

# 搅拌摩擦焊技术及其应用发展

长春轨道客车股份有限公司(130062) 张欣盟 杨景宏 王春生 韩凤武

**摘要** 简单介绍了搅拌摩擦焊 FSW 的技术特征,对当前搅拌摩擦焊 FSW 技术的主要应用领域进行了概述,着重对近些年搅拌摩擦焊的技术发展和最新应用进展进行介绍,同时对搅拌摩擦焊的应用前景进行了展望。

**关键词:** 搅拌摩擦焊 双轴肩搅拌摩擦焊 静轴肩搅拌摩擦焊 搅拌摩擦点焊

**中图分类号:** TG453

## 0 前言

搅拌摩擦焊 FSW (Friction stir welding) 是由英国焊接研究所(The Welding Institute - TWI)发明的一项先进的固相连接技术<sup>[1]</sup>。FSW 对工件的焊接,主要通过焊接工具的高速旋转摩擦、搅拌实现的。其过程实质是一个柱状带特殊轴肩和针凸的搅拌头旋转下扎,使材料发生热塑性变形,随着搅拌头的旋转,其周围的塑化金属向其后方旋转沉积,再通过轴肩的下压填充由搅拌头前进而形成的空穴,从而形成搅拌摩擦焊焊缝<sup>[2]</sup>。该技术成功克服了传统熔焊的技术不足,从原理上可根除铝合金熔焊时的裂纹、气孔等缺陷。FSW 新技术自 1991 年发明以来,以任何一种焊接方法都无可比拟的发展速度,迅速实现了由实验室向大规模工程化应用的跨越,并已在焊接行业获得了良好的声誉。迄今,FSW 技术的铝合金工业化应用最为成熟也最为广泛。并且随着研究的深入,以及先进可靠的自动控制系统、压力传感以及激光跟踪等电子元器件的出现,FSW 的应用将会更加广泛。

文中首先对 FSW 的技术特征进行了简单介绍,同时对当前 FSW 技术的主要应用领域进行了概述,并着重对近些年 FSW 的技术发展进行介绍。

## 1 FSW 技术特征

### 1.1 FSW 技术优势

搅拌摩擦焊为固相焊接技术,即焊接过程中无金属熔化,从而杜绝了焊后接头焊缝区没有气孔和裂纹类缺陷。FSW 过程为一种类似锻造的过程,焊后接头焊缝区得到的是细晶锻造组织,而不是传统弧焊的铸态组织,其力学性能好,接头抗拉强度高,焊接变形小,

相对熔化焊,FSW 热输入低。研究表明铝合金 FSW 焊接时,最高温度一般不超过 480 ℃,相对熔化焊(一般 600 ℃ 以上)小很多。因此,焊后工件中残余应力小、尺寸精度高,据报道,焊接变形可减小为 MIG 焊的 1/12<sup>[3]</sup>,变形量对比如图 1 所示。

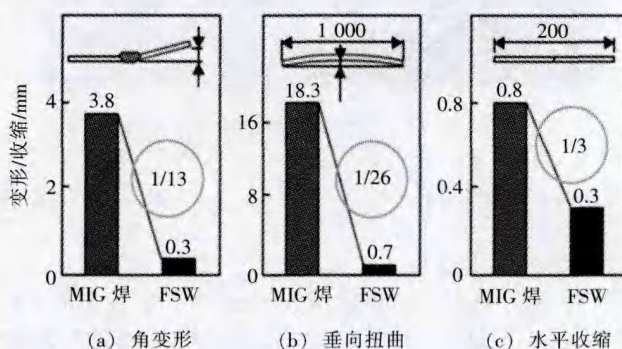


图 1 铝合金 MIG 焊与 FSW 变形对比

FSW 技术是纯机械化的焊接技术,其过程是通过类似于机加工的机床运动实现。焊接过程不受操作者个人技术水平及状态的影响,人为因素小,焊接接头质量稳定。FSW 工艺不需开坡口,不需要填充材料、焊剂和保护气体。FSW 自身具有氧化膜破损功能,通常情况下事先不需进行氧化膜清理。因 FSW 为固相焊,焊接接头的质量受焊接工况环境(如温度、湿度等)影响小,工作厂房不需温湿度设备投入,并节省相应的电能耗。FSW 过程洁净,无弧光、射线、烟雾、粉尘、飞溅等有害物质产生,能够大幅改善一线作业人员的工作环境。

### 1.2 FSW 技术的不足

FSW 过程为热力复合作用过程,一般情况下在焊缝正下方有刚性支撑,因此在进行无法实现刚性支撑的工件焊接时,存在很大困难。另外,FSW 过程为机械运动过程,不适合空间相对狭小,以及待焊路径较为复

杂的工件焊接。

FSW 过程需通过主轴向焊接工件施加较大的锻压力,并且随着焊接材料的厚度增加,所需的锻压力增大(从几十千牛到上百千牛)。这样焦点问题就是在保证很大顶锻压力的情况下,设备的稳定性如何保证。特别是对于用于实现长大部件 FSW 焊接的动龙门式设备,问题更为突出。

FSW 焊接时,搅拌头的前端搅拌针扎入工件内部,在结束焊接时,随着搅拌头的向上提升,将会在工件的焊缝末端留有与搅拌针相对应的凹坑-匙孔,如图 2 所示。这将造成焊缝的不完整,很多情况下都需切割去除,而且在进行环焊缝焊接时,匙孔问题处理起来更为繁琐。

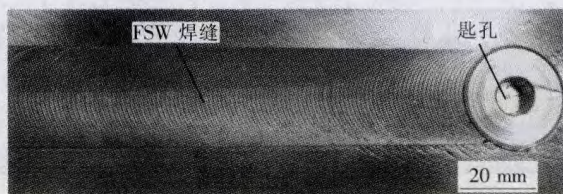


图 2 铝合金搅拌摩擦焊焊缝外观照片

## 2 FSW 技术应用

### 2.1 航空航天领域

轻量化一直为航空航天工业追求的目标,如飞机机翼、运载火箭燃料贮箱等部件都采用比强度较高的 2000 及 7000 系列铝合金材料(图 3)。在航空航天领域,波音公司最早实现了实际产品的 FSW 工艺技术应用。据波音公司报道,FSW 已成功代替熔化焊,实现了大型空间运载工具,如运载火箭和航天飞机等大型高强铝燃料贮箱的加工制造。在航空领域,美国月蚀航空公司走在了 FSW 技术研究应用的前列,该公司于 1997 年启动 FSW 技术在飞机制造中的应用研究,并于 2002 年通过飞行认证<sup>[4]</sup>。



图 3 飞机部件 FSW 应用照片

### 2.2 船舶制造领域

1995 年,挪威 Hydro Marine Aluminum 公司成功地将 FSW 技术应用在铝合金快速舰船的甲板、侧板等构件的流水线制造。从 1996 ~ 1999 年,已经成功焊接了 1 700 块船舶面板,焊缝总长度超过 110 km。之后,日本和澳大利亚的造船公司,相继在船舶的结构制造过程中大量采用 FSW 技术,如制造渔船的冷藏箱板、高速货船的甲板、侧墙等构件。日本的 Sumitomo 轻金属公司采用 FSW 技术实现了铝质蜂窝结构件和耐海水板材的焊接<sup>[4]</sup>。

### 2.3 汽车制造领域

2000 年,TOWER 等公司成功利用 FSW 技术实现了汽车悬挂支架、轻合金车轮、防撞缓冲器、发动机安装支架以及铝合金车身的焊接。并且 TWI 与德国宝马公司研究了 FSW 在汽车车身生产制造中的应用。主要用于实现汽车底盘、大梁、车轮、邮箱等结构的加工焊接。在瑞典,FSW 技术已用于铝质汽车零部件的大规模生产。

### 2.4 轨道车辆领域

在轨道车辆制造领域,日本 HITACHI 公司首先于 1997 年将 FSW 技术应用于铝合金车体部件的加工制造。日本轻金属公司、瑞典的 SAPA 公司已将 FSW 工艺用于地铁车辆铝模块部件焊接。近些年,随着轨道客车高速安全、轻质降噪的发展需求,铝合金车体主要结构材料大量采用了特别适合于 FSW 焊接的大型铝合金中空挤压型材,其中常用 FSW 焊接接头形式如图 4 所示。

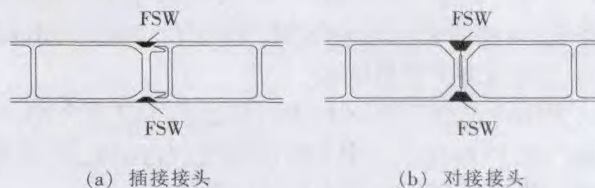


图 4 铝合金车体挤压型材搅拌摩擦焊接头形式

目前,国外知名轨道客车厂商,如西门子、庞巴迪、阿尔斯通、日立等公司都已大量采用 FSW 技术进行铝合金车体的制造。近些年,国内各大车辆厂商都已启动针对 FSW 技术应用的研究开发,并已不同程度地实现了产品部件加工应用。

## 3 FSW 技术发展

### 3.1 双轴肩 FSW (Bobbin tool FSW - BTFSW)

双轴肩 FSW 技术作为一种新型的搅拌摩擦焊技

术,是对传统 FSW 技术的一种补充。在双轴肩的搅拌头中,一个共用的搅拌针连接上/下两个轴肩,每个轴肩分别与工件的两个表面接触,下面的轴肩代替了背部的刚性支撑垫板,从而大大降低了焊接过程中的顶锻力,减少了背部工装的要求。同时,双轴肩技术的出现使得三维曲面结构件的 FSW 焊接更容易实现<sup>[5]</sup>。根据双轴肩搅拌头的结构形式的不同,其可分为固定式双轴肩及自适应式双轴肩。其中,前者搅拌头结构简单,但因上、下轴肩距离固定,对工件的板材厚度变化适应性不强。而由 MTS 公司设计提出的自适应双轴肩 FSW,其搅拌头形式如图 5 所示。该双轴肩模式的优势在于工作过程中,上下轴肩距离可根据所焊材料板厚自动调节,从而大大降低了待焊工件及其装配精度要求。

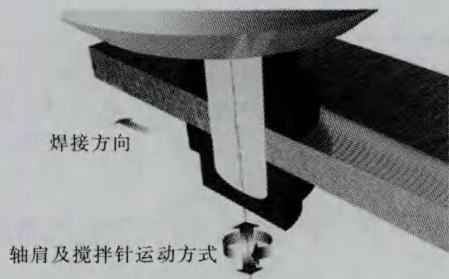


图5 自适应双轴肩搅拌摩擦焊示意图

### 3.2 静轴肩 FSW (Stationary Shoulder FSW - SSFSW)

常规 FSW 轴肩与被焊材料之间的摩擦是实现材料间连接的主要热源。此时需要较大的轴向力才能产生足够的热量并保证良好的焊缝成形。此时,焊接过程中主轴承承受的扭矩和前进阻力较大,所需电机功率较大。同时,为解决例如钛合金等熔点高、热导率低材料的 FSW 焊接,以及角焊缝的焊接,美国的 Callahan<sup>[6]</sup>和 TWI 的 Daries 等人<sup>[7]</sup>提出了静轴肩 FSW 技术。相对常规 FSW,SSFSW 工作时由于仅有内部搅拌针旋转而外部轴肩不转动,因此焊接过程中热输入量相对更低、变形更小,并且焊缝表面无螺旋纹,且可避免下压减薄而导致接头性能的降低。而且因 SSFSW 技术的出现,使得角焊缝和 T 形接头的 FSW 焊接成为可能,如图 6 所示。但直至今日,静轴肩搅拌摩擦焊技术尚处于研究阶段。

### 3.3 FSW 点焊 (Friction stirspot welding - FSSW)

搅拌摩擦点焊 (FSSW) 突破了铝板连接的传统技术。该技术采用与传统 FSW 工艺相同的技术原理,无需任何辅助材料,搅拌头旋转扎入被焊工件的界面处,

利用摩擦生热和搅拌头高速旋转使搅拌头附近的被焊接材料升温并塑化,进而使两层或两层以上轻金属板材以点连接的形式连接在一起,FSSW 搅拌头组成如图 7 所示。与传统电阻点焊、铆接等单点连接相比,FSSW 较电阻点焊能耗低,并且不需要焊前预处理,焊接过程中不会产生烟尘和飞溅,而且接头质量高。该技术在汽车领域具有广阔的应用前景。

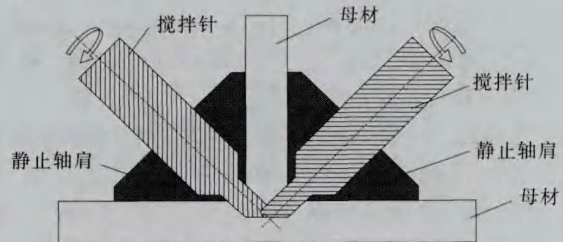


图6 静轴肩 FSW T形接头焊接示意图

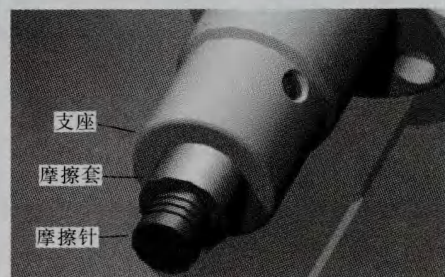


图7 FSSW 搅拌头组成

### 3.4 复合 FSW 技术 (Hybrid FSW - HFSW)

FSW 主要是依靠搅拌头与工件间的摩擦产热,焊接过程中需要相对较大的压紧力和沿焊接前进方向的进给力,所以通常情况下,设备体积较大且极为笨重。而且,在进行高熔点材料的焊接时,问题更为突出。为克服 FSW 的不足,G. Kohg 等人<sup>[8]</sup>提出了激光-搅拌摩擦焊复合工艺。同时,还有采用电弧<sup>[9]</sup>、超声<sup>[10]</sup>、电阻热<sup>[11]</sup>等热源辅助 FSW 技术的研究。此外,日本大阪大学 Hidetoshi Fujii 等人采用高频电阻感应辅助加热方法,进行钢材的 FSW 点焊工艺开发。

## 4 结束语

FSW 焊接工艺可以部分取代传统熔焊,以及电阻点焊和铆接技术,尤其适合于长大部件的焊接。现今,FSW 技术已在铝合金焊接方面展现出了显著优势,并已广泛应用于航空航天、造船、汽车、轨道车辆等工业领域。随着 FSW 技术的研究和高熔点材料搅拌工具的开发,以及空间曲线焊接技术的推广,FSW 技术的应

用领域会更加广泛。

参 考 文 献

[1] Thomas W M, Nicholas E D. Friction stir welding for the transportation industries [J]. *Materials and Design*, 1997, 18(4-6): 269-273.

[2] 张 华, 林三宝, 吴 林, 等. 搅拌摩擦焊研究进展及前景展望[J]. *焊接学报*, 2003, 24(3): 93-96.

[3] Hideshi Ohba, Chiaki Ueda, Kouji Agatsuma. Innovaiton vehicle the a-train[J]. *Hitachi Review*, 2001, 50(4): 130-133.

[4] 王训宏, 王快社. 搅拌摩擦焊的发展现状及存在问题[J]. *焊接技术*, 2006, 35(6): 1-4.

[5] 张 建, 李 光, 李从卿, 等. 2219-T4 铝合金双轴肩 FSW 与常规 FSW 接头性能对比研究[J]. *焊接*, 2008(11): 50-52.

[6] Widener C A, Talia J E, Tweedy B M, et al. High-rotational speed friction stir welding with a fixed shoulder [C]. 6th International symposium on friction stir welding, Montre-

al, Canada, 2006:10-13.

[7] Davies P S, Wynne B P, Rainforth W M, et al. Development of microstructure and crystallographic texture during stationary shoulder friction stir welding of Ti-6Al-4V [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2011, 42(8):2278-2289.

[8] Kohg G, Greenberg Y, Makover I, et al. Laser-assisted friction stir welding [J]. *Welding Journal*, 2002(3):46-48.

[9] Kou S, Cao G. Arc-enhanced friction stir welding method: U. S. Patent 7, 078, 647[P]. 1999-8-13.

[10] Ding R J. Ultrasonic stir welding process and apparatus: U. S. Patent 7, 568, 608[P]. 2009-8-4.

[11] Spinella D J, Streicher E T, Kastelic R. Resistance heated atir welding: U. S. Patent 5, 829, 664[P]. 1998-11-3.

作者简介: 张欣盟, 1980 年出生, 博士, 工程师。主要从事轨道车辆焊接工艺研究, 已发表论文 10 余篇。

· 书 讯 ·

1 最新手工电弧焊技术培训	26.40 元	22 焊接工装夹具及变位机械·性能设计选用	16.80 元
2 现代表面技术	33.60 元	23 焊接结构现代无损检测技术	15.50 元
3 电气工程师便携手册	50.40 元	24 钢熔焊接头金属学	26.40 元
4 晶闸管整流弧焊机设计与调试	22.00 元	25 焊工考试标准化试题及解答	34.80 元
5 焊接材料产品样本	36.00 元	26 焊工取证上岗培训教材	40.80 元
6 低合金结构钢的焊接	7.00 元	27 空气等离子弧切割机的原理和设计	24.00 元
7 焊接手册[美]第四卷 金属及其焊接性	21.50 元	28 焊接设计简明手册	38.40 元
8 焊工培训指南——锅炉 压力容器的焊接	21.00 元	29 先进材料的焊接	30.00 元
9 逆变焊接与切割电源	35.00 元	30 高级电焊工技术	22.00 元
10 简明钎焊工手册	24.00 元	31 弧焊过程质量实时传感与控制	12.00 元
11 国际焊工培训	40.00 元	32 焊工手册——埋弧焊、气体保护焊、电渣焊、等离子弧焊	69.60 元
12 上岗之路——电焊工入门	20.00 元	33 计算机辅助焊接技术	43.20 元
13 袖珍焊工手册	31.00 元	34 电气工程师便携手册	50.40 元
14 焊工技师手册	72.00 元	35 焊接手册(3)——焊接结构	117.60 元
15 简明焊工手册	46.80 元		
16 表面工程	24.00 元		
17 CO <sub>2</sub> 焊接设备原理与调试	33.60 元		
18 电焊机维修简明问答	19.00 元		
19 电阻焊技术	18.00 元		
20 焊接工艺 500 问	28.80 元		
21 焊接技术问答	33.60 元		

以上定价含邮费, 欲购者请通过邮局将款汇至:

邮 编: 150028

地 址: 哈尔滨市松北区创新路 2077 号

联系人: 焊接编辑部

电 话: 0451-86325919