

TA2薄钛板搅拌摩擦焊接头的显微组织与力学性能分析

张乐^{1,2}, 陈元园^{1,2*}, 冯庆^{1,2}, 李耀辉^{1,2}

(1. 西安泰金新能源科技股份有限公司, 陕西 西安 710201; 2. 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710201)

摘要: 为了探究搅拌头转速、焊接速度、轴向压力等工艺参数对薄钛材焊接质量的影响规律, 采用搅拌摩擦焊技术对厚度为3 mm的TA2方形薄钛板进行焊接, 并对搅拌摩擦焊件接头的显微组织及力学性能进行了研究。结果表明: 当搅拌摩擦焊工艺参数为焊接速度60 mm·min⁻¹、转速300 r·min⁻¹、焊头倾角1°—3°、焊接压力20—25 kN和氩气流量16 L·min⁻¹时, 焊缝区域结构完好, 未出现小孔、夹杂物和裂纹等常见的焊接缺陷。通过对焊接接头显微组织分析发现, 该区域的显微组织主要为2.5—32 μm细小等轴晶, 晶粒尺寸沿焊缝中心呈现倒V型对称分布, 并从焊缝中心向母材方向逐渐增大。表明, 焊接过程中温度和应力的分布对晶粒的生长有显著影响。焊缝区域的显微硬度为131.9—138.1HV, 随离焊缝中心距离的增大而降低, 焊缝区域的平均晶粒尺寸和平均显微硬度分别是12.8 μm和135.4 HV, 均显著优于母材区域的57 μm和125.1 HV。相较于母材, 焊缝区域的晶粒尺寸和硬度表现出显著的优越性, 表明焊接过程有效细化了晶粒及提高了材料的局部硬度。导电率方面, 焊缝区域为3.65%IACS, 低于母材区域的3.82%IACS。通过残余应力测试发现, 焊缝中心区域的最大残余应力为420 MPa(横向)和180 MPa(纵向), 在距焊缝中心15—20 mm处出现压应力。拉伸测试结果显示, 搅拌摩擦焊件及母材的抗拉强度分别为415和297 MPa、屈服强度为325和258 MPa、延伸率为32%和62%, 焊接接头的强度得到提高, 但塑性性能有所下降, 这是因焊接过程中产生的显微组织细化和残余应力所致。通过研究确定了搅拌摩擦焊焊接薄钛材最优的工艺参数组合, 提高了焊接效率和质量的稳定性。

关键词: 搅拌摩擦焊; TA2方形薄钛板; 显微硬度; 金相组织; 抗拉强度; 延伸率; 导电率; 残余应力。

中图分类号: TG406

文献标志码: A

文章编号: 1673-9981(2025)01-0196-05

引文格式: 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.

ZHANG Le, CHEN Yuanyuan, FENG Qing, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Joint of TA2 Thin Titanium Plate[J]. Materials Research and Application, 2025, 19(1):196-200.

0 引言

TA2钛材属于α工业纯钛的一种, 具有密度小、耐腐蚀强及良好的力学性能等优点, 已经被广泛应用于航空航天、船舶等领域。TA2钛材的工业产品包括棒材、板材、管材、钛带材等, 但是这些产品的大规模应用需要进行焊接, 工业上一般采用氩弧焊和搅拌摩擦焊等方式^[1-4]。氩弧焊焊接工艺成熟、成本低, 但是存在热循环严重及焊缝晶粒粗大, 对焊接接头的强度和塑性不利; 搅拌摩擦焊, 是通过搅拌挤压进行焊接, 焊缝残余应力低、晶粒细小, 已经被广泛应用于铝钛铜等有色金属合金的焊接。但是, 搅拌摩擦焊的参数选取很重要, 若选取不当会使焊缝

存在孔洞、裂纹等缺陷^[5-7]。

采用搅拌摩擦焊工艺, 通过选取合适的焊接工艺参数, 焊接厚度为3 mm的TA2钛板, 并对TA2搅拌摩擦焊接头进行显微组织和力学性能分析, 为科技人员在该方面的研究提供参考。

1 试验部分

1.1 试验材料

焊接材料为宝鸡钛业股份有限公司提供的TA2钛板材, 其晶粒度为(6±0.5)级, 厚度为3 mm, 组成成分列于表1。图1为TA2钛板的金相组织图。

收稿日期: 2023-06-26

基金项目: 国家重点研发计划基金项目(2021YFB3400802)

作者简介: 张乐, 硕士, 工程师, 研究方向为钛合金焊接及热处理。E-mail: 137644696@qq.com。

通信作者: 陈元园, 硕士, 助理工程师, 研究方向为钛合金焊接及热处理。E-mail: 2308461631@qq.com。

表1 TA2钛板的组成成分
Table 1 Chemical compositions of base metal

元素	C	N	Si	H	S	Al	O	Fe	Ni	Ti
含量 w/%	0.1	0.003	0.08	0.003	0.06	0.08	0.22	0.35	0.2	余量



图1 TA2板材金相组织

Figure 1 Metallographic structure of TA2 plate

表2 焊接工艺参数
Table 2 Welding parameters

焊接速度/(mm·min ⁻¹)	转速/(r·min ⁻¹)	倾角/(°)	焊接压力/kN	氩气流量/(L·min ⁻¹)
60	300	1—3	20—25	16

1.3 分析测试方法

利用 OLYMPUS PMG3 倒置式显微镜观察 TA2 钛板材的微观组织形貌,利用 Nano Measurer 1.2 软件对其晶粒尺寸进行计算。使用上海敏新检测仪器有限公司生产的 MHV-50 显微维氏硬度计对试件进行硬度测试,载荷为 4.9 N、保压时间为 10 s,以试件中心作为参考坐标原点进行 3×3 阵列的取点。采用美特斯工业系统(中国)有限公司生产的 E45.305 微机控制电子万能试验机对试件进行室温拉伸,并利用日立热场式场发射扫描电镜 SU5000 对断口进行观察,其中拉伸速率为 3 mm·min⁻¹,拉伸试件如图 2 所示。

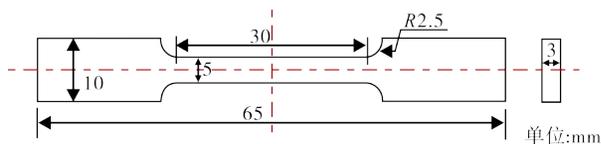


图2 拉伸试件尺寸

Figure 2 Dimensions of tensile samples

利用 Sigma scope smp350 涡流金属电导仪对焊缝及母材进行导电率检测,对每个位置测量 5 次并取平均值为该位置的导电率。运用济南西格马科技有限公司提供的 RSD-1 残余应力打孔装置,在焊缝不同区域打出深度为 2 mm 的盲孔以检测残余应力,其中钻头直径为 1.5 mm。

1.2 试验方法

焊接前需对试件进行处理。首先将尺寸为 200 mm×100 mm×3 mm 的焊件切割成 30 mm×10 mm×3 mm 的试件,然后用 240#、600#、1200# 和 2000# 砂纸分别对试件进行打磨处理,再通过机械抛光获得光亮表面,最后用腐蚀液腐蚀试件 10 s,再用丙酮和酒精对其清洗,腐蚀液由 HF+HNO₃+H₂O 组成(体积比为 1:2:50)。采用搅拌摩擦焊工艺对试件进行焊接,焊接工艺参数列于表 2。其中,摩擦头直径为 12 mm,其成份为莱钨合金。

2 结果与分析

2.1 显微组织及硬度

图 3 为 TA2 搅拌摩擦焊接头的形貌图。从图 3 可见,TA2 薄钛板搅拌摩擦焊接头可划分为焊缝(WZ)、热力影响区(TIZ)和母材(BM)3 个区域,而热力影响区很窄,焊缝的宽度约为 12 mm。

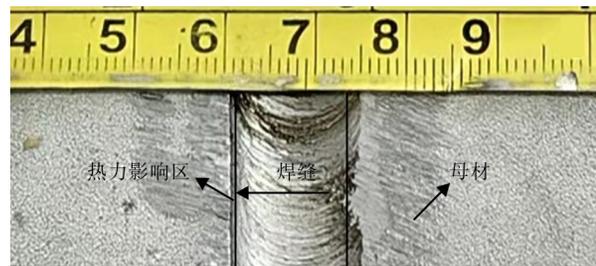
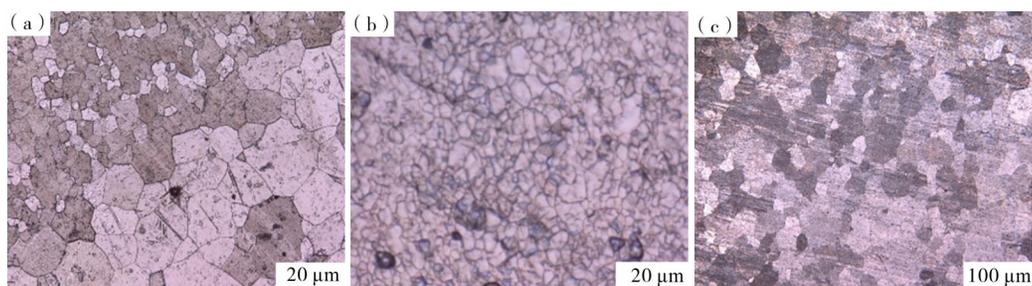


图3 TA2搅拌摩擦焊接头形貌图

Figure 3 TA2 friction stir welded joint

图 4 为 TA2 搅拌摩擦焊接头显微组织。从图 4 可见,焊缝组织为等轴晶。图 5 为 TA2 搅拌摩擦焊接头的晶粒尺寸曲线图。从图 5 可见,接头晶粒尺寸曲线呈现 V 型,焊缝中心位置的晶粒尺寸最小。这是由于焊缝中心受挤压最严重,而越往焊缝边缘受挤压越小。通过计算得到焊缝中心位置的晶粒尺寸为 2.5 μm,焊缝区域的平均晶粒尺寸为 12.8 μm,母材的平均晶粒尺寸为 57 μm,母材平均晶粒尺寸比焊缝的大 44.2 μm。



(a)—热力影响区;(b)—焊缝;(c)—母材。

(a)—the thermal affected zone;(b)—the weld zone;(c)—the base material.

图4 TA2搅拌摩擦焊接头显微组织

Figure 4 Microstructure of TA2 friction stir welded joint

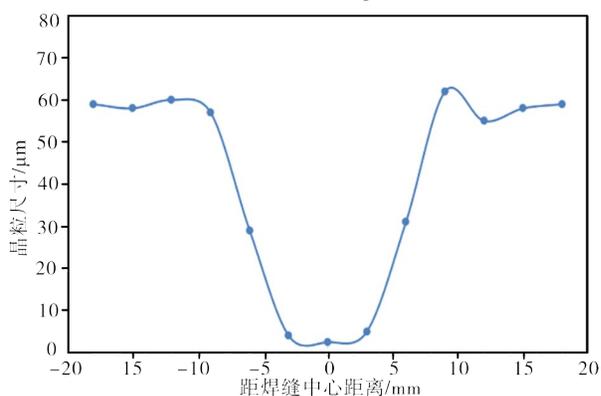


图5 TA2搅拌摩擦焊接头晶粒尺寸

Figure 5 Grain size of TA2 friction stir welded joint

图6为TA2搅拌摩擦焊接头显微硬度。从图6可以看出,TA2搅拌摩擦焊接头晶粒硬度曲线呈现倒V型,焊缝中心位置的硬度最高。这是因为焊缝中心受挤压最严重,因而存在大量的位错,导致硬度的增加^[6-8]。通过计算得到焊缝区域的平均硬度为135.4 HV,母材的平均硬度为125.1 HV,焊缝的平均硬度比母材的高10.3 HV。

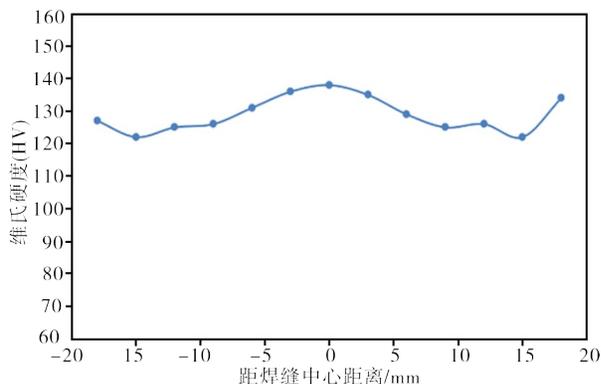


图6 TA2搅拌摩擦焊接头显微硬度

Figure 6 Microhardness of TA2 friction stir welded joint

2.2 导电率

图7为TA2搅拌摩擦焊接头不同区域的平均导电率。从图7可以看出,TA2搅拌摩擦焊焊缝(WZ)与母材(BM)的平均导电率分别为

3.65% IACS 和 3.82% IACS。焊缝比母材的导电率小,这是因为焊缝的晶粒尺寸比母材晶粒的小,焊缝区域平均晶粒尺寸为12.8 μm,母材区域平均晶粒尺寸是57 μm,使电子沿晶界迁移的路径变长^[9-12],造成导电率变差。

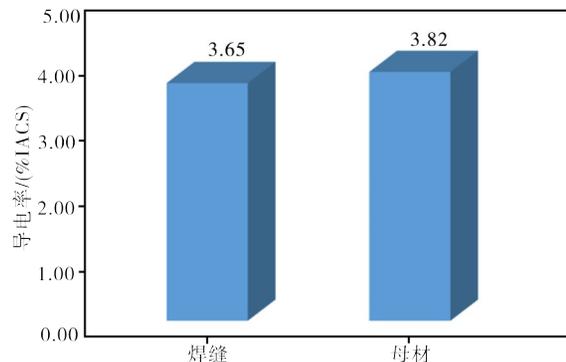


图7 TA2搅拌摩擦焊接头平均导电率

Figure 7 Average conductivity of TA2 friction stir welding joint

2.3 残余应力

图8为TA2搅拌摩擦焊接头残余应力。从图8可见,在距离焊缝两侧20 mm以内,焊件接头的残余应力呈现倒V型分布。其中,搅拌摩擦焊件接头的焊缝中心横向残余应力及纵向残余应力分别达到

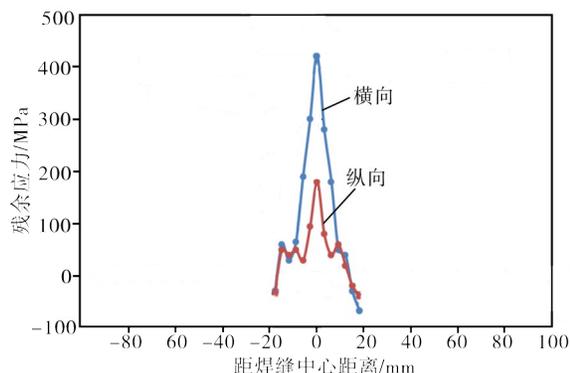


图8 TA2搅拌摩擦焊接头残余应力分布图

Figure 8 Residual stress of TA2 friction stir welded joint

420和180 MPa,这是因为焊缝中心受挤压变形严重,使得晶粒组织分布不均匀而发生严重的晶格畸变^[12-15],导致残余应力很大,且在距离焊缝中心约15 mm处出现压应力。

2.4 拉伸测试

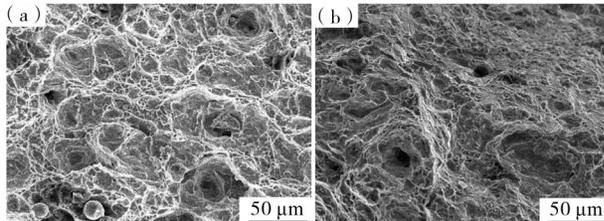
图9和图10分别为母材、搅拌摩擦焊件的拉伸试件及断口形貌。从图10可以看出,母材和搅拌摩擦焊件均存在韧窝。结果表明,试件断裂为塑性断裂。表3为拉伸测试结果。由表3可知,TA2搅拌摩擦焊件的抗压强度和屈服强度均高于母材,而其延伸率大约是母材的51.6%。这是因为焊缝位置遭受挤压而变形显著,致使晶粒细化,从而产生细晶强化效应并伴随着大量位错^[16-17]。因此,焊件强度大,延伸率差。



(a)—母材;(b)—搅拌摩擦焊件。
(a)—the base metal;(b)—the friction stir welding parts.

图9 拉伸样品

Figure 9 Tensile samples



(a)—母材;(b)—搅拌摩擦件。
(a)—the base metal;(b)—the friction stir welding parts.

图10 拉伸试件断口形貌

Figure 10 Fracture morphologies

表3 拉伸测试结果

Table 3 Tensile test results

名称	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	断后延伸率/ %
母材	297	258	62
搅拌摩擦焊件	415	325	32

3 结论

在搅拌摩擦焊焊接速度 $60 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 、转速 $300 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、焊头倾角 $1^\circ\text{—}3^\circ$ 、焊接压力 $20\text{—}25 \text{ kN}$ 和氩气流量 $16 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 的焊接工艺参数下,对TA2搅拌摩擦焊接头组织和性能进行了测试。

(1)焊缝(WZ)的宽度为12 mm,组织主要由细小的等轴晶构成,焊缝区域的平均晶粒尺寸、平均硬度分别为 $12.8 \mu\text{m}$ 和 135.4 HV ,母材的平均晶粒尺寸、平均硬度为 $57 \mu\text{m}$ 和 125.1 HV 。

(2)TA2搅拌摩擦焊焊缝(WZ)与母材(BM)的导电率分别为 $3.65\% \text{ IACS}$ 和 $3.82\% \text{ IACS}$,焊缝的导电率比母材小。

(3)TA2搅拌摩擦焊接头残余应力沿焊缝向母材方向逐渐降低,焊缝中心残余应力最高,横向残余应力、纵向残余应力分别达到420和180 MPa。

(4)TA2搅拌摩擦焊件的强度比母材高,但延伸率变差为母材的51.6%。

参考文献:

- [1] 陈元园,冯庆,张乐,等.TA1薄钛板氩弧焊接头显微组织和力学性能分析[J].金属加工(热加工),2023(5):57-61.
- [2] 韩坤炎,陈元园,张乐,等.不同焊接参数和热处理温度对TA1钛板搅拌摩擦焊接头显微组织与力学性能的影响分析[J].金属加工(热加工),2023(10):56-60.
- [3] 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.
- [4] 张智峰,刘正涛,谢细明,等.钛合金搅拌摩擦焊研究现状[J].精密成形工程,2021,13(3):179-187.
- [5] 耿子明,宋杰,王磊等.搅拌摩擦焊应用现状及展望[J].焊接技术,2019(1):1-4.
- [6] 秦丰,乌彦全,张春波,等.工业纯钛摩擦螺柱焊接头组织与性能研究[J].电焊机,2023,53(3):77-82.
- [7] 马俊雅,李静静.航空航天用高强铝合金搅拌摩擦焊的研究现状与发展[J].材料研究与应用,2023,17(1):79-86.
- [8] 秦佳琛,谭锦红,张大童,等.双轴肩搅拌摩擦焊技术研究现状与发展趋势[J].材料研究与应用,2020,14(4):336-343.
- [9] 邓军,赵运强,谭锦红,等.搅拌头转速对铝合金双轴肩搅拌摩擦焊接头组织性能影响的研究[J].材料研究与应用,2017,11(2):84-88.
- [10] 骆志捷,袁鸽成,黄泽涛,等.5083铝合金搅拌摩擦焊缝的剥落腐蚀性能[J].材料研究与应用,2015(2):107-111.
- [11] 周利,周炜璐,杜正勇,等.钛及钛合金搅拌摩擦焊研究进展[J].精密成形工程,2015,7(5):46-51.
- [12] 李继忠,董春林,栾国红,等.TC4钛合金搅拌摩擦焊焊缝成形及微观组织研究[J].航空制造技术,2013,436(16):160-163.
- [13] 李继忠,董春林,赵华夏,等.钛合金搅拌摩擦焊工艺参数对组织性能的影响[J].航空制造技术,2015,487(17):100-103.
- [14] 高福洋,郁炎,刘志颖,等.纯钛搅拌摩擦焊晶粒细化

- 机制[J].航空材料学报,2016,36(6):29-34.
- [15] 王快社,张小龙,沈洋,等.TC4钛合金搅拌摩擦焊接连接组织形貌研究[J].稀有金属材料与工程,2008,268(11):2045-2048.
- [16] 周冉辉,高福洋,刘向前,等.钛及钛合金搅拌摩擦焊接技术综述[J].材料开发与应用,2018,33(4):127-136.
- [17] 王月,姬书得,李继忠,等.2.5mm厚TC4钛合金搅拌摩擦焊的成形规律研究[J].热加工工艺,2016,45(15):171-176.

Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Joint of TA2 Thin Titanium Plate

ZHANG Le^{1,2}, CHEN Yuanyuan^{1,2*}, FENG Qing^{1,2}, LI Yaohui^{1,2}

(1. Xi'an Taijin Xinneng Technology Co., Ltd., Xi'an 710201, China; 2. Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710201, China)

Abstract: IN order to explore the influence laws of process parameters such as stir - head rotation speed, welding speed, and axial pressure on the welding quality of friction stir welding of thin titanium materials. The TA2 square thin titanium plate with a thickness of 3 mm was welded friction stir welding, and the microstructure and mechanical properties of the weld joint were analyzed. The findings indicate that the weld area is free from defects such as pores, inclusions and cracks, The metallographic microstructure of the weld area is mainly composed of fine equiaxed grains ranging from 2.5 to 32 μm , with grain growth occurring sequentially from the center of the weld to the base metal, The grain size exhibits a symmetrical inverted "V" distribution along the weld center. The microhardness in the weld area ranges from 131.9 to 138.1 HV, decreasing progressively from the weld center to the base metal. The average grain size and microhardness of the weld area were 12.8 μm and 135.4 HV, respectively, compared to 57 μm and 125.1 HV in the base metal area, indicating that the weld area's grain size is 44.2 μm smaller and its microhardness is 10.3 HV higher than that of the base metal. The average conductivity of the weld region and base metal region was measured at 3.65%IACS and 3.82%IACS, respectively, that the weld region has a conductivity 0.17% lower than that of the base metal. Residual stress measurements using the MTS3000 blind hole method revealed that the central weld exhibited the highest residual stress, with transverse and longitudinal stresses of 420 MPa and 180 MPa respectively, Compressive stress was observed 15—20 mm from the weld center. Tensile test indicated that the the friction stir weldment achieved a tensile strength of 415 MPa, yield strength of 325 MPa and elongation of 32%, compared to 297 MPa, 258 MPa, and 62% for the base metal Through this research, the optimal combination of process parameters for friction stir welding of thin titanium materials was determined, which improved the welding efficiency and quality stability.

Keywords: friction stir welding; TA2 square thin titanium plate; microhardness; metallographic structure; tensile strength; elongation rate; conductivity; residual stress

(学术编辑:孙文)