

尹 欣 刘元朋 文振华◎著



摩擦焊 及其检测技术

MOCAHAN
JIQI JIANCE JISHU

 知识产权出版社
全国百佳图书出版单位

尹 欣 刘元朋 文振华◎著



摩擦焊 及其检测技术

MOCAHAN
JIQI JIANCE JISHU



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

内容提要

本书全面系统地介绍了摩擦焊及其检测技术的发展与应用,深入阐述了缺陷识别、图像处理、智能化平台以及典型应用等摩擦焊关键技术,反映了当前摩擦焊及其检测技术的最新成果。全书内容新颖,认真总结了作者的科研成果,同时参考国内外最新资料,反映了当前该领域的前沿研究水平。全书论述力求概念清晰,表达准确,突出理论联系实际,通过实例说明原理,富有启发性。

本书可供从事摩擦焊领域科研和应用的研究人员阅读,也可供大专院校相关专业的研究生参考。

责任编辑:宋云

图书在版编目(CIP)数据

摩擦焊及其检测技术/尹欣,刘元朋,文振华著.

—北京:知识产权出版社,2012.6

ISBN 978-7-5130-1360-4

I. ①摩… II. ①尹… ②刘… ③文… III. ①摩擦焊—检测 IV. ①TG453

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第111201号

摩擦焊及其检测技术

尹欣 刘元朋 文振华 著

出版发行:知识产权出版社

社址:北京市海淀区马甸南村1号

网 址: <http://www.cnipr.com>

发行电话:010-82000893 82000860 转 8101

责编电话:010-82000860 转 8388

印 刷:知识产权出版社电子印制中心

开 本:787mm×1092mm 1/16

版 次:2012年6月第1版

字 数:230千字

邮 编:100088

邮 箱:bjb@cnipr.com

传 真:010-82000860 转 8386

责编邮箱:songyun@cnipr.com

经 销:新华书店及相关销售网点

印 张:15

印 次:2012年6月第1次印刷

定 价:48.00元

ISBN 978-7-5130-1360-4/TG·002(4236)

版权所有 侵权必究

如有印装质量问题,本社负责调换。

前 言

据工业发达国家统计，每年需要进行焊接加工之后才能成为使用产品的钢材占钢消耗总量的 45% 左右。

摩擦焊（Friction Welding）是 20 世纪 50 年代发展起来的一种先进固态焊接技术，由于摩擦焊焊接过程中接头部位不存在金属的熔化，因而焊接时不存在熔焊时的各种缺陷，如气孔、缩孔、缩松等。摩擦焊具有焊接质量高、自动化好、节能、环保等优势，因此被广泛地应用于航天、航空、国防等部门。

本书针对摩擦焊及其焊接缺陷的特点，系统地研究了摩擦焊缺陷的检测技术、识别技术以及典型摩擦焊的应用。

本书共 8 章，第 1 章绪论首先回顾了摩擦焊技术的基本概念、发展历史、工作原理、工艺及缺陷检测技术，最后阐述了本书的结构框架。

由于本书所涉及的缺陷识别技术包含了许多共性理论分析和讨论，第 2 章便对摩擦焊缺陷检测技术涉及的小波分析、人工神经网络和模糊理论等共性知识进行了详细介绍。

第 3 章重点讨论了摩擦焊缺陷的无损检测方法以及典型的超声检测系统；介绍了荧光渗透检测与超声检测，对本书所用到的 UltraPAC 超声系统从原理、组成、软件分析及具体应用等方面进行了详尽的分析。

第 4 章针对摩擦焊缺陷超声信号的特点，采用小波算法进行降噪。给出了小波阈值、模极大值滤波及结合阈值的模极大值滤波算法的改进算法。本书提出的改进算法以模极大值滤波为基础，通过对信号的模极大值进行非线性阈值处理并还原小波系数后重构以实现非平稳信号的滤波。

第 5 章对摩擦焊超声 C 扫描图像进行处理，介绍了基于数学形态的图像去噪；介绍了分形理论相关知识在图像分形维数计算中的应用，将计算

的超声 C 扫描图像的分形维数作为缺陷图像分析的特征变量；最后介绍了图像边缘检测方法，本章的小波边缘检测算法可以正确地提取出摩擦焊超声检测图像边缘，且定位精度较高。

第 6 章对摩擦焊缺陷建立模糊神经网络模型进行识别，介绍了补偿模糊神经网络模型对摩擦焊缺陷信号识别的应用。研究表明：这种具有快速算法的模糊神经网络计算效率比较高，由于有补偿度参数的作用，网络训练过程中陷入局部极小的可能性较小，能较为平稳地逼近精度极限，较好地识别出缺陷类型。

第 7 章建立了摩擦焊缺陷识别的可视化系统。采用计算机语言编程集成算法程序和模块化的设计思想，实现了摩擦焊缺陷检测、信号处理、分类识别的一体化。

第 8 章介绍了摩擦焊的典型应用——搅拌摩擦焊技术。从原理、特点、工艺、焊接缺陷以及数值模拟等方面详尽地对其进行分析，并选用铝合金材料作为应用实例，介绍搅拌摩擦焊技术在航空领域中的具体应用。

本书由尹欣、刘元朋、文振华著，其中尹欣负责总体策划和全书整合，并编写了第 4 章、第 5 章、第 6 章以及第 8 章的 8.1、8.2、8.3、8.4 等章节；刘元朋负责编写了第 1 章、第 2 章、第 3 章的内容；文振华负责编写了第 7 章、第 8 章的 8.5、8.6、8.7、8.8、8.9 等章节。全书由郑州航空工业管理学院机电工程学院蒋志强教授负责审校工作。

在本书的写作过程中，得到了西北工业大学机电学院王玉副教授、中航工业北京航空制造工程研究所中国搅拌摩擦焊中心王卫兵、孙占国工程师的热心指导与帮助，在此向他们表示衷心的感谢。

本书是以摩擦焊技术的前沿性、综合性、适用性为原则，根据作者多年从事摩擦焊领域的研究成果并参考该学科发展的重要相关文献撰写而成，并得到河南省科技攻关计划（项目号：112400450390）、河南省高等学校青年骨干教师资助计划项目（项目号：2011GGJS-137）、精密制造技术与工程开放实验室 2010 开放基金资助项目（项目号：PMTE201002A）、郑州市科技局科技创新团队（项目号：112PCXTD350）、河南省高校科技创新团队（项目号：2012IRTSTHN014）等课题资助。同时还得到了知识产权出版社的大力支持和帮助，在此表示衷心的感谢！

由于本书涉及的研究领域发展非常快，限于作者的学识水平，书中疏漏及不当之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

作 者

2012 年 3 月于郑州

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 摩擦焊技术概述	3
1.2 摩擦焊原理及焊接过程	5
1.3 摩擦焊缺陷检测技术	12
1.4 本书主要内容	16
参考文献	18
第2章 预备知识	21
2.1 Fourier 变换理论	23
2.2 小波分析理论	28
2.3 人工神经网络理论	44
2.4 模糊理论	51
参考文献	66
第3章 摩擦焊缺陷无损检测方法及系统	69
3.1 常用的无损检测方法	71
3.2 UltraPAC 检测系统	73
3.3 UltraPAC 超声扫描系统	75
参考文献	85
第4章 摩擦焊缺陷超声信号小波降噪方法	87
4.1 引 言	89
4.2 小波阈值去噪	89

4.3	小波模极大值去噪	99
4.4	结合阈值与模极大值的去噪方法	108
	参考文献	114
第5章	摩擦焊超声 C 扫描图像处理与边缘检测	117
5.1	引言	119
5.2	摩擦焊 C 扫描图像去噪	119
5.3	C 扫描图像分形维数的计算与分析	123
5.4	摩擦焊 C 扫描图像边缘检测	134
	参考文献	146
第6章	摩擦焊缺陷模糊神经网络识别方法	149
6.1	引言	151
6.2	训练样本采集	151
6.3	缺陷识别网络的结构设计	157
6.4	网络模型训练	159
6.5	网络性能验证	163
	参考文献	166
第7章	摩擦焊缺陷智能识别系统	169
7.1	可视化编程	171
7.2	摩擦焊缺陷信号可视化平台设计	173
7.3	系统界面及功能介绍	176
7.4	小结	181
	参考文献	181
第8章	搅拌摩擦焊的应用	183
8.1	引言	185
8.2	搅拌摩擦焊接原理	186
8.3	搅拌摩擦焊接特点	187
8.4	搅拌摩擦焊焊缝分析	188

8.5 搅拌摩擦焊接研究进展.....	192
8.6 搅拌摩擦焊过程数值模拟研究进展.....	195
8.7 搅拌摩擦焊的应用.....	199
8.8 搅拌摩擦焊在铝合金材料焊接工程中的应用.....	208
8.9 小 结.....	226
参考文献	227

第 1 章 绪 论

1.1 摩擦焊技术概述

1.1.1 摩擦焊技术概念

摩擦焊 (Friction Welding) 是在恒定或递增压力以及扭矩的作用下, 利用焊接接触端面之间的相对运动在摩擦面及其附近区域产生摩擦热和塑性变形热, 使焊件摩擦面及其附近区域温度上升到接近但一般低于熔点的温度区间, 材料的变形抗力降低、塑性提高、界面的氧化膜破碎, 在顶锻压力的作用下, 伴随着材料产生塑性变形及流动, 通过界面上的扩散及再结晶冶金反应而实现连接的固态焊接方法^[1-2]。

1.1.2 摩擦焊的起源与发展

人类应用焊接技术的历史悠久, 古代的焊接技术主要是铸焊、锻焊和钎焊。中国的商朝就发明了铸焊技术, 商朝制造的铁刃铜钺就是铁与铜的铸焊件。战国时期制造的刀剑, 刀刃为钢, 刀背为熟铁, 一般是经过加热锻焊而成的。春秋战国时期曾侯乙墓中的建鼓铜座上有许多盘龙, 是分段钎焊连接而成的。中世纪, 在叙利亚的大马士革也曾用锻焊制造兵器。古代焊接技术由于其热源是炉火, 温度低、能量不集中, 因此无法用于大截面、长焊缝工件的焊接, 只能用以制作装饰品、简单的工具和武器。19 世纪初, 英国的戴维斯发现电弧和氧乙炔焰两种能局部熔化金属的高温热源, 1885 ~ 1887 年, 俄国的别纳尔多斯发明碳极电弧焊钳, 弗莱彻于 1887

年设计出一种使用氧和氢混合物的焊炬装置, 20 世纪初, 碳极电弧焊和气焊得到应用, 使手工电弧焊进入实用阶段。摩擦焊最初是 1891 年由英国人 J. H. 贝文顿利用摩擦热进行焊接和挤压并获得了专利, 但是, 直到 1956 年才由前苏联丘季科夫试验成功第一种实用的摩擦焊方法, 即连续驱动摩擦焊。在我国, 哈尔滨焊接研究所于 1957 年通过封闭加压原理试验成功了铝—铜摩擦焊。经过半个多世纪的研究发展, 摩擦焊以其优质、高效、低耗环保的突出优点受到所有工业强国的重视。特别是近年来不断开发出摩擦焊的新技术, 如线性摩擦焊、搅拌摩擦焊等, 使其在航空、航天、核能、海洋开发等高技术领域及电力、机械制造、石油钻探、汽车制造等产业部门得到了愈来愈广泛的应用。

美国 GE 公司率先将摩擦焊技术应用于军用航空发动机转子部件制造中, 成功制造了 TF39 航空发动机的 16 级压气机盘、F101 航空发动机 1~3 级盘及前后轴颈等部件。洛克希德马丁公司采用搅拌摩擦焊技术实现了“猎户号”航天飞船载人舱两块大型组件拼接 (如图 1-1 所示), 该设备包括一个 22 英尺直径的转台, 安装有自适应搅拌摩擦焊接头以及带 T 形槽的工作台, 可实现五坐标焊接, 由机器人严格控制焊接精度, 最终完成了厚度为 2 英寸的铝锂合金 33 道焊缝以及前锥体与筒段连接的 440 英寸长焊缝连接。德国 MTU 公司正在开展高压压气机转子等大型部件的摩擦焊技术

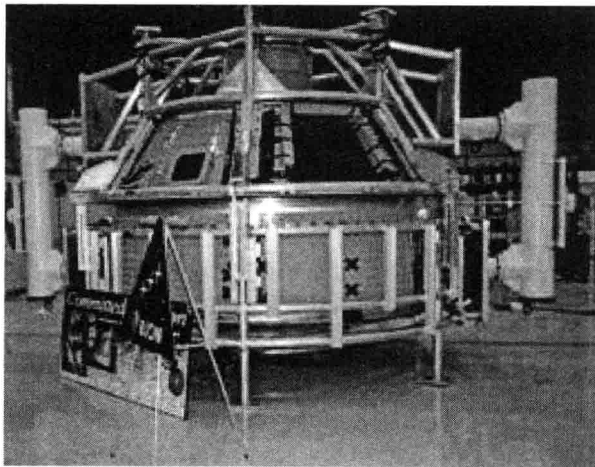
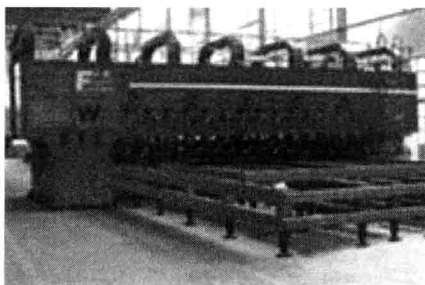


图 1-1 采用搅拌摩擦焊制造的“猎户号”载人舱测试件

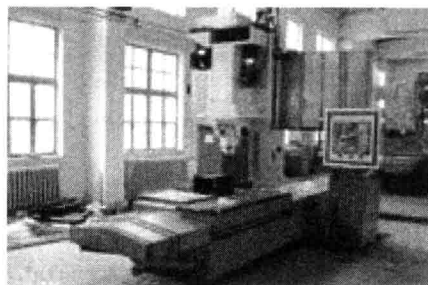
研究。法国海豚发动机也将摩擦焊推广应用于减速器锥形齿轮的焊接。

目前我国摩擦焊技术的应用比较广泛，可焊接直径为 3.0 ~ 120mm 的工件以及 8000mm 的大截面管件，同时还开发了相位焊和径向摩擦焊技术，以及搅拌摩擦焊技术。不仅可焊接钢、铝、铜，而且还成功焊接了高温强度级相差很大的异种钢和异种金属，以及形成低熔点共晶和脆性化合物的异种金属。如高速钢—碳钢、耐热钢—低合金钢、高温和金—合金钢、不锈钢—低碳钢、不锈钢—电磁铁，以及铝—铜、铝—钢等。

我国现有 600 余台摩擦焊机，绝大部分是连续驱动摩擦焊机。随着实际生产的需要，国内对于其他形式的摩擦焊机也进行了研制，如长春焊接设备厂研制了小吨位的惯性焊机、相位摩擦焊机；北京赛福斯特技术有限公司研制了系列搅拌摩擦焊机（如图 1-2 所示）等。这些焊机有的技术指标和制造水平已达到或接近国外同类焊机的水平。



(a) 平板直缝焊接



(b) 平面曲线焊接

图 1-2 搅拌摩擦焊设备

1.2 摩擦焊原理及焊接过程

1.2.1 摩擦焊的原理及工艺

在压力作用下，被焊界面通过相对运动进行摩擦时，机械能转变为热能，所产生的摩擦加热功率为^[3]

$$P = \mu F v \quad (1-1)$$

式中 μ 为摩擦因数， F 为摩擦压力， v 为摩擦相对运动速度。

摩擦焊接过程一般分为图 1-3 所示的几个基本过程。焊前，待焊的一对工件中，一工件夹持于旋转夹具，称为旋转工件；另一工件夹持于移动夹具，称为移动工件。焊接时，旋转工件在电机驱动下开始高速旋转，移动工件在轴向力作用下逐步向旋转工件靠拢，当两侧工件接触并压紧后，摩擦界面上一些微凸体首先发生黏结与剪切，并产生摩擦热。随实际接触面积增大，摩擦扭矩迅速升高，摩擦界面处的温度也随之上升，摩擦界面逐渐被一层高温黏塑性金属所覆盖。此时，两侧工件的相对运动实际上发生在这层黏塑性金属内部，产热机制已由初期的摩擦产热转变为黏塑性金属层内的塑性变形产热。在热激活作用下，这层黏塑性金属发生动态再结晶，使流动应力降低，故摩擦扭矩升高到一定程度（前峰值扭矩）后逐渐降低。随着摩擦热量向两侧工件的传导，焊接面两侧的温度亦逐渐升高，在轴向压力作用下，焊合区金属发生径向塑性流动，从而形成飞边，轴向缩短量逐渐增大。随摩擦时间延长，摩擦界面温度与摩擦扭矩基本恒定，高温区逐渐变宽，飞边逐渐增大。当摩擦焊接区的变形达到一定程度后，旋转工件转速已经很低（惯性摩擦焊）或开始制动刹车（连续驱动摩擦焊），此时，随着界面温度的降低，摩擦扭矩出现第二个峰值，即后峰值扭矩。在顶锻后的保压过程中，焊合区金属通过相互扩散与再结晶，使两侧金属牢固焊接在一起，从而完成焊接过程。在整个焊接过程中，摩擦界面温度一般不会超过熔点，故摩擦焊属于固相焊接。

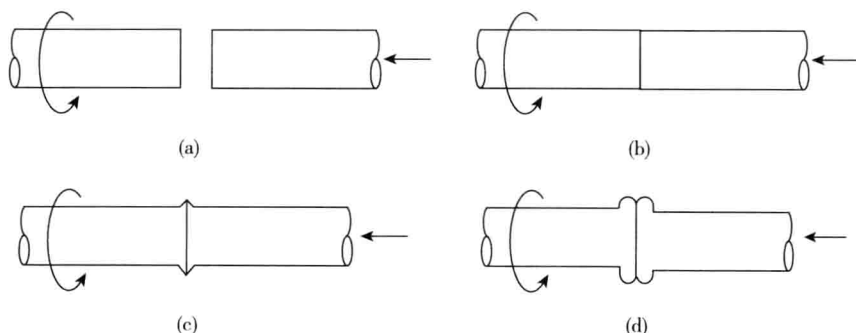


图 1-3 摩擦焊接基本过程

1.2.2 摩擦焊工艺及分类

通过与相关科学及高新技术的紧密结合，摩擦焊工艺方法已由传统的几种形式发展到十多种（如图1-4所示），极大地扩展了摩擦焊接的应用领域。被焊零件的形状由典型的圆截面扩大到非圆截面（线性摩擦焊）和薄板（无压力摩擦焊），所焊材料由传统的技术材料拓展到粉末合金、复合材料、功能材料、难熔材料，以及陶瓷—金属等新型材料和异种材料领域。

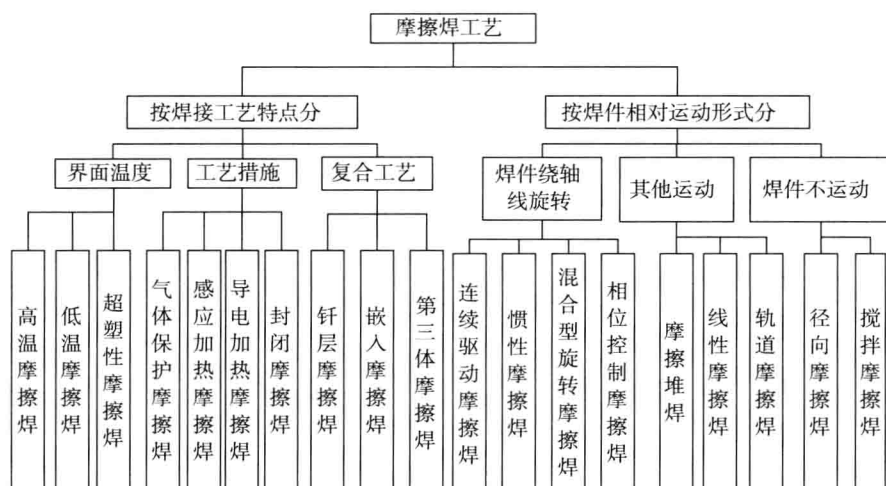


图1-4 摩擦焊工艺方法及分类

摩擦焊的方法很多，一般根据工件的相对运动和工艺特点进行分类。通常所说的摩擦焊主要是指连续驱动摩擦焊、相位控制摩擦焊、惯性摩擦焊和轨道摩擦焊，统称为传统摩擦焊，它们的共同特点是靠两个待焊件之间的相对摩擦运动产生热能。而搅拌摩擦焊、嵌入摩擦焊、第三体摩擦焊和摩擦堆焊，是靠搅拌头与待焊件之间的相对摩擦运动产生热量而实现焊接。下面，以连续驱动摩擦焊和搅拌摩擦焊为例介绍摩擦焊的结构及其焊接过程。

1. 连续驱动摩擦焊

连续驱动摩擦焊是将待焊工件两端分别固定在旋转夹具和移动夹具内(其结构如图1-5所示),工件被夹紧后,位于滑台上的移动夹具随滑台一起向旋转端移动,移动一定距离后,旋转端工件开始旋转,工件接触后开始摩擦加热。此后,则可进行不同的控制,如时间控制或摩擦缩短量控制。当达到设定值时,旋转停止,顶锻开始,通常施加较大的顶锻力并维持一段时间,然后,旋转夹具松开,滑台后退,当滑台退到原位时,移动夹具松开,取出工件。至此,焊接过程结束。典型的连续驱动摩擦焊过程的转速、轴向压力、扭矩、轴向缩短量的变化如图1-6所示。

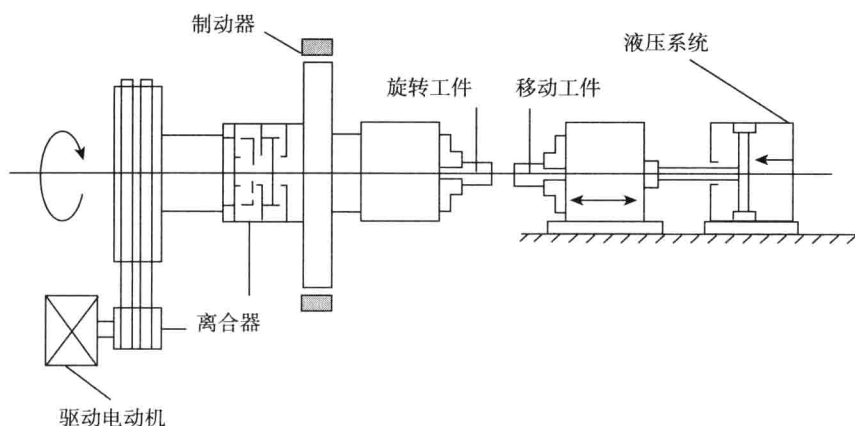


图1-5 连续驱动摩擦焊机的基本结构

2. 搅拌摩擦焊

搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding, FSW)是英国焊接研究所(The Welding Institute, TWI)于1991年发明并获世界范围内专利保护的新型固相焊接技术,是世界焊接技术发展史上自发明到工业应用时间跨度最短且发展最快的一项神奇的连接技术,被誉为“世界焊接史上的第二次革命”和“绿色焊接技术”。FSW的工作原理是搅拌头(包括搅拌针和轴肩)旋转着插入被焊材料,搅拌头与被焊材料接触区域间的相互作用产生热量,