

卓越工程师教育 —— 焊接工程师系列教程

# 焊接工艺

第2版

## 理论与技术

韩国明 主编

 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

# 焊接工艺理论与技术

第2版

韩国明 主编



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”专业学生进行卓越工程师教育及毕业后从事焊接技术工作的学生、焊接方向的研究生了解和掌握焊接专业基础知识,以及企业开展焊接工程师培训和焊接工程技术人员自学焊接专业基础知识的需要而编写的。全书共分10章,主要内容为:前3章系统地叙述了作为熔焊热源的焊接电弧的物理本质、热源和力源的特征、焊丝熔化和熔滴过渡、母材熔化和焊缝成形等基本内容。后7章则分别讲述了在材料加工中广泛应用的埋弧焊、钨极氩弧焊、熔化极活性气体保护焊、熔化极氩弧焊、CO<sub>2</sub>气体保护焊、药芯焊丝电弧焊以及等离子弧焊与切割等焊接方法的基本原理、工艺特点、相关设备以及应用等基本知识和内容。最后列举了较多的结构焊接实例,这些实例具有符合国情、时效性强、分布面广的特点,以供读者借鉴。每章末附有复习思考题。

本书可供大学相关专业、函授班和培训班作为教材,还可供具有大专以上文化水平的技术人员、技师作为焊接工程师岗前教育和岗位培训之用,也可供焊接方向的研究生和从事焊接工作的工程师和技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

焊接工艺理论与技术/韩国明主编. —2版. —北京:机械工业出版社, 2017.9

卓越工程师教育. 焊接工程师系列教程

ISBN 978-7-111-57916-8

I. ①焊… II. ①韩… III. ①焊接工艺—高等学校—教材  
IV. ①TG44

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第217917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:刘 岚 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1月第2版第1次印刷

184mm×260mm·25.5印张·619千字

0001—2500册

标准书号:ISBN 978-7-111-57916-8

定价:65.00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

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

# 编 委 会

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

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发展规划纲要（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》的出版可谓是恰逢其时，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做出重大贡献。

单 平

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基础,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,并列出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。若见本套教程中存在瑕疵和谬误,恳请各界读者不吝赐教,予以斧正。

## 前 言

我国高等院校在专业设置方面，已将焊接并入“材料成型及控制工程”专业，为了满足“材料成型及控制工程”专业中焊接方向的本科生教学需要，以及该专业毕业生从事焊接技术工作和已从事焊接工作的工程技术人员学习的需求，编写了本书。

本书共 10 章，前 3 章阐述了作为熔焊热源的焊接电弧的物理本质，热源和力源的特征，焊丝熔化和熔滴过渡，母材熔化和焊缝成形等基本内容。后 7 章分别讲述了在材料加工中广泛应用的埋弧焊、钨极氩弧焊、熔化极活性气体保护焊、熔化极氩弧焊、CO<sub>2</sub> 气体保护焊、药芯电弧焊、等离子弧焊与切割等焊接方法的基本原理、工艺特点、相关设备以及应用等基本知识和内容。

本书取材少而精，具有针对性，讲求实用性，并列举了较多结构的焊接实例。本套教材也适于具有大专以上文化水平的技术人员作为焊接继续工程教育之用。

本书由天津大学韩国明主编。其中绪论、第 4~6 章、第 9 章由天津大学韩国明编写；第 1~3 章由天津大学奚道岩编写；第 7~8 章由天津大学李桓编写；第 10 章由天津理工大学韦福水编写。

本书在编写过程中，参考了全国高校焊接专业的有关教材及其他文献资料，在此对原作者表示谢忱。

由于编撰者水平有限，缺点、错误在所难免，敬请专家及各界读者予以批评、指教。

编 者

序	
编写说明	
前言	
绪论	1
<b>第 1 章 焊接电弧</b>	<b>5</b>
1.1 电弧的物理基础	5
1.1.1 气体放电的基本概念	5
1.1.2 电弧中带电粒子的产生	6
1.2 焊接电弧的引燃过程	22
1.2.1 接触	22
1.2.2 拉开	23
1.2.3 燃弧	23
1.3 电弧各区域及其导电机构	23
1.3.1 阴极区及其导电机构	23
1.3.2 弧柱区及其导电机构	25
1.3.3 阳极区及其导电机构	26
1.3.4 电极斑点的跳动现象	27
1.4 焊接电弧的热和力	28
1.4.1 电弧的热功率和温度分布	28
1.4.2 电弧力及影响因素	32
1.5 电弧的静特性与动特性	38
1.5.1 焊接电弧的静特性	38
1.5.2 焊接电弧的动特性	40
1.6 焊接电弧的稳定性	41
1.6.1 焊接电源的影响	42
1.6.2 焊条药皮的影响	42
1.6.3 气流的影响	42
1.6.4 焊接处清洁程度的影响	42
1.6.5 焊接电弧磁偏吹的影响及其控制	42
<b>第 2 章 焊丝的熔化和熔滴过渡</b>	<b>46</b>
2.1 焊丝的加热及熔化	46
2.1.1 热能来源	46
2.1.2 焊丝与焊条的熔化参数	48
2.1.3 影响焊丝熔化速度的因素	48
2.2 熔滴的形成及过渡	50
2.2.1 熔滴上的作用力	50
2.2.2 熔滴过渡的主要形式及其特点	54
2.2.3 熔滴的几何尺寸	66
2.2.4 熔滴温度	67
2.2.5 飞溅损失及影响因素	68
2.2.6 熔滴过渡的控制	70
<b>第 3 章 焊接熔池及焊缝成形</b>	<b>74</b>
3.1 焊接熔池	74
3.1.1 电弧对焊件的热输入和热效率	74
3.1.2 焊接熔池的温度分布	75
3.1.3 熔池的质量和存在时间	77
3.1.4 熔池金属的受力和流动状态	78
3.2 熔池金属的结晶和焊缝成形	80
3.2.1 熔池金属的结晶过程及特点	80
3.2.2 焊缝的几何参数	84
3.2.3 焊接参数和工艺因素对焊缝尺寸的影响	86
3.2.4 焊缝成形缺陷及原因	90
3.2.5 焊缝成形的控制	92
3.2.6 电磁搅拌对焊缝组织及成形的影响	95
<b>第 4 章 埋弧焊</b>	<b>101</b>
4.1 埋弧焊的特点和应用	101
4.1.1 埋弧焊过程	101
4.1.2 埋弧焊的特点	102
4.1.3 埋弧焊的应用	106
4.2 埋弧焊用焊丝和焊剂	107
4.2.1 焊丝	107
4.2.2 焊剂	111



4.2.3	焊丝与焊剂的选配	118	6.1.2	熔化极氩弧焊的应用	204
4.3	埋弧焊机	120	6.2	熔化极氩弧焊的焊接材料	204
4.3.1	埋弧焊机的结构和分类	120	6.2.1	保护气体	204
4.3.2	焊接过程中电弧的自动调节	122	6.2.2	焊丝	207
4.3.3	等速送丝式埋弧焊机	124	6.3	熔化极氩弧焊工艺	211
4.3.4	电弧电压反馈变速送丝式埋弧焊机	130	6.3.1	焊前准备	211
4.4	埋弧焊工艺	141	6.3.2	焊接参数选择	211
4.4.1	焊前准备	141	6.3.3	铝的熔化极氩弧焊	212
4.4.2	焊接技术及焊接参数	142	6.3.4	不锈钢的熔化极氩弧焊	217
4.4.3	焊接实例分析	152	6.3.5	低碳钢和低合金结构钢的熔化极氩弧焊	218
<b>第5章</b>	<b>钨极氩弧焊</b>	<b>155</b>	6.4	熔化极脉冲氩弧焊	222
5.1	钨极氩弧焊概述	155	6.4.1	原理及熔滴过渡的特点	222
5.1.1	钨极氩弧焊的特点	155	6.4.2	冶金及工艺特点	223
5.1.2	钨极氩弧焊的应用	157	6.4.3	焊接参数的选择	224
5.2	焊枪、电极及氩气	157	6.4.4	变极性脉冲MIG焊	225
5.2.1	焊枪结构及气体保护效果	157	6.4.5	熔化极脉冲氩弧焊的应用	226
5.2.2	电极材料及形状尺寸	159	6.5	熔化极活性气体保护焊	229
5.2.3	焊丝	162	6.5.1	Ar + O <sub>2</sub>	229
5.2.4	氩气	163	6.5.2	Ar + CO <sub>2</sub>	230
5.3	钨极氩弧焊的种类	165	6.5.3	Ar + CO <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	230
5.3.1	直流钨极氩弧焊	165	6.6	熔化极氩弧焊设备	232
5.3.2	交流钨极氩弧焊	167	6.6.1	熔化极氩弧焊电源	233
5.3.3	脉冲钨极氩弧焊	170	6.6.2	程序自动控制系统和供气系统	235
5.3.4	高频脉冲钨极氩弧焊	173	6.6.3	送丝系统	236
5.3.5	多电极钨极氩弧焊	174	6.6.4	焊枪	238
5.3.6	氩弧点焊	174	<b>第7章</b>	<b>CO<sub>2</sub>气体保护焊</b>	<b>242</b>
5.4	钨极氩弧焊工艺	175	7.1	CO <sub>2</sub> 气体保护焊的特点和应用	242
5.4.1	接头形式及坡口	175	7.1.1	CO <sub>2</sub> 气体保护焊的工艺特点与分类	242
5.4.2	焊件和填充焊丝的焊前清理	176	7.1.2	CO <sub>2</sub> 气体保护焊的冶金特性	243
5.4.3	焊接参数	176	7.2	CO <sub>2</sub> 气体保护焊用的焊接材料	247
5.4.4	操作要领	180	7.2.1	CO <sub>2</sub> 气体	247
5.4.5	焊接实例分析	185	7.2.2	焊丝	249
5.5	钨极氩弧焊焊机	190	7.3	CO <sub>2</sub> 气体保护焊工艺	254
5.5.1	焊机的组成及引弧装置	191	7.3.1	焊前准备	254
5.5.2	WS系列交、直流钨极氩弧焊机	194	7.3.2	焊接参数选择	256
<b>第6章</b>	<b>熔化极氩弧焊</b>	<b>203</b>	7.3.3	减少金属飞溅的措施	264
6.1	熔化极氩弧焊概述	203	7.4	CO <sub>2</sub> 气体保护焊设备	266
6.1.1	熔化极氩弧焊的特点	203			



7.4.1	CO <sub>2</sub> 气体保护焊设备的组成及分类	266	9.2.5	焊接实例分析	320
7.4.2	CO <sub>2</sub> 气体保护焊焊接电源	268	9.3	粉末等离子弧堆焊和喷涂	322
7.4.3	程序自动控制	269	9.3.1	粉末等离子弧堆焊	322
7.4.4	供气系统	269	9.3.2	磁控等离子弧堆焊	325
7.4.5	半自动 CO <sub>2</sub> 气体保护焊焊机	270	9.3.3	粉末等离子弧喷涂	325
7.5	特种 CO <sub>2</sub> 气体保护焊	279	9.3.4	超音速等离子弧喷涂	327
7.5.1	CO <sub>2</sub> 电弧点焊	279	9.3.5	低压等离子弧喷涂	328
7.5.2	双层气流保护脉冲焊	281	9.4	等离子弧切割	328
<b>第8章</b>	<b>药芯焊丝电弧焊</b>	<b>283</b>	9.4.1	等离子弧切割的原理及特点	328
8.1	药芯焊丝的特点及应用	283	9.4.2	等离子弧切割方法分类	329
8.1.1	药芯焊丝的特点	283	9.4.3	氮气等离子弧切割	330
8.1.2	药芯焊丝的应用	284	9.4.4	空气等离子弧切割	335
8.2	药芯焊丝的结构及分类	285	<b>第10章</b>	<b>焊接方法在工程中的应用</b>	<b>344</b>
8.2.1	药芯焊丝的结构	285	10.1	埋弧焊在工程中的应用	344
8.2.2	药芯焊丝的分类	286	10.1.1	16MnR 压力容器环缝的埋弧焊工艺	344
8.2.3	气体保护焊用药芯焊丝	286	10.1.2	06Cr19Ni10 钢制压力容器的埋弧焊工艺	346
8.2.4	焊剂保护用药芯焊丝	286	10.1.3	埋弧焊在轧辊表面堆焊中的应用	347
8.2.5	自保护药芯焊丝	287	10.2	钨极氩弧焊在工程中的应用	350
8.2.6	不锈钢药芯焊丝	288	10.2.1	CO <sub>2</sub> 冷凝器奥氏体不锈钢管板与纯铜换热管的钨极氩弧焊	350
8.3	药芯焊丝标准	290	10.2.2	脉冲 TIG 焊在 60 万 kW 核电蒸汽发生器的管子与管板焊接中的应用	352
8.4	药芯焊丝 CO <sub>2</sub> /MAG 气体保护焊	297	10.2.3	不锈钢圆网的 TIG 焊工艺	355
8.4.1	药芯焊丝 CO <sub>2</sub> /MAG 气体保护焊原理及工艺特点	297	10.2.4	Ar-N <sub>2</sub> 混合气体保护 TIG 焊焊接纯铜的厚大件	357
8.4.2	药芯焊丝 CO <sub>2</sub> /MAG 气体保护焊焊接参数	297	10.3	熔化极气体保护 (MIG/MAG) 焊在工程中的应用	359
8.5	焊接设备	301	10.3.1	MIG 焊在大截面铸铝母线焊接中的应用	359
<b>第9章</b>	<b>等离子弧焊与切割</b>	<b>303</b>	10.3.2	大口径输气管道自动 MAG 焊工艺	362
9.1	等离子弧的形成及特性	303	10.3.3	自动 MAG 焊在电站水轮机组蜗壳制作中的应用	365
9.1.1	等离子弧的形成	303	10.3.4	膜式省煤器的自动 MAG 焊	367
9.1.2	等离子弧的能量特性	304	10.4	CO <sub>2</sub> 气体保护焊在工程中的应用	369
9.1.3	等离子弧的基本形式	305			
9.1.4	等离子弧的静特性及对电源外特性的要求	306			
9.2	等离子弧焊	307			
9.2.1	工艺特点及应用	307			
9.2.2	焊枪	308			
9.2.3	焊接方法及焊接参数的选择	312			
9.2.4	双弧现象及防止措施	318			



10.4.1	汽车车架 CO <sub>2</sub> 气体保护焊焊接工艺设计及变形控制 .....	369	10.5.3	药芯焊丝在异种钢焊接中的应用 .....	381
10.4.2	STT II 型逆变焊机在输气管道打底焊中的应用 .....	372	10.6	等离子弧焊在工程中的应用 ...	384
10.4.3	CO <sub>2</sub> 气体保护焊在高炉 HS 燃烧室炉壳焊接中的应用 .....	374	10.6.1	汽提塔钛板衬里的等离子弧焊 .....	384
10.5	药芯焊丝电弧焊在工程中的应用 .....	377	10.6.2	等离子纵缝焊机在不锈钢容器制造中的应用 .....	387
10.5.1	药芯焊丝半自动电弧焊在管道工程中的应用 .....	377	10.6.3	耐候钢纵缝的等离子弧焊 .....	389
10.5.2	100t 转炉炉壳的药芯焊丝自保护电弧焊技术 .....	379	10.7	熔焊工艺方法混合应用的工程实例 .....	391
			参考文献	.....	397



# 绪 论

21 世纪以来，信息技术、生物技术、新材料技术、能源与环境技术、航空航天技术和海洋开发技术六大科学技术的迅猛发展与广泛应用，引领了整个世界范围内传统材料加工、制造业的大发展，传统材料加工工程的学科领域和发展模式都发生了深刻变革。以信息技术、生物技术、材料科学技术与材料加工技术相结合的先进材料加工技术应运而生。新材料与新工艺创新日新月异，使得材料加工的服务领域不断拓展，先进材料加工科学与技术得到了空前的发展。材料加工范围不再局限于传统的金属材料，新型材料使产品的力学性能、功能得到优化，产品的机械寿命大幅度提高；各种高性能材料，例如高强度钢材的应用，铝、镁、钛及其合金材料的轻量化发展。新型材料的应用改变了传统的产品结构设计和加工方法。在产品设计中大量地采用新材料，产品的加工向着高精度、高质量的方向发展。在制造业中，焊接是一种十分重要的加工方法。据统计，每年仅需要进行焊接加工之后使用的钢材就占钢总产量的 45% 左右。新的焊接方法不断涌现，对传统的电弧焊接方法提出了挑战。随着现代工业生产的需要和科学技术的蓬勃发展，焊接技术将向高效化、智能化方向发展，能够完成高温、低温、水下、核辐射、空间等严酷条件下的焊接。

## 1. 焊接过程的实质

焊接是通过加热或加压，或两者并用，并且用或不用填充材料，使焊件达到原子结合的一种加工方法。

金属等固体材料之所以能保持固定形状的整体，是因为其内部原子之间的距离（晶格）十分小，原子间形成了牢固的结合力。若要把两个分离的金属构件靠原子结合力的作用连接成一个整体，则需要克服两个困难：

- 1) 连接表面不平。即使进行最精密的机械加工，其表面平面度也只能达到微米级，仍远远大于原子间结合所要求的数量级  $10^{-4} \mu\text{m}$ 。
- 2) 表面存在的氧化膜和其他污染物阻碍金属表面原子之间接近到晶格距离并形成结合力。焊接过程就是克服这两个困难的过程。而熔焊（包括电弧焊）过程，从物理实质上来看就是在不加压的情况下，将焊件待连接处的金属加热熔化，靠液态金属的流动使原子互相靠近、熔合、冷却结晶而连接成牢固的整体。

## 2. 焊接的发展概况

电弧作为一种气体导电的物理现象，早在 19 世纪初已被发现，并预料到可以利用它熔化金属，但当时的工业水平还不能提供足够功率的电源来产生大能量的电弧，因此，利用电弧作为金属熔焊的热源，只不过是理想。直到 19 世纪末期电力生产得到发展以后人们才有条件研究电弧的实际应用。据报道，1885 年才发明了碳极电弧，起初主要用作强光源，可以把它看作是电弧实际应用的创始。

19 世纪末期至 20 世纪初期，随着化学工业和电力工业的发展，氧气和电石生产得到一



定的发展，氧乙炔火焰焊接的应用在工业生产中开创了新的局面。在这期间，虽然研究出铝热剂铸焊、电阻焊、碳极电弧焊和金属极电弧焊等，使焊接热源和焊接技术取得了重大的突破，但由于当时的电弧焊设备比较简陋，电力工业还不很发达，因此电弧焊在金属结构生产中的应用还很少，而氧乙炔焊却由于设备简单、价格低而迅速发展，广泛应用于工业生产中。

电弧焊是指利用电弧作为热源的焊接方法，简称弧焊。它是熔焊中最重要、应用最广泛的焊接方法。20世纪20年代研制出构造简单、使用方便、成本低廉的交流电弧焊机；20世纪30年代起，又相继推出了薄涂料焊条和厚涂料焊条，尤其是厚涂料优质焊条的出现，使焊条电弧焊技术进入成熟阶段，它的熔深大、效率高、质量好、操作方便等突出优点是气焊方法无法比拟的，于是焊条电弧焊在工业生产中被广泛应用，特别是在车辆、船舶、锅炉、起重设备和桥梁等金属结构的制造中很快成为主要的焊接方法，钨极氩弧焊和熔化极氩弧焊也是在20世纪30年代先后研究成功的，成为焊接有色金属和不锈钢等材料的有效方法。这一时期，工业产品和生产技术的发展速度很快，迫切要求焊接过程向机械化、自动化方向发展，而且当时的机械制造、电力拖动与自动控制技术也已为实现这一目标提供了技术和物质基础。于是便在20世纪30年代中期研究成功了变速送丝式埋弧焊机，以及与之相匹配的颗粒状焊剂和光焊丝，从而实现了焊接过程自动化，显著地提高了焊接效率和焊接质量。而等速送丝式埋弧焊机的出现大大简化了埋弧焊设备，为工业生产中大量应用埋弧焊创造了更为有利的条件。

20世纪40年代起，焊接科学技术的发展又迈进一个新的历史阶段，特别是进入50年代之后，新的焊接方法以前所未有的发展速度相继研究成功，如用电弧作热源的CO<sub>2</sub>气体保护焊（1953年）和等离子弧焊（1957年）；属于其他热源的电渣焊（1951年）、超声波焊（1956年）、电子束焊（1956年）、摩擦焊（1957年）、爆炸焊（1963年）、脉冲激光焊（1965年）和连续激光焊（1970年）等。此外还有多种派生出来的焊接方法，例如活性气体保护焊、各种形式的脉冲电弧焊、窄间隙焊、搅拌摩擦焊、全位置焊等。

上述各种焊接方法针对不同的材料、不同的结构加以选用，在工业生产中发挥着各自的作用。这些焊接方法与金属切削加工、热切割加工、压力加工、铸造、热处理等其他加工方法一起构成的材料加工技术是现代材料加工工业，例如车辆、船舶、航空、航天、原子能、采矿、化工机械、桥梁、电子以及轻工等几乎所有工业部门的基本加工方法，而其中各种电弧焊方法在焊接生产中所占比例最大，应用最为广泛。据统计，一些工业发达国家，电弧焊在焊接生产总量中所占比例大都在60%以上。

### 3. 基本焊接方法及电弧焊方法的分类

按照焊缝金属结合的性质，基本的焊接方法通常分为三大类，即熔化焊接、固相焊接及钎焊。而每一大类又可按焊接热源及其他明显特点分为若干种，按类别列出的基本焊接方法近30种。

熔化焊是焊接过程中将焊件接头加热至熔化状态，不加压力完成焊接的方法。电弧焊是熔化焊的一种，按照采用的电极，电弧焊又分为熔化极电弧焊和非熔化极电弧焊两类，其中熔化极电弧焊是利用金属焊丝（或焊条）作电极同时熔化填充焊缝的电弧焊方法，它包括焊条电弧焊、埋弧焊、熔化极氩弧焊、CO<sub>2</sub>气体保护焊等方法；非熔化极电弧焊是利用不熔化电极（如钨棒、碳棒）进行焊接的电弧焊方法，它包括钨极氩弧焊、等离子弧焊等方法，



基本焊接方法分类如图 0-1 所示。

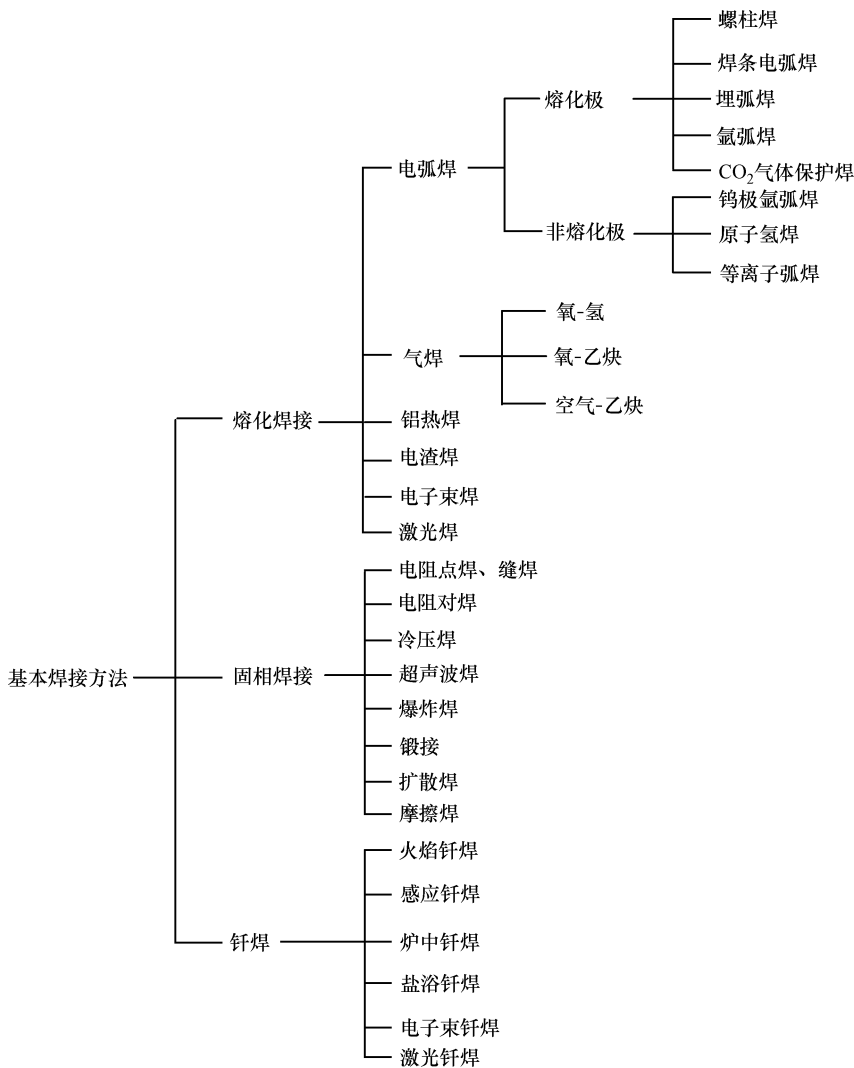


图 0-1 基本焊接方法分类

#### 4. 课程内容及要求

学习本课程的原则是：按照学习的规律，在学习、掌握电弧焊基本理论的基础上，进一步学习各种基本的焊接方法，掌握它们各自的工作原理和焊接特点，要理论与实践相结合，通过试验与专题研究来深化所学的知识。期望通过本课程和相关课程的学习，能够较熟练地从事焊接技术工作。

本教材共分 10 章，前 3 章是电弧焊的基本理论和基本规律；第 4 章～第 9 章是基本的电弧焊方法以及在各自基础上产生的新的焊接方法；第 10 章是焊接方法在工程中的应用。

学习第 1 章焊接电弧，要求在了解电弧物理过程的基础上，掌握电弧各区域的导电机理、能量变换规律以及它们对焊接过程的影响。第 2 章焊丝的熔化和熔滴过渡及第 3 章焊接熔池及焊缝成形，是对焊缝形成全过程的论述和分析。电弧能量对于金属熔化及液态金属运



动状态的影响贯穿始终。熟悉并掌握焊丝熔化、熔滴过渡、母材熔化和熔池形成等一系列过程中的条件、状态、规律等知识,将为深入研究各种电弧焊方法打下良好的基础。埋弧焊、钨极氩弧焊、熔化极活性气体保护焊、熔化极氩弧焊、CO<sub>2</sub>气体保护焊、药芯焊丝电弧焊、等离子弧焊等是常用的电弧焊方法。因此,学习并掌握这些焊接方法的工作原理、焊接特点、工艺要领以及焊接参数的合理选择等,对于焊接技术工作者来讲是十分必要的。

本书在焊接方法各章中都列举了一些焊接实例,并在第 10 章专门叙述了焊接方法在工程中的应用,作为理论联系工程实际的引导。

# 焊接电弧

电弧既是各种电弧焊方法的能源，又是碳弧气刨、电弧喷涂、电弧冶炼以及等离子弧切割、等离子弧喷涂、等离子弧堆焊等金属加工方法的能源。为了科学地应用和发展电弧焊技术，首先应当了解焊接电弧中能量转换的物理过程和基本规律。本章作为电弧焊的基础理论，将结合电弧形成过程，讨论电弧带电粒子的产生和气体导电的机理、电弧的构造和性能、电弧热和电弧力两种能量的产生以及能量转换的规律等。其目的在于了解电弧过程实质，建立焊接电弧的物理概念，并以此作为施焊技术的指导思想以及新的焊接方法、新的焊接材料创新研究的理论基础，把握电弧焊进程以便获得优质焊缝。

## 1.1 电弧的物理基础

焊接电弧发出强烈的光和热，但却不是一般的物质燃烧现象。实质上，焊接电弧是在焊接电源供给一定电压的两个电极之间或者电极与焊件之间的一种气体放电现象，亦即电荷通过两电极间的气体空间的一种导电现象（见图 1-1）。借助于这种气体放电，把电能转变为热能、机械能和光能。焊接时主要是利用电弧的热能和机械能。

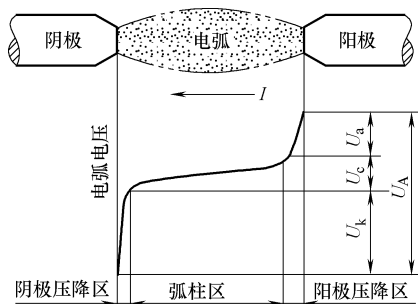


图 1-1 电弧及各区域的电压分布

### 1.1.1 气体放电的基本概念

各种物质不论其形态为固态、液态或气态，是否呈导电性皆取决于它在电场作用下是否拥有可以定向移动的带电粒子。金属体内部拥有大量的自由电子时，只要在金属导体的两端加上电压，自由电子便会在电场力的作用下定向移动而形成电流，这种导电现象叫做电子导电，显然，其带电粒子是自由电子。金属导电时，金属本身不发生化学变化，电源可以是直流或交流。通常所说的液体导电，是指电解质的水溶液或电解质本身熔融成液体时的导电，在此两种液态中电解质都要发生电离，其分子电离成正离子和负离子。在没有电场存在时，这些离子只做无规则的热运动，从宏观上看没有电荷（离子）的定向移动，不显示出电流；但当在电解质的液体里插入与直流电源相接的两个电极时，液体中就出现电场，电解质的正负离子除了做热运动外，还要在电场力的作用下做定向移动，正离子向阴极移动，负离子向阳极移动，形成电流，这种导电现象叫做离子导电。显然，这跟金属中的电子导电是不同的。另外一个重要的不同点是在电解质导电过程中，同时发生电解现象，即正负离子分别在阴极板上和阳极板上发生还原及氧化。这表明电解质液体的导电过程要发生化学变化。



在通常情况下气体是不导电的（或导电性很微弱），这是因为常态下的气体几乎完全由中性的分子或原子组成，不拥有带电的粒子（或拥有的带电粒子很少），因此它是不导电的。若要气体导电，则必须先有一个产生带电粒子的过程，然后才能呈现导电性。

图 1-2 所示为气体放电的全伏安特性曲线及放电类型。

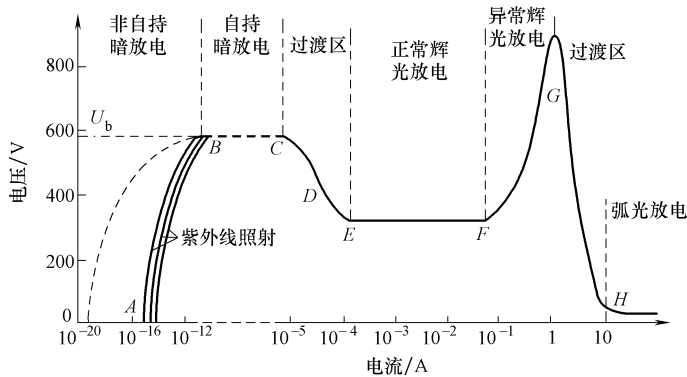


图 1-2 气体放电的全伏安特性曲线及放电类型

气体放电时，在不同的条件下和不同的电流区间，其导电机制和放电形态有显著不同。在较小的电流区间，气体导电所需要的带电粒子不能通过导电过程自行产生，而需要外加措施（加热、光激励等）来造成带电粒子，促使气体放电，一旦外加的激励源取消，则气体不再发生电离，放电现象也就停止，这种气体导电现象叫做被激放电，也叫做非自持放电。当电流大于一定数值时，气体放电只在开始时需要外加措施制造带电粒子，进行诱发（通常称为“点燃”），在放电过程中阴极不断地发射出足够的电子，气体电离度较大，放电过程本身能够产生维持导电所需要的带电粒子。因此，当放电开始后，取消外加诱发措施，放电过程本身仍能继续下去的，放电过程叫做自激放电，也叫做自持放电。按照电流数值和放电特性的不同，自激放电又可分为暗放电、辉光放电和电弧放电三种基本形式，其中电弧放电的电压最低、电流最大、温度最高、发光最强。因此，电弧在工业以及其他一些领域中作为热源或光源被广泛应用。

### 1.1.2 电弧中带电粒子的产生

电弧中的带电粒子主要是由气体介质中中性粒子的电离及从阴极发射电子这两个物理过程所产生，同时伴随着发生其他一些物理变化，如激发、电离、扩散、复合、负离子化等。

#### 1. 激发和电离

在一定条件下气体的中性粒子（原子或分子）分离为正离子和电子的现象叫做电离。气体分子或原子在常态下是由数量相等的正电荷（原子核）和负电荷（电子）构成的一个稳定系统，对外呈中性。就原子而论，原子核带有电量为  $Ze$  的正电荷，核外的每个电子带有电量为  $e$  的负电荷。 $Z$  个电子围绕着核转动。 $Z$  是核内的质子数，也是核外的电子数。原子的结构模型示例如图 1-3 所示。电子一方面受核的正电荷的吸引，有靠近核的向心趋向，另一方面由于转动而有离开核的离心趋向，这两者对立统一，就使电子按一定规律分布