

# TA2 板材小孔 TIG 焊接头的组织与性能

殷亚运,雷小伟,陈利阳,齐风华,李鹏

(中国船舶重工集团公司第七二五研究所 河南 洛阳 471023)

**摘要:**研究了10 mm厚TA2板小孔TIG焊接头微观组织、显微硬度、抗拉强度、工艺性能及冲击性能,对焊缝中心冲击断口进行了扫描电镜观察。结果表明,采用优化小孔TIG焊工艺可不开坡口实现10 mm厚TA2板的单面焊双面成型;大焊接电流导致焊缝组织较母材粗大,但焊缝中心冲击吸收功未见显著降低,且熔合线附近还略高于母材的;接头未出现明显硬化或软化,接头强度与母材的相当,工艺性能良好。

**关键词:**小孔TIG焊;钛合金;微观组织;力学性能;冲击韧性

中图分类号: TG444.2 文献标识码: A

DOI:10.19515/j.cnki.1003-1545.2018.04.014

## Microstructures and Mechanical Properties of TA2 Plate Joint Welded by Key Hole TIG

YIN Yayun, LEI Xiaowei, CHEN Liyang, QI Fenghua, LI Peng

(Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471023, China)

**Abstract:** Key hole TIG welding of 10 mm thick TA2 plate was conducted. The microstructures, hardness, tensile strength, bending properties and impact properties of the welded joints were investigated. The impact fracture of the specimens with notch machined at the center of weld was observed by scanning electron microscope. It has been verified that one side welding both sides formation of 10 mm thick TA2 plate without notch can be successfully obtained by using the optimized TIG welding parameters; high welding current accounts for coarse grains of the weld, but impact value in the weld center doesn't reduce obviously and that around the fusion line is slightly higher than that of the base material; the joint has good bending performance; the strength and hardness are equal to those of the base material.

**Keywords:** key hole TIG welding; microstructure; mechanical property; charpy impact toughness

小孔TIG焊技术是2000年左右出现的一种大电流TIG焊接新技术,由澳大利亚联邦科学与工业组织(CSIRO)首次提出,其焊接过程中会形成小孔(也称“匙孔”),类似于等离子弧“小孔”。其作用形式与传统TIG焊相同,形成小孔的原因在于焊接过程中采用大电流并配合加强的枪身冷却,从而获得了挺度大、穿透力强的焊接电弧,焊接过程中电弧打穿熔池形成小孔<sup>[1]</sup>。当电弧压力、重力和液态金属表面张力达到动态平衡时小孔可稳定存在。小孔TIG焊的物理机制使得它非常适合焊接低热传导的材料,如不锈钢、钛合金、锆合金、镍基合金等。传统TIG焊不开坡

口一次焊透且成型良好的板材厚度通常不大于4 mm,而已有的研究表明,小孔TIG焊采用“I”型直边坡口一次可焊透16 mm厚钛、13 mm厚不锈钢和9 mm厚碳素钢的对接缝,生产效率和经济效益较传统TIG、MIG焊大大提高。对于更大厚度材料,可以通过开Y形坡口,先从坡口正面或背面采用小孔TIG焊一次焊透钝边,再采用传统TIG或MIG等进行填充,从而显著减少焊接道次,降低焊接热输入,提高焊接效率,降低焊缝的残余应力和变形<sup>[2]</sup>。

国外对小孔TIG焊的研究起步较早,设备和工艺成熟,目前该技术已发展为一套完整的商业

收稿日期:2018-03-26

基金项目:七二五所海洋工程创新项目(MK160805)

作者简介:殷亚运,男,国际焊接工程师,主要从事有色金属焊接工艺研究。

化焊接技术<sup>[3]</sup>。国内有关小孔 TIG 焊的研究较少, 李洋等人针对核电领域使用的 508-III 低合金钢开展了小孔 TIG 焊工艺研究, 发现通过合理匹配工艺参数及采取有效的工艺过程控制措施, 试验焊缝可通过射线探伤检测<sup>[4]</sup>。

钛及钛合金因具有密度低、比强度高、无磁、抗冲击能力强以及耐腐蚀等特点, 在航空航天、石油化工、船舶建造等领域应用越来越广泛。然而有关钛及钛合金材料的小孔 TIG 焊接尚未见公开报道。因此, 本文选用钛领域使用较为广泛的 TA2 材料, 开展板材对接小孔 TIG 焊工艺试验, 对接头的微观组织、显微硬度、抗拉强度、冷弯性能及冲击性能进行观察与测试, 为小孔 TIG 焊技术应用于钛合金焊接及有关工程结构物制造、修复提供一定试验依据。

## 1 试验方法

试验所用母材为 10 mm 厚的 TA2 板材, I 型坡口, 不留间隙。采用小孔 TIG 焊打底 + 传统自动 TIG 焊盖面。盖面使用直径 1.2 mm 的 TA2 焊丝。焊前采用硬质合金刮刀对对接缝及其周围 25 mm 范围内氧化皮进行清理并用丙酮擦拭干净。

试验焊接系统主要包括一体化的小孔 TIG

焊机及加强冷却的专用焊枪。焊接时焊枪和拖罩保护气均为纯度 99.99% 氩气, 焊枪气流量为 20 L/min, 拖罩气流量为 30 L/min。

完成打底焊后即对打底焊缝进行射线探伤, 以考察小孔 TIG 打底焊质量, 并对接头进行显微组织观察及硬度测试。完成盖面焊后再次对组合焊缝进行射线探伤, 对探伤合格的焊缝进行接头拉伸、工艺性能测试及 20 °C 焊缝区及熔合线附近夏比冲击测试。

母材强度和伸长率的测试采用圆拉试样, 试样直接从试板上线切割并加工。焊接接头的强度测试采用圆拉和板拉试样, 板拉试样为全板厚, 焊缝均位于试样中心。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 焊缝形貌及射线探伤结果

打底焊后焊缝正背面宏观形貌见图 1。可见焊道均匀, 焊缝成形美观, 根部焊道比较细, 焊缝正背面呈银白及淡黄色, 表明在合适的打底焊参数下, 小孔 TIG 焊可很好的实现单面焊双面成型。打底焊缝射线探伤结果见图 2, 可以看出, 焊缝无裂纹、气孔、夹杂、未熔合、未焊透等冶金缺陷, 焊缝质量满足 NB/T 47013.2—2015 之 I 级要求, 焊接质量优良。

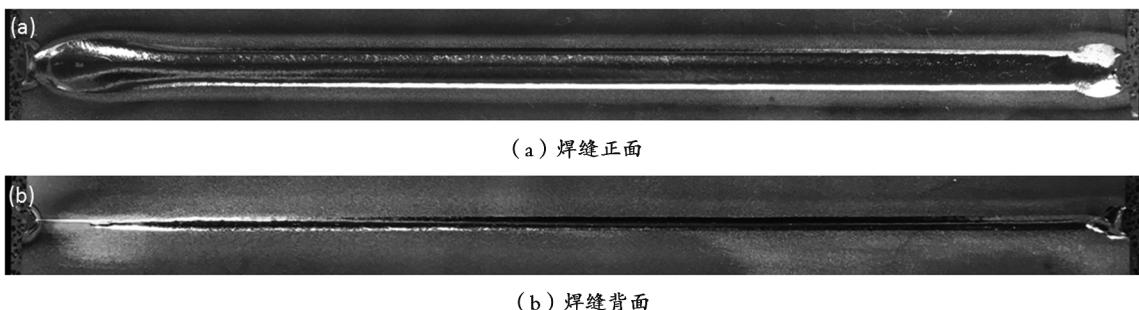


图 1 小孔 TIG 焊缝宏观形貌  
Fig. 1 Macrostructure of key hole TIG weld: (a) topside; (b) backside



图 2 小孔 TIG 焊缝射线底片  
Fig. 2 Radiograph of key hole TIG weld

## 2.2 接头微观组织及硬度

图3为仅完成打底焊接后的接头光学显微形貌。可以看出,焊缝区与热影响区分界线不明显。由于对接缝处存在间隙,加上打底焊时未填丝,焊后焊缝上表面有轻微凹陷。

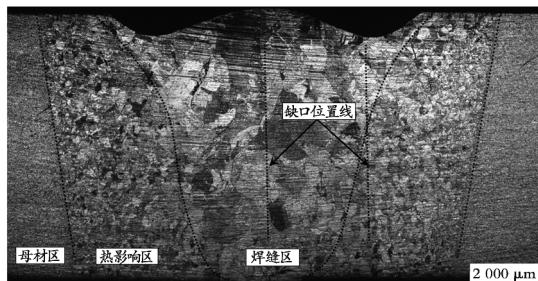
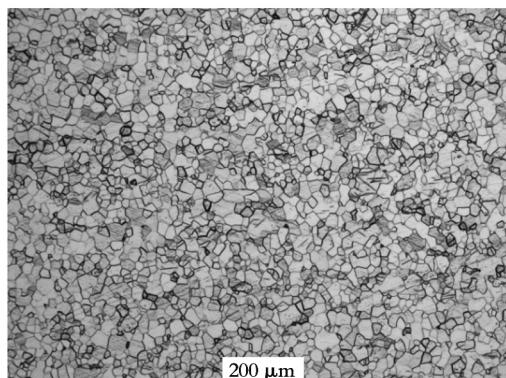


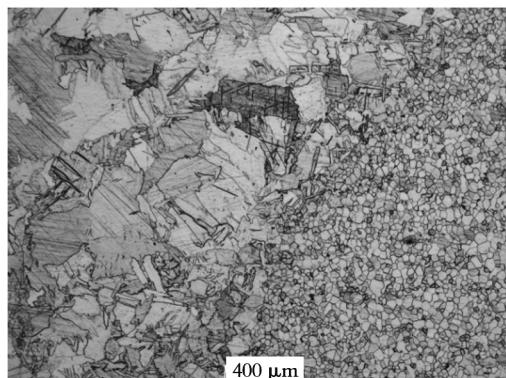
图3 小孔 TIG 打底焊缝横截面形貌

Fig. 3 Morphology of key hole TIG welded joint

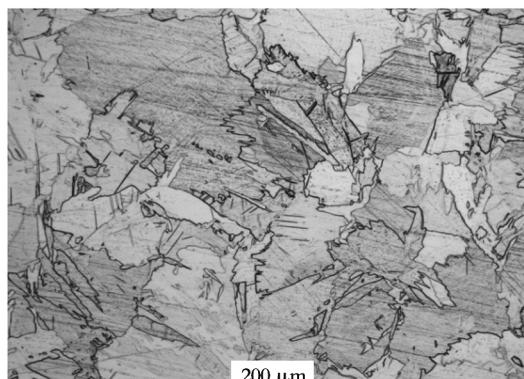
图4为接头不同区域微观组织形貌。可以看出,母材区微观组织为细小的等轴状 $\alpha$ ,晶粒大小均匀。图4(b)左上半区为热影响区,右下半区为母材区,热-基交界线非常明显。由于受到小孔TIG焊接热循环的影响,热-基交界处热影响区侧发生固态相变,组织转变为锯齿状 $\alpha$ 。热影响区组织形貌特征为锯齿状 $\alpha$ ,不同的 $\alpha$ 晶粒杂乱交织在一起。焊缝中心区微观组织特征与热影响区相同,均为锯齿状 $\alpha$ ,局部区域存在孪晶,不同取向 $\alpha$ 晶粒交织更为明显。与热影响区相比,该区域母材受到焊接热循环影响更严重,因而晶粒更为粗大。



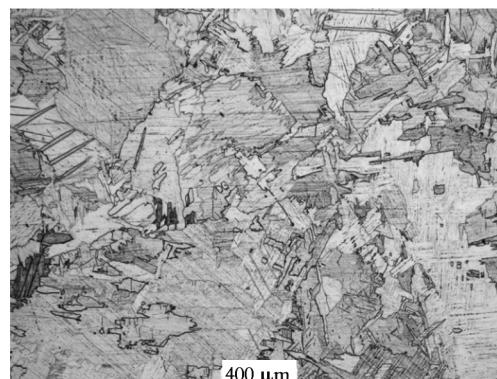
(a) 母材区显微组织



(b) 热-基交界处显微组织



(c) 热影响区显微组织



(d) 焊缝中心显微组织

图4 接头不同区域显微组织

Fig. 4 Microstructure of key hole TIG welded joint

图5为接头不同区域的维氏硬度值。可见,接头不同区域硬度值并无显著差别,母材硬度在165左右,接头硬度最高值为179,位于焊缝区,最低值为162,也位于焊缝区。接头受焊接热循环影响,组织形态及晶粒大小变化明显,但从硬度分布上看,接头并无强化及软化。

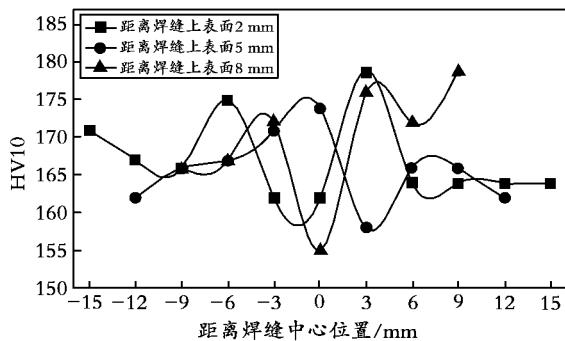


图5 接头不同区域维氏硬度值

Fig. 5 Hardness profiles of key hole TIG welded joint

### 2.3 接头拉伸试验

拉伸力学性能测试结果见表1,表中数据为3组数据均值。圆拉测试表明,接头断裂位置均位于焊缝,与母材相比,小孔TIG焊接头强度有所提高,伸长率有所降低,但并不明显,性能可视为与母材等强。全厚度板拉测试试样断裂位置也位于焊缝,接头抗拉强度可达484 MPa,与491 MPa的母材抗拉强度相比,接头系数达到了98.6%。

表1 母材与接头力学性能

Table 1 Mechanical properties of base material and welded joints

项目	圆拉试样		板拉试样	
	$R_{p0.2}$ /MPa	$R_m$ /MPa	A/%	$R_m$ /MPa
母材	341.5	491.5	28.5	491
接头	354.0	495.5	28.0	484

### 2.4 接头工艺试验

焊接接头的工艺性能是体现焊接接头塑性是否恶化的一项重要指标,往往存在焊接接头强度发生强化,而工艺性能变差的情况,因此,现代焊接理论推荐低匹配原则,在保证接头强度能够

满足要求情况下,其工艺性能不出现恶化。

依据NB/T 47014标准对焊接接头进行侧弯取样并进行冷弯测试,以考察焊接接头的抗弯曲变形能力。结果表明,在 $R=5t$ 测试条件下,4件侧弯试件在弯曲角度达到180°时均未出现裂纹缺陷,表明小孔TIG焊接头具有良好的抗弯曲变形能力,工艺性能优良。

冷弯试验结果表明,虽然小孔TIG焊接过程中电流较大,但是其较大的单道焊接厚度和较快的焊接速度使得其在凝固过程中单位质量获得的热量并没有显著增高,其熔池的凝固机理与等离子弧焊缝类似,对于TA2的工艺性能没有直接影响,该材料小孔TIG焊具有较好的焊接工艺性。

### 2.5 接头冲击试验及断口分析

依据GB/T 229—2007《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》进行20℃夏比V型缺口冲击试验,试样尺寸为55 mm×10 mm×7.5 mm,缺口分别开在焊缝中心和熔合线区域,详细缺口位置参见图3。

焊接接头不同区域冲击吸收功见表2。虽然小孔TIG焊电流很大,焊缝区及热影响区晶粒均发生明显粗化,但焊缝区冲击吸收功与母材相比并没有显著降低,且熔合线附近冲击吸收功还略高于母材的。

表2 焊接接头冲击试验结果

Table 2 Results of compact test J

母材	熔合线	焊缝中心
82 84 88	91 92 94	79 83 85

焊缝中心区冲击试样断口扫描电镜形貌见图6。可以看出,断面比较平整,分布有大量拉长的韧窝,窝孔较浅且边缘撕裂明显,具有韧性断裂特征。虽然焊缝中心组织与母材相比较为粗大,粗大晶粒通常会损害材料韧性,但焊缝中心组织特征为交织的锯齿状 $\alpha$ ,这种组织特征对裂纹扩展具有一定的阻碍作用<sup>[5]</sup>,因而与母材相

比,焊缝中心冲击韧性并未显著降低。熔合线附近由于晶粒粗化不如焊缝中心严重,且组织特征也为交织的锯齿状 $\alpha$ ,因而冲击韧性还略高于母材的。

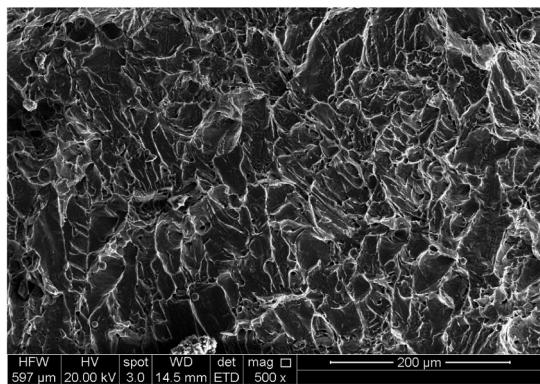


图6 焊缝中心冲击试样断口扫描电镜形貌

Fig. 6 Fracture morphology of impact specimen

### 3 结 论

(1) 采用小孔TIG焊可以在不开坡口条件下,一次焊透10 mm厚TA2板材,且焊缝成形良好,常规TIG焊盖面后焊缝质量满足NB/

T 47013.2—2015之I级探伤要求,焊缝质量优良。

(2) 小孔TIG焊接头焊缝区及热影响区显微组织主要为粗大的锯齿状 $\alpha$ ,接头硬度、强度及冲击韧性与母材的相当,工艺性能良好。

#### 参考文献:

- [1] 林三宝,范成磊,杨春利.高效焊接方法[M].北京:机械工业出版社,2012:41—43.
- [2] 廖志谦,王忠平.钛合金厚板的等离子焊接[J].材料开发与应用,2005,20(4):27—29.
- [3] JARVIS B L, AHMED N U. Development of keyhole mode gas tungsten arc welding process [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2000, 5(1):1—7.
- [4] 李洋,谷文,冯东旭,等.低合金钢自动小孔TIG焊接工艺研究[J].一重技术,2016(1):43—47.
- [5] 胡伟民,李国林,刘希林,等.钛合金厚板窄间隙TIG焊接接头的组织和力学性能[J].中国有色金属学报,2010,20(1):48—53.

(编辑:房威)