

不同方法焊接 TA2 钛管的组织与性能

刘子健¹, 陈文革¹, 陈洋², 高婷², 成超超¹, 余田亮¹

(1. 西安理工大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710048)

(2. 宝鸡核力材料科技有限公司, 陕西 宝鸡 721000)

摘要: 采用搅拌摩擦焊 (FSW)、钨极氩弧焊 (TIG)、高频感应焊 (HFIW) 和激光焊 (LBW) 4 种方法分别焊接制备了薄壁 TA2 钛管。通过光学显微镜 (OM)、X 射线衍射仪 (XRD)、扫描电子显微镜 (SEM) 和显微硬度仪对焊缝处的组织与性能进行表征。结果表明: 采用 FSW 焊接 TA2 钛管, 焊缝成形良好, 表面平整无缺陷, 焊缝处为细小的等轴 α 相, 焊缝中心显微硬度最高, 剪切断口兼具准解理与沿晶断裂的特征; TIG 也可实现 TA2 钛管焊接, 但焊缝存在氧化现象, 表面呈灰黑色, 焊缝处为粗大锯齿状 α 相及点状 β 相, 显微硬度为 171.0 HV, 剪切断口呈准解理断裂; HFIW 焊缝表面存在氧化与起皮, 焊缝处为等轴 α 相, 焊缝中心显微硬度最低, 为 166.5 HV, 热影响区因针状 α' 马氏体的存在显微硬度最高, 断口呈解理断裂; LBW 可实现 TA2 钛管高质量焊接, 焊缝呈银白色, 表面光滑、无氧化, 焊缝组织由针状 α' 马氏体及因快冷残余的 β 相组成, 焊缝显微硬度为 204.7 HV, 断口呈准解理断裂。

关键词: TA2 钛管; 搅拌摩擦焊; 钨极氩弧焊; 高频感应焊; 激光焊

中图分类号: TG457.19; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2025)06-029-08

Microstructure and Mechanical Properties of TA2 Titanium Tubes Welded Using Different Techniques

Liu Zijian¹, Chen Wenge¹, Chen Yang², Gao Ting², Cheng Chaochao¹, Yu Tianliang¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

(2. Baoji Nuclear Power Materials Technology Co., Ltd., Baoji 721000, China)

Abstract: Thin-walled TA2 titanium tubes were welded using four methods: friction stir welding (FSW), tungsten inert gas welding (TIG), high-frequency induction welding (HFIW), and laser beam welding (LBW). The microstructure and properties of the weld zones were characterized by optical microscopy (OM), X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), and micro-hardness testing. The results show that the TA2 titanium tube welded by FSW exhibits good weld formation with a smooth and defect-free surface. The weld zone mainly consists of fine equiaxed α phase and exhibits the highest micro-hardness at the weld center. The shear fracture surface exhibits characteristics of both quasi-cleavage and intergranular fracture. TIG can also achieve TA2 titanium tube welding, but oxidation is observed on the weld surface, which appears gray-black. The weld zone consists of coarse serrated α phase and dot-like β phase, with a micro-hardness of 171.0 HV. The shear fracture surface shows quasi-cleavage characteristics. HFIW weld exhibits surface oxidation and peeling. The weld zone consists of equiaxed α phase, and the lowest micro-hardness of 166.5 HV occurs at the weld center. Due to the presence of acicular α' martensite, the heat-affected zone (HAZ) reaches the highest micro-hardness. The shear fracture surface shows cleavage morphology. LBW produces high-quality weld on TA2 titanium tube with a silvery-white, smooth, oxidation-free surface. The weld zone consists of acicular α' martensite and retained β phase resulting from rapid cooling, achieving a micro-hardness of 204.7 HV. The shear fracture surface exhibits quasi-cleavage features.

Keywords: TA2 titanium tube; friction stir welding; tungsten inert gas welding; high-frequency induction welding; laser welding

收稿日期: 2025-07-23

基金项目: 西安市重点产业链技术攻关项目 (24ZDCYJSGG0055)

通信作者: 陈文革 (1969—), 男, 教授。

TA2 钛管凭借轻质、高强度、耐高温、耐腐蚀等特性, 已成为长征系列运载火箭燃料管路、深海探测器耐压舱体的核心构件。据统计^[1], 2023 年我国钛

焊管产量达到 7000 t, 且高端应用领域的钛焊管仍依赖进口。这一现状促使国内学者对钛及钛合金焊接工艺展开深入研究, 通过采用不同焊接方法探索提升钛管焊接质量的可行路径。

搅拌摩擦焊 (FSW) 是一种利用高速旋转的搅拌头摩擦生热, 使材料塑化并连接的固态焊接技术。黄永德等人^[2]使用带有 AlCrN 涂层的搅拌头焊接 TC4 钛合金, 焊接头抗拉强度为 1041.30 MPa, 达到母材强度的 95% 以上。王欣等人^[3]采用 FSW 焊接 TC11 钛合金, 发现在适宜的搅拌头转速下, 搅拌区的抗拉强度 (1403~1433 MPa) 可超过母材。Li 等人^[4]对 Ti-6Al-4V 合金进行 FSW 焊接, 焊接头显微硬度呈 U 型分布, 且焊缝硬度低于母材。Edwards 等人^[5]研究发现, 通过控制 FSW 的热循环 (温度低于 β 相变点) 可获得强度高于母材的焊接头^[14]。李博等人^[6]通过工艺优化, 在搅拌区实现了完全 α/β 相变, 获得 $\alpha+\beta$ 双态组织, 其平均硬度 (360 HV) 显著高于母材, 主要强化机制为细晶强化与复相强化。

钨极氩弧焊 (TIG) 是一种使用惰性气体氩气作为保护气体的气电保护焊接方法, 工艺成熟且适用性广。康登等人^[7]采用 TIG 焊接薄壁钛管, 接头抗拉强度达到 430 MPa, 断后伸长率为 25%, 表现出良好的强塑性匹配。陈元园等人^[8]采用氩弧焊焊接 TA2 钛板, 焊缝最高显微硬度约为 195 HV。郑成博等人^[9]采用氩弧焊焊接工业纯钛, 发现焊缝与热影响区主要由粗大锯齿状 α 相组成, 焊缝中心显微硬度达 147.2 HV。苏允海等人^[10]采用氩弧焊焊接 5 mm 厚的 TA2 板材, 接头抗拉强度为 598.3 MPa, 并保持了较高的塑性 (断后伸长率为 26.7%, 断面收缩率为 38.5%)。孙建刚等人^[11]采用氩弧焊焊接 TC4 钛合金板材, 获得了无缺陷焊接头, 其平均抗拉强度为 924 MPa, 与母材相当, 且冲击功提升至母材 1.5 倍以上, 实现了强度与韧性的良好匹配。

高频感应焊 (HFIW) 是利用高频电流在工件表层产生涡流发热, 经加压实现焊接的方法, 该技术尤其适用于薄壁构件。陈琪等人^[12]采用 HFIW 焊接 0.5 mm 厚的 TA2 钛管, 焊接头抗拉强度为 446.8 MPa, 显微硬度呈 “M” 形对称分布 (两侧热影响区最高, 焊缝中心最低)。进一步研究发现^[13], 经 800 °C 退火处理后, 接头组织由锯齿状/针状转变为等轴晶, 硬度分布更均匀, 且断口呈现韧性特征, 表明退火处理有效改善了焊接头的均匀性与韧性。李伟杰等人^[14]采用 HFIW 焊接 TA1 薄壁钛管, 发现焊缝和热影响区组织主要为粗大的锯齿状 α 相及少量针状 α 相。此外, 李万强^[15]采用 B-Ti57CuZrNi-S 钎料高频感应钎焊 TC6/TC11, 钎焊

界面形成 β -Ti 固溶体及多种金属间化合物, 焊接头强度最高可达 433 MPa, 但其性能受工艺参数影响显著。

激光焊 (LBW) 是利用高能量密度激光束熔化金属实现焊接, 其能量密度高, 易于获得高硬度焊缝。陈高澎等人^[16]采用 LBW 焊接 10 mm 厚的 TA5 钛板, 接头平均抗拉强度为 783 MPa, 硬度呈 “马鞍形” 分布 (焊缝最高)。程东海等人^[17]研究了 0.8 mm 厚 TC4 钛合金的 LBW, 结果表明, 焊缝区为网状 α 相, 抗拉强度约 995 MPa, 略低于母材。Kashaev 等人^[18-19]采用 LBW 焊接 TC4 钛合金, 在优化工艺参数下焊缝整体形成 α' 马氏体, 其产生的相变强化效应使得焊接头硬度均匀且显著高于母材。李兴宇^[20]对 TA2 钛板的 LBW 研究表明, 焊缝为晶粒粗大的锯齿状 α 相 (内含针状 α' 相), 焊缝中心硬度最高 (>170 HV), 体现了 LBW 快速硬化的特点。

综上所述, FSW、TIG、HFIW 和 LBW 4 种焊接方法均可用于钛及钛合金板、棒的连接, 且各有特色, 但在钛管焊接的特定领域, 其工艺适用性与性能影响规律尚不明确。为此, 本研究采用上述 4 种方法焊接 TA2 钛管, 重点研究不同焊接方法对焊管组织结构与力学性能的影响规律。通过对比分析各工艺下焊缝形貌、组织特征、力学性能等方面的差异, 旨在明确不同焊接方法的技术特点与适用条件, 为不同使用要求的钛管选择更适宜的焊接工艺提供理论依据与技术支撑, 从而推动钛管的焊接工艺优化与应用拓展。

1 实验

实验材料为 1.5 mm 厚的 TA2 钛板, 其化学成分见表 1, 微观组织见图 1。从图 1 可以看出, TA2 母材

表 1 TA2 钛板化学成分 (w%)

Table 1 Chemical composition of TA2 titanium plate					
Fe	C	N	H	O	Ti
0.30	0.08	0.03	0.015	0.25	Bal.

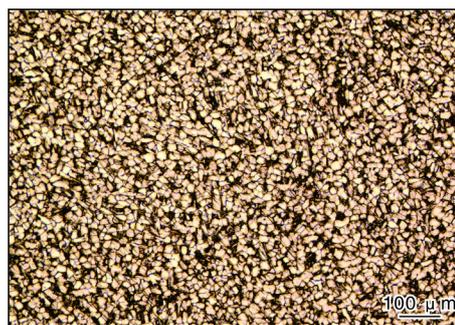


图 1 TA2 钛板金相组织

Fig.1 Metallographic microstructure of TA2 titanium plate

组织由等轴 α 相组成, 晶粒尺寸约为 $40\ \mu\text{m}$, 且晶粒分布较为均匀, 排布紧密, 晶界清晰。

将 TA2 钛板表面清洗干净, 用三辊卷板机将两端预弯, 分次卷圆: 每次压下量 $<20\%$ 板厚, 速度为 $2\sim 5\ \text{m/min}$, 预留 $5^\circ\sim 8^\circ$ 过卷角, 圆管外径 $30\ \text{mm}$ 。焊前用砂纸去除表面氧化层, 随后用丙酮、无水乙醇超声清洗 $10\ \text{min}$, 取出干燥。采用 FSW、TIG、HFIW 和 LBW 4 种方法焊接管材, 制备出 $\phi 30\ \text{mm}\times 1.5\ \text{mm}$ TA2 钛管。图 2 为 4 种不同焊接方法原理示意图, 表 2 为 4 种不同焊接方法的工艺参数及特点。

采用 HV-120 型显微维氏硬度计测定 TA2 焊管焊缝区的显微硬度, 测试压力为 $0.49\ \text{N}$, 保压时间为 $20\ \text{s}$ 。每个试样测量 5 个点, 取平均值作为实验结果。采用 XRD-7000 型 X 射线衍射仪 (XRD) 表征焊缝处的物相组成, 靶材为 $\text{Cu-K}\alpha$, 扫描速度 $2.00^\circ/\text{min}$, 工作电流 $40\ \text{mA}$, 加速电压 $40\ \text{kV}$, 扫描角度 $20^\circ\sim 90^\circ$ 。金相试样用 $\text{H}_2\text{O}+\text{HNO}_3+\text{HCl}+\text{HF}$ 腐蚀剂 (体积比为 $95:2.5:1.5:1$) 腐蚀, 采用 OLYMPUS-GX71 型金

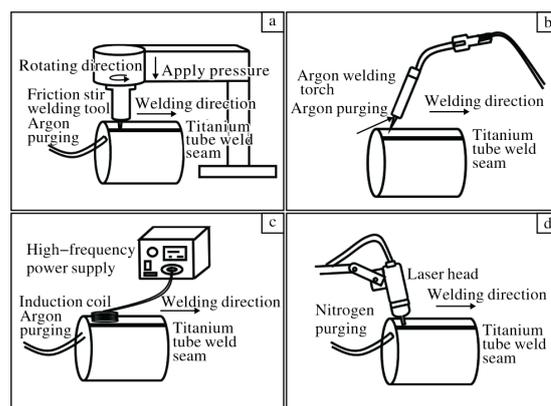


图 2 不同焊接方法原理示意图

Fig.2 Schematic diagrams of different welding methods:

(a) FSW; (b) TIG; (c) HFIW; (d) LBW

相显微镜观察显微组织, 同时用 ImageJ 软件测量晶粒尺寸。参照 GB/T 6400—2007 标准进行剪切试验, 采用 JSM-6700F 型扫描电子显微镜 (SEM) 观察剪切断口形貌。

表 2 不同焊接方法工艺参数及特点

Table 2 Parameters and characteristics of different welding methods

Welding method	Equipment type	Process parameters	Shielding atmosphere	Advantages	Disadvantages
FSW	FSW-3LM-003 FSW Machine	Tool WC-Co alloy; Shoulder $\phi 15\ \text{mm}$; Pin $1.8\ \text{mm}$; Rotation $800\sim 1000\ \text{r/min}$; Traverse $60\sim 100\ \text{mm/min}$; Tilt 2° ; Plunge $0.15\ \text{mm}$	Ar ($>99.999\%$)	Fine microstructure, high strength, no fusion defects	Expensive equipment, limited to simple structures, parameter-sensitive
TIG	PTA-400 Plasma Arc Welder	Current $90\sim 110\ \text{A}$ (DCEN); Voltage $12\sim 14\ \text{V}$; Speed $60\sim 80\ \text{mm/min}$; Arc length $2\sim 3\ \text{mm}$	Ar ($>99.999\%$)	Low cost, mature process, excellent protection	Large HAZ, coarse microstructure, significant distortion
HFIW	HFRW-50 HF Welder	Frequency $300\sim 350\ \text{kHz}$; Power $120\sim 150\ \text{kW}$; Speed $1.2\sim 1.5\ \text{m/min}$; Force $3.5\sim 4.5\ \text{kN}$; V-angle $4^\circ\sim 6^\circ$	Ar ($>99.999\%$)	High efficiency, energy-saving, suitable for continuous thin-wall production	Coarse microstructure, relatively low strength, narrow applicability
LBW	IPG-YLS-6000 Fiber Laser	Wavelength $1070\ \text{nm}$; Power $2.5\sim 3.5\ \text{kW}$; Spot $\phi 0.3\ \text{mm}$; Speed $1.8\sim 2.4\ \text{m/min}$; Defocus $+1\ \text{mm}$	He ($>99.999\%$)	Precise heat input, minimal distortion, high depth-to-width ratio	Expensive equipment, porosity sensitivity, stringent assembly requirements

2 结果与分析

2.1 宏观照片

图 3 为不同方法焊接的 TA2 钛管宏观照片。从图 3a 可以看出, 采用 FSW, 焊接开始时压力不足, 导致初始焊缝未焊透且表面粗糙; 随着压力的增加, 后续焊缝表面光滑, 鱼鳞纹平整, 毛边飞刺少, 质量良好, 但因摩擦升温过高导致焊缝表面呈淡金色 (方框所

示)。从图 3b 可以看出, TIG 焊缝表面呈现灰黑色, 是由于保护气氛不足导致部分氧化。从图 3c 可以看出, HFIW 焊缝熔合充分, 焊道笔直均匀, 成形良好, 但存在肉眼可见的氧化、起皮缺陷。从图 3d 可以看出, LBW 焊缝较窄, 且表面光亮、均匀, 未见明显缺陷, 同时其周围母材颜色未发生明显变化, 表明热影响区相较其他焊接方法更窄, 惰性气体保护效果良好。

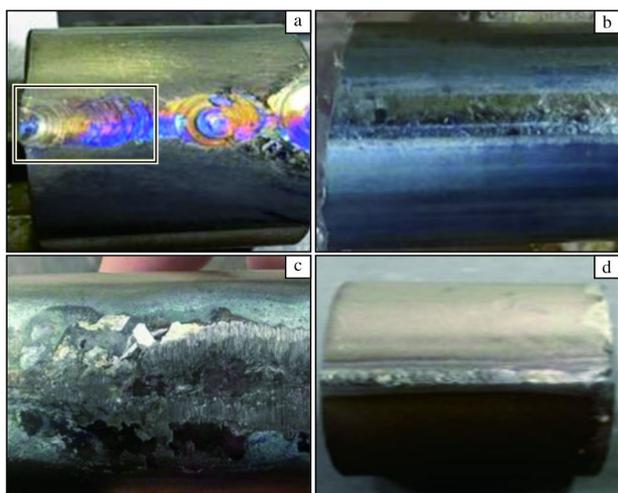


图3 不同方法焊接的TA2钛管宏观照片

Fig.3 Macrographs of TA2 titanium tubes welded by different methods: (a) FSW; (b) TIG; (c) HFIW; (d) LBW

2.2 XRD

图4为不同方法焊接的TA2钛管焊缝处的XRD谱图。从图4可以看出,FSW焊缝处主要为 α 相(因固相焊接峰值温度低于 β 相变点,故无 β 相)。另外在图谱中可观察到衍射峰向左偏移 0.5° ,这与FSW焊接过程中材料发生晶格畸变有关^[21]。当焊接时搅拌头对材料施加宏观压应力,晶格会发生收缩,导致衍射峰向左偏移。TIG焊缝同时存在 α 相和 β 相。在TIG焊接过程中,熔池加热形成 β 相,冷却发生 $\beta \rightarrow \alpha$ 相变。理论上TIG冷却速度最小,达到平衡相变最慢,但TA2中微量杂质元素(如Fe)在慢冷条件下发生扩散偏聚,局部形成亚稳 β 相^[22]。HFIW焊缝主要为 α 相,另有少量 α' 马氏体。这是由于HFIW冷却速度较快, β 相不能完全转变为 α 相,部分转变为 α' 马氏体。 α' 马氏体与 α 相均为密排六方结构,峰位重叠。此外,还可观察到微弱的 TiO_2 衍射峰,说明焊接过程中可能发生了轻微程度的氧化,主要是由于停止加热后保护气氛

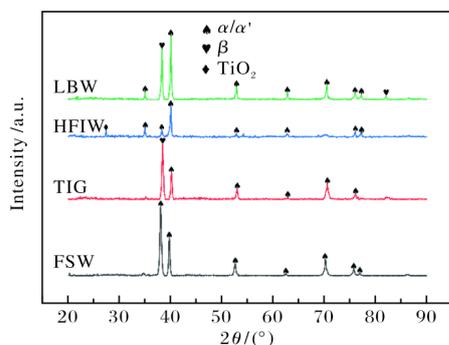


图4 不同方法焊接的TA2钛管焊缝处XRD谱图

Fig.4 XRD patterns of weld seams in TA2 titanium tubes welded by different methods

不足所致。LBW焊缝主要为 α' 马氏体(与 α 相衍射峰重叠),另有少量 β 相。高能激光使熔池迅速升温,母材 α 相完全转变为 β 相,随后极快冷却发生 $\beta \rightarrow \alpha'$ 相变,但部分 β 相由于冷速太快, α' 马氏体相变被中途抑制,残留部分未转变 β 相。

2.3 金相组织

图5为FSW焊接TA2钛管不同区域的金相照片。从图5a可以看出,焊缝区(WZ)晶粒细小致密,是由于在搅拌过程中,一方面母材晶粒被搅拌针破碎变成细小晶粒,另一方面搅拌针附近的温度远高于再结晶温度,部分晶粒发生再结晶,并且此过程时间短暂,被破碎的晶粒和再结晶的晶粒来不及长大,从而使得搅拌区晶粒细密,尺寸在 $20\ \mu\text{m}$ 左右。从图5b可以看出,热影响区(HAZ)因搅拌针热量传导导致晶粒较母材明显长大且不均匀。该区域位于轴肩边缘下方,晶粒已开始破碎但未受搅拌针直接作用,故不如焊缝区晶粒均匀细小。随着距焊缝中心距离的增大,晶粒直径呈增大趋势。这种晶粒尺寸的变化规律与张乐等人^[23]对TA2薄板FSW焊接头晶粒尺寸的研究结果一致。

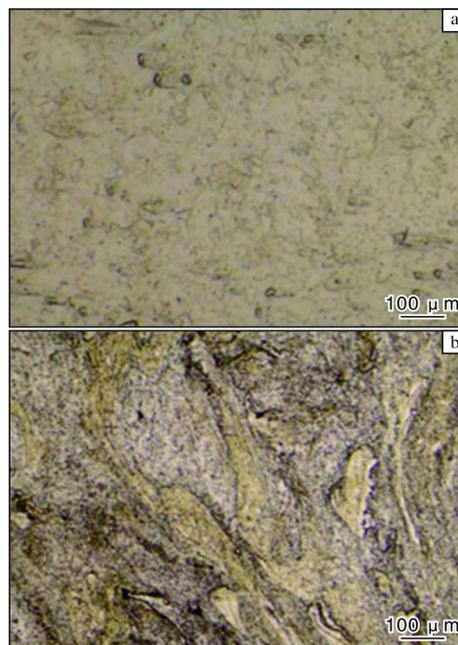


图5 FSW焊接TA2钛管不同区域的金相照片

Fig.5 Metallographs in different zones of TA2 titanium tube welded by FSW: (a) WZ; (b) HAZ

图6为TIG焊接TA2钛管不同区域的金相照片。从图6a可以看出,WZ分布有较大的不规则锯齿状 α 相,晶粒尺寸在 $120\ \mu\text{m}$ 左右。在 α 晶内,可观察到析出的点状 β 相,这是因为Fe、O等元素在慢冷过程中有足够时间扩散,并在晶格缺陷(如位错、晶界)或成分

起伏区域富集, 形成纳米尺度的溶质原子团簇, 从而在 α 基体中形成亚稳 β 相颗粒。从图 6b 可以看出, HAZ

晶粒粗大, 远大于母材晶粒尺寸。这主要是由于焊接过程中, 受到焊接热循环的影响, HAZ 晶粒长大所致。

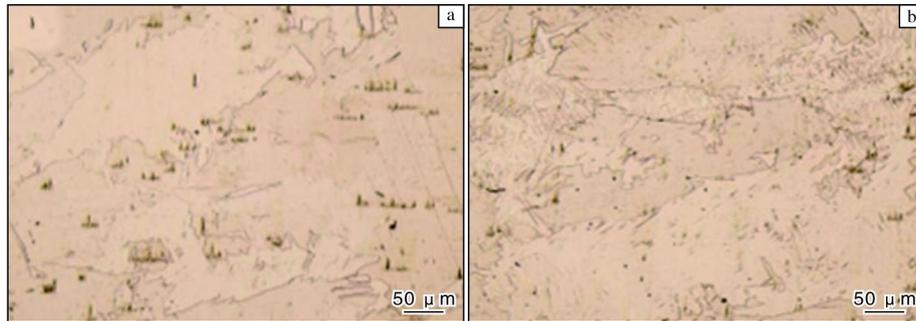


图6 TIG 焊接 TA2 钛管不同区域的金相照片

Fig.6 Metallographs in different zones of TA2 titanium tube welded by TIG: (a) WZ; (b) HAZ

图 7 为 HFIW 焊接 TA2 钛管不同区域的金相照片。图 7 中可观察到一些黑色小圆点, 可能是由于焊接过程中保护不良出现的夹杂物。从图 7a 可以看出, WZ 组织由均匀的等轴晶 (晶粒尺寸约 30 μm) 及其周围较大的柱状 α 相组成。焊接过程中, 在高温停留时间较长的情况下, 焊缝中心晶粒会因冷却速度较快

而形成细小的等轴晶, 而靠近熔合线的区域由于温度梯度较大, 晶粒则沿与熔合线垂直的方向生长, 形成粗大的柱状晶。张敏等人^[24]对 Ti45A1 合金感应焊接模拟时也发现了类似情况。从图 7b 可以看出, HAZ 因受热循环影响, 晶粒尺寸明显大于母材, 并形成针状 α' 马氏体。

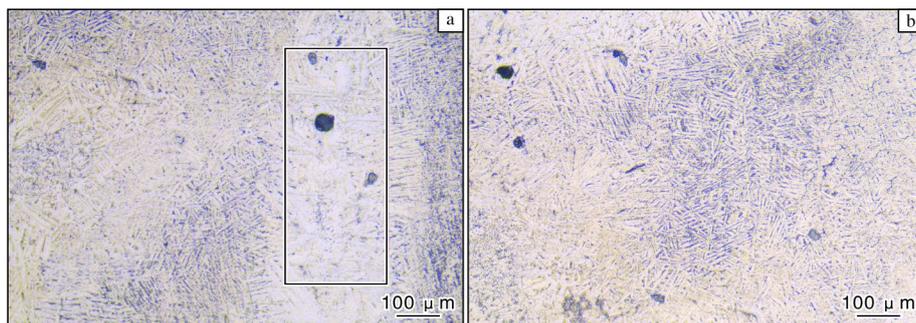


图7 HFIW 焊接 TA2 钛管不同区域的金相照片

Fig.7 Metallographs in different zones of TA2 titanium tube welded by HFIW: (a) WZ; (b) HAZ

图 8 为 LBW 焊接 TA2 钛管不同区域的金相照片。图 8 中也可观察到一些较大的气孔缺陷。气孔的形成与焊接工艺参数密切相关, 如激光功率、焊接速度和材料厚度等, 这些因素会影响熔池的形成和热流体流动,

从而导致形成气孔^[25]。从图 8a 可以看出, WZ 组织主要由细小的针状 α' 马氏体构成。这是由于 LBW 能量密度大, 热作用时间短, 在冷却过程中焊接组织来不及通过扩散转变成平衡的 α 相, 因此形成细小的针状

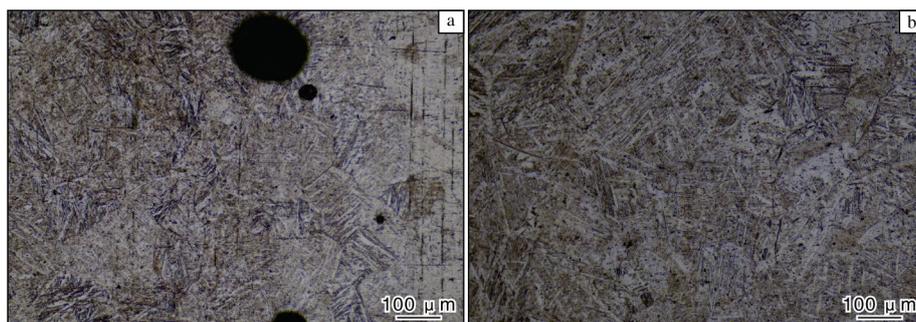


图8 LBW 焊接 TA2 钛管不同区域的金相照片

Fig.8 Metallographs in different zones of TA2 titanium tube welded by LBW: (a) WZ; (b) HAZ

α' 马氏体^[26]。从图 8b 可以看出, HAZ 以板条状 α' 马氏体为主。这是由于 HAZ 温度较高, α 相转变为 β 相, 随后在母材影响下快速冷却, 使 β 相沿晶体学方向有序生长, 最终形成排列规则的板条状 α' 马氏体^[27]。在图 4 所示 XRD 谱图中, 同样可观察到主衍射峰为 α' 马氏体。

2.4 断口形貌

图 9 为不同方法焊接 TA2 钛管剪切断口的 SEM 形貌。从图 9a 可以看出, FSW 断口分层, 有两条平直锐利的裂纹, 呈典型层间裂纹特征; 从图 9b 可以看出, FSW 断口上存在清晰的撕裂棱、少量韧窝和冰糖

状形貌, 表明材料断裂模式为准解理与沿晶断裂的混合模式^[28]。从图 9c 可以看出, TIG 断口表面凹凸不平, 存在明显的撕裂棱, 左下角可见放射状裂纹扩展痕迹, 源于局部解理; 从图 9d 可以看出, TIG 断口上存在由放射状撕裂棱围成的扇形区域, 边界有明显的撕裂棱, 且扇形区域内存在韧窝。韧窝底部可观察到细小的第二相粒子, 这可能是前文中提到的 TIG 焊接因保护不足而产生的氧化物或点状 β 相。断口存在扇形解理面和韧窝, 表明断裂模式为准解理断裂。从图 9e 可以看出, HFIW 断口呈平行定向排列的条状结构, 表面光

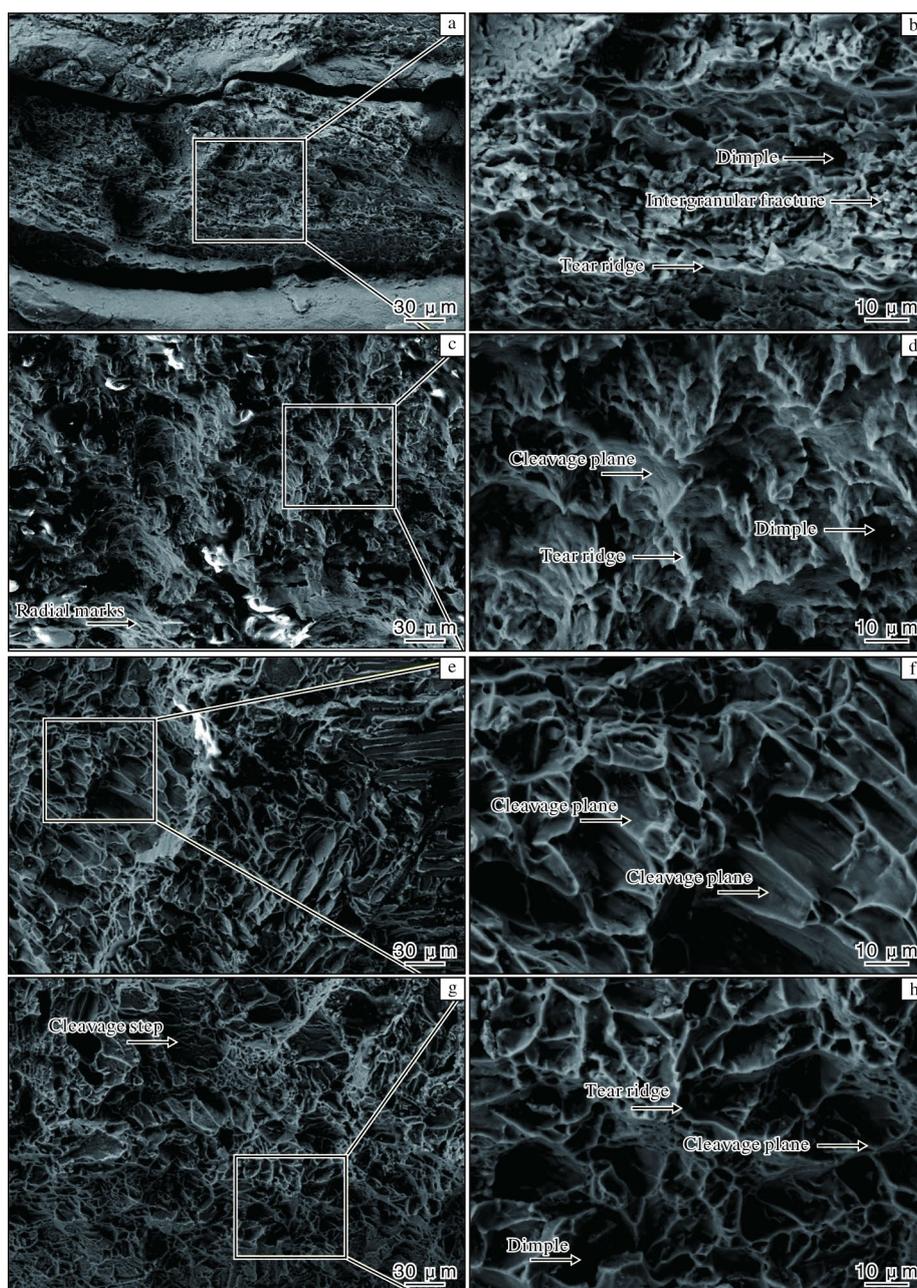


图 9 不同方法焊接 TA2 钛管的剪切断口 SEM 形貌

Fig.9 SEM morphologies of shear fracture surfaces of TA2 titanium tubes welded by different methods: (a, b) FSW; (c, d) TIG; (e, f) HFIW; (g, h) LBW

滑锐利,这是因焊接过程保护不足生成的脆性氧化膜分层剥离所致^[29]。从图9f可以看出,HFIW断口以连续的解理面为主,其呈大片平坦平台,表面光滑无塑性变形痕迹,为典型的解理断裂。从图9g可以看出,LBW断口整体较为平坦,无明显宏观塑性变形特征,局部区域呈类似台阶的形貌。从图9h可以看出,LBW断口由多个局部解理小面构成,相邻小面之间通过塑性撕裂形成的撕裂棱相连接;在解理面周围观察到少量韧窝。这种局部解理小面、撕裂棱与韧窝共存的特征,表明断裂是以脆性解理为主,伴随局部塑性变形的准解理模式。该断口与TC4钛合金LBW焊接头的断口形貌类似^[30]。

2.5 显微硬度

图10为不同方法焊接TA2钛管焊接头显微硬度分布曲线。TA2钛管母材的显微硬度为150~170HV。从图10可以看出,FSW焊接头显微硬度呈“W”形分布,焊缝处显微硬度最高(176.8HV),HAZ显微硬度最低(约为150HV)。这是由于在搅拌头的搅拌作用下,WZ晶粒发生细化和加工硬化,造成显微硬度增大,而HAZ受热发生了晶粒长大,造成显微硬度降低。TIG焊接头的WZ显微硬度最大,为171.0HV,高于HAZ及母材区域的显微硬度。这是由于焊缝中心形成的点状纳米 β 颗粒产生弥散强化作用,并能钉扎位错,从而提高了焊缝硬度。母材区域的显微硬度最低,焊接头最大显微硬度值与最小显微硬度值的差值仅为19.4HV。HFIW焊接头显微硬度呈“M”形分布,即焊缝中心显微硬度最低,仅有166.5HV,两侧HAZ显微硬度最高。这是由于WZ为较软的等轴 α 相,HAZ形成的针状 α' 马氏体产生强化效应^[31],使硬度显著高于母材。LBW焊接头显微硬度由焊缝中心向母材大致呈下降趋势,WZ显微硬度最高,达到204.7HV,其次是HAZ,母材的显微硬度最低。由于激光热输入集中,能量密度高,且熔池小,因而冷却速度快,抑制

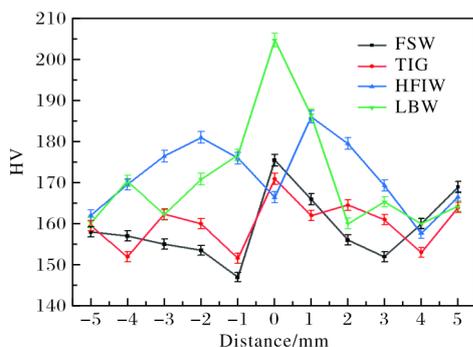


图10 不同方法焊接的TA2钛管焊接头显微硬度分布曲线

Fig.10 Micro-hardness distribution curves of weld seam in TA2 titanium tubes welded by different methods

了 $\beta \rightarrow \alpha$ 相变,使WZ形成高密度针状 α' 马氏体。该过程引入了较高的位错密度,增大了晶格畸变,使得焊缝显微硬度明显高于母材。HAZ形成板条状 α' 马氏体,因板条间可协调变形^[32],显微硬度有所降低。

以上研究表明,若追求超高显微硬度,可优先考虑LBW;若追求高冶金质量(低缺陷)与良好综合性能,推荐选择FSW;若需控制成本,可选择HFIW,但在此情况下需加强焊接保护措施。

3 结论

(1) FSW焊接TA2钛管,焊缝成形良好,表面平整无缺陷。焊缝处为细小的等轴 α 相,焊缝中心显微硬度最高,为176.8HV。热影响区晶粒出现粗化,显微硬度约为150HV。剪切断口呈准解理断裂与沿晶断裂的混合断口形貌。

(2) TIG可实现TA2钛管焊接,但焊缝表面氧化,呈灰黑色,焊缝处为粗大锯齿状 α 相和点状 β 相,显微硬度为171.0HV,热影响区晶粒粗化,剪切断口呈准解理断裂。

(3) HFIW焊缝表面存在氧化与起皮缺陷,焊缝处为等轴 α 相,焊缝中心显微硬度最低,热影响区为针状 α' 马氏体,显微硬度最高,剪切断口呈解理断裂。

(4) LBW可实现TA2钛管的高质量焊接,获得银白色、光滑、无氧化的窄焊缝。焊缝处为细针状 α' 马氏体+残余 β 相,显微硬度为204.7HV,热影响区为板条状 α' 马氏体,剪切断口呈准解理断裂。

参考文献 References

- [1] 安仲生,陈岩,赵巍,等. 2023年中国钛工业发展报告[J]. 钛工业进展, 2024, 41(2): 41-48.
- [2] 黄永德,伍大为,张泽龙,等. 钛合金搅拌摩擦焊搅拌头磨损机理及其涂层强化[J]. 航空制造技术, 2024, 67(10): 45-52.
- [3] 王欣,谢文辉,姜正计,等. TC11钛合金搅拌摩擦焊接头微观组织和力学性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(4): 1436-1441.
- [4] Li J P, Shen Y F, Hou W T, et al. Friction stir welding of Ti-6Al-4V alloy: friction tool, microstructure, and mechanical properties[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 58: 344-354.
- [5] Edwards P, Ramulu M. Peak temperatures during friction stir welding of Ti-6Al-4V[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2010, 15(6): 468-472.
- [6] 李博,沈以赴,胡伟叶. TC4钛合金搅拌摩擦焊微观组织特征及影响[J]. 河北科技大学学报, 2016, 37(1): 20-25.

- [7] 康登, 杨德宇, 黄然, 等. 工业钛管(TA2)钨极氩弧焊接工艺研究[J]. 中氮肥, 2024(3): 48-51.
- [8] 陈元园, 冯庆, 张乐, 等. 焊后热处理对 TA2 钛板氩弧焊接头显微组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2023, 48(11): 221-225.
- [9] 郑成博, 刘爱国, 张璐瑶, 等. TA2 钛合金熔丝钨极氩弧焊接头的组织性能[J]. 沈阳理工大学学报, 2019, 38(6): 54-58.
- [10] 苏允海, 刘治宇, 刘政军, 等. TA2 钨极氩弧焊接工艺的优化[J]. 沈阳工业大学学报, 2016, 38(2): 153-158.
- [11] 孙建刚, 高福洋, 高奇, 等. TC4 钛合金热丝钨极氩弧焊接头组织性能研究[J]. 材料开发与应用, 2019, 34(2): 9-13.
- [12] 陈琪, 肖述广, 王超, 等. 薄壁 TA2 钛管高频焊接接头的组织和力学性能[J]. 材料热处理学报, 2022, 43(6): 175-182.
- [13] 陈琪, 谢志雄, 董仕节, 等. 高频感应焊 TA2 钛管焊后退火组织与性能研究[J]. 湖北工业大学学报, 2024, 39(1): 75-79.
- [14] 李伟杰, 李菊英, 谢志雄, 等. TA1 高频感应焊接头和基体在 NaCl 溶液中的电化学腐蚀行为[J]. 武汉轻工大学学报, 2024, 43(1): 54-60.
- [15] 李万强. 钛合金 TC6 与 TC11 高频感应钎焊工艺[J]. 电焊机, 2017, 47(5): 77-81.
- [16] 陈高澎, 万自永, 李鹏, 等. TA5 钛合金激光焊接头组织与力学性能分析[J/OL]. 金属加工(热加工), 1-7[2025-12-22]. <https://link.cnki.net/urlid/11.5627.TH.20250717.1716.002>.
- [17] 程东海, 黄继华, 林海凡, 等. TC4 钛合金激光拼焊接头显微组织及力学性能分析[J]. 焊接学报, 2009, 30(2): 103-106.
- [18] Kashaev N, Ventzke V, Fomichev V, et al. Effect of Nd: YAG laser beam welding on weld morphology and mechanical properties of Ti-6Al-4V butt joints and T-joints[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2016, 86: 172-180.
- [19] Lisiecki A. Welding of titanium alloy by different types of lasers[J]. Archives of Materials Science & Engineering, 2012, 58(2): 209-218.
- [20] 李兴宇. 工业纯钛激光焊接工艺及缺陷抑制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
- [21] 贺志荣, 吴佩泽, 刘康凯, 等. 激冷 Ti-47Ni 合金薄带的组织、相变和形状记忆行为[J]. 金属学报, 2018, 54(8): 1157-1164.
- [22] Yang Y, Zhang X M. Diffusion reaction in the interface of titanium/mild steel composite[J]. Journal of Central South University of Technology, 1996, 3: 135-139.
- [23] 张乐, 陈元园, 冯庆, 等. TA2 薄钛板搅拌摩擦焊接头的显微组织与力学性能分析[J]. 材料研究与应用, 2025, 19(1): 196-200.
- [24] 张敏, 周玉兰, 薛覃, 等. Ti-45Al 合金焊接熔池凝固过程数值模拟[J]. 焊接学报, 2018, 39(3): 6-10.
- [25] 任利娜, 张群兵, 雷晓维, 等. 激光能量对 TC17 钛合金焊接接头组织和疲劳性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2024, 53(7): 1836-1844.
- [26] 卢军霞, 郭天文, 王宝成, 等. 激光焊钛与脉冲氩弧焊钛热处理后机械性能的比较[J]. 第四军医大学学报, 1999, 20(2): 121-123.
- [27] Zeng Z, Oliveira J P, Bu X Z, et al. Laser welding of BTi-6431S high temperature titanium alloy [J]. Laser Welding, 2017, 7(11): 504.
- [28] 姜明昊. TA5 钛合金搅拌摩擦焊接头微观组织及力学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [29] 李俊, 钱翰城, 董明洪, 等. TC4 合金高频感应氧化工艺的研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2007(5): 346-348.
- [30] Guo N, Cheng Q, Fu Y L, et al. Research on underwater laser welding with filler wire process of TC4 titanium alloy[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(6): 118-124.
- [31] Li C, Muncharua K, Takao S, et al. Fiber laser-GMA hybrid welding of commercially pure titanium[J]. Materials & Design, 2009, 30(1): 109-114.
- [32] 刘明筋, 金成. 基于全场应变的工业纯钛激光焊接头组织与拉伸性能[J]. 焊接技术, 2022, 51(5): 35-39.

专利信息

一种高均匀性 TA31 钛合金板材的锻造方法及应用

申请号: CN202510866640.9

申请日: 2025-06-26

公开(公告)日: 2025-09-12

公开(公告)号: CN120619224A

申请(专利权)人: 西北工业大学; 西部超导材料科技股份有限公司

摘要: 本发明属于有色金属加工技术领域, 涉及一种高均匀性 TA31 钛合金板材的锻造方法及应用。该方法通过 X 向、Y 向、Z 向三维均匀化锻造方式, 能够有效提高坯料的整体均匀性; 同时通过 X 向、Y 向交替拔长成形, 从而达到提高成品板材组织均匀性和减小各向异性的目的。通过上述工艺, 可以有效解决传统轧制方式生产钛合金板材所存在的各向异性较大的问题。本锻造方法生产的 TA31 钛合金板材具有优异的组织均匀性和性能均匀性, 适用于工业化生产。