

引用格式:刘甲,孙奇,余巍,等.60 mm厚 TC4ELI 钛合金板窄间隙激光-MIG 复合焊接头的组织与性能研究[J].热加工工艺,2026,55(11):82-87. LIU Jia, SUN Qi, YU Wei, et al. Study on Microstructure and Properties of Narrow Gap Laser-MIG Composite Welded Joint of 60 mm Thick TC4ELI Titanium Alloy Plate[J]. Hot Working Technology, 2026, 55(11):82-87. DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20242115

60 mm 厚 TC4ELI 钛合金板窄间隙激光-MIG 复合焊接头的组织与性能研究

刘甲¹, 孙奇¹, 余巍^{1,2}, 陈利阳¹, 刘海彬¹, 晏阳阳^{1,2}, 张浩¹, 杜志博¹, 王伟超¹, 张亚龙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:为推动高效、高可靠性大厚板钛合金焊接技术发展,以 60 mm 厚 TC4ELI 钛合金板为研究对象,研究了间隙激光-MIG 复合焊接技术,获得了 TC4ELI 板窄间隙激光-MIG 焊接接头,分析了焊接接头的金相组织和力学性能。结果表明:焊接接头焊缝区和完全相变热影响区的微观组织主要为针状马氏体 α' 相和 α 相,晶粒之间也存在着少量的 β 相。受多道焊接热影响,中部焊缝区和热影响区还存在着片层或块状 α 相;接头不同厚度层的抗拉强度和焊缝中心熔敷金属的平均抗拉强度均高于母材强度;从焊缝中心至母材,接头的显微硬度和冲击吸收功总体呈现降低的趋势;接头弯曲性能合格。大厚板钛合金窄间隙激光-MIG 复合焊接技术具有良好的应用前景。

关键词:TC4ELI 钛合金;窄间隙;激光-MIG 复合焊

中图分类号: TG456.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2026)11-0082-06

Study on Microstructure and Properties of Narrow Gap Laser-MIG Composite Welded Joint of 60 mm Thick TC4ELI Titanium Alloy Plate

LIU Jia¹, SUN Qi¹, YU Wei^{1,2}, CHEN Liyang¹, LIU Haibin¹, YAN Yangyang^{1,2}, ZHANG Hao¹,
DU Zhibo¹, WANG Weichao¹, ZHANG Yalong¹

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

Abstract: In order to promote the development of high efficiency and high reliability welding technology of large thick titanium alloy plate, the narrow gap laser-MIG composite welding technology of 60 mm thick TC4ELI titanium alloy plate was studied, and the narrow gap TC4ELI plate welded joint was obtained. The microstructure and mechanical properties of the welded joint were studied. The results show that the weld and HAZ structure of TC4ELI titanium alloy narrow gap laser-MIG composite welded joint are mainly composed of acicular martensitic α' phase, acicular α phase and a small amount of intergranular β phase. Under the influence of multi-pass welding heat, there are also lamellar or massive α phases in the middle weld and HAZ. The base material of the joint is $\alpha+\beta$ phase bistate equiaxial structure, and the structure distribution is uniform. The average tensile strength of different layer of the joint and the tensile strength of the metal deposited in the weld center are higher than that of the base metal. The microhardness and impact absorption energy of the welded joint from the weld center to the base metal tend to decrease. The bending performance of the joint is qualified. The narrow gap laser-MIG laser welding technology of large thick titanium alloy plate has a good application prospect.

Key words: TC4ELI titanium alloy; narrow gap; laser-MIG composite welding

钛合金作为一种重要的结构材料,在航空航天、船舶建造、海洋工程等领域具有广泛的应用。然而,由于钛合金的高熔点、难加工等特性,在传统焊接时存

在诸多挑战,如焊缝质量不稳定、变形严重等问题。随着海洋工程装备向深海领域发展,水下船舶装备高速发展,大厚板钛合金装备被广泛应用。因此,发展先进的高效、高可靠性大厚板钛合金焊接技术,对提高钛合金的焊接质量和效率具有重要意义^[1-2]。

窄间隙激光-MIG 复合焊接技术是近年来飞速发展先进焊接工艺,在船舶领域大厚板焊接方面具有

收稿日期:2024-10-24

修回日期:2025-07-16

基金项目:国防基础科研计划资助项目(JCKY2023206A002)

作者简介:刘甲,男,高级工程师,研究方向为钛合金激光焊接;

E-mail:liuj725@126.com

广阔的需求。激光-MIG复合焊接技术是一种兼具激光焊接和MIG焊接优点的高效焊接工艺,激光焊接具有高密度,焊接熔深大,同时MIG焊接提供较好的熔池控制与高熔敷速率,从而实现更高质量的焊接接头^[3-4]。

本试验主要以60mm厚TC4ELI钛合金板为研究对象,进行窄间隙激光-MIG复合焊接工艺研究,旨在获得成形良好的焊接接头,并对接头的金相组织和力学性能进行分析。通过钛合金窄间隙激光-MIG复合焊接技术研究,为工程化应用提供理论和试验基础。

1 试验材料与方法

试验采用TC4ELI板,按照标准GJB 944A—2018《舰船用钛及钛合金板材规范》轧制,试板规格为1000mm×200mm×60mm,共2件,试板宽度方向与轧制方向垂直,试板的化学成分和力学性能见表1。板材坡口加工成双面“U型”坡口,见图1。采用规格为 $\phi 1.2$ mm的TC4ELI焊丝,按照GJB 9581A—2018《钛及钛合金焊丝规范》标准制造。坡口加工后,通过酸洗清洗焊接坡口加工面和附近的油污、氧化物等杂质,酸洗液由5mL的氢氟酸、12mL的硝酸和83mL的水配比而成。焊接前,再采用无水酒精擦拭试板坡口^[5-6]。

表1 TC4ELI试板的化学成分(质量分数,%)和力学性能
Tab.1 Chemical composition (wt%) and mechanical properties of TC4ELI test plate

Al	V	Fe	C	O	H	N	R _m /MPa	R _{p0.2} /MPa	A/(%)
6.13	4.24	0.155	0.007	0.11	0.0011	0.006	920	856	17.5

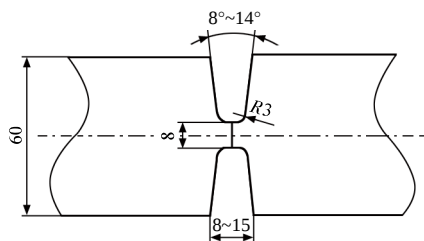


图1 坡口尺寸(mm)

Fig.1 The groove sizes (mm)

激光-MIG焊接试验采用IPG光纤激光器,配有龙门式库卡机器人系统,搭载HIGHYAG激光焊接头;MIG焊机采用福尼斯TPS4000CMT焊机,进行双面多层多道焊接,焊接工艺参数如表2所示。采用激光-MIG复合打底、填充和盖面焊接,施焊过程采用纯度为99.99%的氩气保护熔池及热影响区,以

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	焊接电压/V
打底	6~10	120~180	0~10	120~140	18~20
填充	4~6	30~60	10~15	180~220	28~32
盖面	4~6	30~40	10~15	160~200	25~30

防止氧化^[6-7]。

焊接完成后,检查激光-MIG复合焊接试板表面形貌,按照NB/T 47013—2015《承压设备无损检测》标准对焊接试板焊缝开展X射线检测和超声波检测。参照CB/T 4363—2013《船用钛及钛合金焊接工艺评定》对焊接接头进行组织与性能检测,沿垂直于焊接方向进行取样观察,采用线切割截取1件金相检测试样、6件横向拉伸试样、3件焊缝熔敷金属纵向圆拉试样、12件弯曲试样和18件冲击试样^[8]。焊后试板采用ZEISS Axio Observer 7m金相显微镜,按照GB/T 5168—2020《钛及钛合金高低倍组织检验方法》和GB/T 6611—2008《钛及钛合金术语和金相图谱》开展接头微观金相组织分析^[9]。焊接接头沿厚度方向均匀分3层,截取横向板拉伸试样,每层截取2个拉伸试样,按照GB/T 2651—2023《金属材料焊缝破坏性试验 横向拉伸试验》标准在DNS600材料试验机上进行拉伸试验;沿焊接方向截取熔敷金属纵向圆拉试样,在厚度方向分别在上部、中部、下部各取1个试样,在MTSE45.305-A材料试验机上进行圆棒拉伸试验。

按照GB/T 2650—2022《金属材料焊缝破坏性试验 冲击试验》标准在ZBC2602-B摆锤式冲击试验机上开展冲击试验;在厚度方向均匀截取3组横向弯曲试样,每组取4个,试样尺寸为400mm×20mm×10mm,按照GB/T 2653—2008《焊接接头弯曲试验方法》在BHT5106电液伺服弯曲试验机上开展侧向弯曲试验^[10-11];距接头表面3mm和30mm处进行显微硬度测试,测试路径为从一侧母材至另一侧母材打点,测试力为0.2kg,加载时间为30s,按照GB/T 4340.1—2009《金属维氏硬度试验第1部分:试验方法》标准,在Wilson VH3300显微硬度计上开展显微硬度测试。

2 结果与讨论

2.1 焊缝外观形貌

60mm厚TC4ELI激光-MIG复合焊焊缝的表

面形貌如图 2 所示。可看出,焊缝表面呈银白色,无飞溅。按照 NB/T47013.2—2015 标准开展 X 射线检测,焊缝质量满足 I 级要求,按照 NB/T47013.3—2015 标准开展超声波检测,焊缝质量满足 I 级要求。



图 2 焊缝外观形貌
Fig.2 The appearance of the weld

接头横截面宏观形貌如图 3 所示。从图可以看出,接头内部没有裂纹、孔穴、夹渣、侧壁或层间未熔合、未焊透等缺陷,接头正反面存在着轻微的咬边。接头上表面熔宽为 18.3 mm,下表面熔宽为 15.9 mm,单道焊缝厚度在 4~7 mm,熔敷速率高^[12]。

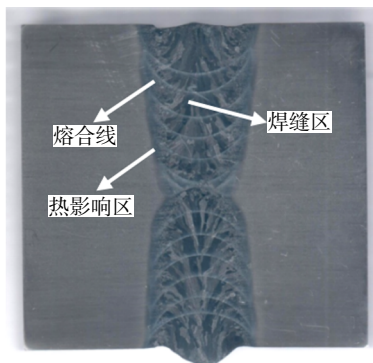


图 3 焊缝横截面宏观形貌
Fig.3 Macroscopic metallography of cross section of the weld

2.2 接头微观组织

图 4 为母材的金相组织。可看出,沿厚度方向板材近表面和中部区域的组织均为 $\alpha+\beta$ 相双态等轴组织,主要由等轴 α 相、部分片层 α 相和少量的片层 β 相转变组织组成,组织均匀分布,近表层和中部区域母材组织分布状态基本一致,板材厚度方向组织状态均匀性较好。

图 5 和图 6 分别为接头靠近母材区的热影响区和靠近焊缝区的热影响区金相组织。由图 5(a)、(b) 可知,近母材的热影响区明显未发生固态相变,呈现明显的双态等轴组织特征,主要由等轴 α 相、部分片层 α 相和少量的由片层 β 相组成,组织均匀分布。相对于母材组织,热影响区中的片层 α 相轻微长大,片层 β 相减少。接头近表面和中部区域近母

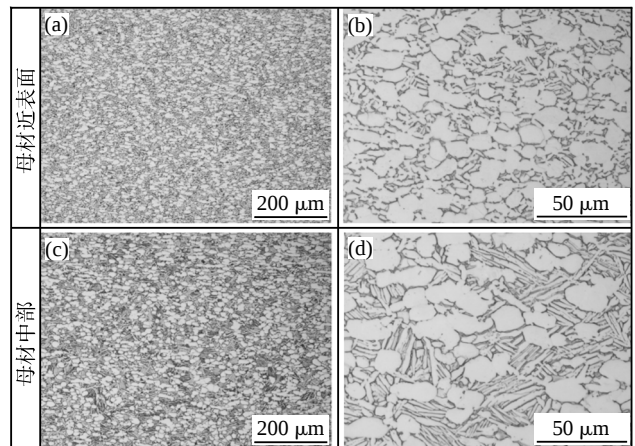


图 4 母材的组织
Fig.4 Microstructure of the base metal

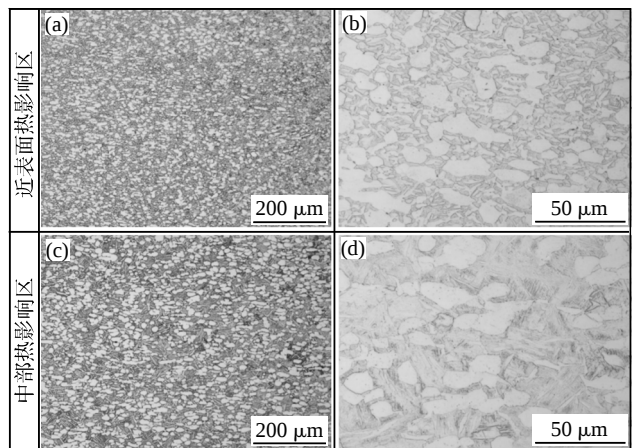


图 5 接头近母材处热影响区的组织
Fig.5 Microstructure of HAZ around base metal of the joint

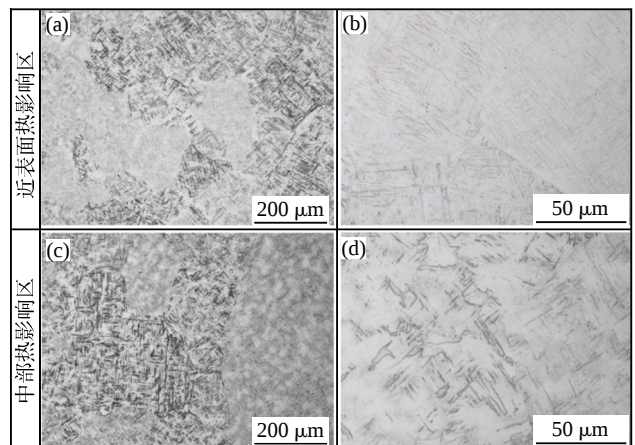


图 6 接头近焊缝处热影响区的组织
Fig.6 Microstructure of HAZ around weld of the joint

材侧热影响区无明显区别,这表明在激光-MIG 复合焊过程中,尽管近表面和中部区域焊接热输入和热循环存在差异,但是对厚度方向近母材处的热影响区影响不大,该热影响区组织均匀性较好。由图 6 可知,相对于母材组织,接头近焊缝处热影响区组织

发生了显著的完全固体相变。由图 6(a)、(b)可以看出,近表面近焊缝热影响区金相组织主要由针状马氏体 α' 、针状 α 相和少量的晶间 β 相组成,呈现部分魏氏组织特征,同时可以看到明显的原始 β 晶界^[13]。近焊缝处热影响区受高温热循环影响,该处组织首先在高温下发生固态相变形成过饱和高温 β 相,在快速冷却过程中, β 相以非扩散转变成过饱和非平衡六方晶格马氏体 α' ,呈集束状生长,截止在原始 β 晶界,长宽比在 10:1 以上。在原始 β 相晶粒内可以明显看到较多的针状 α 相交错分布,针状马氏体 α' 和针状 α 相间有少量的 β 相^[6]。由图 6(c)、(d)可以看出,中部近焊缝热影响区金相组织主要由针状 α 相、块状 α 相组成,其间也存在少量的马氏体 α' 和晶间 β 相。这主要是由于中间焊道热影响区受到后续填充多道次焊接热循环影响,有一定的完全退火效应。相对于近表面近焊缝热影响区,过饱和马氏体 α' 相发生分解形成针状 α 相,同时部分针状 α 相晶粒长大形成块状 α 相。多道焊接热输入影响条件下,TC4ELI 主要成分具备了一定的原子扩散条件,实现了晶界的转移和形核生长,片层 α 相晶粒尺寸增加,附近的晶粒相互兼并,由此产生相对较为粗大的块状 α 相晶粒。因此中间焊道近焊缝热影响区强度会降低,塑性会提高^[6]。

图 7 为接头近表面和中部焊道熔合线区域的金相组织。可以明显看到焊缝与热影响区分界线,即焊缝熔合线。左侧为热影响区完全相变区,右侧为焊缝枝晶,枝晶在熔合线处与热影响区发生联生结晶,熔合良好。近表面和中部焊道熔合线组织状态基本一致,粗大的原始晶界内交错分布着针状马氏体 α' 相

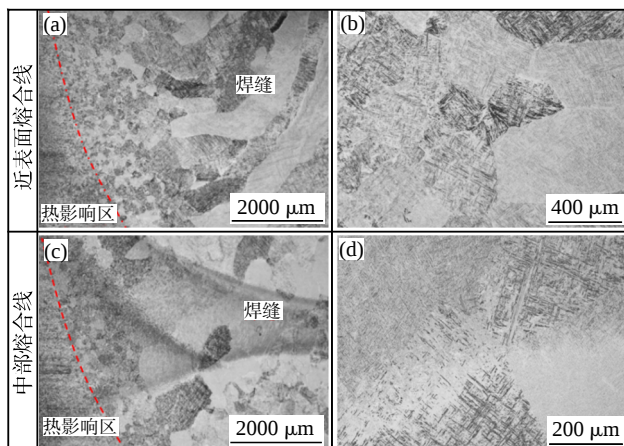


图 7 接头熔合线区的组织
Fig.7 Microstructure of fusion line of the joint

和针状 α 相, α 相之间分布着少量的晶间 β 相^[6]。

图 8 为接头熔合线附近焊缝区域的金相组织。可看出,接头近表面和中部焊道的焊缝组织组成物和分布状态基本一致,焊缝组织主要由马氏体 α' 相、针状 α 相和少量的晶间 β 相组成。在金相组织中可以清晰地观察到粗大的 β 相原始晶界,该晶界为焊缝高温柱状枝晶 β 相快速冷却保留下来的。马氏体 α' 相一般在高温 β 相原始晶界处形核,向过冷度大的方向生长,由于焊缝快速冷却形成针状马氏体 α' ,其长度与宽度的比值一般高于 10; 针状 α' 互相缠结,呈十字状,分布特征呈现部分魏氏或网篮形貌^[13]。

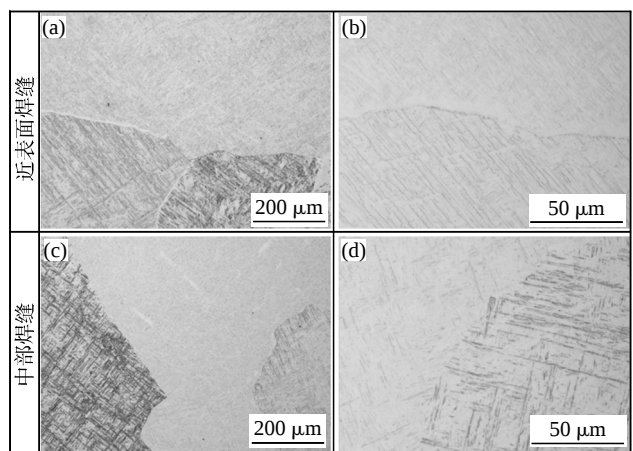


图 8 接头靠近熔合线位置焊缝的组织
Fig.8 Microstructure of weld around fusion line of the joint

图 9 为接头近表面焊道和中部焊道中心焊缝区域的金相组织。近表面焊缝中心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。可以清晰看到粗大的 β 相原始晶界,内部针状马氏体 α' 相和针状 α 相呈一定位相交错分布,其更加密集细小,这会进一步提高焊缝强度^[6,14-15]。中部焊缝中心

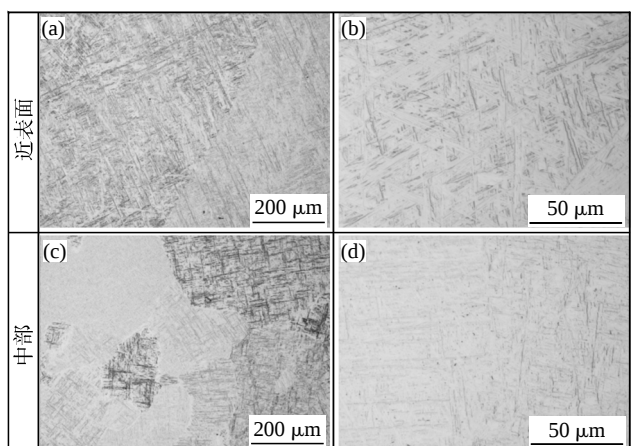


图 9 接头中心焊缝区组织形貌
Fig.9 Microstructure of central weld zone of the joint

组织主要由针状马氏体 α' 相、针状 α 相、片层 α 相和少量的晶间 β 相组成。相较于近表面焊道焊缝中心金属,针状马氏体 α' 相显著减少,有较多的片层 α 相出现,中部焊道焊缝金属的强度降低,这主要是由于中间焊道易受到上下填充焊道的热处理作用。多次热作用下合金元素原子有了很强的扩散能力,实现了晶界的迁移运动,部分过饱和马氏体 α' 相发生分解形成针状 α 相,针状 α 相晶粒进一步长大、相邻 α 相相互吞并,形成片层状 α 相晶粒,这有利于改善中部焊道焊缝金属的塑性^[6]。

2.3 接头力学性能

接头横向拉伸测试结果如表 3 所示。上部和下部焊接接头抗拉强度相近,且均高于中部接头抗拉强度。这主要是由于中部焊道焊缝和热影响区受后续焊接热影响,组织中针状马氏体 α' 相减少,块状或片层状 α 相增多,中部焊道强度略微下降。不同取样位置焊接接头的抗拉强度均高于 920 MPa,高于母材抗拉强度,接头强度系数大于 1,这是因为焊缝和热影响区针状马氏体 α' 相和针状 α 相有利于提高组织强度,因此接头整体强度高于母材,拉伸断裂位置位于母材处。

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

取样位置	R_m /MPa	平均值 /MPa	断裂位置
上部	940,946	943	母材
中部	929,923	926	母材
下部	946,945	945.5	母材

熔敷金属纵向拉伸测试结果如表 4 所示。不同取样部位拉伸屈服强度与母材基本一致,抗拉强度高于母材强度,塑性明显低于母材。这主要是因为母材组织为 $\alpha+\beta$ 相双态等轴组织,组织均匀分布,具有良好的塑性,而焊缝主要由集束状针状马氏体 α' 相和针状 α 相组成,呈魏氏组织特征,塑性较差。上部和下部焊缝抗拉强度和断裂伸长率相近,抗拉强度高于中部焊缝拉伸强度,断裂伸长率低于中部焊缝。这主要是由于中部焊道焊缝中针状马氏体 α' 相

表 4 熔敷金属的纵向拉伸性能
Tab.4 Longitudinal tensile properties of the deposited metal

取样位置	$R_{p0.2}$ /MPa	R_m /MPa	A(%)
上部	862	986	9.5
中部	855	940	11
下部	857	973	9

减少,块状或片层状 α 相增多,因此中部焊道强度降低,塑性略微提高。

焊接接头上表面和中部显微硬度分布分别如图 10 和图 11 所示。从焊缝中心至母材,焊接接头硬度总体呈降低趋势,接头上表面焊缝区平均显微硬度约为 297 HV,热影响区平均显微硬度约为 287.7 HV,母材平均显微硬度约为 281 HV;焊接接头中部焊缝区平均显微硬度约为 299 HV,热影响区平均显微硬度约为 292 HV,母材平均显微硬度约为 286.3 HV。这主要是因为焊缝存在密集交错的针状马氏体 α' 相和针状 α 相,其强度高于块状等轴 α 相,且晶粒内位错能高于母材,晶界较多,晶格能较大,因而焊缝平均显微硬度高。而靠近焊缝的热影响区也存在着交错分布的针状马氏体 α' 相和针状 α 相,因此焊缝和热影响区显微硬度要高于母材^[6]。

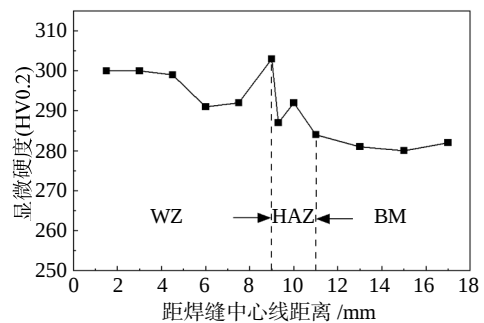


图 10 焊接接头上表面的显微硬度分布
Fig.10 Microhardness distribution of upper surface of the welded joint

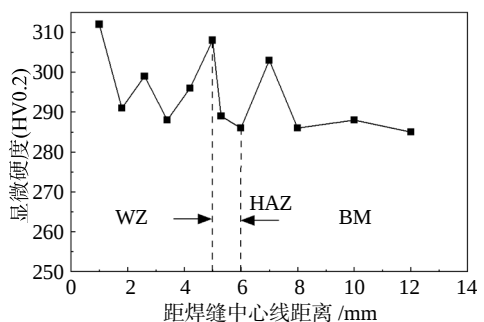


图 11 焊接接头中部的显微硬度分布
Fig.11 Microhardness distribution of middle region of the welded joint

接头夏比冲击试验结果如表 5 所示。可知,焊接接头上表面和中部焊缝的冲击吸收功最大,热影响区稍低,母材冲击吸收功最小,接头上表面母材和焊缝冲击吸收功相差约 14 J,接头中部焊缝和母材冲击吸收功相差约 15.3 J。这主要是由于焊缝、热影响区与母材组织成分及分布状态差距较大造成的,焊缝和热影响区存在针状马氏体 α' 组织,呈交错分布

表 5 接头各区域的冲击吸收功
Tab.5 Impact absorbing energy of each region of the joint

取样位置	缺口位置	冲击吸收功 /J	平均值 /J
上表面	焊缝中心	43、44、45	44
上表面	热影响区	40、39、35	38
上表面	母材	27、31、32	30
中部	焊缝中心	45、45、46	45.3
中部	热影响区	36、35、34	35
中部	母材	29、31、30	30

状态,可有效阻碍冲击裂纹形成和快速扩展,母材中双态组织含有较多的等轴 α 相,一般会促进裂纹的形成与扩展。

接头上表面和中部的焊缝冲击吸收功相差不大,上表面热影响区冲击吸收功略高于中部热影响区,上部和中部母材冲击吸收功平均值相同。整体来看,焊接接头厚度方向冲击吸收功均匀性较好。

侧向弯曲试验结果表明,弯曲试样在 $d=16t$ 、弯曲角度为 180° 的试验条件下,全部侧弯试样均未发生断裂且无裂纹,满足 CB/T 4363—2013 相关要求,接头弯曲性能合格良好。

3 结论

(1) 窄间隙激光 -MIG 复合焊可实现 60 mm TC4ELI 钛合金多层多道焊接成形,熔敷速率高。接头上表面和下表面呈银白色,焊接保护良好,焊缝成形美观。X 射线探伤检测和超声波检测均满足相关要求。

(2) 板材厚度方向近表面和中部区域的母材组织均为 $\alpha+\beta$ 相双态等轴组织,主要由等轴 α 相、部分片层 α 和少量的由片层 β 相组成,组织均匀分布。

(3) 上表面和中部近母材处热影响区基本未发生固态相变,呈现明显的双态等轴组织特征;上表面近焊缝热影响区微观组织主要为针状马氏体 α' 相和 α 相,晶粒之间也存在着少量的 β 相,低倍下可以明显的看到原始晶界,受多道焊接热影响,中部近焊缝热影响区也存在着片层或块状 α 相。

(4) 上表面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、片层 α 相和少量的晶间 β 相组成。

(5) 接头抗拉强度高于母材;焊缝区和热影响区冲击吸收功高于母材;弯曲性能满足 CB/T 4363—2013 要求,性能良好。

参考文献:

- [1] 余陈,张宇鹏,徐望辉,等. 厚板 TC4 钛合金磁控窄间隙 TIG 焊接工艺[J]. 电焊机, 2018,48(1):52-56.
- [2] 吕世雄,崔庆龙,黄永宪,等. 厚板钛合金窄间隙 TIG 焊接头组织与性能[J]. 焊接学报, 2012,33(8):81-84.
- [3] 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.
- [4] 火巧英,戴忠晨,朱伟,等. 10 mm 厚 6005A 铝合金激光 -MIG 复合焊接[C]//2014 轨道交通先进金属加工及检测技术交流会论文集. 2014:286-288.
- [5] 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.
- [6] 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):56-66.
- [7] 张高磊,孔华,邹江林,等. 高功率光纤激光深熔焊接飞溅特性以及离焦量对飞溅的影响 [J]. 中国激光, 2021,48(22):73-80.
- [8] 罗皓,刘甲,崔永杰,等. BFe10-1-1 合金 PAW 接头组织和性能研究[J]. 热加工工艺, 2019,48(23):140-142.
- [9] 韩云飞,袁兵兵,孙冰,等. 壁厚和铸造缺陷对 ZTA15 钛合金组织及性能的影响[J]. 钢铁钎焊, 2022,43(6):84-88.
- [10] 赵太源,李亚军,肖莉,等. S30403 不锈钢无缝钢管背面保护焊接技术[J]. 焊接, 2019(11):58-61.
- [11] 高祥楼,杜高峰,黄泽银,等. 低合金高强度钢 Q500MD 焊接工艺研究[J]. 金属加工(热加工), 2023(5):53-56.
- [12] 刘甲,陈高澎,马照伟,等. 钛合金混合保护气等离子弧焊接头组织及性能[J]. 材料导报, 2021,35(z1):371-373.
- [13] 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.
- [14] 周秉文,刘文博,景栋,等. Ti/TiAl₃ 叠层复合材料 TIG 焊接头组织与性能研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2022,51(12):4579-4585.
- [15] 王浩军,张颖云,毛悦,等. TC4 钛合金搭接接头双侧激光角焊的组织与性能[J]. 热加工工艺, 2019,48(11):147-150. 