基于 3D 打印构件的异种钛合金焊接技术成为焊接领域的重要研究方向。

基于上述背景,本文以无人机(unmanned aerial vehicle,UAV)桁架 3D 打印的 TC4 管材和 TA18 合金管材为研究对象,开展异种钛合金氩弧焊工艺试验。通过焊接工艺的系统研究,确定了最佳氩弧焊工艺参数,分析了异种焊接接头的微观组织和力学性能,可为改善 3D 打印钛合金异种焊接应力分布、优化焊接结构等提供技术支持。结合桁架管接头需与 2~8 根钛合金管连接、不同位置的管接头结构不同的特点,本文设计专用焊接工装并制定合理焊接顺序,有效控制了桁架结构的焊接变形。同时配套设计

去应力热处理专用工装,避免构件在热处理过程中产生变形。

## 1 试验材料及方法

以 TC4、TA18 钛合金为对象开展焊接试验,通过调节焊接电流、保护气流量等参数,初步确定了焊缝成形质量良好的钨极氩弧焊(tungsten inert gas welding, TIG)工艺窗口。母材尺寸为  $50 \text{ mm} \times 24 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ ,填充焊丝为  $\phi 2.0 \text{ mm}$  的与母材同成分的 TC4 焊丝,母材的化学成分见表 1。焊前清除试样待焊表面的氧化物及油污,并在对接面加工  $45^\circ$  坡口,保证焊缝熔透与焊丝的有效填充。采用方波交直流氩弧焊机进行填丝对接焊,钨极直径为  $\phi 1.8 \text{ mm}$ ,焊接过程使用纯度  $\geq 99.99\%$  的氩气进行保护。填丝 TIG 焊工艺示意图如图 1 所示。

表 1 母材的化学成分(质量分数,%)  
Tab.1 Chemical composition of base material (wt%)

| 材料   | C           | H            | O           | N            | V              | Fe          | Al             | Ti |
|------|-------------|--------------|-------------|--------------|----------------|-------------|----------------|----|
| TC4  | $\leq 0.10$ | $\leq 0.015$ | $\leq 0.20$ | $\leq 0.05$  | $3.5 \sim 4.5$ | $\leq 0.30$ | $5.5 \sim 6.8$ | 余量 |
| TA18 | $\leq 0.05$ | $\leq 0.015$ | $\leq 0.12$ | $\leq 0.025$ | $2.0 \sim 3.0$ | $\leq 0.30$ | $2.5 \sim 3.5$ | 余量 |

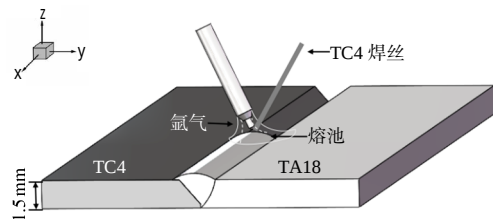


图 1 填丝 TIG 焊工艺示意图

Fig.1 Schematic diagram of filler wire TIG welding process

采用金相显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)、能谱仪(EDS)和 X 射线衍射(XRD)分析接头微观组织与物相组成,并开展显微硬度、室温和高温拉伸、高温持久力学性能测试(试样尺寸如图 2 所示)及断口分析。设计专用焊接与热处理工装,制定对称焊接顺序,采用管内充氩保护,控制焊接与热处理过程中的结构变形。

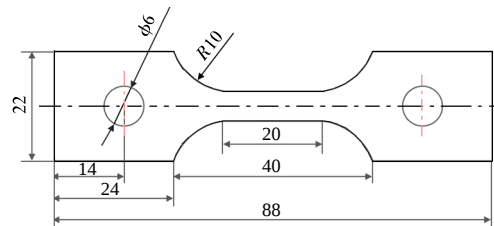


图 2 拉伸及持久力学性能试样形状及尺寸(mm)  
Fig.2 Shape and dimensions of specimen for tensile and durability mechanical properties (mm)

## 2 结果与讨论

### 2.1 焊接工艺参数优化

结合工程实践经验,针对厚度 1.5mm 的钛合金构件,为保障焊接接头的成形与质量,将焊接电流设定为 25~35 A,保护气流量设定为 10~20 L/min。为优选焊接电流和保护气流量工艺参数,试验工艺参数设置如表 2 所示。

采用上述 9 组工艺参数开展焊接试验并对性能进行评判,初步筛选出合适的焊接参数。对各参数焊接试板进行显微硬度测试,结果如图 3 所示,图 3 (a)~(c)的编号与表 2 参数组别对应。从图 3 可以

表 2 试验工艺参数  
Tab.2 Process parameters of test

| 工艺参数                          | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  |
|-------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 焊接电流 /A                       | 25 | 25 | 25 | 30 | 30 | 30 | 35 | 35 | 35 |
| 保护气流量 /(L·min <sup>-1</sup> ) | 10 | 15 | 20 | 10 | 15 | 20 | 10 | 15 | 20 |

看出,保持焊接电流不变时,随着保护气流量的增加,焊接板 TC4 或 TA18 侧硬度基本呈增加的趋势;当电流超过 30 A 后,继续调整保护气流量,硬度提升并不明显;保持保护气流量不变时,焊接板 TC4 或 TA18 侧硬度呈先增加后减小的趋势。结合硬度测试结果,最终确定最优工艺参数为焊接电流 30 A、保护气流量 10 L/min。

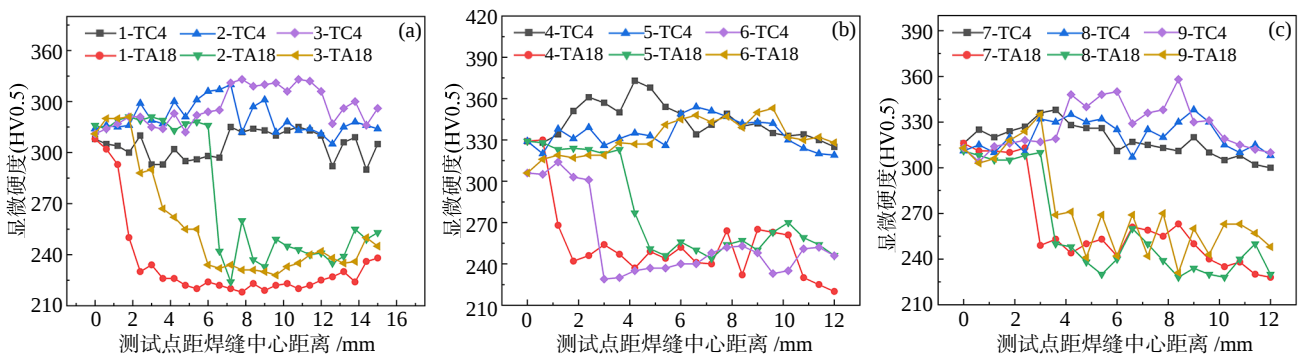


图 3 各参数下的显微硬度  
Fig.3 Microhardness under different process parameters

### 2.2 显微组织演化

对异种钛合金焊接接头焊态与热处理态焊缝、热影响区的微观组织及物相组成进行分析。图 4 为最优工艺参数下的焊缝宏观形貌,焊缝呈光亮的银白色,鱼鳞纹平滑、均匀。焊缝正面未见夹杂、裂纹和孔洞等缺陷,正面熔宽 7 mm 左右,背面熔宽 4 mm 左右。依据 HB 20160-2014 无损检测标准进行荧光渗透检测(图 5)和 X 射线检测,结果显示焊接区及热影响区表面无裂纹、未熔合及气孔等缺陷,焊缝质量达到 I 级。



图 4 焊接接头宏观形貌  
Fig.4 Macromorphology of weld joint

图 6~8 为焊接接头各区域的组织形貌。可看出,焊接接头冶金结合良好,无明显的气孔、裂纹、夹杂等缺陷。焊缝为典型的铸造组织,由粗大的柱状晶和少量等轴晶组成。熔池凝固时,柱状晶在熔合线处

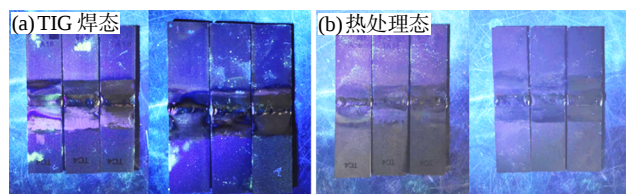


图 5 焊接接头荧光渗透检测  
Fig.5 Fluorescent penetrant inspection of welded joints

与母材未熔化的晶粒联生结晶,并在温度梯度的作用下,沿着焊接方向向焊缝中心生长。该接头主要分为分为焊缝区(FZ)和热影响区(Heat-affected zone, HAZ)。

图 6 为 TIG 焊接板母材的金相组织。由图可知,两种母材均为  $\alpha+\beta$  相等轴组织,由白色  $\alpha$  相与黑色  $\beta$  相组成,细小的  $\beta$  相均匀分布在粗大  $\alpha$  相晶界处。

图 7 为焊接接头焊缝区金相组织。由图 7(a)可见,焊缝晶粒粗大,以柱状晶为主,晶粒内部可以看到少量的长条状  $\alpha$  相和大长径比的针状  $\alpha'$  相。对针状  $\alpha'$  相放大观测如图 7(b)所示,可以看到针状  $\alpha'$  相长径比极大,相邻晶粒取向一致,呈平行排列的束域,其两侧存在取向不同的交错  $\alpha'$  束域,彼此交织。

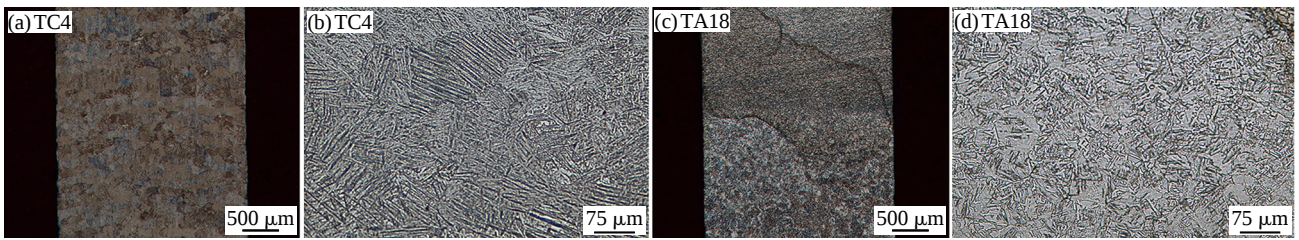


图6 焊接接头母材的金相组织  
Fig.6 Microstructure of base metal of welded joints

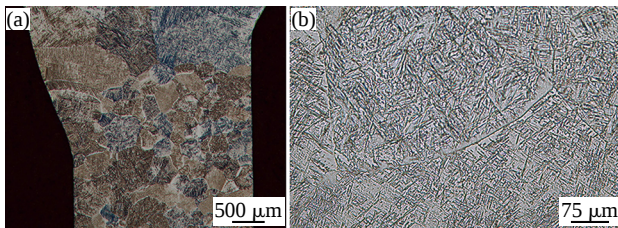


图7 焊接接头焊缝区金相组织  
Fig.7 Microstructure of welded seam zone of welded joints

在 TC4 钛合金加热过程中,当温度超过  $\alpha/\beta$  转变温度时,TC4 母材中的  $\alpha$  相向  $\beta$  相转变。由于合金元素在  $\beta$  相中的扩散系数较大, $\beta$  晶粒会快速长大。焊缝熔池冷却速度快,将原来粗大的  $\beta$  晶粒保留至固相,最终转变为针状马氏体  $\alpha'$  相,原  $\beta$  相晶界轮廓清晰。这类针状马氏体  $\alpha'$  存在特定的晶体学取向关系,大多由  $\beta$  晶界向晶内生长。

图 8 为焊接接头热影响区金相组织。从图 8 可见,TC4 侧近热影响区受热温度超过  $\alpha/\beta$  转变温度,

原有  $\alpha$  相完全转变为  $\beta$  相。该区域加热温度低于焊缝区域,冷却速度相比于焊缝区更快,最终尺寸小于焊缝的  $\beta$  等轴晶粒。在随后的冷却过程中, $\beta$  相转变为  $\alpha'$  相。由于此时熔池的冷却速度相对较大,使得针状马氏体  $\alpha'$  相既能够在  $\beta$  相晶界形核,又能够在  $\beta$  相晶内形核,形成网篮组织。随着距焊缝中心位置的增加,热影响区的加热温度仅能使部分  $\alpha$  相转变为  $\beta$  相,高温为  $\alpha+\beta$  双相,此时加热温度较低且冷却速度较快, $\beta$  晶粒来不及快速长大,晶粒尺寸较小;冷却后未转变的原生  $\alpha$  相保留下来,形成原生  $\alpha$  相+针状马氏体  $\alpha'$  相的双相组织。TA18 侧由于焊接热输入的影响, $\beta$  相晶粒具备成长条件,降温过程中  $\beta$  相为  $\alpha$  相生长提供了不同取向,最终形成大量片状与针状组织。而由于加热温度较低,冷却速度较快, $\beta$  相相互融合和长大受限,形成细小的  $\beta$  相,冷却后进一步转化成等轴的  $\alpha$  相。

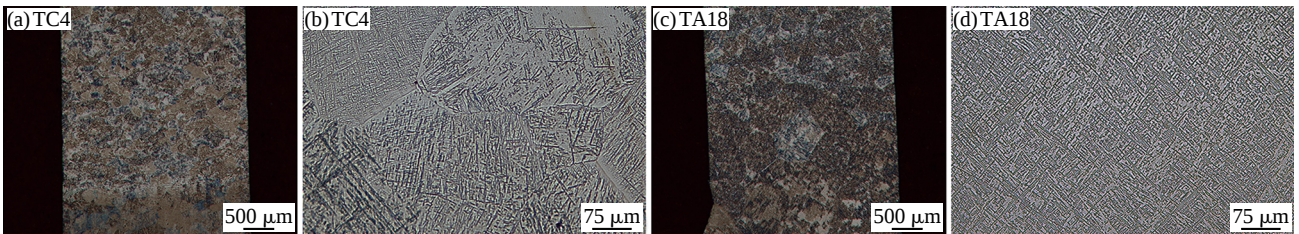


图8 焊接接头热影响区金相组织  
Fig.8 Microstructure of heat-affected zone of welded joints

焊后对焊接试样进行去应力退火处理,为研究热处理对焊接性能的影响,观察分析热处理后焊接试板不同区域的组织形貌,结果如图 9~11 所示。通过对比热处理前后各区域形貌可知,各区域晶粒均出现长大,且组织分布更均匀。其中,TC4 侧细长片状  $\alpha$  相减少,转变为短棒状  $\alpha$  相, $\alpha$  相宽度较焊态明显变大;TA18 侧  $\beta$  相含量减少,白色  $\alpha$  晶粒长径比减小,呈现等轴化特征。

### 2.3 元素及物相组成

采用能谱仪(EDS)与 X 射线衍射仪(XRD)对热处理后焊接接头 TC4、TA18 侧各区域进行测试,分

析其元素分布与物相组成。采用线扫方式检测,扫描路径如图 12 所示。1 区为焊缝区,2-1、2-2 分别为 TA18 热影响区和 TC4 热影响区,3-1、3-2 分别为 TA18 母材区和 TC4 母材区。EDS 线扫结果见表 3。由于焊丝材料为 TC4,可以看出焊缝区 Al、V 元素含量较 TC4 母材高,热影响区与母材元素分布、含量基本一致,说明钨极氩弧焊工艺对材料元素分布影响不大。

利用 X 射线衍射物(XRD)对接头各区域进行物相分析,结果如图 13 所示。从图可见,TA18 侧热影响区的物相组成与母材基本一致,仅衍射峰强度

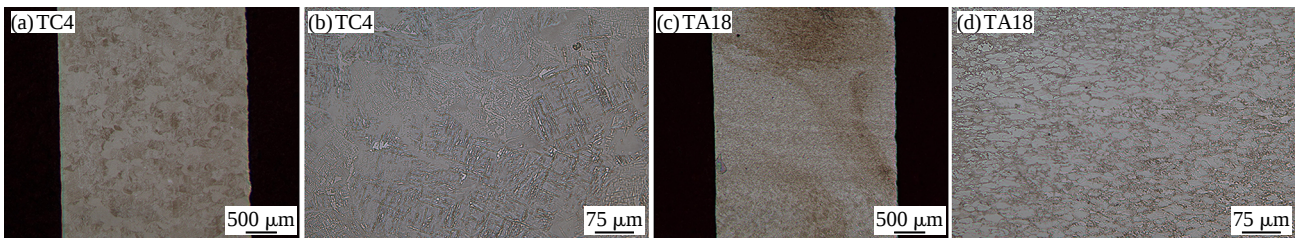


图 9 焊接接头母材区热处理态组织

Fig.9 Microstructure of base metal zone of welded joint after heat treatment

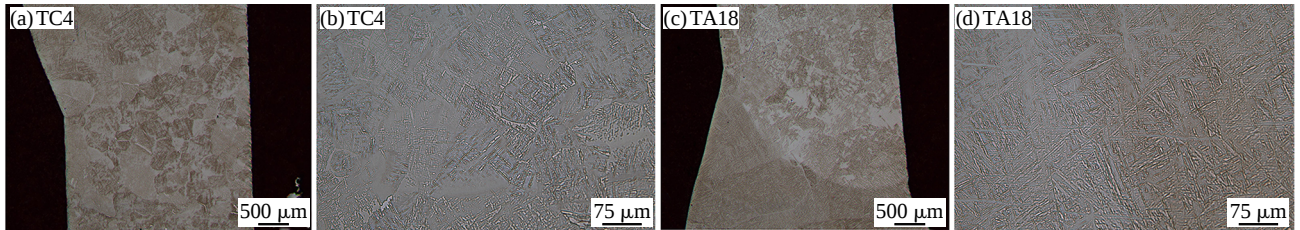


图 10 焊接接头焊缝区热处理态组织

Fig.10 Microstructure of weld zone of welded joint after heat treatment

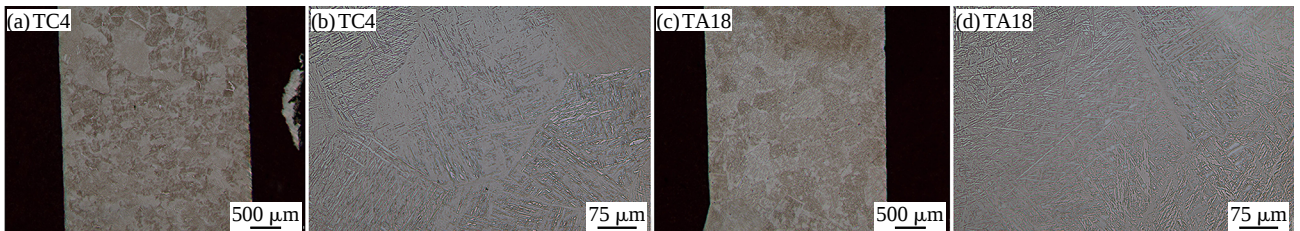


图 11 焊接接头热影响区热处理态组织

Fig.11 Microstructure of heat-affected zone of welded joint after heat treatment

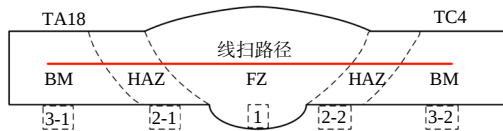


图 12 线扫路径示意图

Fig.12 Schematic diagram of line scanning path

表 3 各区域 EDS 结果(质量分数, %)

Tab.3 EDS results of each area (wt%)

| 测试区域      | Ti   | Al  | V   | Fe  | O   | C   | N   |
|-----------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 焊缝区       | 82.8 | 6.3 | 4.0 | 0.1 | 4.7 | 2.2 | 0.0 |
| TC4 母材区   | 85.9 | 3.3 | 2.5 | 0.1 | 6.0 | 2.1 | 0.1 |
| TA18 母材区  | 82.8 | 6.4 | 4.0 | 0.0 | 4.6 | 2.2 | 0.0 |
| TC4 热影响区  | 86.2 | 3.4 | 2.5 | 0.1 | 5.2 | 2.3 | 0.3 |
| TA18 热影响区 | 82.4 | 6.3 | 4.1 | 0.0 | 4.7 | 2.4 | 0.0 |

略低,这该区域组织更均匀有关;TC4 侧热影响区物相组成及对应衍射峰强度与母材差别显著:热影响区  $\alpha$ -Ti 最强衍射峰为(002)面,而母材  $\alpha$ -Ti 最强衍射峰为(101)面,热影响区衍射峰位置相对于母材  $\alpha$ -Ti 向小角度偏移,推测是热影响区  $\beta$  相占比增加, $\alpha$  相减少所致;焊缝区主体成分为 TC4,其  $\alpha$ -Ti 最强衍射峰为(101)晶面;同时该区域  $\alpha$ -Ti 衍射峰

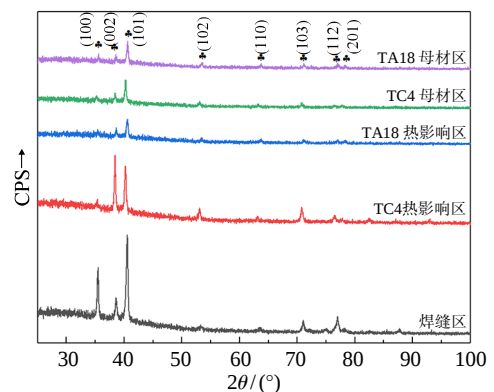


图 13 焊接接头各区域 XRD 分析

Fig.13 XRD analysis of different regions of welded joint

对于 TC4 热影响区向大角度偏移,这可能是由于 TA18 中 Al、V 溶入焊缝,增加了焊缝区 Al、V 含量,进而造成其发生变化。

## 2.4 力学性能

### 2.4.1 显微硬度

采用维氏显微硬度测试仪测试了异种钛合金焊接接头去应力退火前后的硬度,试验载荷为 4.9 N,测试路径由焊缝中心向两侧母材延伸,结果如图 14、15 所示。焊接接头近缝热影响粗晶区出现软化现

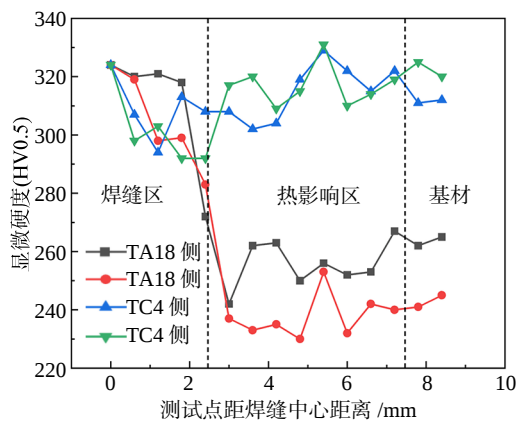


图 14 焊态焊接接头硬度曲线  
Fig.14 Hardness curves of welded joints

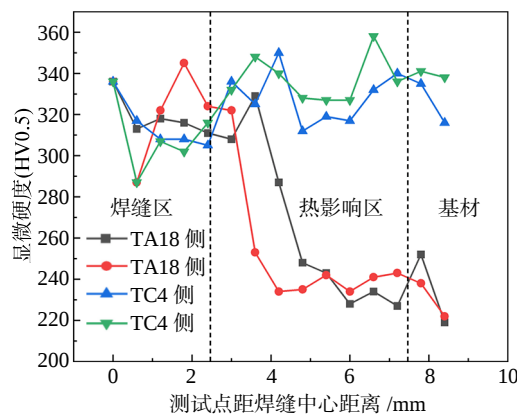


图 15 退火态焊接接头硬度曲线  
Fig.15 Hardness curves of annealed welded joints

象。TC4 侧硬度降至最低,低于母材;在热影响细晶区硬度有所增加,最终至母材硬度(320 HV0.5)。TA18 侧硬度同样低于母材,热影响细晶区有所增加,并逐渐增加至母材水平(250 HV0.5)。钛合金导热性差,近缝热影响区长时间处于过热状态, $\beta$  晶粒明显粗化,在随后的冷却过程中,较快的冷却速度使得未转变的  $\alpha$  相保留下来,形成  $\alpha+\alpha'$  双相组织,在硬度方面体现为熔合线附近粗晶区的显微硬度值降低。由于焊丝选用 TC4 材料,因此焊缝区硬度明显高于 TA18 母材。

对比热处理前后硬度,TC4 侧经热处理后硬度有所增加,这是由于热处理后组织中细长片状  $\alpha$  相减少,转变为短棒状  $\alpha$  相,滑移系数减小,使得硬度增加;TA18 侧硬度略微下降,这是由于热处理后显微组织粗化,相界面数量减少;同时  $\alpha$  相的体积分数降低, $\beta$  相的体积分数增加。 $\beta$  相滑移系数更多,更易发生塑性变形,因此该区域显微硬度较焊态小幅降低。

#### 2.4.2 室温、高温性能

表 4 为 TC4、TA18 母材以及 TC4/TA18 异种焊接试板在供货态、热处理态下的室温拉伸性能测试结果。TC4 母材供货态和热处理态的平均抗拉强度和屈服强度分别为 1084.3、1057.3 MPa 和 961.7、926.0 MPa;TA18 母材在供货态和热处理态的平均

表 4 室温拉伸性能  
Tab.4 Room temperature tensile properties

| 试样牌号     | 试样状态   | 抗拉强度 /MPa |        | 屈服强度 /MPa |       | 断后伸长率(%) | 断面收缩率(%) |
|----------|--------|-----------|--------|-----------|-------|----------|----------|
|          |        | 测试值       | 平均值    | 测试值       | 平均值   |          |          |
| TC4      | 供货态    | 1086      | 1084.3 | 980       | 961.7 | 13.0     | 25       |
| TC4      | 供货态    | 1074      |        | 953       |       | 14.5     | 26       |
| TC4      | 供货态    | 1093      |        | 952       |       | 14.0     | 26       |
| TC4      | 热处理态   | 1060      | 1057.3 | 910       | 926.0 | 13.0     | 25       |
| TC4      | 热处理态   | 1073      |        | 929       |       | 14.0     | 24       |
| TC4      | 热处理态   | 1039      |        | 939       |       | 11.0     | 20       |
| TA18     | 供货态    | 662       | 665.0  | 626       | 628.3 | 14.5     | 36       |
| TA18     | 供货态    | 661       |        | 625       |       | 19.0     | 36       |
| TA18     | 供货态    | 672       |        | 634       |       | 19.5     | 36       |
| TA18     | 热处理态   | 651       | 659.3  | 621       | 628.7 | 20.5     | 45       |
| TA18     | 热处理态   | 664       |        | 634       |       | 20.5     | 40       |
| TA18     | 热处理态   | 663       |        | 631       |       | 19.0     | 39       |
| TC4/TA18 | TIG 焊态 | 759       | 749.3  | 669       | 662.0 | 13.0     | 34       |
| TC4/TA18 | TIG 焊态 | 759       |        | 672       |       | 12.5     | 35       |
| TC4/TA18 | TIG 焊态 | 730       |        | 645       |       | 13.5     | 36       |
| TC4/TA18 | 热处理态   | 705       | 710.7  | 631       | 631.0 | 14.5     | 30       |
| TC4/TA18 | 热处理态   | 715       |        | 642       |       | 14.5     | 32       |
| TC4/TA18 | 热处理态   | 712       |        | 620       |       | 13.5     | 26       |

抗拉强度和屈服强度为 665.0、659.3 MPa 和 628.3、628.7 MPa; TC4/TA18 焊接接头焊态和热处理态的平均抗拉强度和屈服强度为 749.3、710.7 MPa 和 662.0、631.0 MPa。可看出,焊接接头的抗拉强度和屈服强度均高于 TA18 母材,满足钛合金氩弧焊接接头强度达到母材 80%的要求。

当 TA18 钛合金修复区达到抗拉极限时,TC4 基体仅达到屈服极限,因此断裂率先出现在母材侧;TA18 钛合金经热处理后, $\beta$  相分布更为弥散均匀,再结晶程度高,片层状  $\alpha$  相细化且取向不同。这类组织阻碍滑移产生,同时位错难以穿过  $\alpha/\beta$  相界面,使整体强度较低。TC4 热处理后,部分  $\alpha$  相向  $\beta$  相转变,等轴初生  $\alpha$  相比比例逐渐减少,次生  $\alpha$  相(马氏体  $\alpha'$ )增加。此外, $\beta$  相发生马氏体转变,该马氏体对材料的强化作用小,故热处理后强度降低。

表 5、6 分别为去应力退火后焊接试板高温拉伸和高温持久试验结果。根据材料使用工况,测试温度设定为 300 °C。测得 TC4/TA18 焊接接头高温平均拉伸抗拉强度和屈服强度分别为 440.5 MPa 和 397 MPa。依据高温拉伸数据,选取 300 °C、350 MPa 开展高温持久试验,试样保持 72 h 未断裂,继续增加载荷使其断裂,测得平均断后伸长率为 9.5%。由此可知,试样在 72 h 持久测试中未达到其极限,其高温持久性能大于 72 h,具有良好的高温使用性能。

表 5 高温拉伸性能  
Tab.5 High-temperature tensile properties

| 试样       | 温度 /°C | 抗拉强度 /MPa | 屈服强度 /MPa | 断后伸长率(%) |
|----------|--------|-----------|-----------|----------|
| TC4/TA18 | 300    | 443       | 403       | 11.0     |
| TC4/TA18 | 300    | 438       | 391       | 11.5     |

表 6 高温持久性能  
Tab.6 High-temperature durability

| 试样       | 温度 /°C | 应力 /MPa | 持续时间 /h | 断后伸长率(%) |
|----------|--------|---------|---------|----------|
| TC4/TA18 | 300    | 350     | 72      | 9.0      |
| TC4/TA18 | 300    | 350     | 72      | 10.0     |

为了进一步验证焊接接头的力学性能规律,对室温拉伸断口进行观察,结果如图 16 所示。图 16 中(a)~(f)依次对应热处理态 TC4 试板、热处理态 TA18 试板、供货态 TA18 试板、供货态 TC4 试板、热处理态 TC4/TA18 焊接试板以及焊态 TC4/TA18 焊接试板。由断口形貌可知:热处理态 TC4 试板(图 16(a))断口表面较为平坦,存在放射状条纹,由断裂源向外延伸扩展,无明显塑性变形,局部可见解理台

阶和河流花样,断口整体光滑,呈典型的解理断裂脆性。热处理态 TA18 试板(图 16(b))断口整体呈粗糙颗粒状,分布大量韧窝结构,韧窝尺寸较均匀,分布密集,部分韧窝底部可见第二相粒子,为典型韧性断裂特征。供货态 TA18 试板(图 16(c))断口表面呈现混合形貌,部分区域存在解理断裂面,部分区域分布细小韧窝,表现出准解理特征。供货态 TC4 试板(图 16(d))断口表面存在明显的二次裂纹,沿晶界扩展,晶粒轮廓清晰,局部晶面光滑,呈现冰糖状断口,为典型沿晶脆性断裂。热处理态 TC4/TA18 焊接试板(图 16(e))断口整体平整,无明显塑性变形。焊态 TC4/TA18 焊接试板(图 16(f))断口为韧-脆混合断裂特征,断裂面起伏较大,局部可见韧窝与解理台阶,韧窝较浅,解理面较小。结合形貌与力学性能分析可知,TC4 母材强度大,韧性小,其断口形貌为脆性断裂特征。同时对比焊态与热处理态焊接接头的断口形貌,可直观印证热处理后力学性能下降的变化规律。

## 2.5 多维度管接头与桁架管氩弧焊变形控制

### 2.5.1 焊接工艺参数优化

为实现焊接工艺的工程化应用,对无人机多维度管接头与桁架管氩弧焊变形控制进行研究。管接头与桁架管需先装配、后焊接,结合套管结构特性与优化后的工艺参数,设计合理的焊接管组顺序,既避免管件间相互干涉,也有效释放局部焊接应力,减小焊接变形。

根据桁架结构特点,设计了如下焊接顺序原则:

(1) 桁架装配后先进行点焊定位,正式焊接时采用对称施焊方式。

(2) 整体遵循由内向外、由中间向两端的焊接顺序,防止出现应力集中。

(3) 优先焊接截面较大的主要受力弦杆,再焊接截面较小的次受力弦杆。

### 2.5.2 辅助工艺优化以及焊后热处理

针对管接头与桁架管的焊接工况,设计专用焊接工装,并配套气氛保护、冷却等辅助工艺,以此减小焊接应力,抑制焊接变形。钛合金管接头与桁架管焊后应进行去应力热处理,针对不同结构的多维度管接头,设计相应的热处理专用工装,防止零件在热处理过程中发生变形。

根据管接头与桁架管的结构特点,设计如图 17 所示的工装。该工装集成夹持固定、气氛保护、焊接

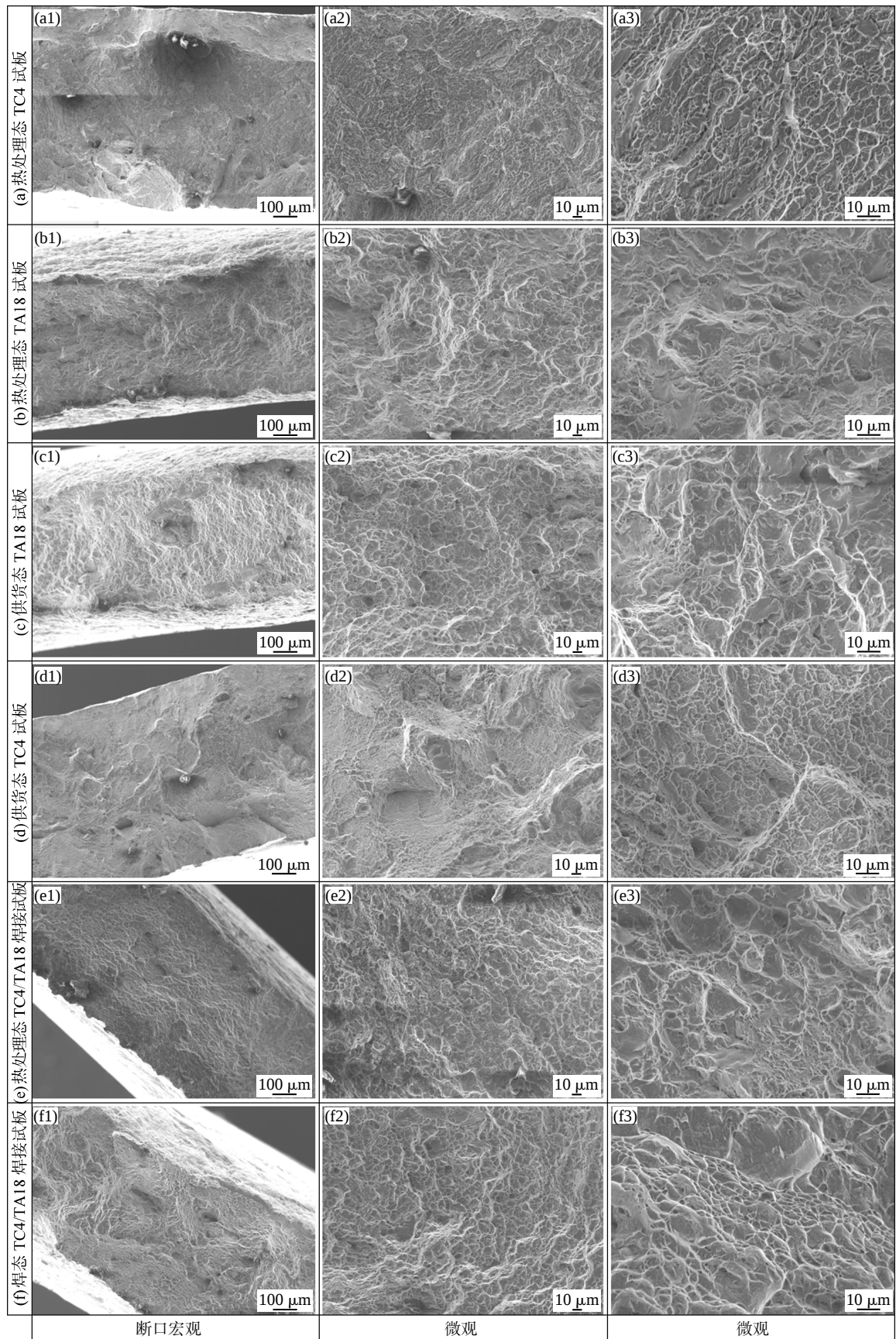


图 16 室温拉伸断口 SEM 图  
Fig.16 SEM images of room temperature tensile fracture

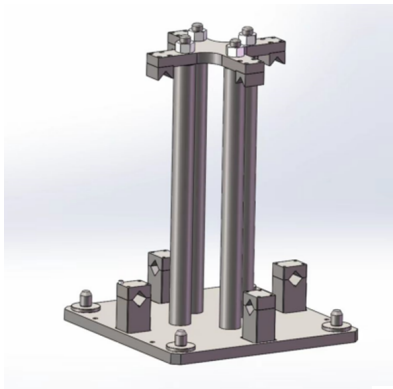


图 17 工装结构图  
Fig.17 Tooling structure diagram

防变形、热处理防变形等多项功能,工件从装配焊接到焊后热处理全程无需拆卸和更换工装。

按设计结构顺序,将管接头和桁架管拼接在工装上,采用三维扫描技术,将拼接好的桁架结构与设

计数模进行尺寸比对,结果如图 18 所示。图 18(a)~(d)分别表示装配前后、焊接前后、热处理前后、拆除工装与原始模型尺寸对比。结果表明,工装起到了良好的加持固定作用,可将多维度易变形结构的尺寸偏差基本控制在 0.5mm 以内。拼接完成后,利用桁架整体联通的特点,在管内通入高纯氩气进行保护,防止桁架受热氧化。依据上述焊接原则将桁架焊接完成后,对比焊前、焊后尺寸,焊后变形小于 0.5 mm,大多数区域变形仅在 0.1 mm 左右,证明该焊接顺序与工装能有效控制焊接变形。将热处理后及拆卸工装后桁架分别与原始桁架模型对比,桁架最大变形量控制在 1 mm 左右,多数区域变形量低于 0.2 mm,整体变形量较小。综合装配、焊接至焊后热处理全流程的尺寸检测结果可知,合理的焊接顺序和一体化工装,能很好地控制无人机桁架的整体变形。

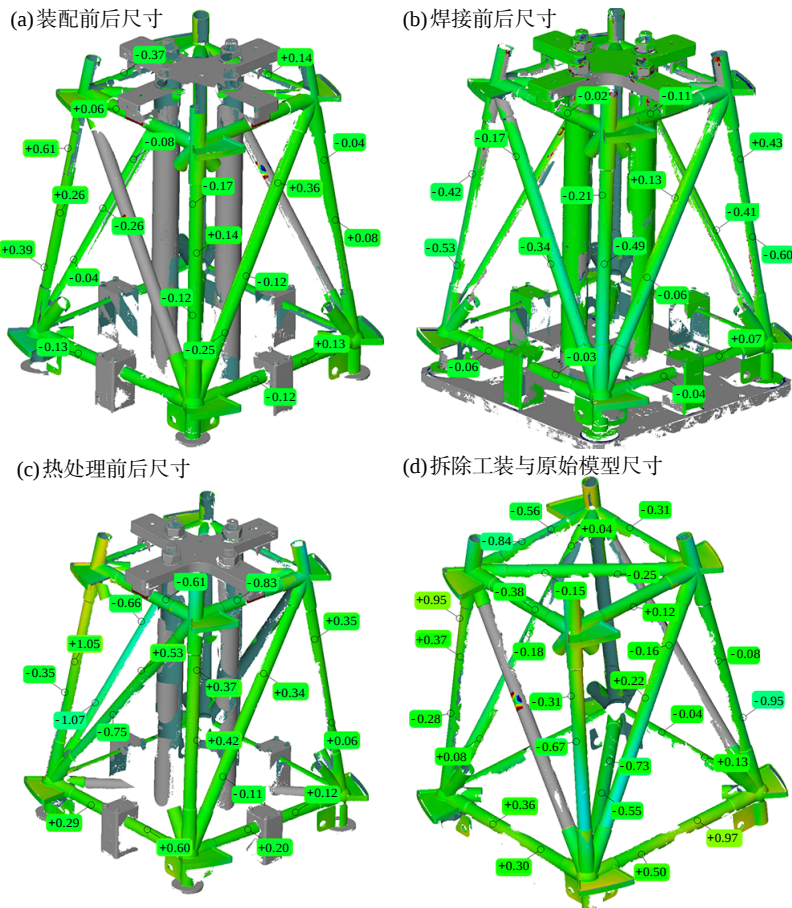


图 18 桁架尺寸三维扫描结果  
Fig.18 Three-dimensional scanning results of truss dimensions

### 3 结论

优化了氩弧焊工艺参数,分析焊接接头热处理前后的组织与性能演变,并配套设计专用的焊接工

装,有效降低了管接头与桁架管的焊接变形,为无人机钛合金桁架 3D 打印 TC4 多维度管接头氩弧焊应用提供理论基础。

(1) 通过对工艺窗口的探索完成工艺参数优

化,确定最优焊接工艺。所得焊接接头组织均匀,无焊接缺陷;焊缝呈典型铸造组织,由粗大的柱状晶和少量等轴晶组成。热处理后组织发生粗化,但整体组织均匀性提升,接头质量满足使用要求。

(2) 试样热处理后抗拉强度降低,但焊接接头强度仍高于 TA18 母材。在 300℃、350 MPa 条件下,焊接接头高温持久寿命可达 72 h,高温性能优异,具备在 300℃下长期工作的能力。

(3) 结合工艺优化、专用工装设计与合理的焊接顺序,可将大尺寸桁架焊接变形控制在 1 mm 以内,变形控制效果良好,为复杂多维度 3D 打印钛合金构件的焊接制造提供了可行工艺方案。

#### 参考文献:

- [1] Quazi M M, Ishak M, Fazal M A, et al. Current research and development status of dissimilar materials laser welding of titanium and its alloys[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 126: 106090.
- [2] Zhang X, Xue K, Liu L, et al. Effect of electrical pulse treatment on the microstructural and mechanical responses of heterogeneous linear friction welded TC17/TC4 dissimilar joint [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 35: 1-12.
- [3] Gong Z, Zhang T, Chen Y, et al. Effect of laser shock peening on stress corrosion cracking of TC4/2A14 dissimilar metal friction stir welding joints [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 30: 1716-1725.
- [4] Zhao X, Lu X, Wang K, et al. Microstructure and mechanical properties of electron beam welded TC4 titanium alloy structure with backing plate[J]. Materials Today Communications, 2023, 35: 106160.
- [5] Li G, Wang Y, Liang Y, et al. Microstructure and mechanical properties of laser welded Ti-6Al-4V (TC4) titanium alloy joints [J]. Optics & Laser Technology, 2024, 170: 110320.
- [6] Su R, Li H, Wang D, et al. Effect of three-stage heat treatment on mechanical properties and micro-deformation mechanism of TC4 titanium alloy welded joint[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 30: 6753-6770.
- [7] Lei Z, He L, Liu R, et al. Fatigue crack initiation mechanism and life prediction of laser-arc hybrid welded TC4 titanium alloy joints[J]. International Journal of Fatigue, 2026, 203: 109308.
- [8] Long J, Zhang L, NA S J, et al. Fracture toughness of electron-beam-welded parts of super-thick TC4-DT Ti alloy for aeronautical use[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2024, 298: 109927.
- [9] Cui S W, Shi Y H, Zhang C S. Microstructure and mechanical properties of TC4 titanium alloy K-TIG welded joints[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(2): 416-425.
- [10] Liu Y Y, Tian W T, Yang Q H, et al. Inertia radial friction welding of Ti60(near- $\alpha$ )/TC18(near- $\beta$ ) bimetallic components: Interfacial bonding mechanism, heterogenous microstructure and mechanical properties [J]. Materials Characterization, 2024, 208: 113598.
- [11] Liu J, Li J, Jin F, et al. Macro and micro structural responses of dissimilar TC4/TC17 titanium alloy joints in linear friction welding and post-welding heat treatment processes and their effects on tensile and fatigue performance [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 37: 484-492.
- [12] Jun M A. Microstructure and high-temperature mechanical properties of laser beam welded TC4/TA15 dissimilar titanium alloy joints [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(1): 160-170.
- [13] 许艳飞, 文璟, 肖逸锋, 等. TC4/TC18 异种钛合金焊接接头的组织性能研究及数值模拟[J]. 金属热处理, 2017, 42(1): 166-170.
- [14] Long J, Zhang L J, Zhuang M X, et al. Narrow-gap laser welding with beam wobbling and filler wire and microstructural performance of joints of thick TC4 titanium alloy plates[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 152: 108089.
- [15] Wang F, Sun Z, Liu Z, et al. Performance analysis on welded joints made of TC4/TA17 dissimilar titanium alloys[J]. Ocean Engineering, 2024, 294: 116758.
- [16] Su R, Li H, Chen H, et al. Stability analysis and porosity inhibition mechanism of oscillating laser-arc hybrid welding process for medium-thick plate TC4 titanium alloy [J]. Optics & Laser Technology, 2024, 174: 110569.
- [17] Li Y, Huang W, Gan K, et al. Synergistic effect of solution-aging on phase evolution and high-temperature creep resistance in inertia-friction-welded Ti-6Al-4V aerospace components[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 38: 2875-2885.
- [18] 李立泽. TC4/TA7 异种钛合金焊接工艺及其接头的组织与性能[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
- [19] Li B, Fan J, Zhang W, et al. Texture evolution and anisotropy of TA18 titanium alloy strip under rolling and heat treatment conditions [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 34: 1582-1590.
- [20] Xu W F, Zhang Z. Microstructure and mechanical properties of laser beam welded TC4/TA15 dissimilar joints[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(12): 3135-3146.
- [21] Ou P, Cao Z, Hai M, et al. Microstructure and mechanical properties of K-TIG welded dissimilar joints between TC4 and TA17 titanium alloys[J]. Materials Characterization, 2023, 196: 112644.
- [22] Li L, Wang S, Huang W, et al. Microstructure and mechanical properties of electron beam welded TC4/TA7 dissimilar titanium alloy joint [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 50: 295-304. 