

引用格式:丛成明,曾才有,张宇鹏,等.钛合金厚板磁控窄间隙TIG焊接接头的组织与性能[J].热加工工艺,2024,53(13):24-29.  
DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20220524  
http://www.rjggj.net rjggj@vip.163.com

# 钛合金厚板磁控窄间隙TIG焊接接头的组织与性能

丛成明<sup>1,2</sup>, 曾才有<sup>2</sup>, 张宇鹏<sup>2</sup>, 王海燕<sup>2</sup>, 赵鸿金<sup>1</sup>, 陈俊孚<sup>2</sup>

(1. 江西理工大学 材料冶金化学学部, 江西 赣州 341000; 2. 广东省科学院中乌焊接研究所, 广东 广州 510651)

**摘要:**针对影响Ti-6Al-4V合金厚板磁控窄间隙TIG焊接接头力学行为的微观组织因素展开研究。测定了100 mm厚Ti-6Al-4V接头的显微硬度分布和室温拉伸性能,采用数字图像关联技术监测拉伸过程的应变分布,通过全面的微观组织表征揭示接头组织不均匀性对力学行为的影响。结果表明:接头抗拉强度达到893 MPa,接头强度系数达到94%,伸长率仅为3.8%。热影响区组织不均匀性显著,由三种典型特征组织构成。靠近母材的热影响区发生了回复和部分再结晶,成为硬度和强度最薄弱区域,拉伸过程中首先发生屈服和颈缩。接头显著的组织不均匀性导致拉伸过程中发生严重的应变局域化现象,使得接头整体伸长率显著恶化。

**关键词:**磁控窄间隙焊接;钛合金厚板;显微组织;力学性能

中图分类号: TG444+.74; TG457.19

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2024)13-0024-06

## Microstructure and Mechanical Properties of Magnetically Controlled Narrow Gap TIG Welding Joint of Titanium Alloy Thick Plate

CONG Chengming<sup>1,2</sup>, ZENG Caiyou<sup>2</sup>, ZHANG Yupeng<sup>2</sup>, WANG Haiyan<sup>2</sup>,  
ZHAO Hongjin<sup>1</sup>, CHEN Junfu<sup>2</sup>

(1. Faculty of Materials Metallurgy and Chemistry, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;  
2. China-Ukraine Institute of Welding, Guangdong Academy of Science, Guangzhou 510651, China)

**Abstract:**The microstructure factors affecting the mechanical behavior of magnetically controlled narrow gap TIG welded joint of Ti-6Al-4V alloy thick plate were systematically studied. The microhardness distribution and tensile properties at room temperature of the 100mm thick Ti-6Al-4V joint were measured. The strain distribution during tensile process was recorded by digital image correlation technology. Through comprehensive microstructure characterization, the influence of joint microstructure heterogeneity on the mechanical behavior was revealed. The results show that the tensile strength of the joint reaches 893 MPa, the joint strength coefficient is 94%, and the elongation is only 3.8%. The microstructure of heat affected zone is composed of three characteristic structures and shows a significant microstructural heterogeneity. Recovery and partial recrystallization occurs in the heat affected zone near the base metal, which exhibits the lowest hardness and strength. Yield and necking first occur in this area during tensile process. The significant microstructural heterogeneity of the joint leads to serious strain localization during tensile process, which makes the overall elongation of the joint deteriorate significantly.

**Key words:** magnetically controlled narrow gap welding; titanium alloy thick plate; microstructure; mechanical property

收稿日期:2022-03-03

基金项目: 广东省科学院建设国内一流研究机构行动专项项目(2020GDASYL-20200103122,2021GDASYL-20210103081); 国家重点研发计划项目(2020YFE0205300); 广州市科技项目(201807010035,201807010011); 国家自然科学基金项目(52005112)

作者简介:丛成明(1996-),男,辽宁本溪人,硕士研究生,研究方向为钛合金先进焊接技术与组织性能调控理论;

E-mail: ccm.jxust@foxmail.com

通信作者:赵鸿金(1967-),男,山西平遥人,教授,博士,研究方向为金属材料加工技术与理论等;E-mail: zhj\_zyh@sohu.com

钛合金具有比强度高和耐蚀性好等优点,被誉为“海洋金属”,是海洋工程装备制造中最重要的轻量化结构材料<sup>[1-2]</sup>。随着海洋探索向深海、远海环境方向发展,大厚度钛合金结构(厚度大于30mm)在海洋工程中的应用日趋增加,如深海探测器和深海空间站耐压壳体结构。我国海洋强国战略的发展对大厚度钛合金高效高质连接技术提出了极其迫切的需求<sup>[3]</sup>。

窄间隙电弧焊接工艺以电弧为热源,以相近牌号钛合金丝材作为填充金属进行多层熔敷,通过随

惰性气体保护设计,可有效提高焊接过程的灵活性和工艺适应性,而且设备造价相对低廉,对于大厚度钛合金的连接是一种低成本、高效的选择<sup>[46]</sup>。由于厚板窄间隙焊接坡口狭窄,焊接过程中电弧易沿厚板侧壁“爬升”,导致两侧焊趾热输入不足,造成侧壁熔合不良等缺陷,显著降低接头的服役可靠性。合理调控窄间隙焊接过程中的电弧热量分配是解决此问题的有效途径<sup>[7-8]</sup>。乌克兰巴顿焊接研究所于20世纪末创造性地将交变磁场引入到窄间隙电弧焊接过程中,采用外加交变磁场优化调控电弧形态和分布,可有效解决窄间隙焊接侧壁熔合不良的问题,首次提出磁控窄间隙TIG (magnetically controlled narrow gap TIG, MCNG-TIG)焊接技术。Sun等人<sup>[9]</sup>设计了一种双磁极TIG窄间隙焊接系统,与传统单磁极相比磁通密度提高了81.8%,随着磁通密度的增加或磁场频率的降低,侧壁穿透率明显增加,有效解决了侧壁熔合不充分的问题。余陈等人<sup>[10]</sup>对100 mm厚和31 mm厚Ti-6Al-4V磁控窄间隙TIG焊试板热处理前后的残余应力进行了研究,由于100 mm厚板在焊接过程中横向收缩的累积效应,使其残余应力较高,真空热处理有效降低了焊板残余应力。沈言锦等人<sup>[11]</sup>基于磁控电弧传感器设计了一种磁控电弧-激光相结合的传感器,能自动采集焊缝的偏差信息进行信息融合后导入到系统中,调整焊枪位置,严格控制焊枪对中,获得均匀的侧壁熔深,为窄间隙的跟踪提供了新的技术方案。

目前,针对大厚度钛合金MCNG-TIG焊接的相关研究主要关注焊接工艺优化、装备研发和焊接残余应力对接头性能的影响等领域,而针对影响接头性能的微观组织因素还未得到太多关注。本文针对100 mm厚Ti-6Al-4V板MCNG-TIG焊接接头的硬度分布和室温单轴拉伸力学性能展开研究,对接头不同区域显微组织演化进行系统表征和深入分析,揭示大厚板钛合金MCNG-TIG焊接接头独特力学响应的微观组织机理。

## 1 实验材料及方案

采用100 mm厚Ti-6Al-4V钛合金热锻+退火态板材作为焊接试件,焊件尺寸(长×宽×高)为650 mm×250 mm×100 mm,设置引弧块、熄弧块和背部衬板。填充金属采用直径3 mm的Ti-6Al-4V实心焊丝。焊接试验采用乌克兰巴顿焊接研究所研发的

PLAZER-AD238-M120型MCNG-TIG焊接装备完成,焊接工装和焊枪机构如图1所示。采用反变形法弥补焊接过程的板材角变形,I型坡口初始张开角度为10°,坡口底部宽度为10 mm,焊接工艺参数见表1。所制备的100 mm厚Ti-6Al-4V钛合金MCNG-TIG接头宏观照片如图1(d)所示。可清楚地观察到:焊缝表面没有明显的氧化现象和咬边缺陷。经无损探伤检测,整条焊缝无侧壁熔合不良缺陷。

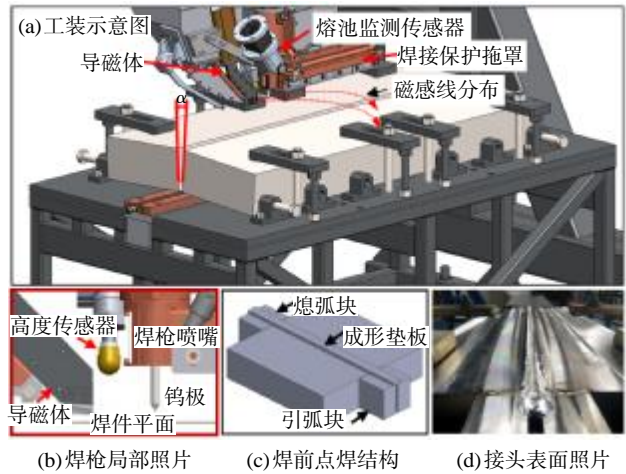


图1 磁控窄间隙TIG焊接工装及100 mm厚Ti-6Al-4V钛合金接头照片

Fig.1 MCNG-TIG welding tooling and as-fabricated 100 mm thick Ti-6Al-4V alloy joint

表1 MCNG-TIG焊接参数  
Tab.1 MCNG-TIG welding parameters

焊接道次	焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 /(m·h <sup>-1</sup> )	送丝速度 /(m·h <sup>-1</sup> )	磁场频率 /Hz	磁场强度 /(A·m <sup>-1</sup> )
17	440~480	11.5~12.5	5~6.5	9~11	5~7	5.5~6.5

利用Buehler VH1202显微维氏硬度计测试焊接接头各区域硬度,加载力为4.9N,保载时间为15s。利用Zwick BT2-FR250SN.A4K电子万能试验机进行室温单轴拉伸测试,初始拉伸速率为0.5 mm/min,拉伸试样尺寸及取样位置如图2所示。拉伸过程中通过数字关联图像技术(digital image correlation, DIC)

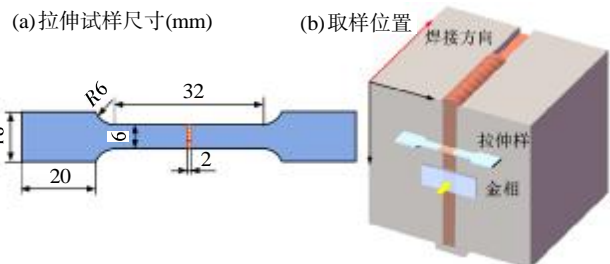


图2 拉伸试样尺寸和取样位置

Fig.2 Illustration of tensile specimen and sampling location

获取试样表面的应变分布,所使用的 DIC 设备型号为新拓三维 XTOM-MATRIX-3M。金相观察样品经打磨、抛光至表面光亮后,用 Kroll 试剂(HF:HNO<sub>3</sub>:H<sub>2</sub>O=1:2:7)对试样进行腐蚀。通过扫描电子显微镜(FEI Quanta TM250 SEM)对接头不同区域微观组织和拉伸断口形貌进行观察。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 硬度分布

100 mm 厚 Ti-6Al-4V 钛合金 MCNG-TIG 焊接接头截面宏观形貌如图 3(a)所示。除打底焊和盖面焊之外,焊缝宽度沿厚度方向较为一致,约为 16 mm,焊缝熔合良好。在焊缝中间厚度区域,对焊接不同区域显微硬度分布进行测定,结果如图 3(b)所示(彩图见电子版,下同)。高硬度值区域集中分布于紧挨熔合区(fusion zone, FZ)两侧的热影响区(heat-affected zone, HAZ),平均硬度为(326.5±17.5)HV,单侧高硬度热影响区宽度约为 7 mm。低硬度值区域集中分布于紧挨热影响区的母材区(base metal, BM),此区域显微硬度平均值为(305.5±24.7)HV。熔合区的硬度分布均匀,平均值为(313.9±17.2)HV,介于热影响区和母材硬度值之间。

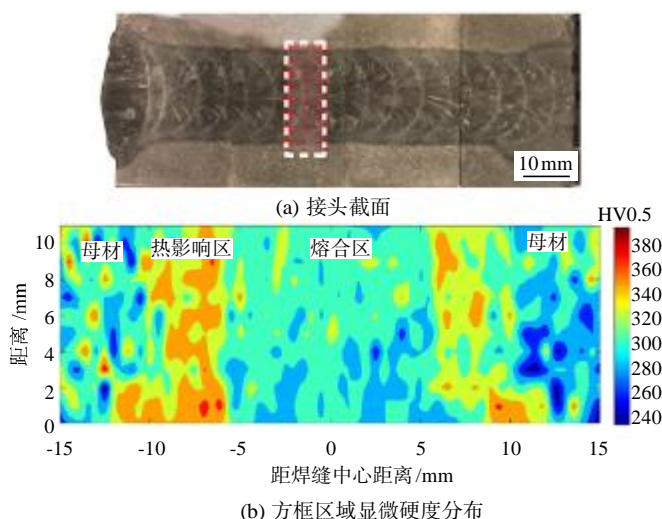


图3 Ti-6Al-4V 钛合金 MCNG-TIG 接头显微硬度测试结果  
Fig.3 Microhardness test results of Ti-6Al-4V titanium alloy MCNG-TIG joint

### 2.2 拉伸性能

对 100 mm 厚 Ti-6Al-4V 合金 MCNG-TIG 焊接接头及收货态 Ti-6Al-4V 母材分别进行室温拉伸试验,应力-应变曲线如图 4(a)所示。母材的抗拉强度为 942 MPa,伸长率达到 10.5%。MCNG-TIG 接头的

抗拉强度达到 893 MPa,平均伸长率仅为 3.8%。从结果可以得出:相较母材性能,接头的抗拉强度略微下降,接头强度系数达到 94%,但接头塑性较母材的显著降低。接头拉伸断裂位于母材与热影响区交界处。

利用 DIC 测试技术探究 MCNG-TIG 接头在拉伸时的应变分布行为,结果如图 4(b)所示。当整体拉伸应变  $\epsilon$  达到 0.2% 时,热影响区与母材交界处已出现局部应变集中。随着  $\epsilon$  逐渐增大,红色应变集中区域面积逐渐扩大。当  $\epsilon$  达到 1.8% 时,拉伸试样应变分布出现两块低应变值区域(深蓝色),此区域对应高硬度值热影响区。此时,最大应变集中分布于热影响区与母材交界处,而熔合区的应变介于热影响区的和高应变母材区的。随着  $\epsilon$  进一步增大,此应变分布特征更加显著,高应变区域面积继续扩大直至断裂,高应变区局限于热影响区与母材交界处附近区域。低应变区面积也同步扩大,并向熔合区中心处扩展。接头拉伸应变分布特征与接头显微硬度分布特征有较强的对应性,即高硬度区对应低应变区,拉伸过程中高应变区展示出了更优异的抗变形能力。以上结果说明:MCNG-TIG 接头强度最薄弱区位于热影响区与母材交界处附近。

### 2.3 显微组织

为进一步探究影响接头力学行为的微观组织层面因素,对 MCNG-TIG 接头显微组织进行观察,结果如图 5 所示。从接头截面金相照片(图 5(a))可以明显看出,焊缝熔合区内原始  $\beta$  相晶粒呈现粗大柱状晶特征。对接头各区域组织进行微观表征,母材区组织由大量拉长的  $\alpha$  相晶粒组成,在  $\alpha$  相晶界处存在长条状  $\beta$  相,如图 5(b)所示。这是典型的锻造+退火态组织,拉长的  $\alpha$  相晶粒由锻造塑性变形导致。熔合区为全网篮组织,由相互交织分布的  $\alpha$  相片层+少量层间残余  $\beta$  相组成,如图 5(c)所示。MCNG-TIG 焊接采用多层熔敷方式,从而引发局部区域的快速升温+冷却热循环。此焊接热循环可促使非平衡凝固的马氏体组织分解,转变成热力学更加稳定的网篮组织。

受电弧热辐射和熔池金属热传导的影响,热影响区内不同区域经历的焊接热循环特征存在显著差异,进而导致热影响区组织构成复杂<sup>[12]</sup>。本文对热影响区内不同位置的组织进行观察,选择如图 5(a)中 d~h 标记的五个典型区域。焊接时熔合区温度最

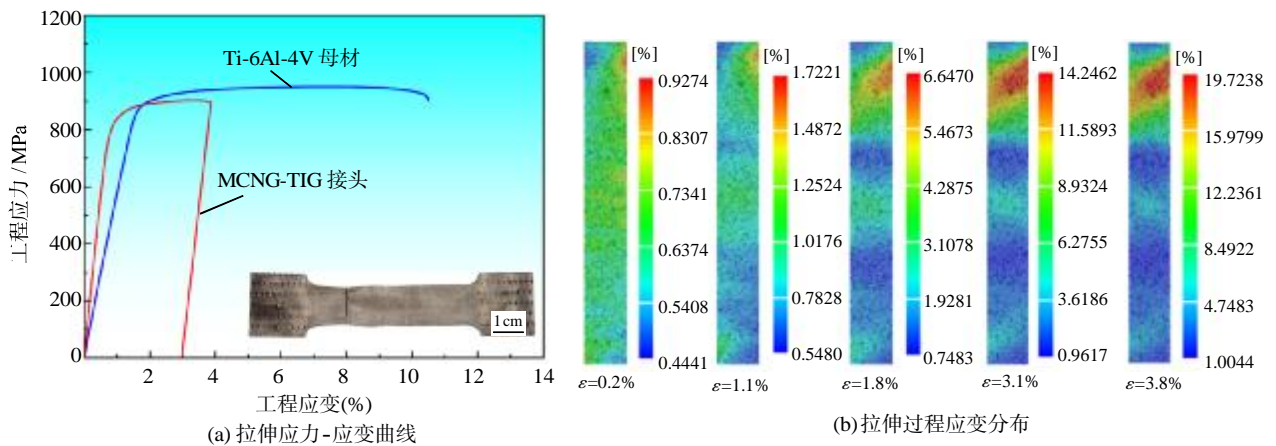
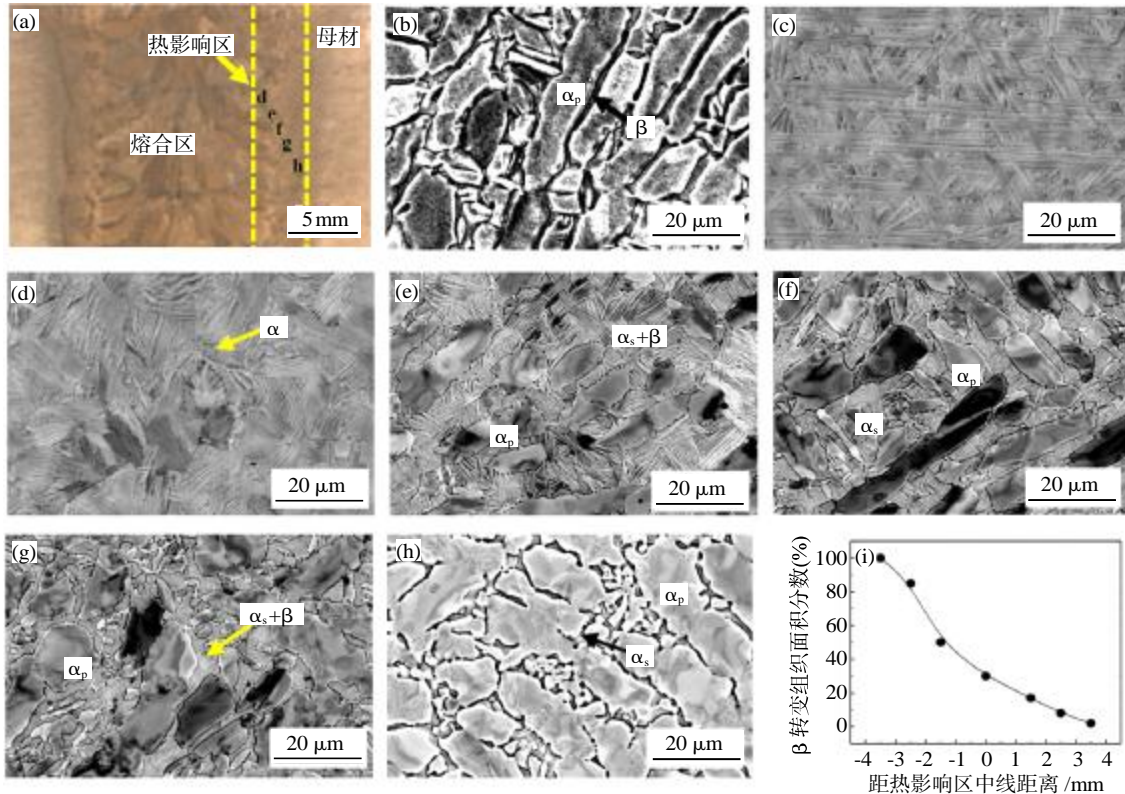


图4 接头的室温拉伸性能

Fig.4 Tensile property of the joint at room temperature

高,靠近此区域的热影响区具有高温、低冷速的热循环特征,最高温度高于 $\beta$ 相转变温度( $980\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),升温过程中,初生 $\alpha$ 相全部转变成 $\beta$ 相,且发生完全再结晶,形成等轴 $\beta$ 晶粒。 $\beta$ 相在冷却过程中又形成 $\beta$ 转变组织,由于冷却速度较小,此区域单个 $\beta$ 晶粒内部全部转变成择优取向排列的 $\alpha$ 集束魏氏体组织,如图5(d)所示。随距高温熔合区越远,则距离冷母材金属更近,热影响区热循环最高温度逐渐降低,且冷却速度逐渐增大,导致升温时只有部分 $\alpha$ 相转

变成 $\beta$ 相,冷却时 $\beta$ 相转变成网篮组织(次生 $\alpha_s$ 片层+层间条状 $\beta$ 相),同时基体中保留大量未相变的初生 $\alpha_p$ 相,如图5(e)~(g)所示。靠近母材的热影响区所经历的加热温度最低,但仍然高于再结晶温度,导致基体发生部分再结晶,形成细小等轴晶区,粗大拉长 $\alpha_p$ 晶粒被破碎,晶粒间存在 $\beta$ 相,如图5(h)所示。同时,未发生再结晶的 $\alpha_p$ 晶粒发生回复,即晶粒内部位错密度显著降低。对热影响区内 $\beta$ 转变组织( $\alpha_s+\beta$ )的面积百分含量进行定量统计,结果



(a)接头宏观照片;(b)母材;(c)熔合区;(d)近熔合区热影响区;(e)~(g)中部热影响区;(h)近母材热影响区;(i)热处理影响区 $\beta$ 转变组织含量

图5 接头各区域的显微组织

Fig.5 Microstructure of each region of the MCNG-TIG joint

如图 5(i)所示。随距熔合区距离增大,β 转变组织面积百分含量逐渐降低。

组织表征结果能很好地解释 MCNG-TIG 接头的力学行为。热影响区中部主要为破碎的 α<sub>p</sub> 晶粒 +β 相转变组织 (细小次生 α<sub>s</sub> 片层 + 层间条状 β 相),这类组织具有优异的强度<sup>[13]</sup>。而熔合区内粗大的原始 β 晶粒 + 粗大的网篮组织片层,强度低于中部热影响区的。靠近母材的热影响区发生了回复和部分再结晶,强度最低,对应硬度分布图中的低硬度值区。在拉伸过程中,此区域首先发生屈服和颈缩,导致后续塑性变形局限于此局部区域。

拉伸断口形貌如图 6 所示。裂纹附近能观察到明显的 α 相再结晶组织,进一步佐证拉伸断裂位置位于靠近母材的热影响区内。裂纹以穿晶断裂和沿晶断裂混合模式进行扩展。从断口正面观察到:断口处有大量均匀分布的韧窝,为典型的韧性断裂特征。同时,也能观察到典型沿晶断裂特征,如图 6(d)所示。材料发生再结晶后,强度往往降低,但具有良好的塑性。但焊接接头为典型异质结构材料,宏观塑性受整体组织不均匀性的影响<sup>[14]</sup>。通过应变分布结果也可以帮助理解 MCNG-TIG 接头的拉伸变形行为。当拉伸应变达到均匀材料名义屈服阶段时(ε=0.2%),在热影响区与母材交界处附近出现了高应变集中区域,此区域局部应变已高达 0.9%,说明已有局部塑性变形发生。随着拉伸载荷继续增大,塑性变形只局限于热影响区与母材交界处附近区域,接头其他区域保持较低的塑性应变水平。在拉伸断裂前,高应变区的塑性变形量可高达 19%。拉伸试样整体塑

性变形来源于局部区域有限的塑性应变。因此,MCNG-TIG 接头的伸长率相较母材的显著降低。

### 3 结论

(1) Ti-6Al-4V 合金厚板 MCNG-TIG 焊接接头的高硬度值区域集中分布于紧挨熔合区两侧的热影响区,低硬度值区域集中分布于紧挨热影响区的母材区,熔合区的硬度分布均匀,其平均硬度分别为(326.5±17.5)HV、(305.5±24.7)HV、(313.9±17.2)HV。

(2) 接头的抗拉强度达到 893 MPa,接头强度系数达到 94%,接头伸长率仅为 3.8%,接头塑性较母材的显著降低。拉伸断裂位置位于靠近母材的热影响区。裂纹以穿晶断裂和沿晶断裂混合模式进行扩展,断口呈现典型的韧性断裂特征。

(3) 熔合区为全网篮组织,由相互交织分布的 α 相片层+少量层间残余 β 相组成,原始 β 晶粒为粗大柱状晶。热影响区由三种典型特征组织构成:靠近熔合区的热影响区组织主要为块状 α 集束魏氏体组织,原始 β 相为完全再结晶等轴晶;热影响区中部组织为破碎的 α<sub>p</sub> 晶粒+β 相转变组织 (细小次生 α<sub>s</sub> 片层+层间条状 β 相),随距熔合区距离增大,β 转变组织面积百分含量逐渐降低;靠近母材的热影响区由回复 α<sub>p</sub> 晶粒和部分再结晶细小等轴晶组成。

(4) 靠近母材的热影响区发生了回复和部分再结晶,强度最低,对应低硬度值区,成为首先发生屈服和颈缩的地方。接头显著的组织不均匀性导致拉伸过程中发生严重的应变局域化现象,接头整体伸长率显著降低。

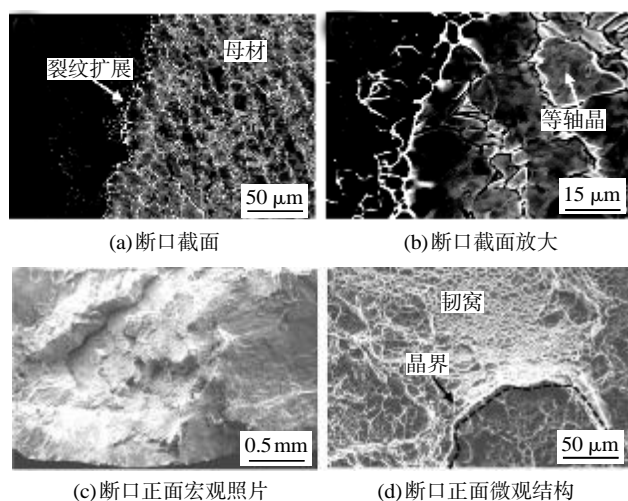


图 6 拉伸断口形貌

Fig.6 Morphologies of the tensile fracture

### 参考文献:

- [1] Balasubramanian T S, Balasubramanian V, Manickam M M. Fatigue crack growth behaviour of gas tungsten arc, electron beam and laser beam welded Ti-6Al-4V alloy [J]. Materials & Design, 2011, 32(8/9):4509-4520.
- [2] 郭鲤,何伟霞,周鹏,等. 我国钛及钛合金产品的研究现状及发展前景[J]. 热加工工艺, 2020, 49(22): 22-28.
- [3] Yang Tao, Xu Dezhi, Chen Weilin, et al. Microstructure evolution and deformation resistance of heavy-thickness Ti-6Al-4V narrow-gap welded joints [J]. Materials Letters, 2019, 250: 116-118.
- [4] Sun Junhao, Ren Wenjie, Nie Pulin, et al. Study on the weldability, microstructure and mechanical properties of thick Inconel 617 plate using narrow gap laser welding method [J]. Materials & Design, 2019, 175: 1-13.

- [5] Yu Weiwei, Fan Minyu, Jia Wenqing, et al. Thermal aging effect on the tensile and fatigue properties of the narrow-gap TIG welded joints in offshore floating nuclear power plants[J]. *International Journal of Fatigue*, 2019, 126: 143-154.
- [6] Dong Bolun, Cai Xiaoyu, Ni Zhida, et al. Numerical simulation of arc characteristics in narrow gap TIG welding [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 161-162: 1-11.
- [7] 贾传宝, 杜永鹏, 武传松, 等. 厚板窄间隙磁控电弧 TIG 焊接自动控制系统设计 [J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(9): 40-46.
- [8] 胡金亮, 曾才有, 余陈, 等. 厚板钛合金磁控窄间隙 TIG 焊接技术发展现状[J]. *精密成形工程*, 2020, 12(4): 10-20.
- [9] Sun Qingjie, Wang Jianfeng, Qian Chunwei, et al. Optimization of magnetic arc oscillation system by using double magnetic pole to TIG narrow gap welding [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 86(1/4): 761-767.
- [10] 余陈, 陈静, 陈怀宁, 等. TC4 钛合金磁控窄间隙 TIG 焊试板热处理前后三维应力[J]. *机械工程学报*, 2019(6): 61-66.
- [11] 沈言锦, 洪波, 杨鹏昊, 等. 窄间隙磁控激光复合式焊缝跟踪方法[J]. *电焊机*, 2019, 49(12): 32-36.
- [12] 贾思峰, 郑卫刚. 磁控技术在窄间隙焊接和高速 TIG 焊接上的应用研究[J]. *热加工工艺*, 2013, 42(13): 154-155.
- [13] 孙清洁, 李文杰, 胡海峰, 等. 厚板 Ti-6Al-4V 磁控窄间隙 TIG 焊接头性能[J]. *焊接学报*, 2013, 34(2): 2833-2839.
- [14] 王选理. Ti-V 系  $\beta$  钛合金结构稳定性及其塑性变形机制 [D]. 上海: 上海交通大学, 2015. [H]

(上接第 5 页)

工、汽车、教育等多个领域和行业获得越来越广泛的应用。

#### 参考文献:

- [1] 钟佳立. 激光焊接技术研究现状浅析及发展趋势展望[J]. *汽车与配件*, 2019(3): 52-53.
- [2] Britten S, Krause V. Industrial blue diode laser breaks 1 kW barrier[J]. *Photonics Views*, 2019, 16(2): 30-33.
- [3] Meng Wei, Li Zhuguo, Lu Fenggui, et al. Porosity formation mechanism and its prevention in laser lap welding for T-joints [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(8): 1658-1664.
- [4] 李尚仁. 中厚板铝合金激光摆动焊接工艺研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- [5] 芦伟, 马旭颐, 巩玥, 等. 光束摆动对铝合金搭接焊缝成形及组织的影响[J]. *应用激光*, 2022, 42(1): 9-14.
- [6] 向发午, 胡学安, 龚钦, 等. 纳秒光纤激光在异种金属焊接中的应用[J]. *热加工工艺*, 2018, 47(3): 9-12.
- [7] 于森, 黄婷, 肖荣诗. 长焦距绿光飞秒激光玻璃焊接[J]. *中国激光*, 2020, 47(9): 105-110.
- [8] Penilla E H, Devia-Cruz L F, Wieg A T, et al. Ultrafast laser welding of ceramics[J]. *Science*, 2019, 365(6455): 803-808.
- [9] Ciuca O P, Carter R M, Prangnell P B, et al. Characterization of weld zone reactions in dissimilar glass-to-aluminum pulsed picosecond laser welds[J]. *Materials Characterization*, 2016, 120: 53-62. [H]

(上接第 12 页)

- [35] Hess A, Heider A, Schuster R, et al. Benefits from combining laser beams with different wavelengths (green and IR) for copper welding[C]// 29th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics. 2010: 540-546.
- [36] Hess A, Weber R, Heider A, et al. Forced deep-penetration welding with low-power second-harmonic assistance of cw copper welding with 1  $\mu\text{m}$  wavelength [J]. *Physics Procedia*, 2010, 5: 29-36.
- [37] Hess A, Schuster R, Heider A, et al. Continuous wave laser welding of copper with combined beams at wavelengths of 1030 nm and of 515 nm[J]. *Physics Procedia*, 2011, 12: 88-94.
- [38] Rüttimann C, Dürr U, Moalem A, et al. Reliable laser micro-welding of copper[J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2011, 103: 5.
- [39] Maina M R, Okamoto Yasuhiro, Hamada Kazuki, et al. Effects of superposition of 532 nm and 1064 nm wavelengths in copper micro-welding by pulsed Nd:YAG laser [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2022, 299: 117388. [H]