

TA18 钛合金板材焊接工艺对比研究

李军兆¹, 于航¹, 樊程¹, 殷鑫¹, 孙清洁^{1,2}, 曾宪山¹

(1. 湖南湘投金天新材料有限公司, 湖南 益阳 413002)

(2. 哈尔滨工业大学(威海), 山东 威海 264209)

摘要: 研究了直流钨极氩弧焊(直流 TIG)、脉冲钨极氩弧焊(脉冲 TIG)和激光焊接 3 种不同焊接工艺对 TA18 钛合金焊接接头宏观形貌、显微组织和力学性能的影响。结果表明, 与直流 TIG 焊接工艺相比, 脉冲 TIG 焊接工艺的高频脉冲促使电弧能量集中, 整体的焊接热输入减小, 焊缝宽度降低; 激光焊接工艺可显著降低焊接接头宽度, 与直流 TIG 焊接工艺相比, 焊接接头宽度减少约 69.5%。TA18 钛合金激光焊接接头显微组织主要为网篮状排列的针状马氏体 α' 相及少量块状相变 α 相, 且针状马氏体 α' 相更加细小。此外, 激光焊接接头具有更高的显微硬度, 但弯曲性能相对较低。

关键词: TA18 钛合金; 直流 TIG; 脉冲 TIG; 激光焊接

中图分类号: TG442; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2023)02-030-05

DOI:10.13567/j.cnki.issn1009-9964.2023.02.004

Comparative Study on Welding Process of TA18 Titanium Alloy Sheet

Li Junzhao¹, Yu Hang¹, Fan Cheng¹, Yin Xin¹, Sun Qingjie^{1,2}, Zeng Xianshan¹

(1. Hunan Xiangtou Goldsky New Materials Co., Ltd., Yiyang 413002, China)

(2. Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China)

Abstract: The effects of three different welding processes, direct-current tungsten inert gas welding (DC TIG), pulsed tungsten inert gas welding (pulsed TIG) and laser welding on the macroscopic morphology, microstructure and mechanical properties of TA18 titanium alloy welded joints were studied. The results show that compared with the DC TIG welding process, the high frequency pulse of pulsed TIG can promote the concentration of arc energy, decrease the overall welding heat input and weld width. Meanwhile, laser welding process can significantly reduce the welded joint width, and the width can be reduced by 69.5% compared with DC TIG welding process. The microstructure of laser welded joint is mainly consisting of acicular martensite α' phase arranged in basket shape and a small amount of massive transformation α phase, and acicular martensite α' phase is finer. Laser welded joint has higher microhardness than TIG welded joint, however, the bending properties of laser welded joint is lower than TIG welded joint.

Key words: TA18 titanium alloy; DC TIG; pulsed TIG; laser welding

TA18(Ti-3Al-2.5V)是美国 20 世纪 60 年代末研制的一种近 α 型钛合金, 因其具有良好的力学性能、加工性能和优于 TC4 钛合金的焊接性能, 被广泛用作航空管材^[1]。相比不锈钢或铝合金管材, TA18 钛合金管材不仅能承受更大的工作压力, 还能满足航空航天领域对可靠性及持久性的要求^[2]。

在工程应用过程中, 钛合金管材、板材和型材均会受到空间位置及装配精度的限制, 势必要采用合适的焊接方法对其进行连接^[3-4]。在实际应用中, TA18 钛合金管材常以无缝管的形式使用, 因而对于 TA18 钛合金的研究主要集中在轧制及无缝管加工方面^[5-7]。

随着钛焊管制备技术的发展, 相比无缝钛管, 钛焊管在制造成本、绿色高效、壁厚均匀一致性等方面显示出一定的优势, 并已在某些领域取代无缝钛管获得应用^[8]。然而, 现阶段针对 TA18 钛合金

收稿日期: 2022-11-03

基金项目: 湖南省科技创新计划项目(S2021GXKJXC0287, 2022RC1060, 2022GK4046)

通信作者: 李军兆(1993—), 男, 工程师。

焊管的研究较少,尤其是焊缝对服役性能的影响有待深入研究。因此,分别采用钛焊管工业生产中常用的直流钨极氩弧焊(直流 TIG)、脉冲钨极氩弧焊(脉冲 TIG)和激光焊接工艺对 TA18 钛合金板材进行焊接,研究不同焊接工艺对焊缝几何形状、显微组织及力学性能的影响,以期为 TA18 钛合金焊管的研发提供一定的理论依据和技术参考,推进钛合金焊管的生产应用。

1 实验

实验材料为 2 mm 厚的 TA18 钛合金冷轧带卷,其化学成分如表 1 所示。从冷轧钛带卷上切取试样,规格为 500 mm × 100 mm × 2 mm。

采用直流 TIG、脉冲 TIG 和激光焊接 3 种方式分别沿着板材轧制方向焊接 TA18 钛合金板材。施焊前,用砂纸打磨试样表面,然后用酒精冲洗,烘干。

表 2 TA18 钛合金板材直流 TIG、脉冲 TIG 和激光焊接的工艺参数

Table 2 Processing parameters of DC TIG, pulsed TIG and laser welding of TA18 titanium alloy plate

DC TIG	Distance of tungsten and plate/mm		Welding current/A	Welding speed/m · min ⁻¹	Welding torch angle/(°)
		215		0.6	90
Pulsed TIG	Peak current/A	Base current/A	Welding speed/m · min ⁻¹	Duty ratio/%	Frequency/Hz
	300	60	0.6	50	200
Laser welding	Laser power/W		Welding speed/m · min ⁻¹	Defocusing distance/mm	
	2200		2	+5	

按图 1 所示,采用激光切割机在 TA18 钛合金焊接接头位置截取金相试样和力学性能试样。金相试样经过磨抛后,用 Kroll 试剂进行腐蚀。采用 XJZ-6A 型光学显微镜观察焊接接头组织,并用 402MVA 型显微硬度计测量焊接接头不同位置的显微硬度,加载载荷为 9.8 N,持续时间为 15 s。拉伸试样按照 GB/T 2651—2008 加工,标距长度为 100 mm。采用 CMT5105 型万能试验机进行室温拉伸性能测试,拉伸

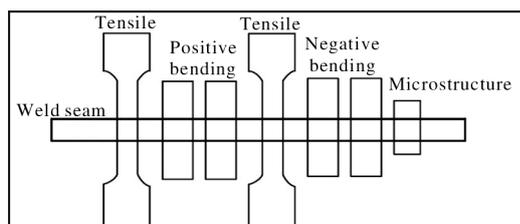


图 1 TA18 钛合金焊接接头取样位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sampling locations for TA18 titanium alloy welded joint

TIG 焊接和激光焊接过程中均采用纯氩气对高温焊接熔池区域进行双面保护,其中钨极保护喷嘴气体流量为 8 L/min,焊接拖罩气体流量为 10 L/min,背面保护气体流量为 10 L/min。

表 1 TA18 钛合金冷轧带卷的化学成分(w%)

Table 1 Chemical composition of TA18 titanium alloy cold rolled coil

Al	V	Fe	C	O	N	H	Ti
3.0	2.7	0.2	0.05	0.08	0.03	0.01	Bal.

TIG 焊机型号为松下 YC-400TX4 型,激光器为 6000 W 光纤激光器,焊接工艺参数如表 2 所示。在使用脉冲 TIG 焊接时,基值电流是峰值电流的 20%,同时脉冲频率设定为 200 Hz,有利于降低焊接总体的热输入,方便控制熔池的形貌和尺寸,使得焊道表面纹理光滑。脉冲 TIG 焊接的平均电流为 180 A,直流 TIG 焊接的电流为 215 A。

速率在试样屈服之前为 0.2 mm/min,之后增加至 20 mm/min。弯曲试样按照 GB/T 2653—2008 加工,压头直径为 6 mm,下压头间距为 12 mm,弯曲速率为 60 mm/min。

2 结果与分析

2.1 宏观形貌

图 2 为不同焊接工艺下 TA18 钛合金焊接接头表面的宏观形貌,焊缝及热影响区宽度如表 3 所示。从图 2 可以看出,TIG 焊接和激光焊接都可实现 TA18 钛合金板材双面良好成形,焊缝正面和背面均连续均匀。由于直流 TIG 焊接热输入较大,焊缝宽度达到 8.72 mm;采用脉冲 TIG 焊接时,高频脉冲促使电弧能量集中,整体的焊接热输入减小,焊缝宽度降低至 7.40 mm;而激光焊接过程中激光束具有更强的穿透性且激光能量更加集中,致使激光焊接接头焊缝和热影响区宽度均明显降低,焊缝宽度

仅为 2.66 mm，相比于直流 TIG 焊接降低约 69.5%。

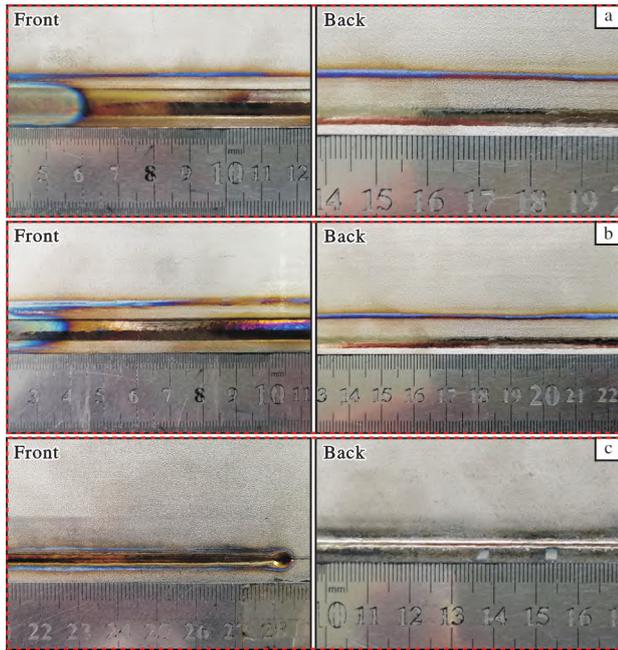


图 2 不同焊接工艺下 TA18 钛合金焊接接头的宏观形貌
Fig. 2 Macroscopic morphologies of TA18 titanium alloy welded joints under different welding processes: (a) DC TIG; (b) pulsed TIG; (c) laser welding

表 3 TA18 钛合金焊接接头横截面焊缝宽度与热影响区宽度 (mm)

Table 3 Width of weld and heat affected zone of cross sectional partition of TA18 titanium alloy welded joints

Welding modes	Weld width	Heat affected zone width
DC TIG	7.40	5.05
Pulsed TIG	2.66	1.22
Laser welding	8.72	5.32

激光焊接具有最快的熔池加热和冷却速度，熔池高温停留时间短，液态金属流动性差，熔池中心的液态金属不能及时回流到焊缝两侧，导致焊缝两侧咬边缺陷增加。而脉冲 TIG 焊接可对焊接熔池的流动性进行调控，因而能够更好地控制焊缝熔透行为、焊缝宽度和咬边。相比激光焊接，脉冲 TIG 焊缝中心位置熔池下塌降低，热影响区位置的熔池咬边也得到一定削弱。

2.2 显微组织

图 3 为不同焊接工艺下 TA18 钛合金焊接接头的横截面形貌。图 4 为 TA18 钛合金焊接接头横截面组成区域示意图。由图 4 可以看出，TA18 钛合金焊接

接头主要分为母材 (base metal, BM)、热影响区 (heat affected zone, HAZ) 和焊缝区 (weld zone, WZ)，而热影响区根据受热情况分为粗晶热影响区 (coarse grain heat affected zone, CGHAZ) 和细晶热影响区 (fine grain heat affected zone, FGHAZ)。从图 3 可以看出，直流 TIG 焊接接头粗晶热影响区的晶粒呈现铸态组织特征。脉冲 TIG 焊接方式能够降低焊缝熔池的整体热输入，同时峰值电流和基值电流交替对熔池液态金属进行加热和冷却，有利于加强对焊接熔池的搅拌作用，细化粗大的柱状晶粒。激光焊接具有较快的加热和冷却速率，熔池液态金属主要依附于热影响区半熔化晶粒形核长大，熔池高温停留时间相对较短，晶粒来不及长大便凝固；焊缝柱状晶区晶粒呈 45° 夹角从两侧对称向焊缝中心位置生长，具有较大的长宽比。

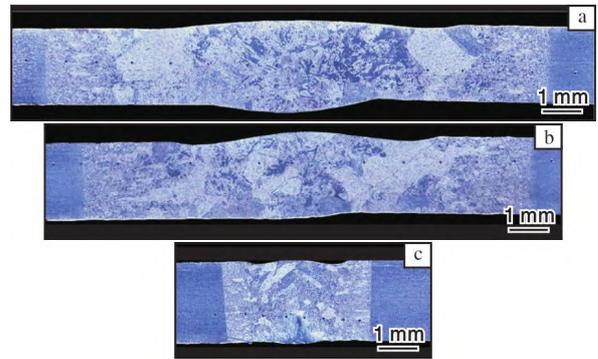


图 3 不同焊接工艺下 TA18 钛合金焊接接头的横截面形貌
Fig. 3 Cross sectional morphologies of TA18 titanium alloy welded joints under different welding processes: (a) DC TIG; (b) pulsed TIG; (c) laser welding

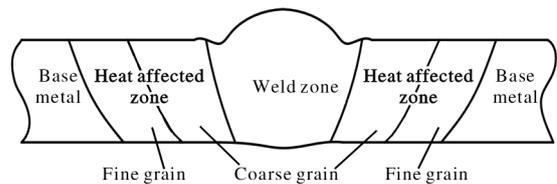


图 4 TA18 钛合金焊接接头横截面组成区域示意图
Fig. 4 Schematic diagram of cross sectional partition of TA18 titanium alloy welded joint

图 5 为 TA18 钛合金焊接接头不同位置的金相组织。从图 5 可以看出，虽然直流 TIG、脉冲 TIG、激光焊接的热源形式有所差异，但焊接接头不同区域的显微组织特征基本相似。TA18 钛合金母材组织为等轴 α 相，当焊接加热温度超过 α/β 转变温度时，母材中的 α 相向 β 相转变，高温下 β 晶粒快速长

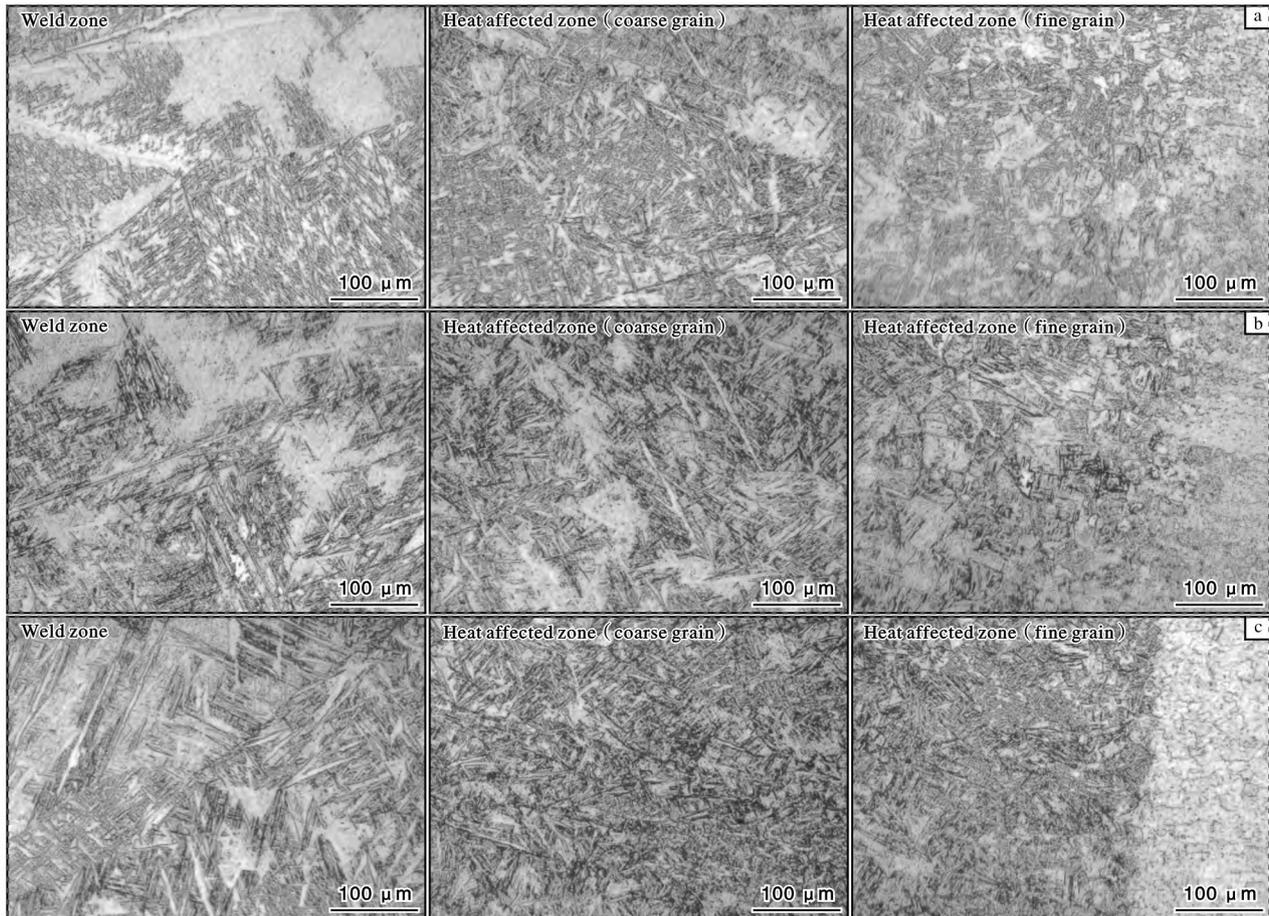


图5 TA18 钛合金焊接接头不同区域的金相组织

Fig. 5 Metallographic structures of TA18 titanium alloy welded joint in various zones: (a) DC TIG; (b) pulsed TIG; (c) laser welding

大^[9-10]。在随后的快速冷却过程中,焊缝熔池内粗大的 β 晶粒保存至固相,并形成针状马氏体 α' 相^[11]。直流TIG焊接接头中除针状马氏体 α' 相之外,还存在大量先共析 α 相,其中焊缝区内先共析 α 相占比最大且呈块状团聚分布,这表明即使在焊缝熔池快速冷却的过程中,熔池内局部区域仍存在较大温差,导致不同位置的冷却速度不同,造成焊缝区不同位置显微组织存在差异。与直流TIG焊缝中存在较大的块状 α 相不同,脉冲TIG焊缝中的针状马氏体 α' 相更加细小,呈交错的网篮组织形态。激光焊接焊缝区显微组织主要为原始 β 晶界隔开的针状马氏体 α' 相及少量的块状相变 α 相,且网篮状排列的针状马氏体 α' 相占比最大,组织最细。

粗晶热影响区为针状马氏体 α' 相和更加细小、弥散分布的块状转变 α 相。随着距离热源中心位置的增加,细晶热影响区的加热温度较低且冷却速度快,晶粒尺寸仍然较小,仅有部分 α 相转变为高温 β 相(深色),随后冷却过程中形成 $\alpha + \alpha'$ 相组织。

2.3 力学性能

由于TA18钛合金直流TIG、脉冲TIG和激光焊接接头微观组织存在差异,导致焊缝显微硬度也有所不同。TA18钛合金母材显微硬度值为2.17 GPa,激光焊接接头焊缝区的平均显微硬度值达到2.73 GPa,显著高于直流TIG和脉冲TIG(焊缝区的平均显微硬度值分别为2.53、2.57 GPa)。这是因为激光焊接具有较快的冷却速率,导致焊缝区形成大量细小的网篮状排列的针状马氏体 α' 相,而网篮状排列的针状马氏体 α' 相是提高焊缝强度和硬度的主要组织^[9,12]。

图6为TA18钛合金室温拉伸试样的照片,图7为不同焊接工艺下TA18钛合金焊接接头的室温拉伸性能。从图6可以看到,不同焊接工艺下拉伸试样的断裂位置均位于母材处。TA18钛合金母材的抗拉强度为659 MPa,屈服强度为626 MPa,延伸率为22.0%。从图7可知,焊接工艺对TA18钛合金焊接接头抗拉强度及屈服强度的影响不大。激光焊接工艺下,焊接接头的延伸率最高,达到20.5%,为母



图6 TA18 钛合金焊接接头室温拉伸试样的照片

Fig. 6 Photo of tensile specimens of TA18 titanium alloy welded joints

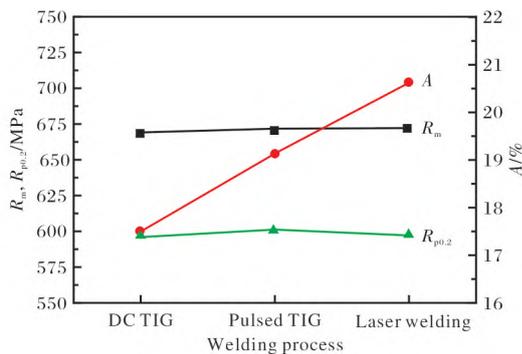


图7 不同焊接工艺下TA18 钛合金焊接接头的室温拉伸性能

Fig. 7 Room temperature tensile properties of TA18 titanium alloy welded joints under different welding processes

材的93%；直流TIG焊接工艺下的延伸率最低，为16.0%，是母材的72%。这是因为激光焊接接头焊缝区和热影响区的宽度要显著小于TIG焊接，在拉伸试样标距范围内母材的变形协调区间更大。

TA18 钛合金焊接接头的弯曲性能如表4所示。从表4可见，激光焊接接头的弯曲角度普遍低于TIG焊接接头，这是由于激光焊缝中的针状马氏体 α' 相较多，造成焊接接头硬度增加。

表4 不同焊接工艺下TA18 钛合金焊接接头的弯曲性能

Table 4 Bending properties of TA18 titanium alloy welded joints under different welding processes

Bending test	DC TIG	Pulsed TIG	Laser welding
Positive bending	36.8°	41.7°	32.6°
Negative bending	49.1°	39.1°	37.5°

3 结论

(1) 与直流TIG焊接工艺相比，脉冲TIG焊接工艺的电弧能量集中，整体的焊接热输入减小，焊

缝熔宽降低；激光焊接工艺可显著降低焊接接头的宽度，与直流TIG焊接工艺相比焊接接头宽度减少约69.5%。

(2) TA18 钛合金激光焊接接头显微组织主要为原始 β 晶界隔开的针状马氏体 α' 相及少量的块状相变 α 相，且网篮状排列的针状马氏体 α' 相占比最大，组织最细。

(3) 3种焊接工艺下拉伸试样的断裂位置均位于母材处，其中，激光焊接工艺下焊接接头的延伸率最高，为20.5%，达到母材的93%。与TIG焊接接头相比，激光焊接接头具有更高的显微硬度，但其弯曲性能相对较低。

参考文献 References

- [1] 杨建朝, 席锦会, 杨亚社, 等. 航空航天用TA18钛合金管材的研发及应用[J]. 钛工业进展, 2014, 31(4): 6-10.
- [2] 张旺峰, 张晖, 颜孟奇, 等. 飞机液压系统用TA18钛合金管材性能特殊性研究[J]. 钛工业进展, 2018, 35(4): 22-25.
- [3] 田喜明, 卫娜, 周中波, 等. Ti-Al-Fe低成本钛合金TIG焊接组织和性能研究[J]. 钛工业进展, 2020, 37(5): 23-26.
- [4] 黄先明. 激光清洗和脉冲钨极电弧焊接Ti-3Al-2.5V钛合金管的研究[J]. 钛工业进展, 2012, 29(1): 44.
- [5] 谢群良, 汪建林. 工艺对Ti-3Al-2.5V钛合金无缝管的表面和性能的影响[J]. 上海钢研, 2002(2): 9-14.
- [6] Zhan M, Jiang Z Q, Yang H, et al. Numerically controlled bending performance of medium strength TA18 titanium alloy tubes under different die sets[J]. Science China: Technological Sciences, 2011, 54(4): 841-852.
- [7] Jiang Z Q, Zhan M, Yang H, et al. Deformation behavior of medium-strength TA18 high-pressure tubes during NC bending with different bending radii[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2011, 24(5): 657-664.
- [8] 李长江, 范江腾, 胡成龙, 等. PTA氧化反应冷凝器用钛焊管国产化分析[J]. 钛工业进展, 2021, 38(4): 38-42.
- [9] 杨晓华, 杨武林, 兑卫真, 等. TC4钛合金激光焊接头微观组织和硬度[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(10): 70-74.
- [10] 董智军, 吕涛, 雷正龙, 等. 激光焊接TC4钛合金组织性能研究[J]. 航天制造技术, 2013(1): 27-30.
- [11] 朱文玉. 探究工艺、粒径及元素含量对TA18合金组织及性能的影响[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [12] 程东海, 黄继华, 杨静, 等. TC4钛合金激光叠焊成形及显微组织[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(2): 255-258.