

引用格式:孙崇锋,刘甲,孙二举,等.20 mm厚TC4ELI钛合金双枪激光-MIG复合焊接接头组织与性能研究[J].热加工工艺,2026,55(3):125-130. SUN Chongfeng, LIU Jia, SUN Erju, et al. Microstructure and Properties of 20 mm Thick TC4ELI Titanium Alloy Welded Joint by Dual-torch Laser-MIG Hybrid Welding[J]. Hot Working Technology, 2026, 55(3): 125-130. DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.25020012

20 mm厚TC4ELI钛合金双枪激光-MIG复合焊接接头组织与性能研究

孙崇锋¹, 刘甲¹, 孙二举¹, 陈利阳¹, 余巍^{1,2}, 雷小伟¹, 崔永杰¹, 张浩¹,
王伟超¹, 张亚龙¹, 张伟¹

(1. 洛阳船舶材料研究所, 河南 洛阳 471023; 2. 海洋腐蚀与防护全国重点实验室, 河南 洛阳 471023)

摘要:研究了20 mm厚TC4ELI钛合金板双枪激光-MIG复合焊接技术,获得了20 mm厚TC4ELI板焊接接头,研究了接头的金相组织、力学性能和工艺性能。结果表明:双枪激光-MIG复合焊接可以获得满足探伤标准I级要求的TC4ELI钛合金焊接接头。接头焊缝区微观组织为针状马氏体 α' 相和针状 α 相,以及少量晶间 β 相。接头上部热影响区出现了连续清晰的晶界及魏氏组织;接头中部热影响区晶界不清晰,晶界内的组织细化, β 转变组织被拉长为更细长的针状 α 相,在 β 晶界处平行排列,表现为 α 集束。接头上部熔合线区处出现粗大 α 相,存在稳定的网篮组织;接头中部熔合线区形成长宽比更高的针状 α 相,形成的网篮组织比较狭长。接头上部和中部的平均抗拉强度高于母材强度;在焊接接头打底层和填充层中,焊缝的平均硬度大于母材和热影响区;接头弯曲性能合格,工艺性能尚可。

关键词:TC4ELI钛合金;激光-MIG焊接;力学性能;弯曲性能

中图分类号: TG456.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2026)03-0125-06

Microstructure and Properties of 20 mm Thick TC4ELI Titanium Alloy Welded Joint by Dual-torch Laser-MIG Hybrid Welding

SUN Chongfeng¹, LIU Jia¹, SUN Erju¹, CHEN Liyang¹, YU Wei^{1,2}, LEI Xiaowei¹, CUI Yongjie¹,
ZHANG Hao¹, WANG Weichao¹, ZHANG Yalong¹, ZHANG Wei¹

(1. Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471023, China; 2. National Key Laboratory of Marine Corrosion and Protection, Luoyang 471023, China)

Abstract: The dual-torch laser-MIG hybrid welding process of 20 mm thick TC4ELI titanium alloy plate was investigated, and the welded joint of 20 mm thick TC4ELI plate was fabricated. The microstructure, mechanical properties and process performance of the welded joint were systematically studied. The results indicate that the dual-torch laser-MIG hybrid welding can produce TC4ELI titanium alloy welded joint that meet the standard Grade I requirement. The microstructure of the weld zone consists of needle-like martensitic α' phase, needle-like α phase, and a small amount of intergranular β phase. In the upper heat-affected zone (HAZ), continuous, well-defined grain boundaries and Widmanstätten structures are observed. The middle HAZ exhibits unclear grain boundaries, with refined microstructures; the β -phase transformation structures are elongated to finer needle-like α phases, which aligns parallel to the β grain boundaries, forming α bundles. In the upper fusion line, coarse α phases and stable basketweave structures are present, while in the middle fusion line, the needle-like α phases exhibits a high aspect ratio, resulting in a narrower basketweave pattern. The average tensile strength of the joint in the upper and middle regions is higher than that of the base material. The hardness of the weld zone in the backing layer and filler layer is also bigger than that of the base material and HAZ. The bending performance of the joint is qualified, and the overall process performance is acceptable.

Key words: TC4ELI titanium alloy; laser-MIG welding; mechanical properties; bending performance

收稿日期: 2025-02-07 修回日期: 2025-11-14

基金项目: 国防基础科研计划资助项目(JCKY2023206A002)

作者简介: 孙崇锋,男,助理工程师,研究方向为钛合金激光焊接;

E-mail: 15236273218@163.com

钛合金因其卓越的力学性能、良好的耐腐蚀性和高比强度,被广泛应用于海洋工程领域。特别是在海洋深水开发、海上石油平台、海洋风电装置以及船舶制造中,钛合金凭借其优异的抗氯化物腐蚀性

能,已成为结构材料的理想选择。其中,具有较高强度的钛合金中厚板,尤为适用于高负荷、耐腐蚀要求较高的海洋环境^[1-3]。随着海洋工程的发展,对于更高性能钛合金材料和更先进加工技术的需求也愈加迫切。然而,钛合金的焊接性较差,特别是在中厚板焊接过程中,传统的焊接方法难以达到理想的质量和效率^[4]。因此,开发新型高效焊接技术,优化焊接接头性能,已成为钛合金海洋工程应用中的关键研究方向。

为克服传统钛合金焊接方法的不足,近年来,双枪激光-MIG复合焊接技术(laser-MIG hybrid welding)作为一种新兴的焊接技术受到了广泛关注。该技术结合了激光焊接的高能量密度和MIG焊接的稳定性,能够实现较高的焊接速度和较少的焊接缺陷。双枪激光-MIG复合焊接具有多个显著优势^[5]:首先,通过双枪配置,激光和MIG焊接协同作用,能够提供更加集中的热源,确保熔池更快形成,热影响区更小;其次,激光焊接的高功率密度使得熔池更加稳定,减少了焊接过程中常见的气孔和裂纹缺陷,提高了焊接接头的质量和力学性能^[6-7];最后,通过双枪结构实现双面焊接,有效降低了焊接变形和应力集中,进一步提升了焊接效率和质量。

本文聚焦于20mm厚TC4ELI钛合金板的双枪激光-MIG复合焊接工艺,结合金相组织观察、力学性能测试,对焊接接头的微观组织、晶粒尺寸、拉伸强度及冲击性能等进行了详细分析,为双枪激光-MIG复合焊接技术在钛合金中的应用提供了实验数据和理论支持,也为钛合金在海洋工程及其他应用领域的推广提供了有力支撑。

1 试验材料与方法

试验材料为TC4ELI钛合金板材,按照标准GJB944A—2018《舰船用钛及钛合金板材规范》轧制。采用线切割方法切割规格为200mm×400mm×20mm的板材试样,共两件。TC4ELI钛合金的化学成分和力学性能见表1。坡口形式为“K”坡口,其中一件板材的20mm侧边开8~10mm钝边,上下坡口角度均为50°。为保证焊接试板干净整洁,焊前采用角磨机对试板进行打磨,用丙酮清洗坡口面,去除

表1 TC4ELI钛合金的化学成分(质量分数,%)和力学性能
Tab.1 Chemical composition(wt%) and mechanical properties of TC4ELI alloy

Al	V	Fe	C	O	H	N	R _m /MPa	R _{p0.2} /MPa	A/(%)
6.33	4.21	0.16	0.009	0.12	0.0014	0.003	995	922	14.5

表面的氧化膜与污染物。

激光焊接试验采用IPG公司生产的YSL20000光纤激光器,激光功率最大能达到20kW,采用激光模式进行焊接。MIG焊机为Fronius TPS-4000CMT焊机。采用双枪激光双面打底,激光-MIG双面多层多道填充盖面焊接,焊接位置为横焊,正反面均采用99.99%纯氩气保护,保护气流量为15L/min,同时在熔池上方侧吹辅助气体,将焊接过程中的等离子体吹离。焊接过程示意图如图1所示,焊接工艺参数如表2所示。

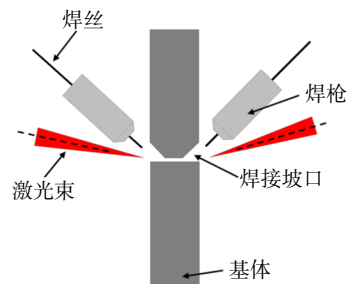


图1 焊接过程示意图

Fig.1 Welding process diagram

表2 焊接工艺参数

Tab.2 Welding process parameters

焊道	激光功率/kW	焊接速度/(cm·min ⁻¹)	离焦量/mm	焊接电流/A
打底	9~15	60~120	0~10	-
填充	4~6	30~70	0~15	160~240
盖面	4~6	30~70	0~15	160~240

焊后试板按照NB/T47013.2—2015《承压设备无损检测第2部分:射线检测》进行X射线检测;按照GB/T5168—2020《钛及钛合金高低倍组织检验方法》相关检测要求,在型号为OLYMPUSGX71的高倍金相显微镜上开展试样微观组织检测,采用Keller试剂浸蚀,浸蚀剂体积比为HF:HNO₃:H₂O=1:5:44;在300kN材料试验机(MTSE45.305-A)上进行拉伸试验,采用横向圆形拉伸试样;按GB/T2653—2008《焊接接头弯曲试验方法》,在BHT5106电液伺服弯曲试验机上进行弯曲性能测试;按照GB/T2650—2022《金属材料焊缝破坏性试验冲击试验》,在ZBC2602-B摆锤式冲击试验机上进行冲击性能测试。试样的截取示意图如图2所示。

2 结果与讨论

2.1 焊缝外观形貌

针对20mm厚TC4ELI钛合金板,首先进行激

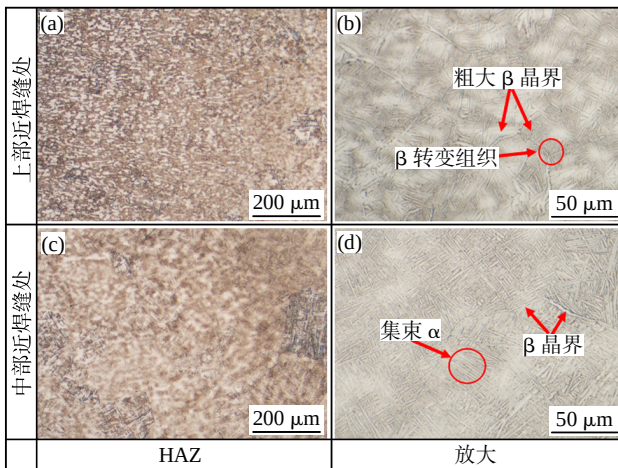


图7 接头近焊缝处热影响区的组织
Fig.7 Microstructure of HAZ around weld of the joint

上,此时合金中的 α 相转变为 β 相。随着焊接热源的移动和快速冷却, β 相以非扩散转变成过饱和非平衡六方晶格马氏体 α' 。同时部分 β 相会转变为 α 相。由于温度梯度较大,晶粒形核不均,导致部分区域 β 相的晶界变得显著^[8]。在晶界内存在明显的 β 转变组织, β 相在冷却后形成粗大的片层状 α (β 转变组织)。如图7(c)、(d)所示,接头中部近焊缝热影响区组织同样与接头上部组织类似,但其晶界不清晰,晶界内的组织细化。接头上部组织中 β 转变组织较大,形成粗大的块状 α 相,而接头中部的 β 转变组织被拉长为更细长的针状 α 相,在 β 晶界处以平行排列的形式存在,表现为 α 集束。在较高温度下,钛合金中的 β 相会处于稳定状态。当冷却速率较慢时, β 相晶粒有足够的时间生长和重新排列,导致 β 晶界不明显。在激光-MIG复合焊接过程中,热输入较大且冷却速率较慢, β 相晶粒容易变大,导致晶界较为模糊,难以清晰辨认。

图8为接头上部和中部熔合线区域的金相组织,熔合线左侧为热影响区,右侧为焊缝区,分界明显。图8(a)、(b)为接头上部熔合线区域的组织形貌,熔合线区靠近热影响区处出现粗大 α 相,这是由于在焊接过程中温度不均所导致的相变。该区域的组织整体表现为稳定的网篮组织,网篮组织通常出现在 $\beta \rightarrow \alpha$ 相变的过程中,尤其是冷却速率和温度梯度较大时。这是因为 α 相会以片状或针状形式在 β 相基体中析出,不同的冷却方向使得被 α 相以不同的方向排列,从而打断之前的组织,形成纵横编织的网篮组织。这类组织的塑性、疲劳性能高于魏氏组织,断裂韧性较低,但具有较好的高温持久和抗蠕

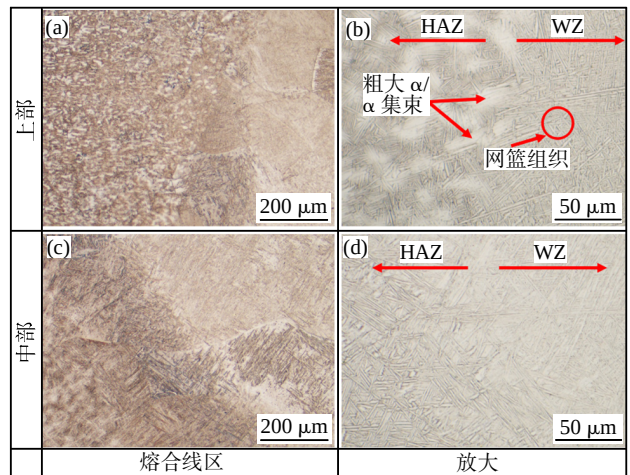


图8 接头熔合线区的组织形貌
Fig.8 Microstructure of the fusion line zone of the joint

变等综合性能^[9]。

图8(c)、(d)为接头中部熔合线区域的组织形貌,与接头上部类似,以熔合线为分界,分隔成尺寸不同的网篮组织,近焊缝区形成长宽比更高的针状 α 相,但较快的冷却速率使得近焊缝区形成的网篮组织比较狭长。近热影响区的组织因为温度梯度小,冷却速率慢, α 相在被拉长前充分长大,尺寸明显大于近焊缝区组织。但熔合线处整体表现为网篮组织,交错的针状 α 相排列能提升接头的硬度,较强的晶体结构使得其对抗外部载荷的能力较强,从而提高接头的抗拉强度或屈服强度^[10]。

图9为接头上部和中部焊缝区域的金相组织。如图9(a)、(b)所示,接头上部焊缝区域金相组织主要由针状 α 相、针状马氏体 α' 相以及晶间 β 相组成。当钛合金达到 β 相变区,组织逐渐转变 β 组织,长大的 β 晶粒由于焊接中较大的冷却速率, β 晶粒

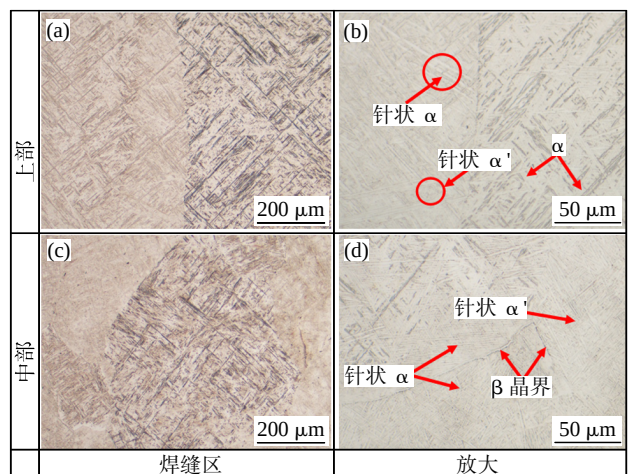


图9 接头中心焊缝区的组织形貌
Fig.9 Microstructure of weld center zone of the joint

迅速回到 $\alpha+\beta$ 相变区,此时, α 相会以片状或针状形式在 β 相基体中析出。不同的冷却速度下 α 相被不同程度地拉长,冷却速率越快, α 相的针状形态越明显。在激光-电弧的复合热源作用下,焊缝区温度远超 β 相相变温度(990°C),焊缝区发生了 α 相向 β 相的可逆转变,在较大的冷却速度下, β 相内最终形成了 α' 马氏体和针状 α 相^[11]。如图 9(c)、(d)所示,接头中部焊缝区域金相组织主要由针状 α 相、针状马氏体 α' 相、晶界 α 相以及晶间 β 相组成。与接头上部组织不同的是,该区域焊缝区表现为清晰连续的 β 晶界,晶界内存在由纵横交错针状 α 相组成的网篮组织^[12]。晶界的显现可能是因为接头中部易受到上下填充焊道的热循环影响,使得合金元素(如铝、钒、钼等)在焊接过程中发生偏析,尤其在焊接区域,容易在晶界或者相变区域聚集,从而影响 β 晶界的生成^[13]。

2.3 接头力学性能及工艺性能研究

垂直于焊接方向分上、下两层截取横向圆拉伸试样,拉伸测试结果如表 3 所示。接头上部的抗拉强度为 1015MPa,断后伸长率为 9.5%;接头下部的抗拉强度为 1017MPa,断后伸长率为 7.5%,断裂位置均为母材。TC4ELI 钛合金母材的抗拉强度为 995MPa,断后伸长率为 14.5%。不同位置接头的抗拉强度均高于母材的抗拉强度,接头的断后伸长率均低于母材。这是因为焊缝区域主要由长宽比较大的针状马氏体 α' 相、针状 α 相以及晶间 β 相组成,其中针状马氏体 α' 相能够有效阻碍位错运动,阻碍塑性变形,因此提升抗拉强度,同时焊缝中粗大的 β 柱状晶使得接头的断后伸长率降低。

表 3 接头的横向拉伸性能
Tab.3 Transverse tensile properties of the joint

取样位置	R_{m2}/MPa	R_m/MPa	A(%)	断裂位置
接头上部	911	1015	9.5	母材
接头下部	891	1017	7.5	母材
母材	922	995	14.5	-

焊接接头上部和中部的显微硬度分别如图 10 和 11 所示,接头上部焊缝区的显微硬度平均值为 356HV0.2,热影响区的显微硬度平均值为 343HV0.2,母材的显微硬度平均值为 322HV0.2;接头中部焊缝区的显微硬度平均值为 353HV0.2,热影响区的显微硬度平均值为 341HV0.2,母材的显微硬度平均值为 323HV0.2,厚度方向上硬度分布较为均匀。结果显示,焊缝区的硬度最高,其次是热影响区,而母

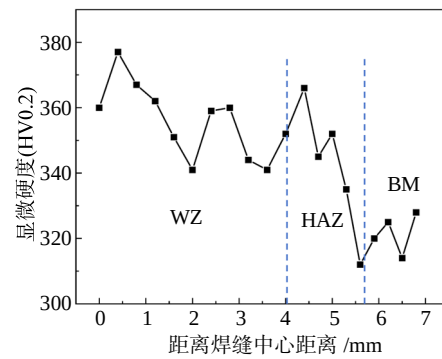


图 10 焊接接头上部的显微硬度

Fig.10 Microhardness of upper region of the welded joint

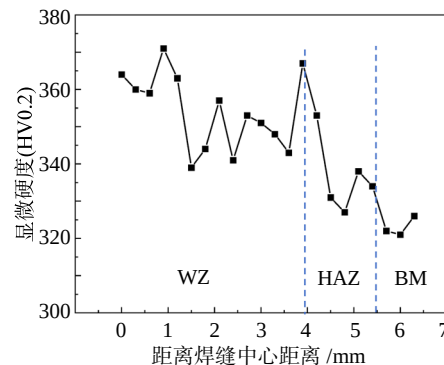


图 11 焊接接头中部的显微硬度

Fig.11 Microhardness of middle region of the welded joint

材的硬度值最低。焊接接头的硬度与每个区所含针状马氏体的含量有关^[14],钛合金中各相的硬度排序为 $\alpha'>\alpha>\beta$,针状马氏体是在快速冷却下 β 相晶粒内形成的,焊接过程中焊缝区加热温度最高,在高温下相完全转换成高温 β ,高温 β 相在极速冷却过程中完全转变为针状马氏体,针状马氏体的含量最高,马氏体内部大量的位错起到了强化作用。热影响区加热温度低,原始 α 相没有完全转变为高温 β 相,在冷却过程中残留下来,马氏体含量低,因此焊缝区显微硬度要高于热影响区和母材^[15]。在接近母材处,热影响区中没有发生马氏体相变, α' 相针状马氏体的含量及分布急剧减少,导致显微硬度值显著降低,最后趋于母材硬度^[16]。

按照 GB/T 2650—2022《金属材料焊缝破坏性试验 冲击试验》对焊接接头的不同区域(母材、热影响区和焊缝)进行测试,每种试样测 3 次取平均值,试验结果如表 4 所示。母材的冲击吸收功为 34.7J,高于热影响区和焊缝,热影响区的冲击吸收功次之(31J),焊缝的冲击吸收功最低(28.3J)。焊接过程中,焊接热循环引起了 TC4ELI 钛合金的微观组织变化,进而影响了其冲击性能。母材由等轴的 α 相+ β 相组成,组织较稳定,具有较好的力学性能和韧

表 4 焊接接头不同区域的冲击吸收功(J)
Tab.4 Impact absorption energy of different areas
of the welded joint(J)

取样位置	缺口位置	冲击吸收功	平均值
中部	焊缝中心	29、26、30	28.3
中部	热影响区	33、29、31	31
中部	母材	34、35、35	34.7

性。而在焊缝区域,由于高温下快速冷却引起了 β 相转变为硬脆的 α' 马氏体相,使得材料的延展性和韧性显著降低,冲击性能较差。热影响区(HAZ)位于母材与焊缝之间,经历了部分组织转变,针状马氏体 α' 含量减少,片层状 α 相长大,冲击性能介于母材和焊缝之间。

根据 GB/T2653—2008《焊接接头弯曲试验方法》对焊接接头进行弯曲性能测试,取 4 组横向侧弯试样,尺寸为 10mm×20mm×400mm,在 $d=16t$ 、弯曲角度为 180°的条件下进行侧弯试验,如图 12 所示,表面无任何 $\geq 3\text{mm}$ 的可见裂纹,满足 CB/T4363—2013 相关要求,接头弯曲性能良好。

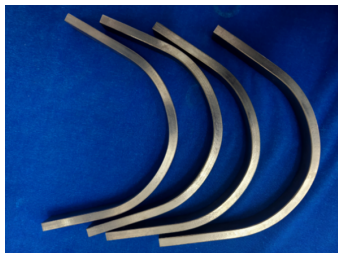


图 12 试样的弯曲试验结果
Fig.12 Bending test results of samples

3 结论

(1) 采用双枪激光-MIG 复合焊接实现了 20 mm 厚 TC4ELI 钛合金的有效焊接,焊缝截面低倍检测未发现明显的气孔、未熔合、裂纹等缺陷,焊缝质量满足 NB/T47013.2 的 I 级要求。

(2) 接头上部焊缝组织主要由针状马氏体 α' 相、针状 α 相和少量的晶间 β 相组成,中部焊缝中心组织主要由针状马氏体 α' 相、针状 α 相、晶界 α 相和少量的晶间 β 相组成,该区域表现较明显的 β 晶界。

(3) 近母材热影响区组织为粗大的等轴 α 相以及拉长 α 相和转变 β 相;接头上部近焊缝热影响区出现连续清晰的晶界及魏氏组织;接头中部热影响区晶界不清晰,晶界内的组织细化, β 转变组织被拉长为更细长的针状 α 相,在 β 晶界处平行排列,

表现为 α 集束。

(4) 接头上部熔合线区出现粗大 α 相,存在稳定的网篮组织;接头中部熔合线区形成长宽比更高的针状 α 相,形成的网篮组织更狭长。

(5) 接头上部和中部的平均拉伸强度高于母材强度;焊接接头的打底层和填充层中,焊缝的平均硬度大于母材和热影响区;接头弯曲性能合格,工艺性能尚可。

参考文献:

- [1] 席凯凯,葛鹏,成培鑫,等. 焊接参数对 TC4 薄板焊接过程的影响[J]. 精密成形工程,2023,15(12):86-94.
- [2] 房卫萍,肖铁,张宇鹏,等. 超厚板 TC4 钛合金电子束焊接接头应力腐蚀敏感性[J]. 焊接学报,2019,40(12):121-128.
- [3] 王启兴. 钛合金电子束焊接在船舶领域应用的前景[J]. 材料开发与应用,2013,28(2):87-92.
- [4] 刘甲,雷小伟,余巍,等. TC4 钛合金中厚板激光焊接接头组织及性能研究[J]. 热加工工艺,2023,52(11):19-24.
- [5] 方乃文,黄瑞生,闫德俊,等. 低镍含氮奥氏体不锈钢激光-电弧焊电弧特性及组织性能[J]. 焊接学报,2021,42(1):70-75.
- [6] 张龙,陈东高,王大锋,等. TC4 钛合金激光-MIG 复合焊接研究[J]. 兵器材料科学与工程,2019,42(2):73-77.
- [7] 雷小伟,陈利阳,张毅,等. 基于氮气保护的 316L 不锈钢大功率激光焊接工艺研究[J]. 材料开发与应用,2023,38(3):24-30.
- [8] 穆壮壮,高福洋,余巍,等. Ti6321 合金激光-MIG 复合焊接接头组织和力学性能分析[J]. 热加工工艺,2024,53(1):53-57.
- [9] 王洪潇,王春生,邓钢,等. 12 mm 厚 TC4 钛合金激光-MIG 复合焊接接头疲劳裂纹扩展行为研究[J]. 电焊机,2024,54(10):17-31.
- [10] 殷亚运,徐希军,雷小伟,等. 小孔 TIG 焊技术在中大厚度 TC4 板上的应用研究[J]. 热加工工艺,2023,52(11):10-14.
- [11] 徐戊矫,谭玉全,龚利华,等. 退火温度和冷却速率对 TC4 钛合金组织和性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程,2016,45(11):2932-2936.
- [12] Qi N, Zhan X, Chen S, et al. Effect of laser power on tensile performance of TA15 laser-welded lock bottom joint[J]. Metals and Materials International,2020,27(11):1-12.
- [13] 刘甲,雷小伟,马照伟,等. Ti-6Al-2Zr-3Nb-Mo 合金激光焊接接头组织及力学性能研究[J]. 中国激光,2022,49(16):95-105.
- [14] Oh J, Kim N J, Lee S, et al. Correlation of fatigue properties and microstructure in investment cast Ti-6Al-4V welds[J]. Materials Science & Engineering A,2003,340(1/2):232-242.
- [15] 马寅,韩晓辉,李刚卿,等. TC4 钛合金激光-MIG 复合焊接接头组织性能[J]. 电焊机,2023,53(8):93-97.
- [16] 刘鸿铭,朱宗涛,刘云祺,等. 12 mm 厚 TC4 钛合金激光-MIG 复合焊接接头组织与性能研究[J]. 精密成形工程,2024,16(5):21-29. 