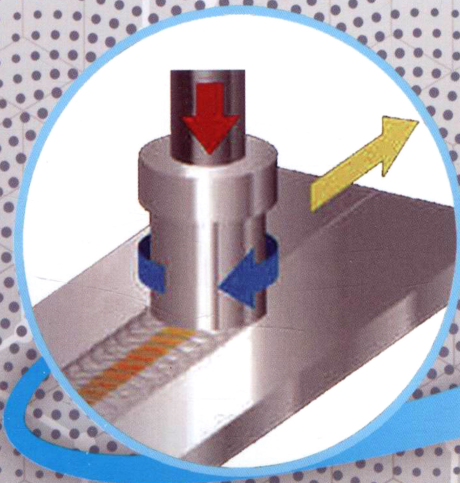


搅拌摩擦 焊接技术

Friction Stir Welding Technology

湖南省焊接协会 组编

陈玉华 胡煌辉 黄春平 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

搅拌摩擦焊接技术

组编 湖南省焊接协会
主编 陈玉华 胡煌辉 黄春平
编著 陈玉华 胡煌辉 黄春平
李志明 文 灏 屈利君
钱锦文 张璟瑜 陈志强
黎浩然 胡 丰 易忠奇



机械工业出版社

本书对搅拌摩擦焊的设备、技术、工艺、检测、缺陷修复等方面进行系统的介绍。本书共九章，主要内容包括搅拌摩擦焊概述、搅拌摩擦焊设备、搅拌摩擦焊焊接工艺、铝合金搅拌摩擦焊焊接接头组织与性能、搅拌摩擦焊缺陷、搅拌摩擦焊检测技术、搅拌摩擦焊接头缺陷修复工艺技术、搅拌摩擦焊工艺评定及标准、搅拌摩擦焊技术的发展。教材中还配有不少应用实例，来进一步介绍搅拌摩擦焊技术的适应性，给初学者以深入浅出的引导。

本书可作为职业院校机电一体化专业教学用书，也可供从事搅拌摩擦焊工作的相关人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

搅拌摩擦焊接技术/陈玉华，胡煌辉，黄春平主编. —北京：机械工业出版社，2018.4

ISBN 978-7-111-59545-8

I. ①搅… II. ①陈… ②胡… ③黄… III. ①摩擦焊—教材—高等职业教育—教材 IV. ①TG453

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 062163 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：侯宪国 责任编辑：侯宪国

责任校对：王 延 封面设计：张 静

责任印制：常天培

2018 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·9.75 印张·2 插页·225 千字

0 001—3000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-59545-8

定价：39.80 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线：010-88379833

机工官网：www.cmpbook.com

读者购书热线：010-88379649

机工官博：weibo.com/cmp1952

教育服务网：www.cmpedu.com

封面防伪标均为盗版

金书网：www.golden-book.com

《搅拌摩擦焊接技术》编辑委员会

主任委员：马克湘

委 员：（按姓氏笔画排序）

毛军明 李志明 杨翠明 张文兵 陈玉华

胡煌辉 柯黎明 洪 波 唐汝元 黄立新

主 编：陈玉华 胡煌辉 黄春平

编 著：（按姓氏笔画排列）

陈玉华 胡煌辉 黄春平 文 灏 李志明

张璟瑜 陈志强 易忠奇 屈利君 胡 丰

钱锦文 黎浩然

主 审：柯黎明 洪 波

序

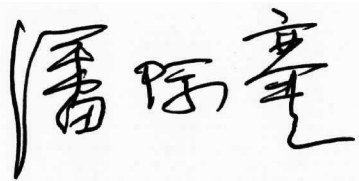
搅拌摩擦焊（FSW）由英国焊接研究所于1991年发明，因其“优质”、高效、节能、环保”的特点被誉为“世界焊接史上的第二次革命”和“绿色焊接技术”。随着FSW在铝合金连接应用上的巨大成功，其应用对象迅速扩展到镁合金、铜合金、钛合金、钢铁、金属基复合材料及异种金属材料。目前，FSW在航空航天、轨道交通、船舶、能源、电子等现代制造业中广泛应用并展现出巨大的发展空间。作为一种新型制造产业，搅拌摩擦焊技术正在世界范围内兴起！

自2002年我国引进搅拌摩擦焊技术以来，搅拌摩擦焊技术发展迅速，并取得了突出的成果，越来越广泛地被了解和接受，正逐步形成规模化、工业化应用。伴随而来的是搅拌摩擦焊技术与操作人才的供求矛盾日益突出，培养体系还没有建立，没有学校开设搅拌摩擦焊技术与应用的课程，更看不到一本系统的搅拌摩擦焊教材，这种现状将会严重阻碍我国搅拌摩擦焊技术的发展。

令人欣慰的是由湖南省焊接协会牵头，联合南昌航空大学、湘潭大学、湖南九方焊接技术有限公司、中车株洲电力机车有限公司、张家界航空工业职业技术学院、湖南工业技师学院、湖南机电职业技术学院等单位的搅拌摩擦焊专家、教师及工程技术人员，共同编著了《搅拌摩擦焊接技术》。这一专业教材是当前国内第一本系统讲述搅拌摩擦焊设备、工艺及应用的教科书，也是首本针对职业院校搅拌摩擦焊课程的教材，对广大搅拌摩擦焊技术与操作人员更是一本实用工具书。

专业协会牵头，学校、企业共同参与教材编写，是一种形式创新，教材内容更加丰富实用，具有理论与实际结合紧密，可操作性强，通俗易懂的特点，对搅拌摩擦焊人才培养和技术推广意义重大。有感于编著团队敢为人先，勇于担当，积极探索，技术报国的精神，欣然作序。

搅拌摩擦焊作为制造业一种新型的连接技术，正在展示其越来越强大的生命力。学好、用好搅拌摩擦焊技术是时代的需要，更是我们建设制造强国的必须。期待每位学习者的用心和创造力为搅拌摩擦焊技术的发展提供助推。



前 言

搅拌摩擦焊技术发明至今，经过国内外学者专家的试验研究，企业机构的应用推广，使其成为有色轻金属结构制造中有效替代熔焊技术的实现工业化应用的新型连接技术，并且正在不断提升技术和经济效益。搅拌摩擦焊技术在提高接头和结构的连接质量、降低焊接变形、实现绿色制造等方面正在凸现出越来越明显的优势。目前，与搅拌摩擦焊技术相适应的新装备和新工具的发展也非常快，各种类别的新型搅拌摩擦焊设备、装置及三维搅拌摩擦焊机相继问世，搅拌摩擦焊在攻克高熔点金属（普通碳钢、不锈钢、钛合金、高温合金等）材料连接中的难题方面也取得不少成果。同时，一些发达和发展中国家正在寻求搅拌工具的类型体设计优化与材料萃取，焊接过程的多方位、多工况、多参数监控及焊接质量实时在线检测和控制，搅拌摩擦焊技术工艺及检测标准也正日益完善。

搅拌摩擦焊技术的发展及生产应用方兴未艾。要将搅拌摩擦焊技术更多更快地转化为生产力，必须培训出适应企业需求的人才。目前搅拌摩擦焊的论文不少，但搅拌摩擦焊的教材却罕见。搅拌摩擦焊技术是当今焊接技术的革命性创新，它的低能耗、无污染、高性能凸显其优越性，而易实现智能化制造更提高了该技术的应用前景。为了适应《中国制造 2025》的要求，也为了焊接这一门传统专业的持续发展，更为了焊工技能的世纪传承，我们要尽快把搅拌摩擦焊技术推广应用到各行各业中去。可以预期：在人们愈来愈重视环境保护和能源节约的现在，搅拌摩擦焊技术应用很快就会有有一个“井喷”的过程出现，而操作人才的需求会成为瓶颈。

基于此，湖南省焊接协会联合南昌航空大学、湖南九方焊接技术有限公司、中车株洲电力机车有限公司、湘潭大学、湖南工业技师学院、张家界航空职业技术学院、湖南机电职业技术学院，组织开展搅拌摩擦焊教材编写工作，组成了以协会会长马克湘教授为主任委员的编辑委员会，推荐陈玉华教授、胡煌辉研究员、黄春平副教授担任主编，约请柯黎明教授、洪波教授担任主审。全体编著人员在大量收集整理相关资料的前提下，更多的是将自己多年工作成果和实践经验融入本教材，使得本书既体现了搅拌摩擦焊发明以来的主要发展成果又汇集了很多实例。

本书共 9 章，分别由陈玉华、胡煌辉、黄春平、李志明、文灏、屈利君、钱锦文、张璟瑜、胡丰、黎浩然、易忠奇、陈志强编写。本书是一本针对职业院校机电一体化专业的实用教材，也供从事搅拌摩擦焊工作的相关人员参考。好的技术需要大家的推广，用好技术才能跟上时代的步伐。感谢众多的搅拌摩擦焊研究者、学者、专家的辛劳付出给这本书提供了很多素材，感谢机械工业出版社对本书出版的支持，感谢为本书的编辑、出版提供帮助的企业和学校。

鉴于搅拌摩擦焊技术本身的特点和其仍处于发展的阶段，还有很多技术需要大家进一步探索和验证，本书难免存在不足之处，恳请读者指正。

目 录

序

前言

第 1 章 搅拌摩擦焊概述	1
1.1 搅拌摩擦焊的原理	1
1.2 搅拌摩擦焊的特点	2
1.3 搅拌摩擦焊焊接结构的接头形式	2
1.4 搅拌摩擦焊技术应用	3
1.4.1 搅拌摩擦焊技术在航空航天制造业的应用	4
1.4.2 搅拌摩擦焊技术在船舶制造业的应用	6
1.4.3 搅拌摩擦焊技术在轨道交通制造业中的应用	7
1.4.4 搅拌摩擦焊技术在其他制造业上的应用	9
1.5 搅拌摩擦焊技术的基本术语	10
本章知识点和技能点	11
第 2 章 搅拌摩擦焊设备	12
2.1 搅拌摩擦焊设备的分类	12
2.1.1 按焊缝空间分布的分类	12
2.1.2 按设备结构形式的分类	14
2.2 典型搅拌摩擦焊设备	17
2.2.1 ESAB SuperStir™ 搅拌摩擦焊设备	17
2.2.2 FW22 搅拌摩擦焊设备	17
2.2.3 VARIAX® 系列搅拌摩擦焊设备	17
2.2.4 国产搅拌摩擦焊设备	18
2.3 搅拌摩擦焊设备的结构	18
2.3.1 搅拌摩擦焊设备的主机	19
2.3.2 搅拌摩擦焊设备的焊接工装	22
2.4 搅拌头的特点与功能	25
2.5 搅拌头的构成与作用	25
2.6 搅拌头材料的选择	26
2.6.1 搅拌头材料的选择依据	26
2.6.2 常用搅拌头材料的性能	27
2.7 搅拌头的设计	30
2.7.1 搅拌头的设计原则	30
2.7.2 不断发展的搅拌头形状	32
2.8 工程常用的搅拌头	35
2.9 搅拌头的开发改进思路	36
2.10 搅拌摩擦焊设备基本操作与数控编程	37
2.10.1 搅拌摩擦焊设备基本操作	37

2.10.2 数控编程	39
本章知识点和技能点	41
第3章 搅拌摩擦焊焊接工艺	42
3.1 搅拌摩擦焊焊接参数	42
3.1.1 焊接速度	42
3.1.2 搅拌头转速	43
3.1.3 搅拌头倾角	43
3.1.4 轴肩压力	43
3.1.5 接头表面状态	44
3.1.6 搅拌头对中偏移量	44
3.1.7 焊接装配	45
3.2 搅拌摩擦焊典型焊接参数	46
本章知识点和技能点	48
第4章 铝合金搅拌摩擦焊焊接接头组织与性能	49
4.1 搅拌摩擦焊焊接接头组织	49
4.1.1 焊缝外观形貌	49
4.1.2 搅拌摩擦焊焊接接头宏观组织	50
4.1.3 搅拌摩擦焊焊接接头微观组织	50
4.2 铝合金搅拌摩擦焊焊接接头力学性能	55
4.2.1 铝合金搅拌摩擦焊焊接接头性能优势	55
4.2.2 搅拌摩擦焊焊接接头力学性能	56
4.2.3 搅拌摩擦焊焊接接头力学性能的各层异性现象	58
4.3 接头显微硬度	58
4.3.1 典型铝合金搅拌摩擦焊焊接接头显微硬度	58
4.3.2 焊接参数对接头显微硬度的影响	59
4.3.3 搅拌摩擦焊焊接接头显微硬度的各层异性	59
4.4 接头断口分析	60
4.5 案例分析	62
4.5.1 5083 铝合金搅拌摩擦焊接头微观组织	62
4.5.2 断口形貌	62
本章知识点和技能点	64
第5章 搅拌摩擦焊缺陷	65
5.1 表面缺陷	65
5.1.1 飞边	65
5.1.2 匙孔	66
5.1.3 表面下凹	66
5.1.4 毛刺	67
5.1.5 起皮	68
5.1.6 背部粘连	68
5.1.7 表面犁沟	69
5.2 内部缺陷	70
5.2.1 未焊透	70



5.2.2 弱结合	71
5.2.3 孔洞型缺陷	72
5.2.4 结合面氧化物残留	74
本章知识点和技能点	75
第6章 搅拌摩擦焊检测技术	76
6.1 破坏性检验	76
6.2 超声波检测	76
6.2.1 超声波检测的原理及特点	76
6.2.2 常规超声波检测	77
6.3 相控阵超声波检测	79
6.3.1 相控阵超声波检测的基本原理	80
6.3.2 相控阵超声波声束扫描模式	81
6.3.3 相控阵超声波检测特点	81
6.3.4 相控阵超声波检测设备	82
6.4 X射线检测	83
6.4.1 X射线检测的原理	83
6.4.2 X射线检测的特点	84
6.4.3 X射线检测的应用	85
6.5 渗透检测	86
6.5.1 渗透检测的原理	86
6.5.2 渗透检测的分类	87
6.5.3 渗透检测的特点	88
6.5.4 渗透检测的应用	88
本章知识点和技能点	89
第7章 搅拌摩擦焊接头缺陷修复工艺技术	90
7.1 搅拌摩擦焊接头中常见缺陷的修复方法	90
7.2 匙孔处理工艺技术	90
7.3 飞边处理工艺	91
7.4 补焊工艺	91
7.5 摩擦塞焊工艺	92
7.5.1 摩擦塞焊原理	92
7.5.2 摩擦塞焊分类	93
7.5.3 摩擦塞焊工艺	93
7.6 孔洞型缺陷处理工艺	99
本章知识点和技能点	99
第8章 搅拌摩擦焊工艺评定及标准	100
8.1 工艺评定	100
8.1.1 工艺评定目的	100
8.1.2 工艺评定流程	100
8.2 工艺评定标准	100
8.2.1 国际标准	100
8.2.2 国家标准	113

8.2.3 行业内标准	113
8.2.4 其他标准	122
8.2.5 搅拌摩擦焊常见术语	124
本章知识点和技能点	126
第9章 搅拌摩擦焊技术的发展	127
9.1 双轴肩搅拌摩擦焊	128
9.1.1 固定式双轴肩搅拌摩擦焊	128
9.1.2 浮动式双轴肩搅拌摩擦焊	128
9.2 静轴肩搅拌摩擦焊	129
9.3 双头搅拌摩擦焊	130
9.4 流动搅拌摩擦焊	131
9.5 复合热源搅拌摩擦焊	132
9.6 超声搅拌摩擦复合焊	134
9.7 搅拌摩擦点焊	136
9.8 机器人搅拌摩擦焊	139
9.9 水下搅拌摩擦焊	140
9.10 阵列射流冲击热沉搅拌摩擦焊	141
9.11 高熔点材料的搅拌摩擦焊	142
本章知识点和技能点	143
参考文献	144

第 1 章 搅拌摩擦焊概述

本章重点

搅拌摩擦焊的原理；搅拌摩擦焊的特点。

搅拌摩擦焊（Friction Stir Welding, FSW）是利用摩擦产生的热量实现板材连接的一种固态连接技术，由英国焊接研究所（TWI）于 1991 年发明。这种方法打破了原来摩擦焊只限于圆形断面材料焊接的概念，对于铝合金、镁合金、铜及其合金、钛合金、钢以及不少异种材料的焊接，均可获得性能优良的焊接接头。搅拌摩擦焊技术发明至今，已经发展成为在铝合金结构制造中可以替代熔焊技术的工业化实用的固相连接技术，在航空航天飞行器、高速舰船快艇、高速轨道列车、汽车等轻型化结构以及各种铝合金型材拼焊结构的制造中，已经展示出显著的技术和经济效益。

1.1 搅拌摩擦焊的原理

搅拌摩擦焊的原理如图 1-1 所示。它是利用一种带有搅拌针和轴肩的特殊形式的焊接工具（称之为搅拌头）进行焊接，在焊接过程中搅拌针要以一定速度旋转着插入被焊材料的结合界面处，通过插入工件接缝内的搅拌针、轴肩与被焊工件摩擦所产生的摩擦热的共同作用，同时结合搅拌头对焊缝金属的挤压，使得被焊工件处于高塑性状态，在搅

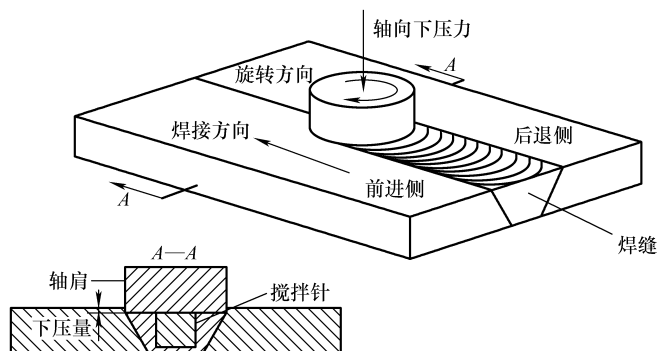


图 1-1 搅拌摩擦焊原理

拌头的高速搅拌和轴肩的挤压下，被焊工件材料从后退侧绕过探针到前进侧尾部，在热-机联合作用下形成致密的金属间结合，而后冷却形成固态焊缝，实现材料的连接。

在形成搅拌摩擦焊接头时，摩擦生热是使材料待焊部位温度升高达到塑性状态的基本要素，工件中的温度分布、塑性区的大小与摩擦生热的速率有关；而搅拌头的搅拌是形成致密焊缝的充分条件，只有通过搅拌头的搅拌给其周围塑化金属提供驱动力，才能使搅拌头沿焊缝方向移动时，搅拌头周围的塑化金属由搅拌头的前方向后方流动，并在搅拌头和周围金属的挤压下形成致密的焊缝。



1.2 搅拌摩擦焊的特点

传统焊接方法一般都是通过熔焊或钎焊等技术对金属实现焊接，焊接过程中由于发生冶金反应，容易产生金属间化合物及气孔等缺陷。与传统熔焊方法和普通摩擦焊相比，搅拌摩擦焊有以下优点：

1) 焊接接头质量高，不易产生缺陷。焊缝是材料在塑性状态下受挤压完成的，属于固相焊接，因而其接头不会产生与凝固冶金相关的焊接缺陷，如裂纹、气孔、合金元素的烧损和组织脆化，适于焊接铝、铜、铅、钛、锌、镁等有色金属及其合金以及钢铁材料、复合材料等，也可用于异种材料的连接。

2) 不受轴类零件的限制，可进行平板的对接和搭接，可焊接直焊缝、角焊缝及环焊缝，可进行大型框架结构及大型筒体制造、大型平板对接等，扩大了应用范围。

3) 易于实现机械化、自动化，质量比较稳定，重复性高。搅拌摩擦焊焊接参数少，焊接设备简单，容易实现自动化，从而使焊接操作十分简便，焊机运行和焊接质量的可靠性大大提高。

4) 焊接成本较低，效率高。无须填充材料、保护气体，焊前无须对焊件表面进行预处理，焊接过程中无须施加保护措施，厚焊接件边缘不用加工坡口；焊接铝材工件时不用去氧化膜，只需去除油污即可；对接时允许留一定间隙，不苛求装配精度。

5) 焊接变形小，焊件尺寸精度较高。由于搅拌摩擦焊为固相焊接，其加热过程具有能量密度高、热输入速度快等特点，因而焊接变形小，焊后残余应力小。在保证焊接设备具有足够大的刚度、焊件装配定位精确以及严格控制焊接参数的条件下，焊件的尺寸精度高。

6) 绿色焊接。焊接过程中无弧光辐射、烟尘和飞溅，噪声低，因而搅拌摩擦焊是一种高质量、低成本的“绿色焊接方法”。

同时，搅拌摩擦焊也存在一些不足，主要表现在：

- 1) 焊接工具的设计、过程参数及力学性能只对较小范围、一定厚度的合金适用。
- 2) 搅拌头的磨损相对较快。
- 3) 需要特定的夹具，设备的灵活性差。

1.3 搅拌摩擦焊焊接结构的接头形式

搅拌摩擦焊焊接结构的设计应当满足下列基本要求：

- 1) 实用性。焊接结构必须达到产品所要求的使用功能和预期效果。
- 2) 可靠性。焊接结构在使用期内必须安全可靠，受力必须合理，能满足强度、刚度、稳定性、抗振性、耐蚀性等方面的要求。
- 3) 工艺性。焊接结构必须能够方便地进行焊接操作，其中包括金属材料具有良好的焊接性、结构的焊前预加工、焊后处理、焊接与检验操作的可达性等。此外，焊接结构也应易于实现机械化和自动化焊接。
- 4) 经济性。制造焊接结构时，所消耗的原材料、能源和工时应最少，其综合成本应尽

可能低。

焊接接头是焊接结构的最基本要素，接头形式是焊接结构设计的重要内容之一。焊接接头的种类和形式很多，可以从不同的角度将它们加以分类。例如，可按所采用的焊接方法、接头形式以及坡口形状、焊缝类型等来分类。根据接头形式的不同，搅拌摩擦焊可以实现棒材-棒材、管材-管材、板材-板材的可靠连接，接头形式可以设计为对接、搭接、角接及 T 形接头，可进行环形、圆形、立体焊缝的焊接。由于重力对这种固相焊接方法没有影响，搅拌摩擦焊可以用于全位置焊接，如横焊、立焊、仰焊、环形轨道自动焊等。常见搅拌摩擦焊接头形式如图 1-2 所示。

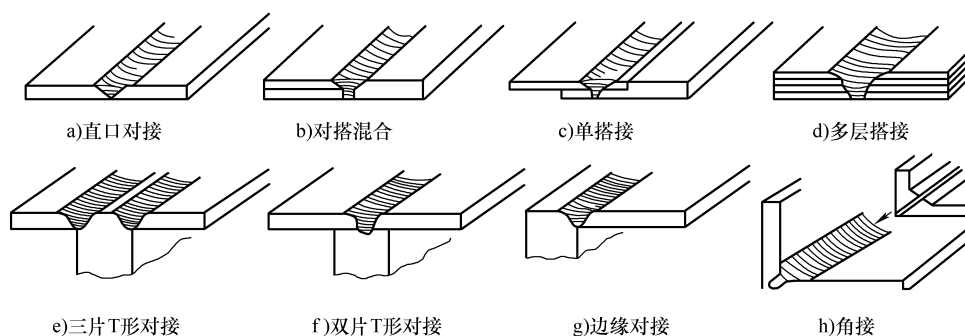


图 1-2 搅拌摩擦焊的接头形式

搅拌摩擦焊焊接接头形式的选择要充分考虑结构特点、材料特性、接头工作条件和经济性等。

1.4 搅拌摩擦焊技术应用

搅拌摩擦焊技术自问世以来，受到了世界主要工业发达国家研究机构的极大重视，英国焊接研究所、美国爱迪生焊接研究所、洛克希德·马丁航空航天公司、马歇尔航天飞行中心、德克萨斯大学、德国 Stuttgart 大学、澳大利亚 Adelaide 大学、澳大利亚焊接研究所等都从不同的角度进行了专门的研究。在我国，北京航空制造工程研究所于 1998 年率先开展搅拌摩擦焊的跟踪研究，并于 2002 年 4 月与英国焊接研究所合作，成立中国搅拌摩擦焊中心。南昌航空大学、哈尔滨工业大学、天津大学、西北工业大学、兰州理工大学、江苏科技大学、西安建筑科技大学、沈阳航空航天大学、燕山大学和大连交通大学等众多高校以及上海航天设备制造总厂、中科院沈阳自动化研究所、昆山华恒焊接股份有限公司、湖南九方焊接技术有限公司等企业和研究机构也相继进入这个研究领域。

搅拌摩擦焊接技术的应用开发和基础理论研究一直在同期交叉进行。到目前为止，国内外已经在搅拌摩擦焊的工艺、焊缝成形、焊接过程数值模拟及应用等方面做了大量工作，将其用于同种材料、异种材料的焊接以及各种不同类型接头的焊接，并在航空航天、船舶制造、交通运输、汽车制造等工业领域得到应用，其研究和应用发展非常迅速。目前，搅拌摩擦焊接技术主要的应用领域见表 1-1。



表 1-1 搅拌摩擦焊的主要应用领域

领 域	应 用
航空航天	运载火箭燃料储箱、发动机承力框架、铝合金容器、航天飞机外储箱、载人返回仓，飞机蒙皮、衍条、加强件之间的连接、框架连接，飞机壁板和地板连接，飞机门预成形结构件、起落架仓盖、外挂燃料箱
船舶制造	快艇、游船的甲板、侧板、防水隔板、船体外壳、主体结构件、直升机平台，离岸水上观测站、船用冷冻器、帆船桅杆和结构件
轨道交通	高速列车、轨道货车、地铁车厢、轻轨电车
汽车制造	汽车发动机、汽车底盘支架、汽车轮毂、车门预成形件、车体框架、升降平台、燃料箱、逃生工具等
其他工业	发动机壳体、冰箱冷却板、天然气和液化气储箱、轻合金容器、家庭装饰、镁合金制品等

1.4.1 搅拌摩擦焊技术在航空航天制造业的应用

航空航天飞行器的铝合金结构件，如飞机机翼壁板、运载火箭燃料储箱等，选材多为 2000 及 7000 系列铝合金材料。这些铝合金材料在传统熔焊下得到的接头强度低且易产生裂纹，所以传统飞机结构中主要采用铆接和螺栓联接。这种大件加工、机械连接方式给飞机的质量和性能、制造成本带来极大的压力。而搅拌摩擦焊可以实现这些系列铝合金材料的优质连接，在飞机结构设计中给新材料、新结构的应用提供了新方法。基于搅拌摩擦焊在航天铝合金结构产品制造上的优越性和新型空间运载工具发展需要，搅拌摩擦焊在航空航天的应用主要表现在以下几个方面：机翼、机身、尾翼；飞机油箱；飞机外挂燃料箱；运载火箭、航天飞机的低温燃料箱；军用和科学研究火箭、导弹以及熔焊结构件的修理等。

一些相关研究所针对飞机的特殊零部件开展了搅拌摩擦焊的应用研究，包括机身纵向和环向结构件、预成形件、起落架传动支承门、方向翼板、中心翼盒盖板蒙皮结构以及飞机地板的搅拌摩擦焊。采用搅拌摩擦焊的飞机模拟验证结构件如图 1-3 所示。目前法国 EADS 公司成功利用搅拌摩擦焊技术实现了飞机中心翼盒上盖板的制造；美国波音公司成功实现了薄板搭接搅拌摩擦焊在飞机前部机头起落架传动支承门上的应用，并利用五坐标搅拌摩擦焊设备实现了飞机门的全位置连接，同时对 C130 运输机载货地板和 C17 运输机的货物装卸斜坡成功地进行了搅拌摩擦焊的应用；此外我国也成功实现了搅拌摩擦焊在机翼结构下壁板及飞机座舱零件等经典结构的焊接。

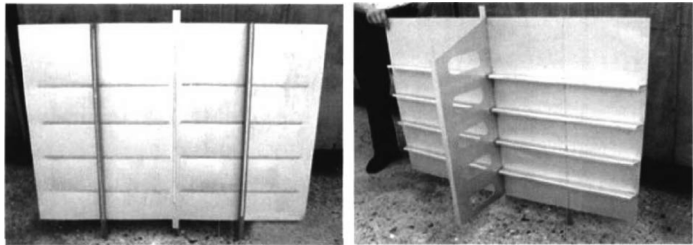


图 1-3 采用搅拌摩擦焊的飞机模拟验证结构件

搅拌摩擦焊技术在运载火箭上的应用也比较多。例如，美国波音公司将搅拌摩擦焊 (FSW) 技术应用到火箭的中间舱段连接中，随后将该技术推广到 Delta4 型火箭燃料储箱、助推舱段等构件的制造中，有效提高了焊接接头的结合强度，降低了结构重量，同时制造成本也大幅下降。此外美国 NASA 实现了 Ariane 火箭的直径 5.5m 储箱底的搅拌摩擦焊及筒体直径 3.6m 的猎户座载人飞船的全搅拌摩擦焊，如图 1-4 所示。我国航天制造业也成功运用 FSW 技术实现了火箭储箱的焊接，例如，首都航天机械公司实现了在 CZ-5、CZ-7 等型号运载火箭的 $\phi 2.25\text{m}$ 、 $\phi 3.35\text{m}$ 、 $\phi 5\text{m}$ 模块储箱筒段纵缝，CZ-5 等 $\phi 3.35\text{m}$ 椭球箱底主焊缝以及储箱总装环缝的搅拌摩擦焊，火箭储箱的结构组成及主焊缝如图 1-5 所示。图 1-6 所示为我国采用卧式总装方式研制的某型号 $\phi 3.35\text{m}$ 储箱正式产品。

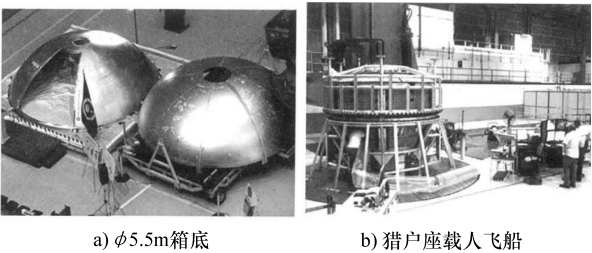


图 1-4 搅拌摩擦焊接技术在美国宇航产品中的应用

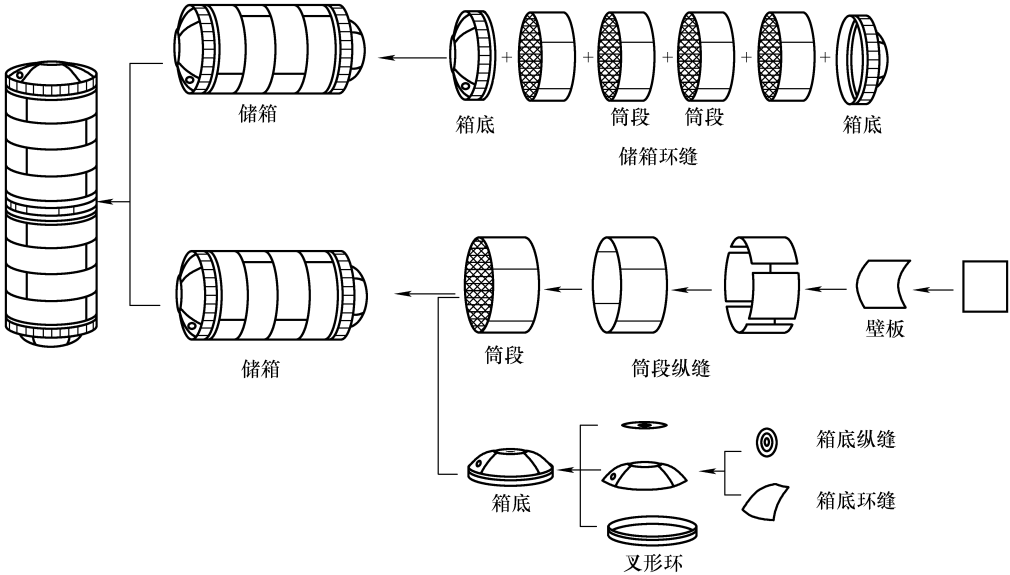


图 1-5 运载火箭储箱主体结构及主焊缝

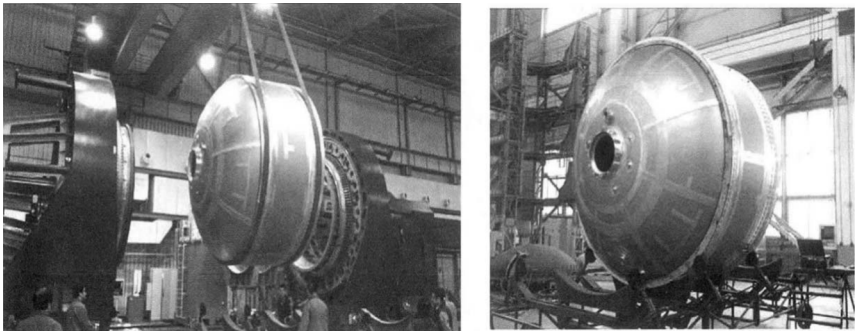


图 1-6 我国采用卧式总装方式研制的某型号 $\phi 3.35\text{m}$ 储箱正式产品



搅拌摩擦焊在航空发动机中的应用目前很少，主要是欧洲 Fokker 宇航公司在研制发动机结构件时应用 FSW 技术实现了发动机产品的零螺栓化，节省了连接与装配空间，减轻了发动机的重量，提高了生产效率。南昌航空大学采用搅拌摩擦焊焊接了某型航空发动机 6A02—T6 铝合金风扇叶片，相对于原钎焊叶片，产品合格率由原来的 30% 提高到 95%，振动疲劳寿命是原钎焊叶片的 3.4 倍。航空发动机的主要部件一般是由镍基高温合金制造的，可采用惯性摩擦焊及线性摩擦焊进行焊接，采用辅助热源搅拌摩擦焊技术有可能解决这些问题，但目前该技术还处于实验室研究阶段。

1.4.2 搅拌摩擦焊技术在船舶制造业的应用

搅拌摩擦焊技术最早成功应用的领域是船舶制造业，主要用于船甲板、侧板、船底外板、舷墙、防水壁板、地板、船体外壳和上层建筑的主要结构件、直升机降落平台、帆船桅杆及结构件、渔船用冷冻中空板等。1996 年，挪威的 Marine 公司和 Maritime 公司对船用平板和型材拼接成大型壁板的搅拌摩擦焊生产流水线制造技术进行了开发研究，使搅拌摩擦焊在型材拼接成壁板技术的应用上实现了工程化。日本 SLM 公司也成功利用搅拌摩擦焊技术实现夹层结构件和 1250mm × 500mm 的海水防护壁板的制造，日本 MES 公司利用搅拌摩擦焊焊接了最高航速达 42.8km 的客货两用船，并成功通过了 2m 的高海浪试验。瑞典 Sapa 公司实现了渔船深度冷却需要的中空铝合金壁板结构件的搅拌摩擦焊；澳大利亚 Adalaide 大学与英国 TWI 公司合作研发了一种便捷式搅拌摩擦焊设备，成功实现轻型高速海洋游船的曲面壁板焊接，并根据此项研究，澳大利亚 RFI 公司研制成功了新型海洋游船；美国尼克尔斯兄弟造船公司在航速达 102km/h 的 X - Craft 级战斗舰中成功使用搅拌摩擦焊技术；荷兰 Royal Huisman 造船厂建造的“雅典娜”号游轮几乎全部采用搅拌摩擦焊制造铝合金结构件，全长 90m、宽 12.2m、高 5.5m，功率 $1.47 \times 10^6 \text{W}$ ，自重 982t；日内瓦的“Seven Seas Navigator”号大型豪华铝合金游船采用了全搅拌摩擦焊制造上层建筑结构；英国 Norsk Hydro 公司利用搅拌摩擦焊焊接了气垫船体和上层结构，实现了气垫飞船的搅拌摩擦焊。葡萄牙的船厂安装了适合小批量散件焊接的模块化搅拌摩擦焊设备，实现船体外壳组装区铝合金部件的现场焊接。

中国搅拌摩擦焊中心研发了多个系列的搅拌摩擦焊设备，并成功开发出船用铝合金结构件的搅拌摩擦焊技术。图 1-7 所示为采用 FSW 技术制造的船用中空铝合金型材。2005 年，该中心自主设计制造了国内最大的全长 15m 的船用型材制造搅拌摩擦焊设备，可实现 $2.5\text{m} \times 12\text{m}$ 的大壁板铝合金型材的批量化制造。2006 年，我国搅拌摩擦焊中心研制了我国第一台船舶铝合金壁板的焊接设备，并且建立了专业化的生产加工车间。该设备集成了先进的工艺控制和变形控制技术，可



图 1-7 采用 FSW 技术制造的船用中空铝合金型材