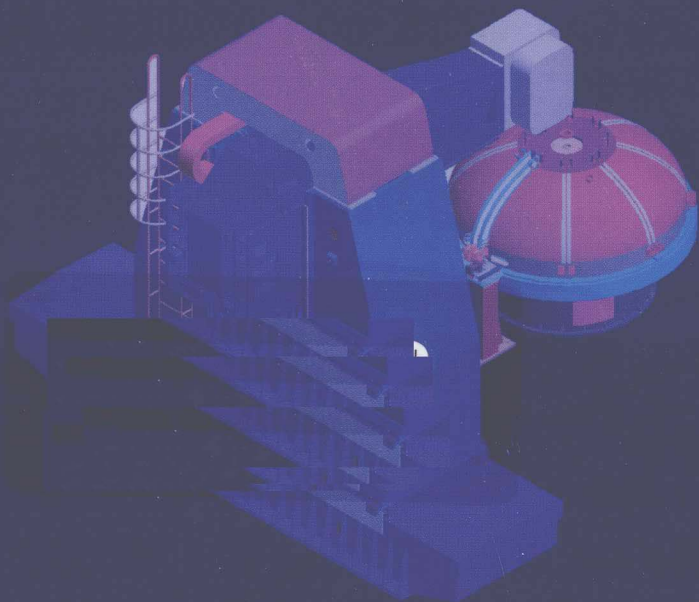




航天科技图书出版基金资助出版

铝合金的 搅拌摩擦焊接

王国庆 赵行华 著



中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

铝合金的搅拌摩擦焊接

王国庆 赵衍华 著



中国宇航出版社

·北京·

版权所有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

铝合金的搅拌摩擦焊接/王国庆等著. —北京:中国宇航出版社, 2010. 10

ISBN 978-7-80218-825-9

I. ①铝… II. ①王… III. ①铝合金-摩擦焊 IV. ①TG457.14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 197661 号

责任编辑 阎列 责任校对 陈琳 封面设计 宇航数码

出版
发行

中国宇航出版社

社址 北京市阜成路 8 号 邮编 100830
(010)68768548

网址 www.caphbook.com / www.caphbook.com.cn

经销 新华书店

发行部 (010)68371900 (010)88530478(传真)
(010)68768541 (010)68767294(传真)

零售店 读者服务部 北京宇航文苑
(010)68371105 (010)62529336

承印 北京画中国画印刷有限公司

版次 2010 年 10 月第 1 版 2010 年 10 月第 1 次印刷

规格 880×1230 开本 1/32

印张 10.625 彩插 16 面 字数 308 千字

书号 ISBN 978-7-80218-825-9

定价 68.00 元

本书如有印装质量问题,可与发行部联系调换

航天科技图书出版基金简介

航天科技图书出版基金是由中国航天科技集团公司于2007年设立的,旨在鼓励航天科技人员著书立说,不断积累和传承航天科技知识,为航天事业提供知识储备和技术支持,繁荣航天科技图书出版工作,促进航天事业又好又快地发展。基金资助项目由航天科技图书出版基金评审委员会审定,由中国宇航出版社出版。

申请出版基金资助的项目包括航天基础理论著作,航天工程技术著作,航天科技工具书,航天型号管理经验与管理思想集萃,世界航天各学科前沿技术发展译著以及有代表性的科研生产、经营管理译著,向社会公众普及航天知识、宣传航天文化的优秀读物等。出版基金每年评审1~2次,资助10~20项。

欢迎广大作者积极申请航天科技图书出版基金。可以登陆中国宇航出版社网站,点击“出版基金”专栏查询详情并下载基金申请表;也可以通过电话、信函索取申报指南和基金申请表。

网址: <http://www.caphbook.com>

电话: (010)68767205, 68768904

序

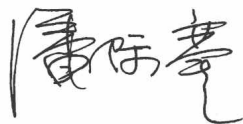
搅拌摩擦焊接技术自 1991 年发明以来，经过短短十几年的发展，在航空、航天、船舶、核工业、交通运输等领域获得了广泛应用，是制造领域的一项革命性成果，也是目前最引人注目和最具开发潜力的焊接技术之一。近年来，形成了较多的搅拌摩擦焊接技术研究成果和学术论文，但目前还没有系统介绍该技术的专著。《铝合金的搅拌摩擦焊接》是第一部系统论述铝合金搅拌摩擦焊接技术的著作，它将有助于读者全面了解搅拌摩擦焊接技术。

作者及他们的研究团队在搅拌摩擦焊接工艺研究、接头缺陷分析、缺陷预防、缺陷补焊以及搅拌头和搅拌摩擦焊接设备研制等方面做了很多的工作，积累了大量的数据，这些数据都是他们在工作中摸索总结出来的，真正反映了工程应用的实际情况。在此基础上，他们形成了系统的搅拌摩擦焊接标准、检测标准和补焊标准。本书集中反映了上述研究成果，可直接为搅拌摩擦焊接技术应用工程实际提供技术支持，具有较高的工程应用价值。

搅拌摩擦焊接是一个非常复杂的过程，同时经历热耦合和机械搅拌双重作用，之前对焊接机理还缺乏统一的论述。本书较为系统、深入地研究了搅拌摩擦焊接组织特征、缺陷成因和焊接过程温度场、流场等机理问题，具有较高的学术水平，对于深入理解搅拌摩擦焊接过程具有一定的理论价值。

笔者与本书作者王国庆相识已有 20 余载，他一直奋战在我国航天事业的第一线，解决了很多型号攻关和技术创新难题，获得了多项国家及省部级奖励。自搅拌摩擦焊接技术传入我国伊始，他就一直积极推动该技术的工程化应用工作，经过多年的钻研，该技术已

在产品上得到应用，为我国航天事业的发展绘上了光彩的一笔。看到我国年轻的焊接科技工作者不断进取创新，将新工艺、新技术在工程中推广应用，我感到十分欣慰。我很高兴为本书作序，希望本书能够为相关工程应用人员和科研人员开展工作提供帮助，为进一步推动搅拌摩擦焊接技术在我国工程领域的实际应用提供助力。

A handwritten signature in black ink, consisting of three characters: '王', '景', and '清'. The characters are written in a cursive, flowing style.

2010年9月21日

前 言

搅拌摩擦焊接技术是英国焊接研究所于 1991 年发明的一种固相连接新技术，被称为继激光焊以来的一场焊接革命。与传统熔化焊相比，搅拌摩擦焊具有接头缺陷少、质量高、变形小，以及焊接过程绿色、无污染等显著优点，在航空、航天、船舶、核工业、交通运输等工业制造领域具有广阔的应用前景。国内外都积极开展了搅拌摩擦焊接技术研究工作，也获得了一定的研究成果，这些研究成果主要以期刊论文、学术报告、会议文档、内部资料等形式存在，还没有有关搅拌摩擦焊接技术的专著问世。随着铝合金搅拌摩擦焊接技术的快速发展，亟须将这些研究成果进行归纳总结、梳理提炼，形成较完整的铝合金搅拌摩擦焊接技术体系，指导搅拌摩擦焊接技术的实际工程应用。

从 2001 年开始，作者所在的搅拌摩擦焊接团队就紧密跟踪国际技术前沿，在国内开展了搅拌摩擦焊接技术研究及应用工作，先后完成了多项国家、中国航天科技集团公司以及本单位的相关研究课题，在搅拌摩擦焊接技术及工艺工程化应用方面取得了丰硕成果，曾获得国防科学技术进步二等奖 2 项，申报国家、国防发明专利 12 项，完成 5 项航天行业标准的编制，形成了相对完整的搅拌摩擦焊接技术体系。完成编制的航天行业标准包括系列化工程用搅拌头、搅拌摩擦焊接技术、接头检测技术、缺陷修补技术，以及指导焊接生产的相关工艺规范（《铝合金搅拌摩擦焊工艺规范》、《铝合金搅拌摩擦焊相控阵超声波检测方法》、《铝合金摩擦塞补焊工艺规范》）和验收标准（《铝合金搅拌摩擦焊技术条件》、《铝合金摩擦塞补焊技术条件》）。

本书就是在总结和提炼上述课题研究成果和实际工程应用经验的基础上,参考国内外铝合金搅拌摩擦焊接技术的最新研究进展,结合搅拌摩擦焊接技术发展趋势而编著的一部专用于铝合金搅拌摩擦焊接的著作。全书以铝合金的搅拌摩擦焊接工艺技术为主线,围绕技术实际工程应用,较为系统地分析了搅拌摩擦焊接技术的特点以及该技术在国内外各领域的应用现状,阐述了搅拌头的研制与开发,搅拌摩擦焊接头组织和力学性能,接头缺陷种类、定义、产生原因及缺陷检测手段、缺陷修补技术等内容,并且针对搅拌摩擦焊接机理,较为详细地论述了通过试验和数值模拟两种手段分析搅拌摩擦焊接接头温度场以及焊缝内部塑性金属流动的方法,最后简要概述了搅拌摩擦焊接技术的最新发展状况,包括复合搅拌摩擦焊、搅拌摩擦点焊等最新焊接技术。

本书的特点主要有两个。1) 学术性。本书采用了前期课题研究所获得的大量成果,书中论述的铝合金搅拌摩擦焊接头组织特征、缺陷成因与预防、焊接过程机理分析等内容都是在课题研究成果的基础上总结提炼的,具有一定的学术水平和理论价值;2) 实用性。本书所采用的大量数据都是作者所属团队在实际搅拌摩擦焊接技术推广应用过程中,通过大量试验研究获得的,并经过实际产品的验证,如焊接工程影响因素分析、焊接工艺参数优化范围、缺陷影响因素等。这些工程数据不同于实验室试验数据,它们取自工程应用一线,考虑了实际应用中的各种状况,真实反映了搅拌摩擦焊工程化应用情况,并且已形成相应的搅拌摩擦焊接标准,这些数据可直接用于搅拌摩擦焊接工艺工程化应用推广,具有一定的工程应用价值。

本书的完成是作者所在的研究团队集体智慧的结晶,除作者之外,团队中的杜岩峰、刘景铎、张丽娜等同志在课题研究过程中做了大量的工作,在铝合金搅拌摩擦焊接工艺优化、搅拌头和搅拌摩擦焊接设备研制、焊接接头缺陷研究及缺陷修补等方面作出了重要贡献,为本书提供了大量的基础数据;张引、刘伟、李华强等同志

为本书搅拌摩擦焊接缺陷检测技术研究提供了相控阵超声波检测方面的资料。北京科技大学的张华老师参与了本书第8章“搅拌摩擦焊接温度场”的编写工作。在课题研究过程中得到了首都航天机械公司孟凡新、刘宪力、孙忠绍、白景彬、周世杰、郝文龙、刘琦、佟琦等各位领导的大力支持和帮助，在此一并表示感谢。同时还要感谢哈尔滨工业大学的吴林教授、林三宝副教授，北京航空航天大学的张彦华教授，他们对本书的编写工作也给予了大力支持。此外，本书的完成，参考了国内外最新研究成果，在此向相关的作者表示衷心的感谢，特别是某些文献未找到原始出处，在此也向相关作者表示诚挚的谢意。

本书汇集了前期大量课题研究成果，在此向提供课题资金资助的相关单位领导表示感谢。

本书作为国内第一部介绍搅拌摩擦焊接技术的专业著作，可供从事铝合金搅拌摩擦焊接技术科研和生产的相关人员参考，也可作为高等院校焊接及相关专业的研究生和本科高年级学生的辅助教材。希望本书能在完善搅拌摩擦焊接技术的理论体系，进一步推进搅拌摩擦焊接技术发展，以及推广工程化应用等方面作出一定的贡献。

限于作者的学识和经验，书中的缺点错误在所难免，殷切希望读者批评指正。

作 者

2010年8月30日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 搅拌摩擦焊接原理	1
1.2 搅拌摩擦焊接特点	1
1.3 接头形式及焊接材料	3
1.4 搅拌摩擦焊接专利许可与授权	6
1.5 搅拌摩擦焊接技术应用	8
1.5.1 搅拌摩擦焊接技术在造船业的应用	8
1.5.2 搅拌摩擦焊接技术在铁道车辆制造上的应用	10
1.5.3 搅拌摩擦焊接技术在飞机制造业的应用	11
1.5.4 搅拌摩擦焊接技术在航天制造业的应用	14
1.5.5 搅拌摩擦焊接技术在其他工业方面的应用	17
1.6 搅拌摩擦焊接技术的常用术语	18
1.7 小结	19
第 2 章 搅拌头与搅拌摩擦焊接设备	20
2.1 搅拌头的研制与开发	20
2.1.1 搅拌头的构成	20
2.1.2 搅拌头材料选择	21
2.1.3 搅拌头形状设计	28
2.1.4 工程用常见搅拌头	37
2.1.5 搅拌头的改进措施	39
2.2 搅拌摩擦焊接设备	40
2.2.1 搅拌摩擦焊接设备分类	40
2.2.2 搅拌摩擦焊接设备结构	43
2.2.3 常见搅拌摩擦焊接设备简介	53

2.3 小结	59
第3章 铝合金搅拌摩擦焊接工艺	60
3.1 焊接工艺参数	60
3.1.1 搅拌头旋转速度	60
3.1.2 焊接速度	67
3.1.3 焊接压力	77
3.1.4 焊接线能量	78
3.1.5 焊接扭矩和焊接能量	83
3.2 影响焊接接头性能的工程因素	86
3.2.1 焊接间隙	87
3.2.2 板厚差	88
3.2.3 板材表面处理状态	90
3.2.4 搅拌头偏移量	91
3.3 理想的参数规范	93
3.3.1 旋转速度与焊接速度参数范围	93
3.3.2 焊接装配范围	98
3.3.3 铝合金常用焊接规范	102
3.4 小结	103
第4章 铝合金搅拌摩擦焊接接头组织及力学性能	104
4.1 搅拌摩擦焊接接头组织	104
4.1.1 焊缝外观形貌	104
4.1.2 搅拌摩擦焊接接头宏观组织	104
4.1.3 搅拌摩擦焊接接头微观组织	109
4.2 铝合金搅拌摩擦焊接接头力学性能	117
4.2.1 铝合金搅拌摩擦焊接接头性能优势	117
4.2.2 常见搅拌摩擦焊接接头力学性能	119
4.2.3 接头力学性能各层异性	123
4.3 接头显微硬度	127
4.3.1 典型铝合金搅拌摩擦焊接接头显微硬度	127

4.3.2	焊接工艺参数对接头显微硬度的影响	133
4.3.3	接头显微硬度的各层异性	134
4.4	接头断口分析	137
4.5	小结	144
第5章	搅拌摩擦焊接缺陷定义及分类	145
5.1	表面缺陷	145
5.1.1	飞边	145
5.1.2	匙孔	147
5.1.3	表面下凹	147
5.1.4	毛刺	148
5.1.5	起皮	150
5.1.6	背部粘连	151
5.1.7	表面犁沟	152
5.1.8	背部间隙	153
5.2	内部缺陷	154
5.2.1	未焊透缺陷	155
5.2.2	弱结合缺陷	156
5.2.3	孔洞型缺陷	158
5.2.4	结合面氧化物残留	162
5.3	搅拌摩擦焊接接头缺陷产生机理	163
5.4	小结	167
第6章	搅拌摩擦焊接接头缺陷检测技术	168
6.1	剖切检查	169
6.2	X射线无损检测	169
6.2.1	X射线无损检测原理	169
6.2.2	X射线无损检测特点	171
6.2.3	X射线无损检测实例	172
6.3	超声波反射法无损检测	173
6.3.1	常规超声波检测及实例	173

6.3.2	变角度超声波无损检测及实例	177
6.3.3	超声波检测特点	181
6.4	相控阵超声波无损检测	181
6.4.1	相控阵超声波无损检测与传统超声波检测 技术的区别	182
6.4.2	相控阵超声波无损检测技术的基本原理	183
6.4.3	相控阵超声波声束扫描模式	184
6.4.4	相控阵超声波无损检测技术特点	186
6.4.5	相控阵超声波无损检测设备	187
6.4.6	相控阵超声波无损检测技术应用实例	188
6.5	小结	191
第7章	搅拌摩擦焊接接头缺陷修补技术	192
7.1	搅拌摩擦补焊	192
7.2	摩擦塞补焊	194
7.2.1	摩擦塞补焊原理	194
7.2.2	摩擦塞补焊分类	196
7.2.3	摩擦塞补焊工艺	197
7.2.4	摩擦塞补焊接头组织	206
7.2.5	摩擦塞补焊在搅拌摩擦焊接接头缺陷修 补中的应用	209
7.2.6	摩擦塞补焊缺陷与防止措施	211
7.3	小结	214
第8章	搅拌摩擦焊接温度场	215
8.1	搅拌摩擦焊接温度场检测	216
8.1.1	焊接材料种类对温度场的影响	216
8.1.2	焊接材料厚度对温度场的影响	219
8.1.3	工艺参数对温度场的影响	222
8.2	搅拌摩擦焊接过程温度场数值模拟	222
8.2.1	不考虑搅拌针产热的热源模型	223

8.2.2 考虑搅拌针产热的热源模型	226
8.3 小结	240
第9章 搅拌摩擦焊缝金属流动试验及数值模拟	241
9.1 焊缝金属流动试验	241
9.1.1 异种材料焊接	241
9.1.2 急停技术	244
9.1.3 嵌入标记材料	245
9.1.4 典型铝合金搅拌摩擦焊缝金属流动实例	250
9.2 搅拌摩擦焊缝金属流动数值模拟	258
9.2.1 数值模拟简介	258
9.2.2 典型铝合金搅拌摩擦焊缝金属流动数值模拟	262
9.3 小结	266
第10章 搅拌摩擦焊接技术的发展	267
10.1 高熔点金属的搅拌摩擦焊接技术	267
10.1.1 搅拌头材料选择	268
10.1.2 搅拌头结构设计	272
10.1.3 焊接设备要求	275
10.1.4 典型高熔点金属搅拌摩擦焊接	275
10.2 复合热源搅拌摩擦焊接技术	284
10.2.1 以激光为辅助热源的复合搅拌摩擦焊接技术	284
10.2.2 以等离子弧为辅助热源的复合搅拌摩擦焊接技术	286
10.3 搅拌摩擦点焊	288
10.3.1 搅拌摩擦点焊的基本原理	289
10.3.2 搅拌摩擦点焊特点	292
10.3.3 搅拌摩擦点焊工艺	294
10.3.4 搅拌摩擦点焊焊接设备	306
10.3.5 搅拌摩擦点焊技术的应用	310
10.4 小结	312
参考文献	313

第 1 章 绪 论

英国焊接研究所(TWI)于 1991 年发明了一种新颖而有潜力的焊接方法——搅拌摩擦焊接(Friction Stir Welding,FSW),该技术具有接头质量高、焊接变形小和焊接过程绿色、无污染等优点,是铝、镁等合金优选的焊接方法,在船舶、机车车辆、航空和航天等制造领域具有广阔的应用前景。搅拌摩擦焊接与传统的摩擦焊接一样,也是一种固相连接技术。本章就搅拌摩擦焊接基本原理、基本特点以及搅拌摩擦焊接技术在各行业的应用情况进行介绍,并且对搅拌摩擦焊接技术常用的术语进行简要的概述。

1.1 搅拌摩擦焊接原理

搅拌摩擦焊接是高速旋转的搅拌头扎入工件后沿焊接方向运动,在搅拌头与工件的接触部位产生摩擦热,使其周围金属形成塑性软化层,软化层金属在搅拌头旋转的作用下填充搅拌针后方所形成的空腔,并在搅拌头轴肩与搅拌针的搅拌及挤压作用下实现材料连接的固相焊接方法。搅拌摩擦焊接工作原理如图 1-1 所示。

1.2 搅拌摩擦焊接特点

搅拌摩擦焊接过程中产生的热量仅仅能使被焊金属达到塑性状态,而未能达到金属熔点,因此搅拌摩擦焊接属于固相连接技术。它可以用来焊接一些熔焊方法难以焊接的金属材料,如铝、镁等合金。相对于传统的普通熔焊,搅拌摩擦焊接具有如下优点:

- 1) 接头机械性能良好。经疲劳、断裂及弯曲等试验证明,搅拌

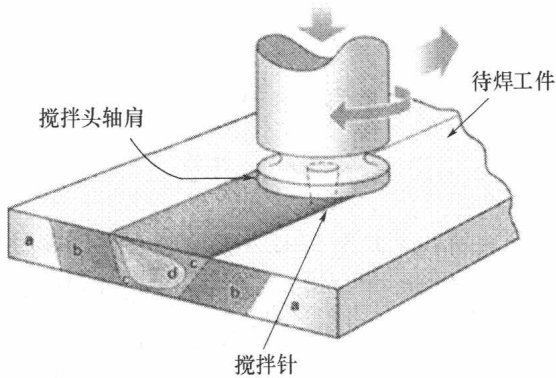


图 1-1 搅拌摩擦焊接工作原理

摩擦焊接接头机械力学性能显著优于熔焊接头。

2) 变形小。即使是焊接长焊缝，变形也比熔焊小得多。

3) 焊接过程绿色、环保。焊接过程无烟尘和弧光污染，无飞溅，工作环境好。

4) 耗材少。搅拌头属于非消耗性材料，现有试验表明，一个搅拌头就可以焊接 6000 系列铝合金 1 000 m 而无须更换新的搅拌头；不需要填丝，不需要保护气体；节省能源。

5) 焊接过程操作简便。

6) 焊接缺陷少，一般不产生焊接缺陷。

7) 不需要特别的焊前准备，对氧化膜不敏感。

8) 自动化程度高，生产周期短。以 2195 - T87 铝合金搅拌摩擦焊接和变极性钨极氩弧焊接(VPTIG 焊接)为例，采用搅拌摩擦焊接可以节省一半以上生产时间。

随着研究的深入和发展，搅拌摩擦焊接技术的缺点正逐渐得到改进，目前该技术仍然存在的不足之处主要有：

1) 相对于熔焊来说，搅拌摩擦焊接的焊接速度不是很高(但对于厚板来说，搅拌摩擦焊接可以一次成型，而传统的普通熔焊需要多层、多道焊接)。

2) 被焊工件必须要夹紧固定，对焊接装配要求较高，尤其是对

界面间隙，一般来说比填丝焊的精度要求还要高。

3) 一般需要在焊缝背面加垫板，进行刚性支撑(目前通过采用双轴肩搅拌头可以不需要背部刚性支撑)。

4) 一般在焊接结束时会有一个留下小孔(目前通过采用搅拌头回抽技术来避免产生小孔)。

5) 设备刚性和精度要求较高，设备一次性投资较大。

6) 目前主要适用于大型结构零部件的焊接，无法实现小型精密零件复杂焊缝的焊接。

7) 缺乏相应的全国通用搅拌摩擦焊接标准。

1.3 接头形式及焊接材料

采用搅拌摩擦焊接技术进行材料的连接，可以用对接、搭接和角接等多种接头形式，常见的接头形式如图 1-2 所示。目前应用最广泛的接头形式为平板对接焊，若采用角接头形式则需要在工件背部进行相应的刚性支撑。

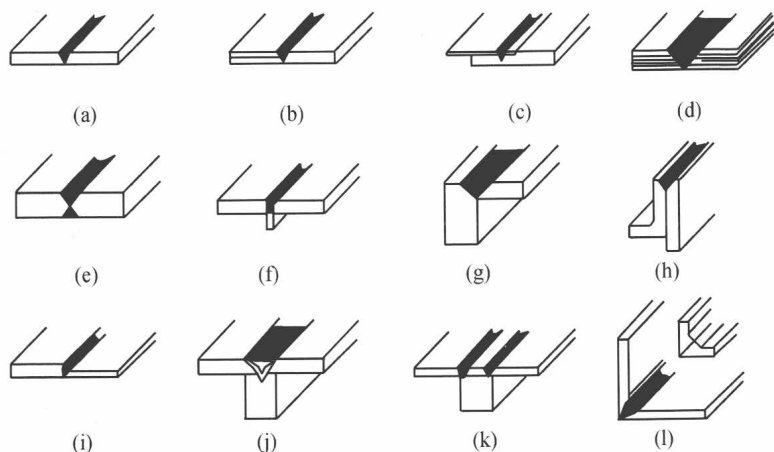


图 1-2 搅拌摩擦焊接常用的接头形式