

卓越工程师教育 —— 焊接工程师系列教程

现代高效 焊接技术

韩国明 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



卓越工程师教育——焊接工程师系列教程

现代高效焊接技术

韩国明 编著



机械工业出版社

本书是为满足普通高等教育“材料成型及控制工程”专业本科生卓越工程师教育的需要而编写的系列教材之一。

全书共8章。介绍了近年来开发和广泛应用的现代高效焊接技术,包括:高效埋弧焊、钨极氩弧焊新技术、高效高熔敷率和低热输入熔化极气体保护焊、窄间隙焊、等离子弧焊新工艺、激光焊与激光切割、复合热源焊、搅拌摩擦焊的基本原理、工艺特点、相关设备以及应用等内容。

本书可以作为大学本科和高职高专“焊接”“材料成型及控制工程”(焊接方向)专业相关课程的教材,硕士研究生“材料加工工程”专业相关课程的参考教材,焊接工程师继续教育的培训教材,还可以供焊接及相关学科教师及工程技术人员从事教学、科研与技术开发工作参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代高效焊接技术/韩国明编著. —北京:机械工业出版社, 2017. 11
卓越工程师教育. 焊接工程师系列教程
ISBN 978-7-111-58549-7

I. ①现… II. ①韩… III. ①焊接-教材 IV. ①TG4

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第288268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:何月秋 责任编辑:何月秋 王彦青

责任校对:郑婕 陈越 封面设计:马精明

责任印制:李昂

河北鹏盛贤印刷有限公司印刷

2018年4月第1版第1次印刷

184mm×260mm·20印张·482千字

0001—2500册

标准书号:ISBN 978-7-111-58549-7

定价:59.00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

服务咨询热线:010-88361066

读者购书热线:010-68326294

010-88379203

编辑热线:010-88379879

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

金书网:www.golden-book.com

教育服务网:www.cmpedu.com

卓越工程师教育——焊接工程师系列教程

编委会名单

主 任 胡绳荪

委 员 (按姓氏笔画排序)

王立君 杜则裕

何月秋 杨立军

郑振太 贾安东

韩国明

序

教育部“卓越工程师教育培养计划”是贯彻落实《国家中长期教育改革和规划纲要（2010—2020年）》和《国家中长期人才发展规划纲要（2010—2020年）》的重大改革项目，也是促进我国高等工程教育改革和创新，努力建设具有世界先进水平和中国特色的现代高等工程教育体系，走向工程教育强国的重大举措。该计划旨在培养和造就创新能力强、适应经济社会发展需要的高质量各类型工程技术人才，为实现中国梦服务。

焊接作为制造领域的重要技术在现代工程中的应用越来越广，质量要求越来越高。为适应时代的发展与工程建设的需要，焊接科学与工程技术人员培养进入了“卓越工程师教育培养计划”，本套“卓越工程师教育——焊接工程师系列教程”的出版可谓恰逢其时，一定会赢得众多的读者关注，使社会和企业受益。

“卓越工程师教育——焊接工程师系列教程”内容丰富、知识系统，凝结了作者们多年的焊接教学、科研及工程实践经验，必将在我国焊接卓越工程师人才培养、“焊接工程师”职业资格认证等方面发挥重要作用，进而为我国现代焊接技术的发展作出重大贡献。

单 平

编写说明

随着高等教育改革的发展,2010年教育部开始实施“卓越工程师教育培养计划”,其目的就是要“面向工业界、面向世界、面向未来”,培养造就创新能力强、适应现代经济社会发展需要的高质量各类型工程技术人才,为建设创新型国家、实现工业化和现代化奠定坚实的人力资源优势,增强我国的核心竞争力和综合国力。

我国高等院校本科“材料成型及控制工程”专业担负着为国家培养焊接、铸造、压力加工和热处理等领域工程技术人才的重任。结合国家经济建设和工程实际的需求,加强基础理论教学和注重培养解决工程实际问题的能力成为了“卓越工程师教育计划”的重点。

在普通高等院校本科“材料成型及控制工程”专业现行的教学计划中,专业课学时占总学时数的比例在10%左右,教学内容则要涵盖铸造、焊接、压力加工和热处理等专业知识领域。受专业课教学学时所限,学生在校期间只能是初知焊接基本理论,毕业后为了适应现代企业对焊接工程师的岗位需求,还必须对焊接知识体系进行较系统的岗前自学或岗位培训,再经过焊接工程实践的锻炼与经验积累,才能成为焊接卓越工程师。显然,无论是焊接卓越工程师的人才培养,还是焊接工程师的自学与培训都需要有一套实用的焊接专业系列教材。“卓越工程师教育——焊接工程师系列教程”正是为适应高质量焊接工程技术人才的培养和需求而精心策划和编写的。

本系列教程是在机械工业出版社1993年出版的“继续工程教育焊接教材”系列与2007年出版的“焊接工程师系列教程”的基础上修订、完善与扩充的。新版“卓越工程师教育——焊接工程师系列教程”共11册,包括《焊接技术导论》《熔焊原理》《金属材料焊接》《焊接工艺理论与技术》《现代高效焊接技术》《焊接结构理论与制造》《焊接生产实践》《现代弧焊电源及其控制》《弧焊设备及选用》《焊接自动化技术及其应用》《无损检测与焊接质量保证》。

本系列教程的编写基于天津大学焊接专业多年的教学、科研与工程科技实践的积淀。教程取材力求少而精,突出实用性,内容紧密结合焊接工程实践,注重从理论与实践结合的角度阐明焊接基础理论与技术,并列举了较多的焊接工程实例。

本系列教程可作为普通高等院校“材料成型及控制工程”专业(焊接方向)本科生和研究生的参考教材;适用于企业焊接工程师的岗前自学与岗位培训;可作为注册焊接工程师认证考试的培训教材或参考书;还可供从事焊接技术工作的工程技术人员参考。

衷心希望本系列教程能使业内读者受益,成为高等院校相关专业师生和广大焊接工程技术人员的良好益友。本套教程中难免存在瑕疵和谬误,恳请各界读者不吝赐教,予以斧正。

编委会

前 言

随着焊接技术的不断创新,新的焊接技术向着高效、节能、绿色、智能化方向快速发展。高效化带来的最终结果就会节能,智能化的焊接技术也必然是高效的,绿色环保焊接是焊接工作者不断追求的目标。焊接技术要高效率一般应从以下三方面着手:一是提高焊接速度;二是提高焊接熔敷率;三是减少焊接辅助工序和时间。单独追求一个方面是很难达到高效的目的的,必须从以上三个方面共同努力。在焊接工作者的不断努力下,特别是近十几年来,相继开发出了许多新型高效的焊接技术。但“材料成型及控制工程”专业的本科教学中仍以传统的焊接方法为主,对现代高效焊接技术没有系统的介绍。为了使学生毕业后在企业能尽快掌握和应用这些技术,适应企业的需求,开展卓越工程师教育,提高毕业生的工作适应性,满足企业对人才的渴望,为此编写了《现代高效焊接技术》一书。

本书共分8章,主要介绍了近年来开发和广泛应用的现代高效焊接技术的基本原理、工艺特点、相关设备以及应用等内容,包括:高效埋弧焊(多丝、金属粉末、冷热填丝等);钨极氩弧焊新技术(A-TIG焊、热丝TIG焊、高频感应热丝TIG焊、TIP TIG焊、超声TIG、K-TIG、TIG-MIG焊等);高效高熔敷率和低热输入熔化极气体保护焊(T.I.M.E焊、LIN-FAST焊、RAPID ARC焊、磁控大电流MAG焊、双丝MAG焊、TANDEM、CMT焊、变极性CMT工艺、CMT Twin、Cold Arc、Cold Process、AC-CBTCS、Low Energe Input);窄间隙焊(NG-SAW、NG-GTAW或NG-TIG、NG-GMAW或NG-MIG/MAG、超窄间隙熔化极气体保护焊);等离子弧焊新工艺(变极性等离子弧焊、活性等离子弧焊、等离子-TIG焊、等离子-MIG焊、变极性等离子-MIG复合焊、窄间隙等离子-MIG复合焊、精细等离子弧焊);激光焊与激光切割;复合热源焊(激光-TIG/MIG/PAW、激光-高频感应热源、激光-电阻热源、激光-搅拌摩擦焊等);搅拌摩擦焊(对接、搭接、T形接头、点焊)。

本书由天津大学韩国明教授编著。

在本书编写过程中,得到了许多同仁的帮助和支持,在此表示衷心的感谢,本书参阅了有关教材和相关的文献资料,在此向本书中所引用文章的作者深表谢忱。

由于编著者水平有限,加之现代焊接技术的研究日新月异,可能有一些新型高效焊接技术未能编入书中,并且在编写中差错和不足在所难免,敬请各界读者予以批评指正。

编著者

目 录

序	
编写说明	
前言	
第 1 章 高效埋弧焊	1
1.1 多丝埋弧焊	1
1.1.1 多丝埋弧焊的特点及应用	1
1.1.2 多丝埋弧焊用焊丝和焊剂	3
1.1.3 交流焊机斯考特连接	4
1.1.4 多丝埋弧焊焊接参数	5
1.1.5 双丝埋弧焊工艺	6
1.1.6 三丝埋弧焊工艺	15
1.1.7 四丝埋弧焊工艺	17
1.1.8 五丝埋弧焊工艺	18
1.1.9 单电源多丝埋弧焊	22
1.2 金属粉末埋弧焊	24
1.3 热丝、冷丝填丝埋弧焊	27
第 2 章 钨极氩弧焊新技术	30
2.1 活性焊剂钨极氩弧焊 (A-TIG 焊)	30
2.1.1 概述	30
2.1.2 A-TIG 焊的特点	30
2.1.3 活性焊剂	31
2.1.4 活性焊剂的使用	32
2.1.5 A-TIG 焊的机理	32
2.1.6 A-TIG 焊的应用	33
2.1.7 316L 不锈钢管 A-TIG 焊工艺	34
2.2 热丝 TIG 焊	36
2.2.1 热丝 TIG 焊的原理	36
2.2.2 热丝 TIG 焊的特点	37
2.2.3 热丝 TIG 焊在管道焊接中 的应用	38
2.2.4 高频感应热丝 TIG 焊	40
2.2.5 高频振动送丝式热丝 TIG 焊	41
2.3 超声-TIG 复合焊	43
2.4 K-TIG 焊	44
2.5 TIG-MIG 焊	45
第 3 章 高效高熔敷率和低热输入 熔化极气体保护焊	46
3.1 高效 MIG/MAG 焊概述	46
3.1.1 提高 MIG/MAG 焊效率的方法	46
3.1.2 高效 MIG/MAG 焊焊接设备 的构成	49
3.2 T. I. M. E 焊	50
3.2.1 T. I. M. E 焊的基本原理	50
3.2.2 T. I. M. E 焊的特点	51
3.2.3 T. I. M. E 焊工艺	52
3.2.4 T. I. M. E 焊设备及对设备 的要求	53
3.3 LINFAS 焊接工艺	53
3.4 RAPID ARC 焊接工艺	54
3.5 磁控大电流 MAG 焊	55
3.6 双丝高速焊	56
3.6.1 双丝 MAG 焊 (MAX 法)	56
3.6.2 T. I. M. E TWIN 和 TANDEM 双丝 熔化极气体保护焊	57
3.7 低热输入气体保护电弧焊	61
3.7.1 冷焊技术的特点及应用	61
3.7.2 CMT 冷金属过渡工艺	62
3.7.3 Cold Arc 技术	67
3.7.4 CP 冷焊工艺	68
3.7.5 AC-CBT 技术	69
3.7.6 TCS 冷金属过渡双丝焊接技术	69
3.7.7 低能量输入电弧焊	69
3.7.8 冷焊技术的应用	72
第 4 章 窄间隙焊	74
4.1 窄间隙焊概述	74
4.1.1 窄间隙焊的优缺点	74
4.1.2 窄间隙焊的应用	75



4.1.3 三种窄间隙焊接方法比较	76	5.4.4 等离子弧-MIG 焊机系统	148
4.2 窄间隙埋弧焊	78	5.4.5 等离子弧-MIG 焊与常规 MIG 焊温度场的比较	149
4.2.1 窄间隙埋弧焊的特点及应用	79	5.4.6 等离子弧-MIG 复合角焊	150
4.2.2 窄间隙埋弧焊设备的关键技术	80	5.4.7 双等离子弧-MIG 复合堆焊	151
4.2.3 单丝窄间隙埋弧焊工艺	90	5.4.8 变极性等离子弧-MIG 复合焊	151
4.2.4 双丝窄间隙埋弧焊工艺	97	5.4.9 低碳钢等离子弧-MIG 焊工艺	152
4.3 窄间隙热丝 TIG 焊	102	5.4.10 窄间隙等离子弧-MIG 复合焊	153
4.3.1 窄间隙热丝 TIG 焊的分类	102	5.5 精细等离子弧焊技术	154
4.3.2 窄间隙 TIG 焊需要解决的问题	103	第 6 章 激光焊与激光切割	155
4.3.3 窄间隙热丝 TIG 焊的基本原理	104	6.1 激光的产生	155
4.3.4 TIG 窄间隙焊焊机机头	105	6.2 激光焊设备	157
4.3.5 单道多层不摆动窄间隙热丝 TIG 焊	105	6.2.1 激光焊设备的组成	157
4.3.6 BHK 电极旋转式窄间隙热丝 TIG 自动焊	109	6.2.2 固体激光设备	158
4.4 窄间隙熔化极气体保护焊	114	6.2.3 碟片激光器	161
4.4.1 窄间隙熔化极气体保护焊的特点及分类	114	6.2.4 半导体激光器	164
4.4.2 低热输入窄间隙熔化极气体保护焊	116	6.2.5 光纤激光器	168
4.4.3 高热输入窄间隙熔化极气体保护焊	116	6.2.6 CO ₂ 激光器	171
4.4.4 焊接参数的选择	117	6.3 激光焊	177
4.4.5 窄间隙熔化极气体保护焊焊丝和保护气体的送进技术	118	6.3.1 激光焊的特点	177
4.4.6 窄间隙坡口侧壁熔合技术	119	6.3.2 激光焊的机理	178
4.4.7 窄间隙 MAG 焊的应用	124	6.3.3 激光焊焊接过程的几种效应	180
4.4.8 双丝窄间隙熔化极气体保护焊	126	6.3.4 激光焊工艺	181
4.4.9 超窄间隙熔化极气体保护焊	130	6.3.5 双光束激光焊	193
第 5 章 等离子弧焊新工艺	133	6.3.6 多焦点激光焊	194
5.1 变极性等离子弧焊	133	6.3.7 旋转焦点激光焊	197
5.1.1 变极性等离子弧焊原理及特点	133	6.3.8 激光填丝焊	198
5.1.2 变极性等离子弧平焊	134	6.4 激光切割	200
5.1.3 变极性等离子弧立焊	136	6.4.1 激光切割的原理、特点及应用	201
5.1.4 变极性等离子弧焊的双弧现象	142	6.4.2 激光切割机	206
5.2 活性等离子弧焊	143	6.4.3 激光切割工艺	210
5.3 等离子弧-TIG 焊	144	6.4.4 光纤激光器切割工艺	217
5.4 等离子弧-MIG 焊	145	6.4.5 三维激光切割技术	218
5.4.1 等离子-MIG 复合焊原理	146	6.4.6 金属材料的激光切割	220
5.4.2 等离子弧-MIG 复合焊特点及应用	146	6.4.7 激光焊与激光切割的危害及预防	222
5.4.3 等离子弧-MIG 复合焊枪	147	第 7 章 复合热源焊	225
		7.1 概述	225
		7.2 激光-电弧复合热源焊	226
		7.2.1 激光-电弧复合热源焊的基本原理	226
		7.2.2 激光-电弧复合热源焊的复合	



形式	227	8.4.1 搅拌摩擦焊焊接接头的抗拉强度 和弯曲性能	273
7.2.3 激光-电弧复合热源焊的物理 特性	227	8.4.2 搅拌摩擦焊焊接接头的硬度	275
7.2.4 激光-电弧复合热源焊的特点	228	8.4.3 搅拌摩擦焊焊接接头的疲劳 强度	276
7.2.5 激光-电弧复合热源焊的应用	229	8.4.4 搅拌摩擦焊焊接接头的冲击 韧度和断裂韧度	277
7.3 激光-TIG 复合焊	231	8.4.5 搅拌摩擦焊的应力腐蚀裂纹	278
7.3.1 激光-TIG 复合焊的作用机理及 特点	231	8.5 搅拌摩擦焊的应用	278
7.3.2 激光-旁轴 TIG 电弧复合焊	232	8.6 搅拌摩擦搭接焊	279
7.3.3 激光-同轴 TIG 电弧复合焊	234	8.6.1 搅拌摩擦焊搭接接头类型	280
7.3.4 旋转双焦点激光-TIG 复合焊	236	8.6.2 界面迁移现象	281
7.4 激光-MIG/MAG 复合焊	239	8.6.3 搭接接头搅拌摩擦焊工艺	282
7.4.1 激光-MIG/MAG 复合焊的基本 原理	239	8.6.4 消除钩状缺陷提高焊接质量 的措施	283
7.4.2 激光-MIG/MAG 复合焊工艺	241	8.6.5 异种材料搅拌摩擦搭接焊	284
7.4.3 铝合金激光-MIG 复合焊	247	8.6.6 铝合金搅拌摩擦焊搭接接头疲 劳行为	285
7.4.4 激光-双 MIG 复合焊	250	8.7 T 形接头搅拌摩擦焊	286
7.4.5 激光-CO ₂ /MAG 短路过渡复 合焊	251	8.7.1 T 形接头的结构形式	286
7.4.6 激光-CTM 复合焊	253	8.7.2 T 形接头搅拌摩擦焊的焊 接过程	286
7.5 激光-等离子弧复合焊	254	8.7.3 T 形接头搅拌摩擦焊焊接工艺	287
7.6 激光-感应热源复合焊	256	8.7.4 T 形接头搅拌摩擦焊焊缝金属 的流动性	288
7.7 激光-电阻热复合焊	257	8.7.5 T 形接头搅拌摩擦焊焊缝组织 特征	290
7.8 激光-搅拌摩擦复合焊	259	8.7.6 T 形接头搅拌摩擦焊焊缝显微 硬度及力学性能	290
第 8 章 搅拌摩擦焊	260	8.7.7 T 形接头搅拌摩擦焊焊接缺陷	292
8.1 概述	260	8.8 搅拌摩擦点焊	293
8.1.1 搅拌摩擦焊的基本原理	260	8.8.1 搅拌摩擦点焊的基本原理	293
8.1.2 搅拌摩擦焊的特点	261	8.8.2 搅拌摩擦点焊的主要形式	293
8.1.3 影响搅拌摩擦焊的因素	262	8.8.3 搅拌摩擦点焊的优点	297
8.2 搅拌摩擦焊工艺	265	8.8.4 搅拌摩擦点焊的工艺	297
8.2.1 接头形式	265	8.8.5 搅拌摩擦点焊金属的塑性流动	298
8.2.2 焊接参数的选择	266	8.8.6 搅拌摩擦点焊的接头组织	300
8.3 搅拌摩擦焊的温度分布和焊 缝金属组织	269	8.8.7 搅拌摩擦点焊焊点的硬度分布	301
8.3.1 焊缝区的温度分布	269	8.8.8 搅拌摩擦点焊的应用	302
8.3.2 焊缝温度仿真计算结果	270	参考文献	304
8.3.3 焊接时的热量测量	271		
8.3.4 焊缝区的组织	272		
8.4 搅拌摩擦焊焊接接头的力 学性能	273		

高效埋弧焊

进入 21 世纪,科学技术突飞猛进地发展,高效化焊接已提上日程,埋弧焊高效化是国内外焊接加工技术研究和应用的重要趋势。自动埋弧焊技术取得了长足的进步,埋弧焊工艺(SAW)已成为高效焊接工艺之一。

焊接结构生产中日益增强的提高生产率的要求,决定了需要采用新的高效焊接工艺。众所周知,能提高埋弧焊焊接效率的方法有改变电极数量,如多丝埋弧焊,埋弧焊从单丝发展到双丝、三丝、四丝甚至五丝或更多;或改变电极形状,如带极埋弧焊;还有添加辅助填充金属的,如坡口内添加合金粉末的埋弧焊;也有改变坡口形状尺寸的,如窄间隙埋弧焊。此外,还有冷丝和热丝填丝埋弧焊等。

埋弧焊设备在精确自动化微机控制和数字化智能控制技术方面也已获得了快速发展;埋弧焊丝年生产能力超过 30 万 t。实现了从单一生产向多门类、多品种、高品质转变。国内生产熔炼焊剂品种达 30 多种,年产能达 35 万 t 以上;烧结焊剂品种有 40 余种,年产能 25 万 t 以上。

埋弧焊具有生产效率高、焊接质量高、劳动条件好等优点,在造船、压力容器、桥梁、铁路车辆、管道、海洋结构等领域有着广泛的应用,适用于低碳钢、低合金钢、不锈钢、铜及铜合金的焊接。

1.1 多丝埋弧焊

1.1.1 多丝埋弧焊的特点及应用

1. 多丝埋弧焊的特点

单丝埋弧焊时,提高焊接电流虽可提高焊接速度,但焊缝成形不良,易出现焊缝两侧凹陷咬边、中心有尖峰的驼峰形焊缝,使焊接速度提高受到限制。另一方面,对于厚大焊件,提高焊接电流虽可使熔深增大,但易生成气孔、裂纹等缺陷,使单丝埋弧焊的焊接电流提高也受到限制。因此在工业上采用的多丝埋弧焊,是一种既能保证合理的焊缝成形和良好的焊接质量又可提高焊接速度的有效方法。

多丝埋弧焊是采用两根或两根以上焊丝同时焊接,完成同一条焊缝的埋弧焊方法。多丝埋弧焊的焊接原理及焊接过程与单丝埋弧焊基本相同。因为采用了多丝,与单丝埋弧焊相比具有以下特点:

(1) 焊接速度大,生产效率高 实现了大厚度焊件的一次性焊接,焊缝熔深大,易于焊透。显著提高了厚板的焊接效率。例如直缝管五丝埋弧焊,单程可完成 40mm 厚板材的焊接,焊接速度达 2.5m/min,极大地提高了焊接效率。多丝埋弧焊工艺工序简单、速度快、



效率高、周期短、质量可靠、经济效益好。

(2) 熔池存在时间长、冶金反应充分 有充分的时间使气体逸出和熔渣浮出,减少焊缝气孔和夹杂等缺陷的产生。

(3) 焊接热输入调节范围广 多丝焊时,可以实现多种参数匹配,调节热输入。有利于改善热影响区的晶粒长大情况,例如四丝埋弧焊焊接速度高达 $30 \sim 50 \text{ mm/s}$,而温度场前沿到温度场中心只有几毫米,所以焊缝金属加热速度极快,这限制了奥氏体晶粒长大倾向且降低了奥氏体的稳定性,降低了焊缝热影响区的晶粒粗大倾向。多丝埋弧焊减少了母材的热循环次数,延长了母材的热循环时间,降低了焊缝热裂纹和气孔的敏感性。

(4) 焊缝深而窄,热影响区窄 多丝焊时,焊丝呈纵向排列,且焊接速度很高,焊缝温度场呈狭长状,即焊缝横向较窄,而焊缝深度方向因熔池底部可能受到多电弧加热,以及散热条件影响,温度易升高。所以多丝埋弧焊的焊缝断面呈深窄形,且热影响区窄;例如单丝(焊接电流为 600 A)双面焊 8 mm 厚钢板,保证焊透时,焊缝断面热影响区宽度为 $3 \sim 5 \text{ mm}$;而四丝焊厚度为 16 mm 的钢板,焊透时,焊缝断面热影响区宽度为 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 。

(5) 多丝埋弧焊调节参数较多,焊缝断面形状调节余地较大 各丝可分别使用独立的电源,各个电源的焊接电流、电弧电压均可单独调节,加上焊接速度等参数,可调节参数多,每个参数对焊缝熔池的深度、宽度和焊缝的余高以及焊根的形状、形貌都有一定的影响;而且焊缝成形还会因各电弧的相对位置、焊丝倾角的不同而改变。

(6) 可实现多种焊接选择 每个电源配置一个控制箱,能实现双丝、三丝、四丝等多丝联动,也能实现单丝焊。

多丝埋弧焊以其高速、高效、性能稳定、质量可靠、适用范围广等显著特点,特别适合于中、厚板的对接和高速焊管等。

2. 存在问题

1) 为了防止电弧之间的相互干扰,在焊接电源的网络接入上,采用固定的焊接电源排列顺序,使相互的输入关系固定,以获得电源输出的相序差别。但这种方式确定的相序关系不能调整,因而对工艺的拓展宽度有限制。

2) 在多丝埋弧焊时,多根焊丝通常是分别起弧,焊丝数量排列越多,尾弧的破渣效果要求就越高,处理不当则会出现起泡现象。

3) 大多数多丝埋弧焊焊接系统不能实现集中控制。每个电源都采用单独控制器去控制,加上机械系统的 PLC 控制器,使焊接系统出现很多控制器,增加了操作上的复杂性和不确定性。

4) 没有集成自动跟踪系统或集成度差,焊接过程仅靠机头前的固定指针或红外光点来对中焊缝,或用肉眼观察以及多次来回模拟调整,增加了调整工作量,从而导致效率降低。

5) 匹配的焊剂不能很好地满足使用性能的要求,并存在焊接速度低的问题。高级管线钢焊接用焊剂应该从改善熔渣系统和焊缝金属组织等方面着手,以满足高强度、高韧度、高速度的要求。

3. 多丝埋弧焊分类及应用

多丝埋弧焊按焊丝与电源的连接,可分为单电源多丝埋弧焊,即各丝共用同一台电源,设备简单,但焊丝焊接参数不可独立调节;各丝也可分别使用独立的电源而相互独立,即多电源多丝埋弧焊,虽然设备复杂,但每个焊丝均可独立调节焊接参数。



多丝埋弧焊按丝的数量可分为双丝埋弧焊、三丝、四丝、五丝及以上的多丝埋弧焊；双丝埋弧焊按焊丝的排列可分为纵列双丝埋弧焊、横列双丝串联埋弧焊、横列双丝并联埋弧焊等。三丝或三丝以上的多丝埋弧焊多为纵列多丝埋弧焊。

三丝或三丝以上的多丝埋弧焊可以进一步提高单程焊接速度。为增加熔深，前导的焊丝与后随焊丝常采用近间距以形成一个熔池，其余后随电弧可采用较大间距以获得较大熔池。

多丝埋弧焊是同时使用2根或2根以上焊丝完成一条焊缝的焊接方法，是一种既能保证合理的焊缝成形和良好的焊接质量，又可提高焊接速度的高效焊接方法之一。主要用于造船、管道、压力容器、H形钢梁等结构的生产中。焊丝可采用细丝也可用粗丝，既可焊接薄板，例如液化石油气储罐薄壁（壁厚为3mm）容器，又可焊接厚大焊件，还可实现单面焊双面一次成形。最多的焊丝可达8~12根，使焊接速度达到120m/h以上。在一些厚板焊接结构生产中，应用3~6台送丝电动机，可以同时进行3~10根焊丝埋弧焊。我国管线钢多丝埋弧焊工艺是20世纪90年代随着大规模油气管线建设的需要而发展起来的一种新型高效焊接方法。多丝埋弧焊是船舶行业主要采用的高效焊接技术之一，埋弧焊的焊接质量和焊缝外观较好，主要应用于拼板平直焊缝的焊接，在平面分段装焊流水线上采用了先进的三丝、四丝等不同型号的埋弧焊机和专用工装。

多丝埋弧焊还可以与其他方法联合进行焊接，如前所述，添加金属粉末的多丝埋弧焊，以及在接缝背面装夹衬垫实现多丝埋弧焊单面焊双面成形，更加发挥出多丝埋弧焊的优势。

1.1.2 多丝埋弧焊用焊丝和焊剂

1. 焊丝

埋弧焊常用的焊丝分为钢焊丝和不锈钢焊丝两大类，在造船、压力容器、H形钢梁等结构的生产中，多丝埋弧焊使用的焊丝，按国家标准GB/T 14957—1994《熔化焊用钢丝》及YB/T 5092—2016《焊接用不锈钢丝》规定选用。

在直缝焊管多丝埋弧焊中，由于焊接速度快、过冷度大，因此完全脱离了平衡状态。当焊接材料的化学成分与母材相同时，焊缝金属将表现出高强度、低韧性和低塑性的力学性能。而对于要求较高的输送油气的直缝焊管，为确保管道的安全运行，都要求焊缝具有优良的冲击性能和塑性。为了避免因焊缝金属强度过高，导致焊缝韧性、塑性及接头抗裂性降低，焊接高强度低碳低合金直缝焊管时，必须控制焊缝中碳的质量分数和合金元素的质量分数。所以，选择焊接材料时要综合考虑焊缝金属的韧性、塑性及接头的抗裂性。同时，在焊接大口径直缝钢管这类刚度大的中厚板结构时，为避免因接头拘束度大而产生裂纹，在设计允许范围内还应选用强度稍低于母材的焊接材料，即选用低匹配的接头形式，这样不但焊缝的实际强度不会因焊接材料强度的降低而下降很多，而且可以大幅度提高焊缝韧性，降低接头裂纹倾向，大大地改善接头焊缝的综合力学性能。因此，直缝焊管埋弧焊丝一般多选用H08C，H08C埋弧焊丝的化学成分见表1-1。

表1-1 H08C埋弧焊丝的化学成分

元素	C	Mn	Si	P	Cr	Ni	Cu	S	Ti
质量分数(%)	0.068	1.37	0.07	0.018	0.01	0.28	0.10	0.08	0.06

2. 焊剂

在直缝焊管多丝埋弧焊中，由于焊丝数目多、热输入大、焊接速度快等因素，一方面使



焊缝含氧量增多,引起焊缝韧性下降;另一方面由于多丝焊的熔池尺寸大,高温停留时间长,熔化金属在重力作用下容易流动,使焊缝扁平。因而,从提高焊缝韧性和保证焊缝良好形貌的角度考虑,多丝埋弧焊应选择熔点较高、具有一定黏度的碱性或高碱性焊剂。同时,多丝埋弧焊电弧燃烧的空间较大,熔化的焊剂量也较多。焊剂颗粒增大将进一步增大电弧燃烧空间,这将使消耗量进一步增加,同时也使焊缝熔宽增大,使熔深和余高减小。另外,由于熔化的焊剂量较大,需要堆积的焊剂也较高,若堆积高度较低,电弧外露,焊缝易产生气孔,严重时导电嘴容易黏渣和烧结。

综上所述,在直缝焊管多丝埋弧焊中应选用颗粒细、熔点高、黏度适中、稳弧性好的高碱性焊剂。

3. 焊丝与焊剂匹配

对于焊缝金属冲击韧度要求不高的焊剂,通常采用碱度较小的高硅型渣系,可以获得良好的焊接工艺性能,具有适用于交流焊接、电弧稳定、脱渣容易、焊缝成形美观、对铁锈敏感性小等特点。当对焊缝金属冲击韧度要求较高时,一般选择碱度较高的氟碱型渣系,有利于提高焊缝金属的冲击韧度,但其工艺性能不如高硅型渣系。

管线钢多丝埋弧焊时既要求焊剂具有良好的焊接工艺性能,又要求焊缝金属具有较高的低温冲击韧度,因此必须协调解决这两者之间的矛盾。材料的韧性作为管线钢一个重要的力学性能指标,其大小直接反映了管线钢抗裂纹破坏的能力。在板材一定的条件下,管线钢焊接接头的韧性受焊接工艺影响很大,特别是焊丝-焊剂匹配,影响了焊接接头的组织形态,也影响了焊接接头的韧性。

例如 X80 管线钢,属于控轧控冷的低碳微合金钢,具有高强度和良好的抗延性断裂能力,是国际上输气管道的主导钢材。X80 钢多丝埋弧焊在较高焊接速度下,可采用宝鸡 H08C 焊丝与现代 S-900SP 焊剂匹配,在较低焊接速度下,采用林肯 LNS140TB 焊丝与林肯 998N 焊剂、宝鸡 H06H1 与宝鸡 SJ101H1 焊剂相匹配,其焊缝热影响区及焊缝区可获得良好的冲击韧度。

1.1.3 交流焊机斯考特连接

多丝埋弧焊可以用一个电源或多个独立电源,前者设备简单,但每个电弧功率的单独调节较困难;后者设备复杂,但每个电弧功率可以独立地调节,并且可以采用不同电流种类和极性,以获得更理想的焊缝成形。为了获得理想的焊缝,多丝埋弧焊一般采用多个独立的电源。同样的焊缝采用不同的电源接法时,焊缝断面形貌差别较大,这主要是因为电源的接法不同,电弧间干扰程度不同。一般情况下,焊丝为直流电源时的焊缝熔深比交流电源时的大。在多丝埋弧焊中,一般是前一电弧保证熔深,后续电弧调节熔宽,因而在直缝焊管多丝埋弧焊中,均采用直流-交流混合电源配置法,即前置焊丝为直流电源,直流电源反接,后面的焊丝均为交流焊丝。在多丝埋弧焊中,交流焊丝数目越多,其电弧间的磁干扰消除也越困难。但通过改变交流电源的连接,使电流相位差一定角度,可有效地消除交流电弧间的磁影响,使电弧稳定燃烧。

实际使用中交流焊机之间常采用斯考特连接。

图 1-1 为两台交流焊机斯考特连接法接线图。 T_1 、 T_2 分别是两台交流焊机的主变压器,



1、7、8、9、10、4 是主变压器的抽头。为了实现两丝焊接电流的正交和 90° 相位角，主变压器一次绕组的抽头 8 连接另一主变压器一次绕组的抽头 10。这种接线方式为 T 形耦合接线，称为斯考特连接。通过这样的连接，这两台交流焊机的主变压器就变成了一台三相变二相的斯考特变压器。

一次侧三相绕组的匝数关系为

$$W_{1-10} = \sqrt{3} W_{1-8} = \sqrt{3} W_{4-8}$$

式中 W ——二次侧绕组匝数。

如斯考特变压器二次侧负荷相同，则它的二次侧负载电流值相等，正交、相位相差 90° ，一次侧电流有效值为 $I_A = I_B = I_C$ ，彼此相位相差 120° ，三相电流平衡。

交流焊机斯考特连接解决了单台交流焊机作为单相负荷所带来的三相负荷不平衡的问题，并且为焊接电流提供 90° 正交相位角，可减小焊接过程中焊接电弧之间互相干扰，有效提高焊接质量。

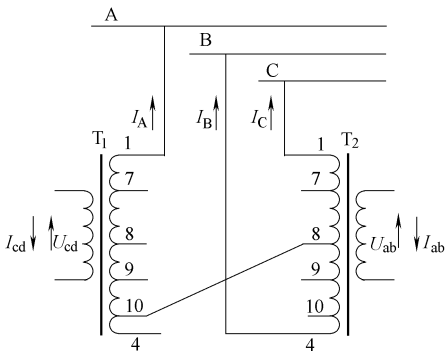


图 1-1 交流焊机斯考特连接

1.1.4 多丝埋弧焊焊接参数

多丝埋弧焊时采用多个独立电源，像单丝埋弧焊一样，每根焊丝的焊接参数即焊接电流和电弧电压可以独立地调节，但是多丝埋弧焊各个焊丝在焊缝成形中各自的作用不同，每根焊丝的焊接参数即焊接电流和电弧电压也不同。通常第一根焊丝的焊接电流在所有焊丝中最大，它的变化对焊缝熔深影响也最大，中间焊丝作为焊缝填充对焊缝的熔深影响相对小一些，最后一根焊丝对此几乎没有影响。因而在制定多丝埋弧焊焊接工艺时，在保证熔深以及选择合适的焊接热输入条件下，焊接电流依次减小，应该是第一根焊丝的焊接电流最大，中间次之，最后一根最小。由于电弧电压大小基本与焊缝宽度成正比，即电弧电压大小决定熔池宽度，电弧电压越大，熔池宽度越大。如果后丝电弧电压小于前丝电弧电压，则后丝熔池宽度小于前丝熔池宽度，造成熔池截面呈“葫芦”形。因而在编制多丝埋弧焊焊接工艺时，电弧电压依次增大。应该是第一根焊丝的电弧电压最小，中间次之，最后一根最大。

除此之外，多丝埋弧焊的焊丝排列、焊丝间距、焊丝倾角、焊丝伸出长度也是影响焊接质量的重要焊接参数。

焊丝的排列有纵列式、横列式两种。从焊缝成形效果看，纵向排列的焊缝深而窄；横向排列的焊缝宽度大。一般选用纵列式即焊丝成纵向直线排列，焊丝中心在焊缝中心线上，否则会因焊丝排列不在一条线上形成摆动电弧，造成正反面焊缝中心错位缺陷。

在多丝埋弧焊中，根据焊丝间的距离不同可分成单熔池和多熔池（分列电弧）两种。单熔池中每个焊丝间距离为 $10 \sim 30\text{mm}$ ，几个电弧形成一个共同的熔池和气泡，前导电弧保证熔深，后续电弧调节熔宽，使焊缝具有适当的熔池形状及焊缝成形系数，为此可大大提高焊接速度。同时，这种方法还因熔池体积大、存在时间长、冶金反应充分，因而对气孔敏感性小。分列电弧之间距离大于 100mm ，每个电弧具有各自的熔化空间，后续电弧作用在前



导电弧已熔化而凝固的焊道上，多适用于水平位置平板对接的单面焊双面成形工艺。在直缝焊管多丝埋弧焊中一般采用单熔池。

同时，在保证熔深以及选择合适的焊接热输入条件下，焊丝间距应设置相等或依次增大。在埋弧焊中，焊丝向后倾斜时的熔深大，而向前倾斜比向后倾斜时的焊缝宽。因而在调整焊丝倾角时，第一根焊丝后倾，后面的焊丝设置为依次过渡到前倾，并依次增大前倾角。但需要特别指出的是，第一根焊丝的后倾角和最后一根焊丝的前倾角都不宜过大。因为第一根焊丝后倾角过大对焊缝熔深有一定的影响；最后一根焊丝的前倾角过大，导电嘴底部易与液态熔渣形成“电弧”，影响焊接过程的稳定性。

焊丝的伸出长度主要影响焊缝的余高和熔合比。焊丝的伸出长度增加，焊缝余高增大，熔深减小；若焊丝的伸出长度过短，导电嘴容易黏渣，进而导电嘴与导电嘴之间易产生“电弧”而影响正常电弧的稳定燃烧。对于多丝埋弧焊，一般情况下，取焊丝伸出长度为35~40mm。

在直缝焊管多丝埋弧焊中，焊接速度对焊缝熔深和熔宽影响较大，余高影响相对来说小些。焊接速度越快，则熔深和熔宽越小，反之越大。一般在保证焊接质量的前提下适当提高焊接速度，以提高直缝焊管的生产效率。

1.1.5 双丝埋弧焊工艺

双丝埋弧焊焊丝的排列和与电源的连接通常采用以下三种形式（见图 1-2）：

1) 各焊丝沿接缝前后排列的纵列式，各焊丝分别使用独立电源，各自独立形成电弧进行焊接。纵列式多丝埋弧焊的焊缝熔深大，而熔宽较窄；各个电弧都可独立地调节焊接参数，而且可以使用不同的电流种类和极性（见图 1-2a）。根据两焊丝间距的不同，其方法有共熔池和双熔池两种，二者的区别在于两焊丝间距大小，是否具有共同的电弧空间。

2) 横列双丝串联式，即各焊丝分别接于同一焊接电源两极，横跨接缝两侧，利用焊丝间的间接电弧进行焊接，母材熔化量小，使得焊缝熔合比小（见图 1-2b）。

3) 横列双丝并联式（见图 1-2c），即焊丝并联于同一电源，横跨接缝两侧并列前进，使得焊缝的熔宽增大。由于横列双丝串联和并联式的焊丝都是合用一个电源，虽然设备简单，但每个电弧功率很难单独调节。

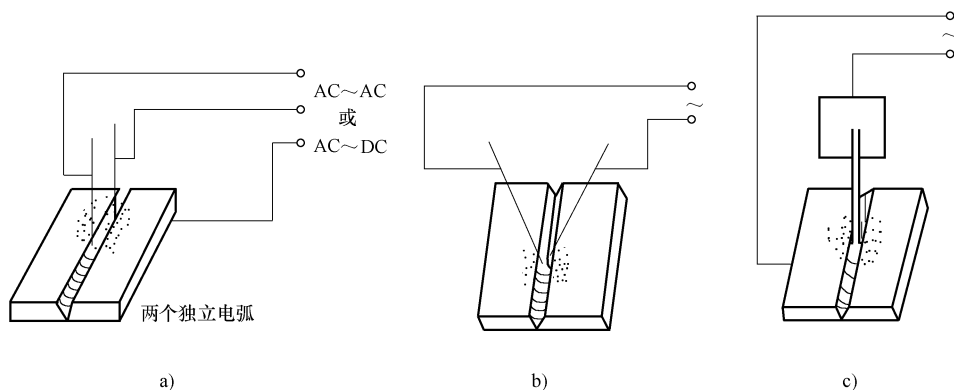


图 1-2 双丝埋弧焊焊丝的排列和与电源的连接形式

a) 纵列式 b) 横列双丝串联式 c) 横列双丝并联式