

钛合金搅拌摩擦焊焊具水冷系统设计与研究

梁永红¹, 邵帅², 张栩², 黄福东², 黄永德²

(1. 江西省机械工业设计研究院, 南昌 330046;
2. 南昌航空大学 江西省航空构件成形与连接重点实验室, 南昌 330036)

摘要: **目的** 针对钛合金搅拌摩擦焊过程中, 搅拌头磨损严重的问题, 研制一种搅拌头水冷系统。**方法** 该水冷系统主要由转轴、保护盖、冷却水循环装置、冷却水管、引流罩等 5 部分组成。该装置结构简单、操作方便、装夹可靠。**结果** 搅拌头磨损情况得到改善, 在焊接 0.5 m 后, 搅拌头几乎无磨损, 实现了钛合金的良好连接, 所得接头焊核区最高硬度达 HV527, 显著高于母材。**结论** 通过焊具水冷系统, 可减少搅拌头的磨损, 大大提高了接头质量和焊接效率。

关键词: 钛合金; 搅拌摩擦焊; 水冷系统; 焊具

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2019.05.018

中图分类号: TG453+.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2019)05-0123-04

Design and Research of Water Cooling System for Friction Stir Welding in Titanium Alloy

LIANG Yong-hong¹, SHAO Shuai², ZHANG Xu², HUANG Fu-dong², HUANG Yong-de²

(1. Jiangxi Provincial Design and Research Institute of Mechanical Industry, Nanchang 330046, China;
2. Jiangxi Key Laboratory of Forming and Joining Technology for Aerospace Components,
Nanchang Hangkong University, Nanchang 330036, China)

ABSTRACT: The paper aims to develop a water cooling system for the tools to solve the problem of severe wear of the tools during the friction stir welding of titanium alloy. The water cooling system mainly consists of five parts: a rotating shaft, a protective cover, a cooling water circulation device, a cooling water pipe, and a directional hood. The device has the advantages of simple structure, convenient operation and reliable clamping. After welding for 0.5 m, the tools was almost wear-free, the wear condition of the tools was improved. Good connection of the titanium alloy was achieved. The maximum hardness of the stir zone of joint reached HV527. With the water cooling system for the welding tools, the wear of the tools can be reduced, and the joint quality and welding efficiency can be greatly improved.

KEY WORDS: titanium alloy; friction stir welding; water cooling system; tools

搅拌摩擦焊 (Friction stir welding, FSW) 是由英国 TWI 焊接研究所于 1991 年基于摩擦焊技术原理所发明的一种固相连接技术^[1], 因其具有焊接性能好、搅拌区晶粒细小、残余应力低、变形小等优点, 自问世以来发展十分迅速, 也因此被誉为 21 世纪最具革

命性的焊接技术^[2-4]。

随着搅拌摩擦焊技术和研究的深入和工业生产的需要, 搅拌摩擦焊的研究和发展趋势逐渐转移到高熔点材料方面, 钛合金的搅拌摩擦焊就是其发展的主要方向之一。因为钛合金具有密度低、耐腐蚀性好、比

收稿日期: 2019-07-21

基金项目: 江西省优势科技创新团队重点项目 (20181BCB19002)

作者简介: 梁永红 (1974—), 女, 工程师, 主要研究方向为机械设计、焊接工艺等。

强度高及耐热性、抗低温脆性良好等特性,被广泛应用于多个工业领域^[5-7]。钛合金是当代先进飞机和航空发动机的主要结构材料之一,可大幅度提高结构减重效果和安全可靠性^[8-9]。相比于传统焊接方法,搅拌摩擦焊为钛合金提供了一种新的高质量、低变形、高可靠的焊接手段。

对于钛合金而言,由于其熔点高($0.8T_m$)^[10]且难于塑化,使得搅拌头与被焊材料之间存在着非常强烈的热机作用,搅拌头磨损较大。适用于钛合金FSW的搅拌头材料通常较稀有且价格较高,当搅拌头磨损较为严重时,会使焊接过程无法顺利进行并影响接头质量^[11],更重要的是,搅拌头磨损严重会缩短其寿命,降低了其工程应用的价值,所以,在对于像钛合金这种高熔点材料的搅拌摩擦焊研究中,搅拌头的磨损越来越被人们所关注。但是目前为止,在钛合金等高熔点材料搅拌摩擦焊领域,研究大多集中在工艺、组织、性能等方面^[12-14],焊具设计仅见于介绍性报道及个别专利中,可供参考的详细资料很少^[15-16]。

为了解决钛合金FSW过程中搅拌头磨损严重、焊接效率低的问题,研究一种用于钛合金搅拌摩擦焊焊具水冷系统具有重大意义。

1 水冷系统的组成

搅拌摩擦焊过程中搅拌头产生的热量,一方面作用于被焊接材料,另一方面通过搅拌头的夹持柄向焊接主轴扩散,尤其是钛合金热导率较低,很容易由于热的积累导致焊接设备的损坏。同时钛合金材料在高温环境下具有很高的活性,容易吸收 H_2 、 O_2 、 N_2 等气体,形成脆性相,影响焊接质量,并且,因为钛合金FSW的搅拌头寿命较短,需要进行拆卸。为了解决以上问题,设计了如图1所示的分体式水冷系统,该水冷系统主要由5个部分组成:转轴、保护盖、冷却水循环装置、冷却水管、引流罩。

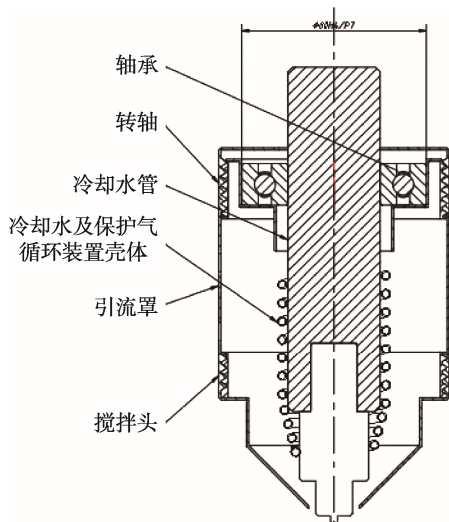


图1 水冷系统整体结构

Fig.1 Schematic diagram of overall structure of water cooling system

1) 转轴。转轴是水冷系统与搅拌摩擦焊设备连接的部分,也是实现将搅拌摩擦焊设备主轴上的转矩传递到搅拌头上的关键部件。转轴通过联轴器与搅拌摩擦焊设备的主轴连接,转轴的下方开有一个沉孔,在沉孔的侧壁上打有3个螺纹孔,用于对搅拌头进行固定。

2) 冷却水循环装置壳体(见图2)。冷却水循环装置壳体通过托架固定在搅拌摩擦焊设备上,并通过轴承与转轴连接,保证在转轴转动的同时壳体不会随着转动,壳体侧壁打有两个圆孔,为进水、出水管连接孔位。

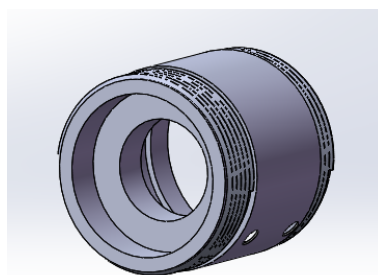


图2 冷却水循环壳体结构

Fig.2 Circulation shell structure of cooling water

3) 冷却水管(见图3)。冷却水管的设计是钛合金构件搅拌摩擦焊焊具水冷系统的核心,水冷系统的目的是带走搅拌头及转轴的热量,从而对焊具进行水冷。在本设计中,冷却水管环绕在转轴及搅拌头周围,可以较好地实现对转轴及搅拌头的冷却。冷却铜管采用“螺旋”型的设计,由于搅拌头的直径较转轴部分直径小,为了能够有更好的冷却效果,环绕在搅拌头周围的冷却铜管螺旋直径较环绕在转轴周围的冷却铜管直径小。使用内卡直通接头将冷却水管固定在冷却水循环装置壳体上,实现与外部进水及出水管连接。



图3 冷却管冷却示意图

Fig.3 Schematic diagram of cooling tube

4) 保护盖(见图4)。保护盖位于冷却水循环装置上方,通过螺纹与下方的冷却水循环装置连接,其设计目的是为了避开杂物及油污进入下方转轴与冷却水循环装置之间的轴承中,避免轴承因此失效。

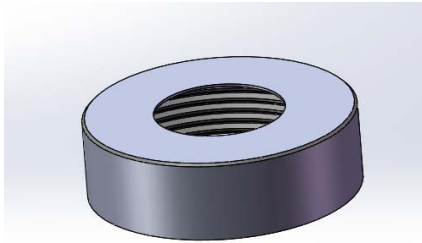


图 4 保护盖的三维图
Fig.4 3D illustration of protective cover

5) 引流罩（见图 5）。引流罩位于冷却水循环装置的下方，通过螺纹与冷却水循环装置壳体连接。其目的主要是为了保护环绕在搅拌头周围的冷却铜管，在接有保护气体时，还能起到一个导流的作用。

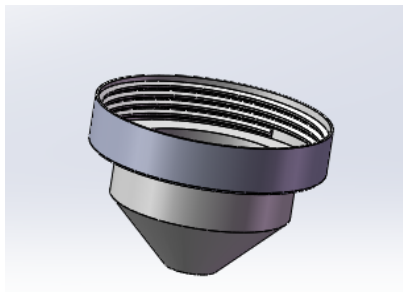


图 5 引流罩三维图
Fig.5 3D illustration of drain cover

2 材料及方法

试验所用材料为厚度 3 mm 的 TC4 钛合金板材，尺寸为 20 mm×8 mm×3 mm，其化学成分如表 1 所示。搅拌头材料选用钨铼合金，其形状设计如图 6 所示。内凹形轴肩的尺寸为 16 mm，搅拌针采用圆锥形设计，

表 1 TC4 钛合金的化学成分（质量分数）
Tab.1 Chemical composition of TC4 titanium alloy
(mass fraction) %

Al	V	Fe	C	N	H	O	Ti
5.5~6.5	3.5~4.5	0.08	0.01	0.3	0.1	0.001	余量

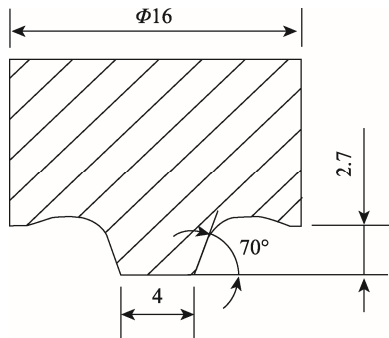


图 6 搅拌头形状设计
Fig.6 Shape design of tool

针长为 2.7 mm。所用焊接参数为转速 $n=300\text{ r/min}$ ，焊接速度 $v=30\text{ mm/min}$ 。焊接完成后采用线切割截取焊缝横截面进行金相观察，金相腐蚀剂为 Kroll 试剂，腐蚀液的体积分数比为 $\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}=1:2:97$ ，腐蚀时间为 3~5 s，使用 401MVD 型维氏显微硬度计对金相试样进行了硬度分析。

3 实验结果分析

采用水冷系统进行焊接时，焊接接头形貌良好，仅在焊缝底部出现个别孔洞缺陷，可以通过增大热输入，即通过增大转速或减小转速来消除。

图 7 所示为实验所采用的搅拌头设计图及原始形貌，其轴肩形状为内凹形，搅拌针形状为圆锥形（圆台形），以便增大产热，减小流动应力。在焊接 0.5 m 后，其形貌如图 8 所示，发现该搅拌头使用效果较好，经观察及测量后发现，搅拌头几乎无磨损，仅在表面出现氧化，有望通过涂层等方式对其进行保护。



图 7 搅拌头原始形貌
Fig.7 Original appearance of tool



图 8 焊接 0.5 m 后搅拌头形貌
Fig.8 Shape of tool after welding for 0.5 m

图 9 为焊接接头的显微硬度，可以看出，焊接接头的硬度呈现不规则的倒“U”形，焊核区出现最高硬度 HV527，相对于母材硬度发生显著提高，已经达到了等强匹配的要求，其强化原因可能是因为在搅拌区的晶粒发生动态再结晶，从而产生了细晶强化。至于有无其他强化原因，还需进一步对其进行实验观察分析。

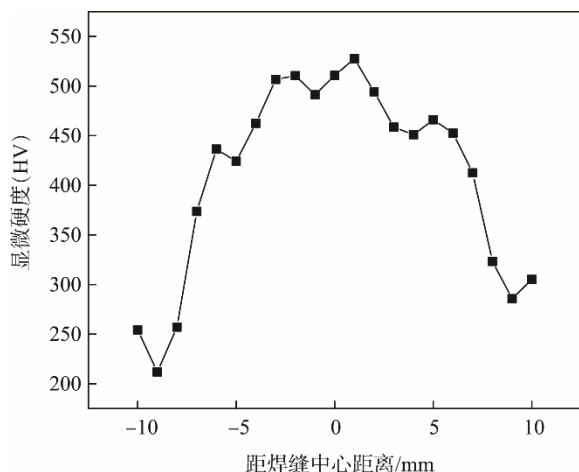


图9 焊接接头显微硬度曲线
Fig.9 Micro-hardness curve of welded joints

4 结论

设计了一种用于钛合金搅拌摩擦焊搅拌头的水冷系统,采用该水冷系统成功实现了钛合金的良好连接,在焊接 0.5 m 后,搅拌头几乎无磨损,说明该水冷系统效果显著,并且与母材相比,其接头的硬度最高可达 HV527,有显著提高,可满足产品性能要求。

参考文献:

- [1] GIBSON B T, LAMMLEIN D H, PRATER T J, et al. Friction Stir Welding: Process, Automation, and Control[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2014, 16(6): 56—73.
- [2] NANDAN R, DEBROY T, BHADOSHIA H K D H. Recent Advances in Friction-stir Welding-process, Weldment Structure and Properties[J]. Progress in Materials Science, 2008, 1(53): 980—1023.
- [3] SANDERS D G, EDWARDS P, CANTRILL A M, et al. Friction Stir-welded Titanium Alloy Ti-6Al-4V: Microstructure, Mechanical and Fracture Properties[J]. Journal of Metals, 2015, 67(5): 1054—1063.
- [4] LIU H J, ZHOU L. Microstructural Zones and Tensile Characteristics of Friction Stir Welded Joint of TC4 Titanium Alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(10): 1873—1878.
- [5] 日本钛协会. 钛材料及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008.
JAPAN Titanium-association. Titanium Material and Its Application[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008.
- [6] BOYERRR, BRIGGS R D. the Use of β Titanium Alloys in the Aerospace Industry[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2005, 14(6): 681—685.
- [7] 张喜燕, 赵永庆, 白晨光. 钛合金及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
ZHANG Xi-yan, ZHAO Yong-qing, BAI Chen-guang. Titanium Alloy and Its Application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [8] 邓炬. 正在崛起的中国钛工业[J]. 稀有金属快报, 2007, 26(6): 1—6.
DENG Ju. the Rising Chinese Titanium Industry[J]. Materials China, 2007, 26(6): 1—6.
- [9] 曹春晓. 钛合金在大型运输机上的应用[J]. 稀有金属快报, 2006, 16(1): 17—21.
CAO Chun-xiao. Application of Titanium Alloy on Large Transport Aircraft[J]. Materials China, 2006, 16(1): 17—21.
- [10] 栾国红, 柴鹏, 孙成斌. 钛合金的搅拌摩擦焊探索[J]. 焊接学报, 2005(11): 83—88.
LUAN Guo-hong, CHAI Peng, SUN Cheng-bin. Exploration of Friction Stir Welding for Titanium Alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005(11): 83—88.
- [11] 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.
ZHOU Ran-hui, GAO Fu-yang, LIU Xiang-qian, et al. Review: Friction Stir Welding Technology for Titanium and Titanium Alloys[J]. Development and Application of Materials, 2018, 33(4): 127—136.
- [12] 谢飞飞. TC4 钛合金搅拌摩擦焊接头组织与性能研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2012.
XIE Fei-fei. Study on Microstructure and Properties of TC4 Titanium Alloy Friction Stir Welding Joint[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2012.
- [13] ZHANG Y, SATO Y S, KOKAWA H, et al. Stir Zone Microstructure of Commercial Purity Titanium Friction Stir Welded Using PCBN Tool[J]. Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 2008, 488(1/2): 25—30.
- [14] MIYAZAWA T, IWAMOTO Y, MARUKO T, et al. Development of High Strength Ir Based Alloy Tool for Friction Stir Welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2012, 17(3): 213—218.
- [15] SEIGHALANI K R, GIVI M K B, NASIRI A M, et al. Investigations on the Effects of the Tool Material, Geometry, and Tilt Angle on Friction Stir Welding of Pure Titanium[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2010, 19(7): 955—962.
- [16] 海敏娜, 王快社, 郝亚鑫, 等. 钛及钛合金搅拌摩擦焊搅拌头最新研究进展[J]. 热加工工艺, 2014, 43(9): 6—8.
HAI Min-na, WANG Kuai-she, HAO Ya-xin, et al. The Latest Research Progress of Friction Stir Welding Tools in Titanium and Titanium Alloy[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(9): 6—8.