

RAL · NEU 研究报告 No.0027

搅拌摩擦焊接技术的研究

JIAOBAN MOCA HANJIE JISHU DE YANJIU

轧制技术及连轧自动化国家重点实验室
(东北大学)

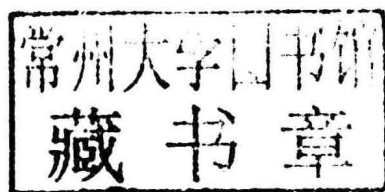


冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

RAL · NEU 研究报告 No. 0027

搅拌摩擦焊接技术的研究

轧制技术及连轧自动化国家重点实验室
(东北大学)



北 京

冶金工业出版社

2016

内 容 简 介

搅拌摩擦焊接技术 (friction stir welding, FSW) 被誉为焊接技术的革命性成果, 目前已经广泛地应用到了各行各业之中并获得了巨大的成功。东北大学 RAL 国家重点实验引进了国内首台专门用于钢铁材料焊接的搅拌摩擦焊机, 利用 FSW 成功地焊接了多种常规材料难以焊接的钢铁材料, 并且获得了高质量的焊接接头。本书介绍了东北大学 RAL 实验室钢铁材料的 FSW 研究进展, 此外还简要地介绍了目前国内外钢铁材料的 FSW 研究状况。

本书可供从事钢铁材料焊接技术研发和生产的工程技术人员、科研人员阅读, 也可供高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

搅拌摩擦焊接技术的研究/轧制技术及连轧自动化国家重点实验室(东北大学)著. —北京: 冶金工业出版社, 2016. 12

(RAL·NEU 研究报告)

ISBN 978-7-5024-7426-3

I. ① 搅… II. ① 轧… III. ① 摩擦焊—研究 IV. ① TG453

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 029141 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

策 划 任静波 责任编辑 卢 敏 李培禄 美术编辑 彭子赫

版式设计 彭子赫 责任校对 郑 娟 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7426-3

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 固安华明印业有限公司印刷

2016 年 12 月第 1 版, 2016 年 12 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 9.75 印张; 153 千字; 142 页

58.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号 (100010) 电话 (010)65289081 (兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题, 本社营销中心负责退换)

研究项目概述

1. 研究项目背景与立题依据

随着国民经济的高速发展，人们对石油和天然气等资源的需求与日俱增。目前，油气的输送和分配主要以管线钢管为载体。高强度级别的管线钢管不仅可以有效地减小管壁厚度，节省材料和实现减重，还可以提高输送压力，增大输送量，最终降低用户的使用成本，因此对于高强管线钢的开发引起了大量研究者的关注。在油气管线的现场铺设过程中，焊接是最为重要的环节，尤其是高强度级别管线钢对焊接的要求更为严苛。目前，管线钢管的环缝普遍采用熔焊连接，但是熔焊伴随的高热输入极易引起熔合区附近热影响区（HAZ）的粗化和脆化，降低接头韧性，还容易引起靠近母材 HAZ 的软化，降低接头强度；另外焊缝区还容易生成冷、热裂纹、气孔和偏析等凝固缺陷。随着管线钢级别的提高，往往需要添加更多的合金元素以保障其力学性能，但是钢的淬硬性也随之提高，容易促使焊接接头韧性的下降。为了保证管线钢接头的强-韧性，在环缝的施焊过程中，目前普遍采用更多的焊接道次，严格控制道次间的温度，并适当地采取焊前预热和焊后缓冷，因此严重地限制了焊接的生产效率。另外，油气管线的铺设多是在偏远地区或海上，时常要面临低温、大风等恶劣气候环境，这对熔焊的工艺过程提出了非常高的要求。因此，目前管线的焊接铺装成本较高，可以达到整个油气管线输送项目总成本的 30%~50%。

汽车工业作为世界各国经济的支柱产业，它的每一次科技进步都会引起巨大的经济和社会效益。在保证安全性能不变的前提下，汽车轻量化对节约能源、减少 CO₂ 排放和提高运输效益具有十分重要的意义。采用厚度小的高强度钢板以及超高强度钢板，与普通钢板相比，汽车重量可以大幅度减轻。在超高强度汽车钢板中双相钢（DP 钢）和相变诱发塑性钢（TRIP 钢）由于具

有较高的强度、较好的伸长率和成型性、较强的吸收碰撞能量等特性，在安全性和节约能耗方面极具潜力，目前已经成为车身轻量化中大力发展应用的高强钢材料。在汽车生产线上，电阻点焊（resistance spot welding, RSW）凭借其成本低和易于实现自动化的优点，成为车身制造中最重要的连接工艺，其中车身中 70% 的连接均采用电阻点焊技术。电阻点焊接头质量的好坏直接决定了汽车使用的可靠性和安全性。对于先进高强汽车钢，在进行 RSW 时，首先由于电阻点焊水冷铜触头的强冷却作用，其次高强度级别汽车钢的碳当量一般都较高，所以熔化的高温奥氏体在快冷形成焊核过程中，其温度变化曲线会直接穿越马氏体相变临界区，焊核中会产生大量粗大的马氏体。这些马氏体一方面能导致焊核的硬度急剧升高、脆性增大，另一方面冷却相变过程中容易产生气孔、裂纹以及内部残余应力分布不均等缺陷，此外热影响区还存在一定程度的软化，最终严重降低了焊点的强度和韧性，对汽车的安全性造成严重损害。此外针对汽车钢表面的镀锌层，电阻点焊过程易造成锌的蒸发，对接头性能也将造成损害。

到目前为止，还有很多种钢铁材料无法用传统熔焊方法进行有效焊接，比如不锈钢、高碳钢、高合金钢以及一些特殊用途的钢铁材料。随着国民经济的快速发展与科技的不断进步，人们相继开发出合金成分更复杂、相组成更多的钢铁材料，传统的焊接方法在焊接这些钢铁材料时往往会严重地恶化材料的性能。因此，传统的焊接方法越来越不适应新钢铁材料的焊接。

作为一种新型的固相连接技术，搅拌摩擦焊接（friction stir welding, FSW）被认为是 21 世纪最具革命性的连接技术。FSW 利用焊接工具与工件间的摩擦热使金属软化，软化的金属因搅拌工具的搅动产生强烈的塑性变形，使焊缝发生动态再结晶，最终实现接头的稳定连接。由于 FSW 的固相连接特征，焊接过程无熔化，因而避免了裂纹、气孔、偏析等熔焊缺陷的产生。也正是由于 FSW 热输入较低，HAZ 晶粒粗化和软化不明显，因而改善了 HAZ 的强-韧性。与多次道次熔焊相比，FSW 通过选择合适长度的焊接工具，可在 1~2 个道次内完成连接，提高了生产效率。另外，FSW 可实现全自动焊，不需开坡口，无预热，不受低温、强风等恶劣气候影响，焊缝稳定可靠，生产效率高。目前，FSW 主要用于铝合金的连接，并被广泛用于航空、航天、汽车、轨道交通、舰船等领域。然而，FSW 钢铁材料的相关研究较少，目前还

处于起步阶段。最近,加拿大的 Schlumberger 公司和瑞典的 ESAB 公司成功开发出了专门用于连接管线钢管环缝的 FSW 装备,并用于 X65 管线钢环缝的现场施焊,获得了高质量的焊接接头。美国的 ExxonMobil 石油公司对 FSW 和全自动熔化极气体保护焊 (GMAW) 陆地和海上油气管线环缝的焊接成本进行了仔细核算。结果发现,尽管 FSW 的焊接工具成本比较高,如多晶立方氮化硼 (PCBN) 和 W-Re 合金工具,但 FSW 大幅提高了生产效率,节约了大量人力成本,与自动 GMAW 相比,FSW 在陆地和海上的油气管道连接中的成本分别节省了 7% 和 25%。因此,与传统熔焊相比,FSW 无论是在焊接质量性能、焊接稳定性还是成本上都具有极大的优势,使得 FSW 在油气管线连接领域具有极为广阔的应用前景,可望在不远的将来成为高强管线环缝的主要连接手段。

基于 FSW 原理,人们还开发出搅拌摩擦点焊 (friction stir spot welding, FSSW) 用来取代传统的电阻点焊 (resistance spot welding, RSW)。与传统 RSW 相比,FSSW 有如下优点:(1) 由于是塑性连接技术,接头具有优异的接头性能;(2) 无融化焊接的缺陷;(3) 低焊接变形和低残余应力;(4) 节省能源、降低成本,研究表明 FSSW 所消耗能量是 RSW 的二十分之一,整个设备成本明显低于电阻点焊设备;(5) 工艺过程简单,搅拌摩擦点焊对工件表面状况要求不高,无需焊接前清理即可得到高质量的点焊接头,不需要任何辅助机械。目前,FSSW 技术已经在汽车研究领域引起了极大关注,日本 Mazda 公司目前已成功经将 FSSW 用于连接汽车中的铝合金部件。

然而,虽然 FSW 在连接钢铁材料方面有巨大的优势,但是目前关于钢铁材料的 FSW 研究相对较少,很多的规律还没有掌握,需要我们做进一步的研究。

2. 研究进展与成果

(1) 为了研究搅拌摩擦焊接高强管线钢,东北大学 RAL 实验室开发出了专门用于管线钢的搅拌摩擦焊管装备,该装备具有液压的快速装卡系统、自动旋转焊接系统、压力自动控制系统,焊接参数可自动调节。利用该搅拌机构可以一次性完成管线钢环形焊缝的焊接,不但可以大大提升焊接过程的效率,而且还可以获得常规熔焊方法难以获得的高质量焊接接头。目前,该机

构已经成功申请了专利并得到了授权。

(2) 为了解决真空热轧复合板生产过程中的焊接难题, 东北大学 RAL 实验室开发出复合板真空焊接装置, 利用该装置可以在真空环境下利用搅拌摩擦焊接技术一次性完成上下金属板界面四周的封装, 从而解决了真空热轧复合板生产过程中的焊接难题。目前, 该机构已经成功申请了专利并得到了授权。

(3) 为了解决高强汽车钢电阻点焊过程中遇到的焊接难题, 东北大学 RAL 实验室在“搅拌摩擦点焊先进高强汽车钢焊接接头的微观组织演变规律和强化机理研究”中央高校基本科研业务费项目的支持下展开了对先进高强汽车双相钢 DP780 的搅拌摩擦点焊研究, 并详细归纳出焊接参数对焊接接头微观组织转变与力学性能的影响。

(4) 为了解决常规熔焊过程中焊接接头粗晶区严重恶化焊接接头性能的难题, 东北大学 RAL 实验室利用搅拌摩擦焊接技术成功地焊接了 X100 管线钢。不但成功地避免了传统熔焊过程中非常容易生成的粗晶区的出现, 而且还获得了具有优异冲击韧性的焊接接头。

(5) 为了研究奥氏体不锈钢在搅拌摩擦焊接过程中的微观组织转变机理及避免传统熔焊过程中很容易出现的热裂纹、元素烧损、晶粒粗大等焊接难题, 东北大学 RAL 实验室成功地利用搅拌摩擦焊接技术连接了 AISI 201 奥氏体不锈钢。并详细研究了焊接过程中焊接接头搅拌区的再结晶机制、晶粒细化规律、 σ 相及 δ -铁素体析出的规律。研究发现, 搅拌摩擦焊接可以在更加广阔的范围内调节焊接参数, 通过焊接参数的调节不但可以控制焊接接头的微观组织转变过程, 而且还可以有效避免有害相的析出。

结合 DP780 搅拌摩擦点焊研究、X100 管线钢搅拌摩擦焊接研究、AISI 201 奥氏体不锈钢搅拌摩擦焊接研究过程, 已培养博士生 1 名、硕士生 5 名。发表高水平 SCI 论文 3 篇, 合计影响因子达到 9.26, 申请国家专利 2 项, 并全部获得授权。研究初步解决了先进高强汽车双相钢 DP780 点焊、X100 管线钢及 AISI 201 奥氏体不锈钢中的焊接难题, 开发出的新型搅拌摩擦焊机也十分顺利地完成了调试并投入使用, 展现出很好的推广应用前景。

3. 论文与专利

论文：

(1) Xie G M, Cui H B, Luo Z A, Yu W, Ma J, Wang G D, Effect of rotation rate on Microstructural characteristic and mechanical properties of friction stir spot welded DP780 steel [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2016 (32): 326~332.

(2) Cui H B, Xie G M, Luo Z A, Ma J, Wang G D, Misra R D K, The microstructural evolution and impact toughness of nugget zone in friction stir welded X100 pipeline steel [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016 (681): 426~433.

(3) Cui H B, Xie G M, Luo Z A, Ma J, Wang G D, Misra R D K, Microstructural evolution and mechanical properties of the stir zone in friction stir processed AISI 201 stainless steel [J]. Materials Design, 2016 (106): 463~475.

专利：

(1) 骆宗安, 谢广明, 崔洪波, 王国栋. 一种管线钢环形焊缝搅拌摩擦焊接机构. CN201510154931.1。

(2) 谢广明, 崔洪波, 骆宗安, 王国栋. 一种真空搅拌摩擦焊接装置及金属复合板制备方法. CN201410843109.1。

4. 项目完成人员

主要完成人员	职 称	单 位
谢广明	副教授	东北大学 RAL 国家重点实验室
骆宗安	教授	东北大学 RAL 国家重点实验室
崔洪波	博士生	东北大学 RAL 国家重点实验室

5. 报告执笔人

谢广明、骆宗安、崔洪波。

6. 致谢

本研究是在东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室骆宗安教授与谢广明副教授共同悉心指导下，在课题组成员的精诚合作下完成的。在项目的完成过程中，实验室完善的装备条件和先进的检测手段，为本研究创造了良好的环境，衷心感谢实验室各位领导、相关老师和实验室的博士、硕士生们的帮助和大力支持。

RAL · NEU 研究报告

(截至 2016 年)

- No. 0001 大热输入焊接用钢组织控制技术研究与应用
- No. 0002 850mm 不锈钢两级自动化控制系统研究与应用
- No. 0003 1450mm 酸洗冷连轧机组自动化控制系统研究与应用
- No. 0004 钢中微合金元素析出及组织性能控制
- No. 0005 高品质电工钢的研究与开发
- No. 0006 新一代 TMCP 技术在钢管热处理工艺与设备中的应用研究
- No. 0007 真空制坯复合轧制技术与工艺
- No. 0008 高强度低合金耐磨钢研制开发与工业化应用
- No. 0009 热轧中厚板新一代 TMCP 技术研究与应用
- No. 0010 中厚板连续热处理关键技术研究与应用
- No. 0011 冷轧润滑系统设计理论及混合润滑机理研究
- No. 0012 基于超快冷技术含 Nb 钢组织性能控制及应用
- No. 0013 奥氏体-铁素体相变动力学研究
- No. 0014 高合金材料热加工图及组织演变
- No. 0015 中厚板平面形状控制模型研究与工业实践
- No. 0016 轴承钢超快速冷却技术研究与应用
- No. 0017 高品质电工钢薄带连铸制造理论与工艺技术研究
- No. 0018 热轧双相钢先进生产工艺研究与开发
- No. 0019 点焊冲击性能测试技术与设备
- No. 0020 新一代 TMCP 条件下热轧钢材组织性能调控基本规律及典型应用
- No. 0021 热轧板带钢新一代 TMCP 工艺与装备技术开发及应用
- No. 0022 液压张力温轧机的研制与应用
- No. 0023 超细晶/纳米晶钢组织控制理论与制备技术
- No. 0024 搪瓷钢的产品开发及机理研究
- No. 0025 高强韧性贝氏体钢的组织控制及工艺开发研究
- No. 0026 超快速冷却技术创新性应用——DQ&P 工艺再创新
- No. 0027 搅拌摩擦焊接技术的研究

(2017 年待续)

目 录

摘要	1
1 搅拌摩擦焊接技术介绍	3
1.1 搅拌摩擦焊接技术简单介绍	3
1.2 搅拌摩擦点焊介绍	5
1.3 搅拌摩擦焊接的应用现状介绍	6
1.4 搅拌摩擦点焊在工业方面的应用现状	8
2 钢铁材料搅拌摩擦焊接介绍	10
2.1 钢铁材料搅拌摩擦焊接技术的难点	10
2.2 钢铁材料搅拌摩擦焊接工具介绍	11
2.2.1 立方氮化硼 (PCBN) 搅拌工具	11
2.2.2 钨合金基体的搅拌工具	11
2.2.3 其他工具	12
2.2.4 高温合金材料搅拌工具的选择	12
2.2.5 钢铁材料搅拌工具形状	13
2.3 钢铁材料搅拌摩擦点焊的研究现状	14
2.3.1 双相钢搅拌摩擦点焊研究	15
2.3.2 TRIP 钢的搅拌摩擦点焊研究	20
2.3.3 低碳钢的搅拌摩擦点焊研究	21
2.3.4 其他钢种的搅拌摩擦点焊研究	23
2.3.5 新颖的搅拌摩擦焊接方法尝试	25
2.3.6 钢铁材料搅拌摩擦点焊研究小结	26
2.4 碳钢搅拌摩擦焊接研究	27



2.4.1	低碳钢搅拌摩擦焊接研究	27
2.4.2	高碳钢搅拌摩擦焊接研究	29
2.4.3	先进高强搅拌摩擦焊接研究	30
2.4.4	低碳微合金钢铁材料搅拌摩擦焊接研究	30
2.5	不锈钢搅拌摩擦焊接研究	34
2.5.1	铁素体不锈钢搅拌摩擦焊接研究	34
2.5.2	奥氏体不锈钢搅拌摩擦焊接研究	36
2.5.3	双相不锈钢的搅拌摩擦焊接研究	38
2.6	钢铁材料搅拌摩擦焊接小结	39
3	先进高强钢 DP780 的搅拌摩擦点焊研究	41
3.1	实验材料与工艺	42
3.2	DP780 搅拌摩擦点焊接头组织性能研究	46
3.2.1	转速对焊接接头组织转变的影响	47
3.2.2	轴肩压入深度对焊接接头组织的影响	63
3.3	焊接参数对焊接接头力学性能的影响	66
3.3.1	转速对焊接接头力学性能的影响	67
3.3.2	压入深度对焊接接头力学性能的影响	70
3.4	焊接过程中压力与温度对焊接接头力学性能的影响	73
3.4.1	焊接转速对焊接压力的影响	74
3.4.2	轴肩压入深度对焊接压力的影响	76
3.5	转速对焊接压力与温度的影响	76
3.6	轴肩压入深度对焊接压力与温度的影响	78
3.7	本章小结	79
4	X100 管线钢搅拌摩擦焊接接头微观组织转变机理及冲击韧性研究	81
4.1	实验材料与过程	81
4.2	X100 管线钢焊接接头宏观形貌分析	82
4.3	焊接接头搅拌区微观组织转变分析	83
4.4	搅拌区冲击韧性研究	92
4.5	本章小结	98

5	AISI 201 奥氏体不锈钢搅拌摩擦加工焊接接头搅拌区微观组织转变及力学性能研究	99
5.1	实验材料与工艺	99
5.2	AISI 201 奥氏体不锈钢焊接接头宏观形貌分析	100
5.3	搅拌区的动态再结晶机制	101
5.4	搅拌区的晶粒细化研究	109
5.5	搅拌区中的 δ -铁素体	112
5.6	条状区域的晶粒细化及 δ -铁素体的研究	116
5.7	搅拌区中 Sigma 相研究	116
5.8	焊接接头横向拉伸试验性能	118
5.9	本章小结	119
6	新型搅拌摩擦焊机的研究与开发	121
6.1	管线钢环形焊缝搅拌摩擦焊接机构介绍	121
6.2	复合板真空搅拌摩擦焊接装置	125
6.3	本章小结	128
	参考文献	130

摘 要

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,搅拌摩擦焊接具有接头缺陷少、质量高、变形小,以及焊接过程绿色、无污染等显著优点。利用搅拌摩擦焊接可以连接常规熔焊难以焊接的铝合金、镁合金、铜合金、钛合金等金属,焊接接头的质量十分优异。目前,搅拌摩擦焊接在焊接铝、镁合金等轻质合金方面已经取得了巨大的成功,并已经在航空、航天、船舶、核工业、交通运输等工业制造领域大量应用。虽然搅拌摩擦焊接技术在轻合金材料焊接方面的应用已经很成熟,但是在焊接钢铁材料时,搅拌工具要在高温下承受巨大的摩擦力与应力,这对搅拌工具是巨大的挑战,因此,在焊接钢铁材料时依然存在较大的困难。随着搅拌工具材料的突破,搅拌摩擦焊接已近逐渐应用到了钢铁材料的焊接方面,并且取得了力学性能十分优异的焊接接头,但是到目前为止还是不成熟。

目前,虽然国内外都开展了大量的搅拌摩擦焊接研究工作,并取得了丰硕的研究成果,但关于钢铁材料的搅拌摩擦焊接研究相对较少,更没有专门介绍钢铁材料的搅拌摩擦焊接的书籍。因此,随着钢铁材料搅拌摩擦焊接研究的深入,亟需将钢铁材料的搅拌摩擦焊接研究进行归纳总结、梳理及提炼,为以后钢铁材料的搅拌摩擦焊接提供丰富的参考资料。2012年,东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室引进了国内第一台高温合金材料的搅拌摩擦焊机,并利用该焊机进行了大量的钢铁材料搅拌摩擦焊接的基础研究。主要的研究工作及成果如下:

(1) 申请了“一种管线钢环形焊缝搅拌摩擦焊接机构”专利并获得批准,成功地研制并制作出该焊接机构。经过调试,该焊接机构可以一次性利用搅拌摩擦焊接技术完成管线钢环形焊缝的焊接。

(2) 申请了“一种真空搅拌摩擦焊接装置及金属复合板制备方法”专利

并获得批准。利用该装置可以在真空轧制复合板过程中封装上下两板的界面,使热轧时复合界面不氧化,从而解决了一些难焊金属或者异种金属的焊接封装难题。

(3) 开展了先进高强汽车用钢 DP780 的搅拌摩擦点焊研究,掌握了焊接参数对焊接接头微观组织转变机理的影响规律。

(4) 开展了 X100 管线钢的搅拌摩擦焊接研究,利用搅拌摩擦焊接技术可以获得具有优异冲击韧性的焊接接头,成功地解决了传统熔焊过程中焊接接头晶粒过分粗大的问题。

(5) 开展了 AISI 201 奥氏体不锈钢的搅拌摩擦焊接研究,详细地研究了搅拌区中晶粒再结晶机制、晶粒细化机制、析出相等问题,并且获得了高质量的焊接接头。

1 搅拌摩擦焊接技术介绍

1.1 搅拌摩擦焊接技术简单介绍

搅拌摩擦焊接 (friction stir welding, FSW) 是在 1991 年, 由英国焊接研究所发明的一种新颖的固相焊接技术。该技术不同于任何传统的焊接技术, 焊接过程中没有焊丝, 没有焊剂, 依靠搅拌摩擦焊机的搅拌头和搅拌头轴肩对工件的摩擦产生热量, 软化工件, 再通过搅拌头的高速转动使软化的工件产生塑性流动, 在流动过程中产生强烈的动态再结晶, 进而实现工件的连接。高速旋转的搅拌头插入工件后停留一段时间, 然后沿焊接方向运动, 依靠搅拌针 (pin) 和轴肩 (shoulder) 与工件的摩擦产生热量, 使其周围金属软化, 在搅拌头旋转的作用下软化的金属填充搅拌针后方所形成的空腔, 工件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。焊接完成后, 整个焊缝主要由搅拌区 (或称焊核区)、热机械影响区和热影响区三部分组成。搅拌摩擦焊接的示意图如图 1-1 所示。

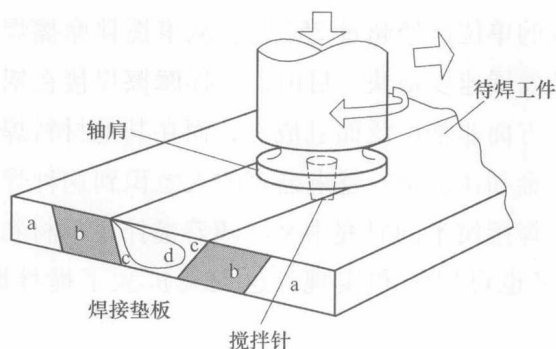


图 1-1 搅拌摩擦焊接示意图

a—母材; b—热影响区; c—热机械影响区; d—焊核区

与传统熔焊相比,搅拌摩擦焊接具有以下优点:

(1) 接头力学性能良好,不易产生缺陷。焊缝是在塑性状态下受挤压完成的固相焊接,避免了传统焊接时由于金属熔池的凝固而产生的裂纹、气孔、偏析等缺陷。

(2) 变形小。与传统熔焊相比,搅拌摩擦焊接的变形比熔焊小很多。

(3) 焊接过程绿色、环保。因为搅拌摩擦焊接过程中只涉及搅拌头与工件的摩擦,所以焊接过程中没有烟尘与弧光污染,没有金属的飞溅,工作环境好。

(4) 操作过程简单,易于实现焊接的自动化。

(5) 节约能源、降低成本。在整个焊接过程中不需要焊丝、焊剂及供电系统,只需要搅拌头做为焊接工具,耗材少^[1]。

搅拌摩擦焊接接头一般分为四个区:母材、热影响区、热机械影响区、焊核区,如图 1-1 所示。其中,焊核区可分为前进侧(advancing side, AS)与后退侧(retreating side, RS),前进侧在焊接过程中材料的流动方向与焊接方向相同,后退侧在焊接过程中材料的流动方向与焊接方向相反,这种差异也导致了在搅拌摩擦焊接过程中两者的变形条件有明显差别。

搅拌摩擦焊接技术从 1991 年诞生以来,经过了 20 多年的发展,现在该技术已经在镁合金与铝合金的焊接中大量应用,在船舶、机动车辆和航空航天等领域也具有非常广阔的应用前景,被誉为焊接技术的革命性成果。搅拌摩擦焊接技术正式进入中国也已有 10 余年的时间。迄今为止,全球拥有搅拌摩擦焊接技术授权的单位已经超过 250 家,从事搅拌摩擦焊接研究的人员也有近万人,可见其发展速度很快。目前,搅拌摩擦焊接在铝合金和镁合金等轻金属的焊接应用方面非常广泛而且成熟,而在其他材料焊接方面的研究也非常多,比如铜合金和钛合金。越来越多的人意识到这种焊接方法的重要性而投入到搅拌摩擦焊接技术的研究中来。随着搅拌工具材料的突破,高温合金的搅拌摩擦焊接也可以顺利实现,这无疑扩大了搅拌摩擦焊接的应用范围^[2]。

基于搅拌摩擦焊接的原理,密苏里大学的 Mishra 教授发明了搅拌摩擦加工技术(friction stir processing, FSP)。该技术是将旋转的搅拌工具插入到整块工件中并沿某一方向运动,利用搅拌工具的旋转在工件金属中引入强塑性