



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

帮您全面掌握焊接工艺及技术
助您早日成为优秀焊接工程师

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



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“材料成形及控制工程”专业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“焊接工程师系列教程”之一。全书共 11 章,主要内容为:前 3 章系统地论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规律等内容。后几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、熔化极氩弧焊、CO₂ 气体保护焊、药芯焊丝电弧焊、等离子弧与切割等的基本原理、工艺特点、相关设备以及应用等基本知识和内容。书中还系统地介绍了摩擦焊的基本原理和工艺特点、接头温度分布、金相组织和力学性能。最后列举了较多结构的焊接实例,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,还可作为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, 2007. 1

(焊接工程师系列教程)

ISBN 978-7-111-20690-3

I. 焊... II. 韩... III. 焊接工艺—教材

IV. TG44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 001351 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:俞逢英 版式设计:霍永明

责任校对:王欣 封面设计:鞠杨 责任印制:李妍

北京铭成印刷有限公司印刷

2007 年 3 月第 2 版第 1 次印刷

184mm×260mm·27.5 印张·683 千字

0001—4000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-20690-3

定价:43.00 元

凡购本书、如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010)68326294

购书热线电话:(010)88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010)88379080

封面无防伪标均为盗版

焊接工程师系列教程

编 委 会

主 任 王立君

委 员 (按姓氏笔画排序)

杜则裕 何月秋

胡绳荪 贾安东

韩国明

本书主编 韩国明

本书参编 奚道岩 李桓 韦福水

本书主审 韦福水

序

时光荏苒，斗转星移。随着新世纪的到来，我国普通高等学校的专业设置格局亦发生了深刻的结构性变革。在机械工程学科覆盖的本科教育层面上，曾经独立设置了近半个世纪的“铸造、焊接、压力加工，以及金属热处理(部分)”专业整合成立了新的“材料成形及控制工程”专业；传统的机械热加工工艺学科的本科工程教育模式至此完成了从“专而窄”向“泛而宽”过渡的深刻变革。

毋庸置疑，在本科教育层面上实施“通才”教育有利于综合性、创新型人才的培养。而与之相应的，在市场经济环境下，社会和企业对焊接工程技术人才的需求则要再通过岗前或岗上培训，以及相应的“焊接工程师”职业资格认证、注册制度解决。就此意义而言，本套“焊接工程师系列教程”的出版可谓是恰逢其时，相信其定会为焊接界培养更多更好的焊接工程师作出贡献。

本套教材体系完整、知识系统、内容丰富，凝练了编审者们长期从事焊接专业教育教学的经验。它的出版无疑将促进我国焊接工程师培训和焊接事业的发展，同时使社会和企业受益。

中国机械工程学会焊接分会理事长



编写说明

为适应普通高等教育专业目录调整的要求,我国普通高等院校原设的机械类热加工专业已合并更名为宽口径的“材料成形及控制工程”专业。在“材料成形及控制工程”专业的教学计划中,专业课学时约占总学时数的9%~10%,一般为250学时左右,教学内容涵盖原铸造、焊接、压力加工和热处理(一部分)专业的知识领域。这一旨在加强基础、拓宽专业的调整有利于综合性创新型人才的培养。但是,新专业课教学的总学时有限,相对于企业对焊接工程技术人才的需求而言,学生在校期间的学习只能是初知焊接基本理论。毕业后为了适应企业焊接工程师的岗位要求,还必须对焊接专业知识进行系统的岗前自学或岗位培训。显然,无论是焊接工程师的培训还是自学都需要有一套实用的、有别于宽口径大学本科的焊接专业教材,“焊接工程师系列教程”正是为满足焊接专业的这一需求而精心策划和编写的。

本套“焊接工程师系列教程”是在机械工业出版社1993年出版的一套4本“继续工程教育焊接教材”的基础上修订、完善、补充的。在第1版的编写过程中,张清桂、田景峰、王长聚、平桂香、张方中、郁东键、杨桂华和陈英等同志提出了许多宝贵意见,再次表示感谢。

新版教程共6本,包括《熔焊原理与金属材料焊接》、《焊接工艺理论与技术》、《焊接结构与生产》、《无损检测与焊接结构质量保证》、《现代弧焊电源及其控制》、《焊接自动化技术及其应用》,后两本是第2版新增加的。

本套教程的编写是基于天津大学焊接专业多年来教学实践的积淀。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入手阐明焊接技术理论,并列举了较多的焊接工程实例。

本套教程适用于企业焊接工程师的岗前自学与岗位培训,同时可作为注册焊接工程师认证考试的培训教材或参考书,也可用作普通高等院校相关专业本科生、研究生的参考教材,还可供从事焊接技术工作的工程技术人员参考。

衷心希望“焊接工程师系列教程”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师益友。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。

“焊接工程师系列教程”编委会

前 言

我国高校在专业设置方面,已将焊接并入“材料成形及控制工程”专业。为了适应在“材料成形及控制工程”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自学的需求,编写了《焊接工艺理论与技术》一书。

《焊接工艺理论与技术》一书共分 11 章,首先在前 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。后几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、熔化极氩弧焊、CO₂ 气体保护焊、药芯电弧焊、等离子弧焊与切割等的基本原理、工艺特点、相关设备以及应用等基本知识和内容。并在编写中力图反映近年来发展的高效、节能、低成本和绿色焊接等新的工艺方法。搅拌摩擦焊是 21 世纪初最具创新的焊接方法,它的研究和应用方兴未艾,本书系统地介绍了其基本原理、工艺特点、温度分布和焊接金属组织,接头的力学性能以及应用等基本知识。

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。

本书参编人员:天津大学奚道岩(第 1~3 章);天津大学李桓(第 7、8 章);天津大学韩国明(绪论、第 4~6、9~10 章);天津理工大学韦福水(第 11 章)。

本书是在《金属结构的电弧焊》一书的基础上修订完成的。第 1 版《金属结构的电弧焊》由奚道岩主编,参加编写的有孙维善、韩国明和吴仁育。由李俊岳教授主审。

本书由天津大学韩国明任主编,天津理工大学韦福水教授主审。

在教材编写过程中,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,敬请各界读者予以批评指教。

编 者

目 录

序

编写说明

前言

绪论 1

第 1 章 焊接电弧 4

1.1 电弧的物理基础 4

1.1.1 气体放电的基本概念 4

1.1.2 电弧中带电粒子的产生 5

1.2 焊接电弧的引燃过程 21

1.2.1 接触 21

1.2.2 拉开 22

1.2.3 燃弧 22

1.3 电弧各区域及其导电机构 22

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 24

1.3.3 阳极区及其导电机构 25

1.3.4 电极斑点的跳动现象 26

1.4 焊接电弧的热和力 27

1.4.1 电弧的热功率和温度分布 27

1.4.2 电弧力及影响因素 32

1.5 电弧的静特性与动特性 37

1.5.1 焊接电弧的静特性 37

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 41

1.6.2 焊条药皮的影响 41

1.6.3 气流的影响 41

1.6.4 焊接处的清洁程度 42

1.6.5 焊接电弧的磁偏吹及控制 42

复习思考题 44

第 2 章 焊丝的熔化和熔滴过渡 46

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 47

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 71

复习思考题 73

第 3 章 焊接熔池及焊缝成形 74

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 85

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 94

复习思考题 98

第 4 章 埋弧焊 100

4.1 埋弧焊的特点和应用 100

4.1.1 埋弧焊的过程 100

4.1.2 埋弧焊的特点 101

4.1.3 埋弧焊的应用 102

4.2 埋弧焊用焊丝和焊剂 103

4.2.1 焊丝 103

4.2.2 焊剂 103

4.2.3 焊丝与焊剂的选配 107

4.3 埋弧焊机 109

4.3.1 埋弧焊机的结构和分类	109	5.6 钨极氩弧焊焊机	186
4.3.2 焊接过程中电弧的自动调节	111	5.6.1 焊机的组成及引弧装置	186
4.3.3 等速送丝式埋弧焊机	113	5.6.2 NSA-500-1 型手工交流钨极 氩弧焊机	189
4.3.4 电弧电压反馈变速送丝式 埋弧焊机	118	5.6.3 SW-300 型交、直流钨极 氩弧焊机	191
4.4 埋弧焊工艺	129	复习思考题	194
4.4.1 焊前准备	129	第6章 熔化极氩弧焊	195
4.4.2 焊接技术及焊接参数	130	6.1 熔化极氩弧焊概述	195
4.4.3 焊接实例分析	138	6.1.1 熔化极氩弧焊的特点	195
4.5 高效率埋弧焊	140	6.1.2 熔化极氩弧焊的应用	195
4.5.1 多丝埋弧焊	140	6.2 熔化极氩弧焊工艺	196
4.5.2 金属粉末埋弧焊	145	6.2.1 铝的熔化极氩弧焊	196
4.5.3 带极埋弧堆焊	148	6.2.2 不锈钢的熔化极氩弧焊	201
4.5.4 窄间隙埋弧焊	149	6.2.3 低碳钢和低合金结构钢的 熔化极氩弧焊	203
复习思考题	152	6.3 熔化极脉冲氩弧焊	205
第5章 钨极氩弧焊	153	6.3.1 熔化极脉冲氩弧焊的原理 及熔滴过渡的特点	205
5.1 钨极氩弧焊概述	153	6.3.2 熔化极脉冲氩弧焊的冶金 及工艺特点	206
5.1.1 钨极氩弧焊的特点	153	6.3.3 熔化极脉冲氩弧焊焊接参 数的选择	207
5.1.2 钨极氩弧焊的应用	155	6.3.4 变极性熔化极脉冲氩弧 焊 (AC PMIG 焊)	209
5.2 焊枪、电极及氩气	155	6.3.5 熔化极脉冲氩弧焊的应用	210
5.2.1 焊枪结构及气体保护效果	155	6.4 窄间隙熔化极氩弧焊	212
5.2.2 电极材料及形状尺寸	157	6.4.1 低热输入窄间隙熔化极氩弧焊	213
5.2.3 氩气	159	6.4.2 高热输入窄间隙熔化极氩弧焊	213
5.3 钨极氩弧焊的种类	160	6.4.3 窄间隙熔化极氩弧焊焊接参 数的选择	214
5.3.1 直流钨极氩弧焊	160	6.4.4 窄间隙熔化极氩弧焊的应用 及特点	215
5.3.2 交流钨极氩弧焊	162	6.5 混合气体的应用	216
5.3.3 脉冲钨极氩弧焊	165	6.5.1 Ar + He	216
5.4 钨极氩弧焊工艺	168	6.5.2 Ar + N ₂	217
5.4.1 接头形式及坡口	168	6.5.3 Ar + O ₂	217
5.4.2 焊接参数	168	6.5.4 Ar + CO ₂	218
5.4.3 操作要领	171	6.5.5 Ar + CO ₂ + O ₂	218
5.4.4 焊接实例分析	172	6.6 TIME 焊	219
5.5 特种钨极氩弧焊	178		
5.5.1 高频脉冲钨极氩弧焊	178		
5.5.2 热丝钨极氩弧焊	179		
5.5.3 窄间隙热丝钨极氩弧焊	180		
5.5.4 多电极钨极氩弧焊	181		
5.5.5 氩弧点焊	182		
5.5.6 活性焊剂钨极氩弧焊 (A-TIG 焊)	182		

6.6.1	TIME 焊的基本原理	219	8.2	药芯焊丝的结构及分类	269
6.6.2	TIME 焊的特点	220	8.2.1	药芯焊丝的结构	269
6.6.3	TIME 焊工艺	220	8.2.2	药芯焊丝的分类	269
6.6.4	TIME 焊对设备的要求	221	8.2.3	气体保护焊用药芯焊丝	270
6.7	双丝高速焊	221	8.2.4	焊剂保护用药芯焊丝	271
6.7.1	双丝 MAG 焊(MAX 法)	221	8.2.5	自保护药芯焊丝	271
6.7.2	TIME TWIN 和 TANDEM		8.2.6	不锈钢药芯焊丝	273
	双丝熔化极气体保护焊	222	8.3	药芯焊丝电弧焊的焊接参数	274
6.8	激光—MIG 复合焊接	225	8.3.1	焊接电流、电弧电压	274
6.9	熔化极氩弧焊设备	226	8.3.2	焊丝伸出长度	275
6.9.1	熔化极氩弧焊电源	226	8.3.3	保护气体流量	275
6.9.2	程序自动控制	228	8.3.4	焊接速度	275
6.9.3	送丝系统	228	8.4	药芯焊丝标准	277
6.9.4	焊枪	230	8.5	药芯焊丝电弧焊的焊接设备	278
复习思考题		231	复习思考题		279
第 7 章	CO ₂ 气体保护电弧焊	232	第 9 章	等离子弧焊与切割	280
7.1	CO ₂ 气体保护电弧焊的特点和应用	232	9.1	等离子弧的形成及特性	280
7.1.1	CO ₂ 气体保护电弧焊的工艺		9.1.1	等离子弧的形成	280
	特点与分类	232	9.1.2	等离子弧的能量特性	281
7.1.2	CO ₂ 气体保护电弧焊的		9.1.3	等离子弧的基本形式	282
	冶金特性	233	9.1.4	等离子弧的静特性及对电源	
7.2	CO ₂ 气体保护电弧焊用焊接材料	237		外特性的要求	283
7.2.1	CO ₂ 气体	237	9.2	等离子弧焊	284
7.2.2	焊丝	239	9.2.1	等离子弧焊的工艺特点及应用	284
7.3	CO ₂ 气体保护电弧焊工艺	241	9.2.2	等离子弧焊的焊枪	285
7.3.1	焊前准备	241	9.2.3	等离子弧焊的焊接方法及焊接	
7.3.2	焊接参数的选择	243		参数的选择	289
7.3.3	减少金属飞溅的措施	249	9.2.4	双弧现象及防止措施	297
7.4	CO ₂ 气体保护电弧焊设备	252	9.2.5	焊接实例分析	299
7.4.1	CO ₂ 气体保护焊焊接电源	253	9.3	粉末等离子弧堆焊和喷涂	301
7.4.2	供气系统	254	9.3.1	粉末等离子弧堆焊	301
7.4.3	半自动 CO ₂ 气体保护焊焊机	255	9.3.2	粉末等离子弧喷涂	302
7.5	特种 CO ₂ 气体保护电弧焊	263	9.4	等离子弧切割	304
7.5.1	CO ₂ 电弧点焊	263	9.4.1	等离子弧切割原理及特点	304
7.5.2	双层气流保护脉冲焊	265	9.4.2	等离子弧切割方法的分类	305
复习思考题		266	9.4.3	氮气等离子弧切割	306
第 8 章	药芯焊丝电弧焊	267	9.4.4	空气等离子弧切割	310
8.1	药芯焊丝的特点及应用	267	复习思考题		319
8.1.1	药芯焊丝的特点	267	第 10 章	搅拌摩擦焊	320
8.1.2	药芯焊丝的应用	268	10.1	概述	320

10.1.1 搅拌摩擦焊的原理·····	320	11.2.3 不锈钢圆网的 TIG 焊工艺·····	353
10.1.2 搅拌摩擦焊的特点·····	321	11.2.4 Ar-N ₂ 混合气保护 TIG 焊焊 接纯铜的厚大件·····	355
10.2 搅拌摩擦焊工艺·····	322	11.2.5 316L 不锈钢管的 A-TIG 焊工艺·····	356
10.2.1 影响搅拌摩擦焊焊接的因素···	322	11.3 熔化极气体保护(MIG/MAG)焊在 工程中的应用·····	358
10.2.2 搅拌摩擦焊焊接参数的选择···	325	11.3.1 MIG 焊在大截面铸铝母线焊 接中的应用·····	358
10.3 搅拌摩擦焊的温度分布和焊缝 金属组织·····	328	11.3.2 大口径输气管道自动 MAG 焊工艺·····	361
10.3.1 焊接区的温度分布·····	329	11.3.3 自动 MAG 焊在电站水轮机组 蜗壳制作中的应用·····	364
10.3.2 仿真计算结果·····	329	11.3.4 膜式省煤器的自动 MAG 焊···	367
10.3.3 焊接时的热量计测·····	330	11.3.5 厚壁管窄间隙 MAG 焊工艺···	368
10.3.4 焊缝区的组织·····	331	11.4 CO ₂ 气体保护焊在工程中的应用···	370
10.4 搅拌摩擦焊焊接接头的力学性能···	332	11.4.1 汽车车架 CO ₂ 气体保护焊焊接 工艺设计及变形控制·····	370
10.4.1 搅拌摩擦焊接头的抗拉强度和 弯曲性能·····	333	11.4.2 STT II 型逆变焊机在输气 管道打底焊中的应用·····	373
10.4.2 搅拌摩擦焊接头的硬度·····	334	11.4.3 CO ₂ 气体保护焊在高炉 HS 燃烧室炉壳焊接中的应用·····	375
10.4.3 搅拌摩擦焊接头的 疲劳强度·····	335	11.5 药芯焊丝电弧焊在工程中的应用···	378
10.4.4 搅拌摩擦焊的冲击韧度和 断裂韧度·····	336	11.5.1 药芯焊丝半自动电弧焊在 管道工程中的应用·····	378
10.4.5 搅拌摩擦焊的应力腐蚀裂纹···	337	11.5.2 100t 转炉炉壳的药芯焊丝 自保护电弧焊技术·····	380
10.5 搅拌摩擦焊的应用·····	337	11.5.3 药芯焊丝在异种钢焊接 中的应用·····	382
复习思考题·····	338	11.6 等离子弧焊在工程中的应用·····	385
第 11 章 焊接方法在工程中的应用···	339	11.6.1 汽提塔钛板衬里的等离 子弧焊·····	385
11.1 埋弧焊在工程中的应用·····	339	11.6.2 等离子弧纵缝焊机在不锈钢容 器制造中的应用·····	388
11.1.1 16MnR 钢制压力容器环缝的 埋弧焊工艺·····	339	11.6.3 耐候钢纵缝的等离子弧焊·····	390
11.1.2 0Cr19Ni9 钢制压力容器的埋 弧焊工艺·····	340	11.7 熔焊工艺方法混合应用的工程实例···	392
11.1.3 埋弧焊在轧辊表面堆焊 中的应用·····	342	附录 A 焊缝坡口的形式与尺寸·····	398
11.1.4 窄间隙埋弧焊在液压缸缸 体制造中的应用·····	345	附录 B 焊接材料·····	411
11.1.5 双丝埋弧焊工艺在高层建 筑钢结构上的应用·····	347	附录 C 常用电焊机型号及 技术数据·····	423
11.2 钨极氩弧焊在工程中的应用·····	348	参考文献·····	428
11.2.1 CO ₂ 冷凝器奥氏体不锈钢管板 与纯铜换热管的钨极氩弧焊 (TIG 焊)·····	348		
11.2.2 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·····	350		

绪 论

20 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等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,引起了整个世界材料加工、制造业的巨大变革。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,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,使金属结构的重量大大降低;而采用铝、镁、钛及其合金材料使产品朝轻量化方向发展。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,产品的加工向着少切削或无切削方向发展,向着高精度高质量方向发展。传统的毛坯材料加工方法逐渐被先进的材料加工方法所替代。以焊接为例,激光-电弧复合热源的焊接、搅拌摩擦焊接等新的焊接方法对传统的电弧焊接方法提出了挑战。因此,发展先进材料加工科学与技术是完全必要的,并且具有非常重要的意义。

1. 焊接过程实质

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,使工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 待连接表面不平。即使进行最精密的机械加工,其表面平面度也只能达到 μm (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,将工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. 焊接方法发展概况

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,还只不过是理想。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 年俄国人发明了碳极电弧,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方法,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,而氧乙炔气体火焰焊接却由于设备简单、价格便宜而迅速发展,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。它是熔焊中最重要的、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;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,其熔深大、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 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较快,迫切要求焊接过程向机械化、自动化方面发展,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 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。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到一个新的历史阶段,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_2 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。到目前为止,基本的焊接方法已多达 20 余种。此外还有多种派生出来的焊接方法,例如活性气体保护电弧焊、各种形式的脉冲电弧焊、窄间隙焊、搅拌摩擦焊和全位置焊等。

上述各种焊接方法针对不同的材料、不同的结构加以选用,在工业生产中它们发挥着各自的作用。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,一些工业发达的国家,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,即熔焊、压焊及钎焊。而每一大类又可按焊接热源及其他明显特点分为若干种,下面按类别列出的基本焊接方法近 30 种。

熔焊是焊接过程中,将焊件接头加热至熔化状态,不加压力完成焊接的方法。按照采用的电极,电弧焊分为熔化极和非熔化极两类,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_2 气体保护电弧焊等方法;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,基本焊接方法分类见图 0-1。

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,通过实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 11 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 章是一种绿色加工方法——搅拌摩擦焊。第 11 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、熔化极氩弧焊、 CO_2 气体保护电弧焊、药芯焊丝电弧焊、等离子弧焊等是常用的基本的电弧焊方法, 搅拌摩擦焊也越来越多地被采用。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几乎都列举了一些焊接实例, 并在第 11 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。

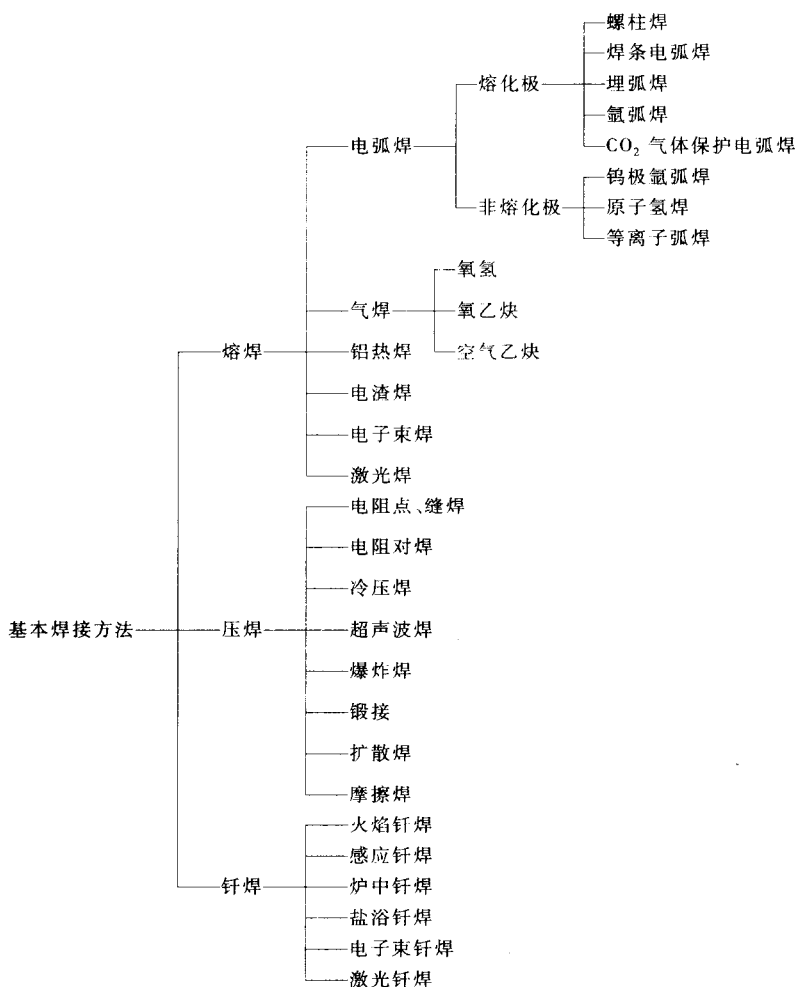


图 0-1 基本焊接方法分类

第1章 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实质和基本规律。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，并以此作为技术指导思想，把握电弧焊进程。

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(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。

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，只要在金属导体的两端加上电压，自由电子便在电场力的作用下定向移动而形成电流，这种导电现象称为电子导电，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，于是液体中出现电场，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。

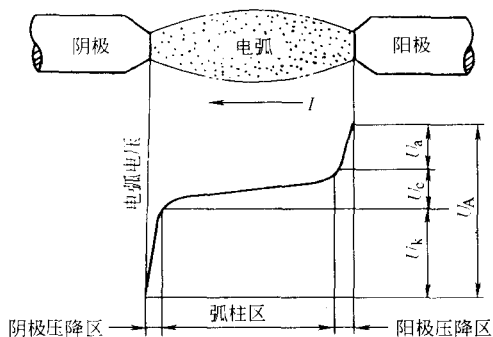


图1-1 电弧及各区域的电压分布

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 是气体放电的全伏安特性曲线及放电类型。

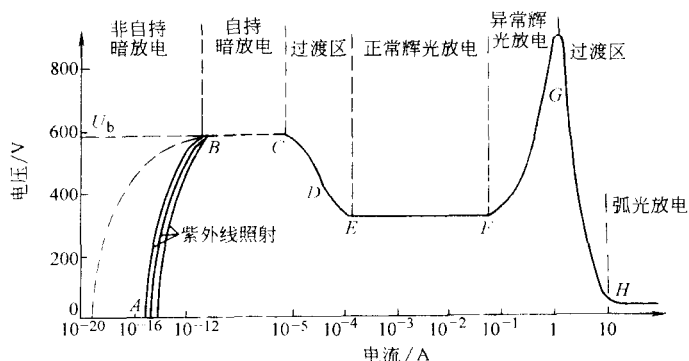


图 1-2 气体放电的全伏安特性曲线及放电类型

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,这种气体导电现象称为被激放电,也称为非自持放电。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,一旦放电开始。取消外加诱发措施,放电过程本身仍能继续下去,这种放电过程称为自激放电,也称为自持放电。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

电弧中带电粒子主要是由气体介质中的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:电离、激发、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称为电离。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,这两者对立的统一,就使电子按一定规律分布在固定的椭圆轨道上绕核运动。电子绕核转动就有一定的动能,电子被核吸引有一定的位能,这两者之和就是原子的内能。光谱分析表明,原子的内能不能连续地变化,它只是一系列不连续的量,由此原子只能处于一系列不连续的能量状态中,这种不连续的能量状态用能级 E_1 、 E_2 、 $E_3 \cdots E_n$ 表示,其中

E_1 的能量值最小, 按顺序依次增大。各种原子具有各不相同的能级数和能量值。

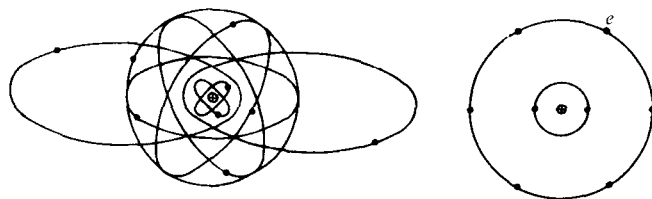


图 1-3 原子结构模型示例
(氧原子模型图)

原子的不同能量状态对应于核外电子的不同运行轨道。由于原子的能量状态是不连续的, 因此电子的可能轨道也是不连续的, 电子只可能与原子能级相对应的轨道上运行, 而不能在任意半径的轨道上运行。电子运行轨道半径越大(即离核越远), 则能级越高; 而轨道半径越小, 则能级越低。

在正常状态下, 原子处于最低能级, 这时电子在离核最近的轨道上运动, 这种状态叫做基态。当原子吸收一定的外界能量(可以是热能、光能、电能、机械能、化学能等各种形式的能量)时, 原子便可从基态跃迁到较高的能级, 这时电子也跃迁到离核较远的轨道上运行, 这一状况称为激发。原子从基态向激发态跃迁时, 其内能也在增大。

处于激发态的原子是不稳定的, 只能停留很短的时间, 根据激发能级的不同可为 $10^{-2} \sim 10^{-9}$ s, 通常约为 10^{-8} s。在这短暂的时间内, 原子将自动地从能级较高的激发态向能级较低的激发态或基态跃迁, 以达到新的稳定。这种在没有外界作用, 而仅仅由于原子内部能量的自发调整所发生的由高能级向低能级的跃迁, 称为自发跃迁。自发跃迁时向外界释放能量, 其方式有两种: 一种以热能形式放出, 传递给其他原子或分子; 另一种以光的形式辐射出来, 成为原子的发光现象。辐射出的光子频率 γ 取决于两个相关能级的能量差, 例如, 原子从能级 E_2 向能级 E_1 跃迁所辐射出来的光子的频率为: $\gamma = (E_2 - E_1)/h$, h 为普朗克常数($6.62 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$)。

自发跃迁完全是随机发生的, 各个原子都是各自独立地进行自发辐射, 因而辐射出来的光子的频率、波长、方向等也各不相同。可以认为, 弧光的多色性大概与此有一定的关系。

原子无论受激发时吸收能量或自发跃迁时释放能量, 其能量值都不是任意的, 而是等于原子发生跃迁的两个能级间的能量差。

使原子产生激发所需要的最低外界能量称为最低激发能, 简称激发能, 常用 W_e 作为代表符号, 以电子伏(eV)作为能量单位。一个电子伏就是一个电子通过电位差为 1 伏的电场时, 电子所获得的能量, 亦即电场所做的功, 其数值等于 $1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$, 即: $1 \text{ eV} = 1 \text{ 基本电荷} \times 1 \text{ 伏} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C} \times 1 \text{ V} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$ 。这个数值的数量级较小, 为了便于表达和计算, 往往将激发能 W_e 的大小用数值相等的激发电压 U_e (单位为 V) 来代表, 二者仅数值相等而物理含义不同(U_e 的物理含义可参照下文中的电离电压进行推理)。

不仅原子可以受激发进行能级跃迁, 其他微观粒子(分子等)也具有这类性质。常用气体粒子的最低激发电压值见表 1-1。

处于激发态的原子(或分子), 其电子虽然跃迁到高能级的较外层的轨道运转而有离去的趋势, 但它仍不能摆脱原子核的约束而分离出去。尽管如此, 处于激发态的气体粒子还是要比处于基态的气体粒子的电离概率大。