

# 激光焊薄壁直缝钛焊管组织及性能研究

殷 鑫<sup>1</sup>, 李军兆<sup>1\*</sup>, 李海明<sup>1</sup>, 樊 程<sup>1</sup>, 刘文正<sup>1</sup>, 彭盛军<sup>1</sup>, 孙清洁<sup>1,2</sup>, 曾宪山<sup>1</sup>

(1. 湖南湘投金天新材料有限公司, 湖南 益阳 413000; 2. 哈尔滨工业大学 (威海), 山东 威海 264209)

**摘 要:** 对薄壁 Gr.1 纯钛直缝焊管采用激光焊接方式焊接, 并对试验获得的样管进行了宏观形貌、显微组织分析和力学性能测试。结果表明, 直缝薄壁焊管焊缝宽度较窄, 外焊缝宽度为 1.51 mm, 内焊缝宽度为 0.98 mm。钛焊管焊缝微观组织主要为柱状  $\alpha$  相、锯齿状  $\alpha$  相和少量针状  $\alpha$  相。扩口、压扁、反弯试验结果均合格。最后对样管进行胀管试验, 胀幅达到 18.4%, 外观变形较为均匀。从胀管后微观组织可知, 胀管后焊缝、热影响区以及母材大部分晶粒受到拉伸作用明显变形和破碎, 并产生较多针状  $\alpha$  相, 但均没有产生裂纹。

**关键词:** 激光焊; 钛管; 微观组织; 力学性能; 胀管

中图分类号: TF823, TG456.7 文献标志码: A

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2024.05.009

文章编号: 1004-7638(2024)05-0070-04

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听  
语  
音  
与  
作  
者  
互  
动  
聊  
科  
研

## Study on microstructure and properties of laser welded thin-walled straight seam titanium pipes

Yin Xin<sup>1</sup>, Li Junzhao<sup>1\*</sup>, Li Haiming<sup>1</sup>, Fan Cheng<sup>1</sup>, Liu Wenzheng<sup>1</sup>,  
Peng Shengjun<sup>1</sup>, Sun Qingjie<sup>1,2</sup>, Zeng Xianshan<sup>1</sup>

(1. Hunan Xiangtou Goldsky New Materials Co., Ltd., Yiyang 413000, Hunan, China; 2. Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, Shandong, China)

**Abstract:** The thin-walled Gr.1 pure titanium straight seam welded pipe was welded by laser, and the samples obtained from the experiment were analyzed for macroscopic morphology, microstructure and mechanical properties. The results show that the weld width of longitudinally welded thin-walled pipe is relatively narrow, with an outer weld width of 1.51 mm and an inner weld width of 0.98 mm. The microstructure of titanium welded pipe weld is mainly columnar  $\alpha$  phase, serrated  $\alpha$  phase and a small amount of needle shape  $\alpha$  phase. The results of flaring, flattening, and reverse bending tests are all qualified. Finally, an expansion test was conducted on the sample tube, and the expansion amplitude reached 18.4%, with a relatively uniform deformation in appearance. From the microstructure after tube expansion, it can be seen that after tube expansion, most of the grains in the weld seam, heat affected zone, and base metal are significantly deformed and broken due to tensile action, and many needle shaped  $\alpha$  phase grains are produced, but no cracks occurred.

**Key words:** laser welding, titanium pipe, microstructure, mechanical properties, expand tube

收稿日期: 2023-11-27

基金项目: 湖南省科技创新计划资助 (2022RC1060、2022GK4046、2022TP2034、2023GK2087)。

作者简介: 殷鑫, 男, 1995 年出生, 湖南益阳人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事激光焊接技术应用研究, E-mail: 1731841503@qq.com; \* 通讯作者: 李军兆, 男, 1993 年出生, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事钛及钛合金高效焊接方法及成型技术研究, E-mail: 031@goldskycn.com。

## 0 引言

激光技术诞生至今已有 30 多年的历史,激光焊接作为一种重要的激光加工技术得到了日益广泛的应用。在某些工业领域,激光焊已经成为了传统焊接方式的替代技术<sup>[1]</sup>。

由于钛及其合金的弹性模量较小,在焊接过程中容易产生变形,在薄板焊接时如何解决变形问题也尤为重要,此外,工艺参数的匹配对薄板焊接质量具有显著影响,因此钛薄板的焊接难度较大<sup>[2]</sup>。目前工业上生产的薄壁钛焊管大多采用 TIG 焊接方法,但是 TIG 焊为保证焊接质量一般采用较慢的焊接速度,导致其生产效率不高,大热输入会导致薄板严重变形。提高焊接速度后,焊接电流也需要相应地提高,此时焊缝往往会出现咬边、驼峰等焊接缺陷<sup>[3]</sup>。而激光焊接具有高能量密度、焊接速度快等特点,可以改善焊缝组织,得到晶粒细化、变形量小的焊接接头,相对于 TIG 焊可以大幅度提高焊接速度,从而提高生产效率<sup>[4-6]</sup>。

现阶段相关研究人员对激光焊接技术在薄壁钛焊管中产业化应用的相关研究较少,基本都处于实验室研究阶段。笔者通过激光焊接方法生产薄壁 Gr.1 钛焊管,对激光焊接接头的宏观、微观组织结构进行分析,对其力学性能进行测试。最后对焊管进行胀管试验,测试其焊缝整体力学性能。实现了钛焊管高质量焊接,为激光焊接技术在薄壁钛焊管生产中的应用提供了一定的技术参考,推动激光焊接技术产业化应用。

## 1 试验部分

试验所采用的试验材料为 Gr.1 纯钛带卷(湖南湘投钛金属股份有限公司生产),带卷厚度为 0.5 mm,经过压辊冷弯成型、焊接后形成直缝焊管。使用的原材料 Gr.1 的化学成分如表 1 所示,原材料性能如表 2 所示。生产试制在湖南湘投金天新材料有限公司连续制管生产线进行,试验前,采用百洁布对轧辊表面进行清洁。焊接试制过程中均采用纯氩气对高温焊接熔池区域进行双面保护,焊管内保护气流量为 10 L/min。激光器为 6 000 W 光纤激光器,波长为 1 080 nm,焦距为 200 mm,试制后形成 $\varnothing 46 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 焊管,具体焊接工艺参数如表 3 所示。激光头与管材运动方向夹角为 80°,避免熔池金属反射的激光束损伤激光头,退火温度为 600 ℃。

焊后采用激光切割机在管材上截取金相、力学性能测试和机械性能测试试样,经过磨抛后对金相

试样进行腐蚀,采用光学显微镜对焊接接头的组织进行分析,其中万能试验机型号为 CMT5105,金相显微镜型号为 XJZ-6A。最后进行胀管试验,胀管时间为 1 s,胀管压力为 10 ~ 15 MPa。

表 1 Gr.1 带卷主要化学成分  
Table 1 Main chemical composition of Gr.1 %

| Fe   | C    | O    | N    | H     | Ti | 其他   |
|------|------|------|------|-------|----|------|
| 0.03 | 0.01 | 0.04 | 0.01 | 0.001 | 余量 | <0.4 |

表 2 原材料性能  
Table 2 Raw material performance

| 抗拉强度/MPa | 屈服强度/MPa | 延伸率/% | 晶粒度等级 |
|----------|----------|-------|-------|
| 328      | 188      | 39.5  | 5     |

表 3 激光焊接工艺参数  
Table 3 Laser welding process parameters

| 激光功率/W | 焊接速度/(m·min <sup>-1</sup> ) | 离焦量/mm |
|--------|-----------------------------|--------|
| 600    | 0.75                        | +20    |

## 2 试验结果

### 2.1 焊缝形貌

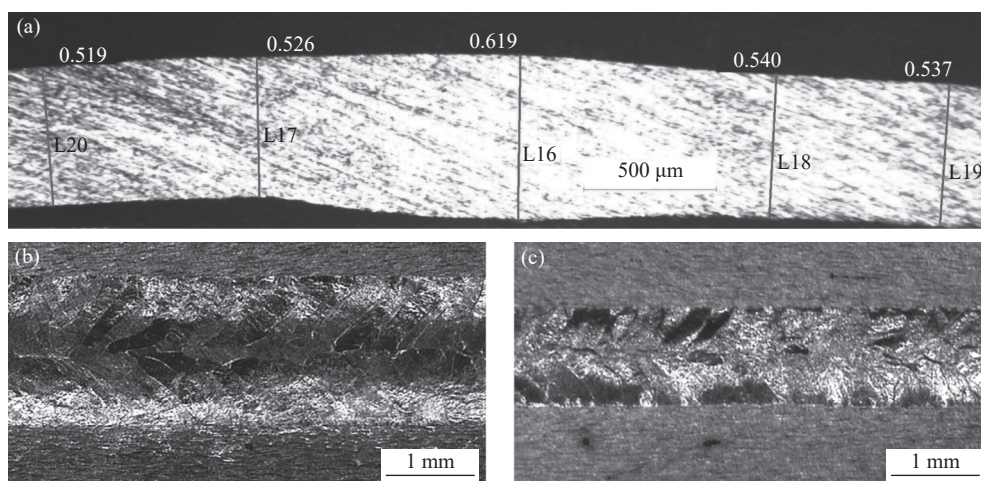
图 1 为大口径薄壁钛焊管焊缝形貌,表 4 为焊缝宏观尺寸。可以看出 Gr.1 纯钛薄壁焊管焊接接头均实现双面良好成型,焊缝正面和背面连续均匀。由于激光焊接过程中激光束具有更强的穿透性且激光能量更加集中,致使激光焊接接头外焊缝宽度仅为 1.5 mm,内焊缝宽度为 0.98 mm,相比于传统 TIG 焊接,激光焊接接头焊缝区和热影响区宽度均明显较窄。

### 2.2 焊缝微观组织

图 2 为 Gr.1 纯钛薄壁焊管不同焊缝位置的金相组织。母材微观组织主要由等轴状  $\alpha$  相组成,且晶粒均较为细小。焊缝区和热影响区为柱状  $\alpha$  相、锯齿状  $\alpha$  相组成,晶粒较大<sup>[7]</sup>。但同时晶粒内部存在少量的针状马氏体  $\alpha'$  相,主要由于激光焊接过程中熔融金属温度很高,当温度超过其相转变温度时,在随后的快速冷却过程中产生了针状  $\alpha$  相<sup>[8]</sup>。

### 2.3 力学性能及机械性能

参考 GB/T3625-2007《换热器及冷凝管用钛及钛合金管》标准,对 Gr.1 纯钛薄壁焊管进行力学性能和机械性能测试。Gr.1 激光焊管经拉伸、压扁、扩口和反弯试验后外观图片如图 3 所示。抗拉强度为 313 MPa,屈服强度为 189 MPa,延伸率为 61.2%。拉伸试样断裂位置出现明显缩颈现象,扩口试验的扩口率为 22%,焊缝未发现裂纹。压扁试验和反弯试验后,焊缝位置无裂纹产生。各项性能均符合标准 GB/T3625-2007 要求。



(a)焊缝宏观;(b)外焊缝;(c)内焊缝

图 1 焊管焊缝金相形貌

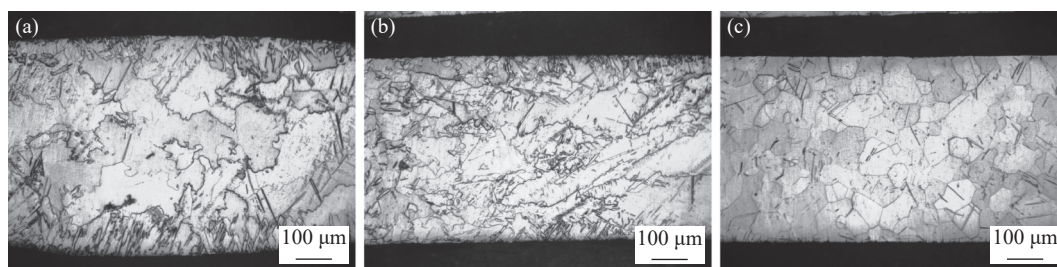
Fig. 1 Macromorphology of welded pipe weld

表 4 焊缝尺寸

Table 4 Weld macro-size

mm

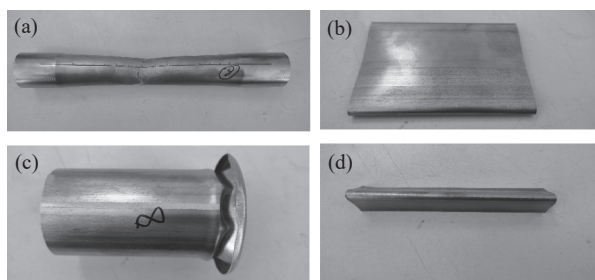
| 焊缝宽度  | 母材厚度  | 焊缝余高  | 外焊缝宽度 | 内焊缝宽度 |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.619 | 0.537 | 0.082 | 1.51  | 0.98  |



(a)焊缝;(b)热影响区;(c)母材

图 2 Gr.1 纯钛焊接接头不同区域金相组织

Fig. 2 The metallographic microstructure of Gr.1 welded joint in various zones



(a)拉伸;(b)压扁;(c)扩口;(d)反弯

图 3 Gr.1 焊管力学性能测试后外观

Fig. 3 Appearance of Gr.1 welded pipe after mechanical property test

## 2.4 胀管试验

Gr.1 薄壁焊管液压胀管试验后样品外观形貌如图 4 所示,微观组织如图 5 所示。样管胀管率为 18.4%,管材胀管程度比较均匀,焊缝均没有出现开

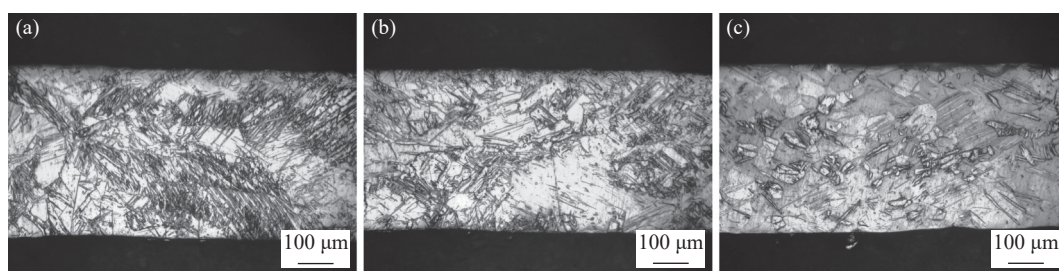
裂的情况。从胀管后金相组织来看,焊缝、热影响区以及母材大部分晶粒受到拉伸作用明显变形和破碎,并产生较多针状  $\alpha$  相,但均没有产生裂纹,胀管性能较好。



图 4 钛焊管胀管后形貌

Fig. 4 Picture of titanium welded pipe after expansion





(a)焊缝;(b)热影响区;(c)母材

图5 胀管试验后微观组织

Fig. 5 Microstructure after tube expansion test

### 3 结论

1)实现了大口径 Gr.1 纯钛薄壁直缝焊管高质量焊接,焊缝及热影响区组织晶粒较为细小。

2)通过对样管进行测试,各项力学性能、扩口、

压扁检测均符合国家标准 GB/T 3625-2007 的要求。

3)胀管试验表明,薄壁钛焊管具有良好的力学性能,在涨幅达到 18.4% 时,焊缝与母材组织变形均匀协调,焊缝没有出现开裂,胀管性能较好。

### 参考文献

- [1] Ma Lei, Fu Chaoqiang. Research progress on the application of laser welding technology[J]. Die Mould Manufacture, 2023, 23(11): 157-159.  
(马磊, 付朝强. 激光焊接技术的应用研究进展 [J]. 模具制造, 2023, 23(11): 157-159.)
- [2] Huang Jiuling, Kong Liang, Wang Min, *et al.* Welding of titanium and titanium alloy thin plates[J]. Welding Technology, 2018, 47(11): 1-5.  
(黄九龄, 孔谅, 王敏, 等. 钛及钛合金薄板的焊接 [J]. 焊接技术, 2018, 47(11): 1-5.)
- [3] Zhen Zuyang. Study on laser-arc hybrid high-speed welding process of TA2 pure titanium sheet[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.  
(甄祖阳. TA2 纯钛薄板激光-电弧复合高速焊接工艺研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.)
- [4] Zhao Xiaolong, Wang Bin, Gong Shuli, *et al.* Study on microstructure and mechanical properties of laser welded joint of 2 mm thick TC4 titanium alloy[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(9): 209-211.  
(赵晓龙, 王彬, 巩水利, 等. 2.0 mm 厚 TC4 钛合金激光焊接接头组织与力学性能研究 [J]. 热加工工艺, 2017, 46(9): 209-211.)
- [5] Sun Wenjun, Wang Shanlin, Chen Yuhua, *et al.* Development of advanced welding technologies for titanium alloys[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(18): 63-72.  
(孙文君, 王善林, 陈玉华, 等. 钛合金先进焊接技术研究现状 [J]. 航空制造技术, 2019, 62(18): 63-72.)
- [6] Yu Hang, Li Junzhao, Zhang Wangcheng, *et al.* Research progress of weld formation and performance control of thin plate TC4 titanium alloy by laser welding[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2022, 43(1): 53-66.  
(于航, 李军兆, 张望成, 等. 薄壁 TC4 钛合金激光焊缝成型与性能调控研究进展 [J]. 钢铁钒钛, 2022, 43(1): 53-66.)
- [7] Wang Boshi, Kong Liang, Li Fang, *et al.* Microstructure and properties of TIG arc assisted laser welding TA2 thin-walled straight pipe[J]. Hot Working Technology, 2023(5): 135-140.  
(王博士, 孔谅, 李芳, 等. TIG 电弧辅助激光焊 TA2 直缝薄壁焊管的组织性能研究 [J]. 热加工工艺, 2023(5): 135-140.)
- [8] Zhou Yang. Research on arc-assisted TA2 thin plate laser welding process and joint performance[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.  
(周洋. 基于电弧辅助的 TA2 薄板激光焊工艺与接头性能研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2020.)

编辑 唐肖