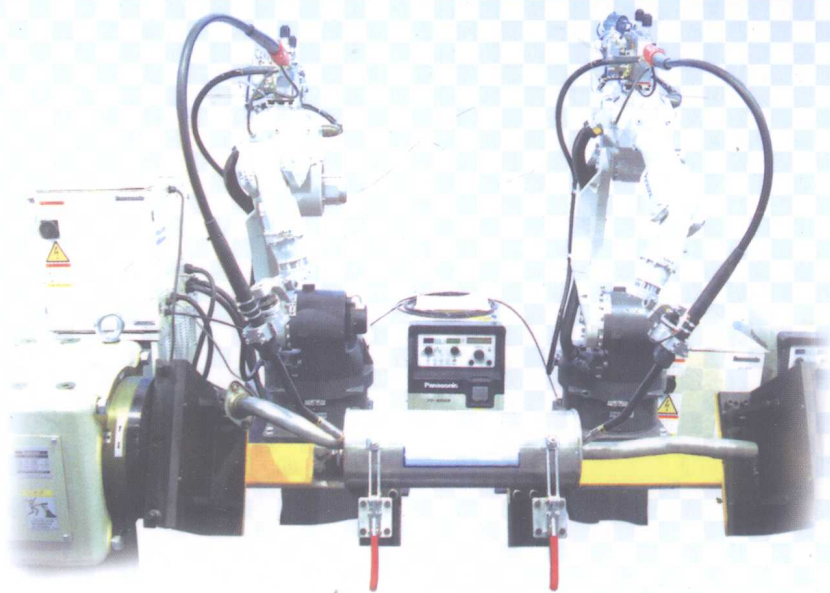




普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 材料连接设备及工艺

天津大学 杨立军 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 材料连接设备及工艺

主编 杨立军

参编 李 桓 韩国明 潘存海

曲文卿 李志勇 陈翠欣

薛海涛

主审 胡绳荪 韦福水



机械工业出版社

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,以在连接技术居于举足轻重地位的焊接技术为重点,较为系统地介绍了焊接工艺理论及其应用,以及微电子连接应用技术。本书分为四部分:第一部分是熔焊设备、工艺理论及应用,包括电弧焊理论及焊条电弧焊、埋弧焊、钨极氩弧焊、熔化极氩弧焊、CO<sub>2</sub>气体保护电弧焊、等离子弧焊接与喷涂等工艺理论及应用,还有电渣焊、高能束流焊接的激光焊、电子束焊的工艺理论及应用;第二部分是压焊设备、工艺理论及应用,包括电阻焊、摩擦焊、扩散焊、变形焊、超声波焊、爆炸焊等工艺理论及应用;第三部分是钎焊设备、工艺理论及应用,包括钎焊理论基础、各种钎焊工艺及设备、不同材料的钎焊等内容;第四部分简要介绍了微电子连接技术及其应用特点,包括器件内连接应用的焊接、粘接、组焊等技术和器件之间连接的波峰焊、再流焊等技术。

本书可作为高等院校材料成形及控制工程专业(焊接方向)主干课程的教材,也可供从事材料连接和焊接技术的工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

材料连接设备及工艺/杨立军主编. —北京:机械工业出版社, 2008. 10  
普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
ISBN 978-7-111-25061-6

I. 材… II. 杨… III. ①焊接设备—高等学校—教材②焊接工艺—高等学校—教材 IV. TG4

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第136235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:冯春生 责任编辑:冯春生 游焱兵

版式设计:霍永明 责任校对:陈延翔

封面设计:王伟光 责任印制:李妍

保定市中国画美凯印刷有限公司印刷

2009年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·30印张·744千字

标准书号:ISBN 978-7-111-25061-6

定价:49.80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) 88379715

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

本书是根据教高[2006]9号《教育部关于印发普通高等教育“十一五”国家级教材规划选题的通知》精神，通过申报评审入选“十一五”国家级教材规划的。它是为满足高等院校材料成形及控制工程专业（焊接方向），以及其他与焊接有关专业的教学需要而编写的。

材料连接技术是现代工业技术的重要组成部分，一般包括焊接技术、机械连接技术和粘接技术，其中的焊接技术应用广泛，居于具有不可替代的地位。材料连接技术的应用遍及机械制造、石油化工、船舶、桥梁、压力容器、建筑、动力工程、交通车辆、电子、通信、航空航天等各个工业部门，已成为现代制造业中不可缺少的成形加工技术之一。本书中包含的熔焊设备及工艺方面的内容是原来的焊接专业和现在的材料成形及控制工程专业（焊接方向）在教学中的专业主干课内容，压焊和钎焊方面的内容也是上述专业教学的重要内容，微电子连接技术则综合运用了多种焊接和粘接技术。这些方面的教学在构筑学生专业理论基础和培养工程实践能力方面起着重要作用。

随着我国科技和经济的发展，对高等院校教学和毕业生提出了更高的要求，不仅要求学生基础理论扎实，而且要拓宽专业知识面。编写本书的目的就是希望较为系统地介绍以焊接技术为主的材料连接技术，使学生能够对材料连接的应用技术有较为全面的了解和学习。

本书系统地讲述了有关焊接的一些基础理论和焊接方法。其中，有关熔焊的有电弧基础理论、电弧焊焊缝成形基础知识、焊条电弧焊埋弧焊、钨极氩弧焊、熔化极氩弧焊、CO<sub>2</sub>气体保护电弧焊、等离子弧焊、电渣焊、高能束流焊接的真空电子束焊、激光焊等；有关压焊的有电阻焊、摩擦焊、扩散焊、变形焊、超声波焊、爆炸焊等工艺理论及应用；有关钎焊的有钎焊理论基础、各种钎焊工艺及设备、不同材料的钎焊等内容。此外，本书还简要介绍了连接技术在微电子技术中的应用，包括器件内连接应用的连接技术和器件之间的连接技术。对于主要的焊接方法，本书都讲述了其工作原理和特点、焊接设备、焊接工艺以及所派生出的其他方法。本书在内容的编排上注意理论联系实际，突出重点，采用最新的技术标准，并注意反映国内外新的研究成果和发展趋势。

本书由天津大学杨立军主编，天津大学胡绳荪教授和天津理工大学韦福水教授主审。编写人员分工为：绪论、第1章部分内容（1.1、1.2和1.5节）、第3章、第5章、第6章由天津大学杨立军编写，并负责全书统稿；第1章部分内容（1.3和1.4节）、第2章由天津大学李桓编写；第4章、第7章由天津大学韩国明编写；第8章由河北工业大学陈翠欣编写；第9章由中北大学李志勇编写；第10章由天津科技大学潘存海编写；第11章由河北工业大学薛海涛编写；第12章、第13章、第14章由北京航空航天大学曲文卿编写。

本书在编写的过程中，得到了许多同志的帮助和支持，韦福水教授和胡绳荪教授在审稿过程中提出了许多改进的建议，在此表示衷心的感谢，并向本书中所引用文献的作者深表谢意。

由于作者水平有限，书中难免有疏漏和欠妥之处，敬请专家和广大读者批评指正。

编者

# 目 录

前言	
绪论	1
0.1 材料连接技术概况	1
0.2 焊接方法的发展	2
0.3 焊接的实质与分类	2
0.4 本课程的性质和教学内容	4
第1章 电弧焊基础	6
1.1 电弧的物理基础	6
1.1.1 电弧的物理本质	6
1.1.2 电弧的引燃	10
1.1.3 焊接电弧的结构和导电机构	12
1.2 焊接电弧的工艺特性	14
1.2.1 电弧的电特性	14
1.2.2 电弧的热特性	16
1.2.3 电弧的力学特性	20
1.2.4 电弧挺度及磁偏吹	25
1.2.5 交流电弧的特点	26
1.3 焊丝的熔化及熔滴过渡	28
1.3.1 焊丝的熔化热源	28
1.3.2 影响焊丝熔化速度的因素	29
1.3.3 熔滴上的作用力	31
1.3.4 熔滴过渡主要形式	32
1.3.5 熔滴过渡的损失及飞溅	39
1.4 母材熔化和焊缝成形	41
1.4.1 焊缝的形成	42
1.4.2 焊接参数和工艺因素对焊缝成形影响	43
1.4.3 焊缝成形缺陷及产生原因	46
1.5 弧焊电源	48
1.5.1 对弧焊电源特性的要求	48
1.5.2 弧焊电源的类型	49
1.5.3 弧焊电源的选用	57
第2章 焊条电弧焊	60
2.1 概述	60
2.1.1 焊条电弧焊的基本原理	60
2.1.2 焊条电弧焊的特点及应用	61
2.2 焊条电弧焊设备	61
2.3 焊条	62
2.3.1 焊条的组成及分类	62
2.3.2 焊条的选用	63
2.4 焊条电弧焊工艺	65
2.4.1 焊前准备	65
2.4.2 焊接参数的选择	68
第3章 埋弧焊	72
3.1 埋弧焊的特点和应用	72
3.1.1 埋弧焊的焊接过程	72
3.1.2 埋弧焊的特点	72
3.1.3 埋弧焊的分类及应用	73
3.2 埋弧焊的冶金特点	74
3.2.1 冶金过程的一般特点	74
3.2.2 埋弧焊焊丝与焊剂的配合	74
3.2.3 低碳钢埋弧焊的主要冶金反应	78
3.3 电弧焊的自动调节系统	81
3.3.1 自动调节的概念	81
3.3.2 电弧自身调节系统——等速送丝埋弧焊调节系统	82
3.3.3 变速送丝埋弧焊调节系统——电弧电压反馈调节系统	86
3.4 埋弧焊设备	91
3.4.1 埋弧焊机的类型	92
3.4.2 埋弧焊机的组成	92
3.4.3 埋弧焊机的工作原理	95
3.5 埋弧焊工艺	102
3.5.1 焊前准备	102
3.5.2 埋弧焊对接工艺	103
3.5.3 T形接头和搭接接头埋弧焊	

工艺 .....	109	5.2.3 熔化极氩弧焊的熔滴过渡控制 .....	155
3.6 高生产率的埋弧焊工艺 .....	110	5.3 熔化极氩弧焊设备 .....	155
<b>第4章 钨极氩弧焊</b> .....	114	5.3.1 送丝系统 .....	156
4.1 概述 .....	114	5.3.2 焊枪 .....	159
4.1.1 钨极氩弧焊的特点 .....	114	5.3.3 供气系统和水冷系统 .....	161
4.1.2 钨极氩弧焊的应用 .....	116	5.3.4 焊接电源 .....	162
4.2 钨极氩弧焊机 .....	116	5.3.5 控制系统 .....	163
4.2.1 焊机的组成及引弧装置 .....	116	5.4 熔化极氩弧焊的焊接材料 .....	164
4.2.2 焊枪 .....	119	5.4.1 保护气体 .....	164
4.2.3 供气系统和水冷系统 .....	120	5.4.2 焊丝 .....	167
4.2.4 焊接程序控制装置 .....	120	5.5 熔化极氩弧焊工艺 .....	171
4.2.5 WS系列交、直流钨极氩弧焊机 .....	121	5.5.1 焊前准备 .....	171
4.3 钨极氩弧焊的焊接材料 .....	129	5.5.2 焊接参数的选择 .....	171
4.3.1 氩气 .....	129	5.6 特种熔化极氩弧焊工艺 .....	175
4.3.2 电极材料及形状尺寸 .....	130	5.6.1 熔化极脉冲氩弧焊(脉冲MIG/MAG焊) .....	176
4.3.3 焊丝 .....	131	5.6.2 双丝熔化极氩弧焊 .....	179
4.4 钨极氩弧焊的种类 .....	133	5.6.3 窄间隙熔化极氩弧焊 .....	180
4.4.1 直流钨极氩弧焊 .....	133	5.6.4 气电立焊 .....	181
4.4.2 交流钨极氩弧焊 .....	134	5.6.5 T. I. M. E 焊 .....	182
4.4.3 脉冲钨极氩弧焊 .....	137	5.6.6 CMT工艺 .....	183
4.5 钨极氩弧焊工艺 .....	140	<b>第6章 CO<sub>2</sub> 气体保护电弧焊</b> .....	185
4.5.1 接头形式及坡口 .....	140	6.1 CO <sub>2</sub> 气体保护电弧焊的原理、特点及应用 .....	185
4.5.2 焊件和填充焊丝的焊前清理 .....	140	6.1.1 CO <sub>2</sub> 气体保护电弧焊的原理 .....	185
4.5.3 焊接参数 .....	141	6.1.2 CO <sub>2</sub> 气体保护电弧焊的特点 .....	186
4.6 钨极氩弧焊其他方法 .....	144	6.1.3 CO <sub>2</sub> 气体保护电弧焊的应用 .....	186
4.6.1 高频脉冲钨极氩弧焊 .....	144	6.2 CO <sub>2</sub> 气体保护电弧焊熔滴过渡的特点 .....	187
4.6.2 多电极钨极氩弧焊 .....	145	6.3 CO <sub>2</sub> 气体保护电弧焊的冶金特点 .....	188
4.6.3 A-TIG焊 .....	145	6.3.1 合金元素氧化问题 .....	188
4.6.4 热丝钨极氩弧焊 .....	147	6.3.2 脱氧和合金化问题 .....	189
<b>第5章 熔化极氩弧焊</b> .....	149	6.3.3 气孔问题 .....	190
5.1 熔化极氩弧焊的特点和应用 .....	149	6.4 CO <sub>2</sub> 气体保护电弧焊设备 .....	191
5.1.1 熔化极氩弧焊的基本原理 .....	149	6.4.1 CO <sub>2</sub> 气体保护电弧焊设备的组成 .....	191
5.1.2 熔化极氩弧焊的特点 .....	149	6.4.2 焊接电源 .....	193
5.1.3 熔化极氩弧焊的应用 .....	150	6.4.3 控制系统 .....	193
5.2 熔化极氩弧焊的熔滴过渡 .....	150		
5.2.1 焊接时的极性选择 .....	151		
5.2.2 熔化极氩弧焊的主要熔滴过渡形式 .....	152		

6.4.4 送丝系统 .....	194	8.2 电渣焊的热源及冶金特点 .....	242
6.4.5 焊枪与软管 .....	194	8.2.1 电渣焊的热源及结晶特点 .....	242
6.4.6 供气系统 .....	194	8.2.2 电渣焊的冶金特点 .....	242
6.4.7 NBC7—250 (IGBT) 型逆变式 CO <sub>2</sub> 焊机 .....	195	8.3 电渣焊的焊接材料 .....	243
6.5 CO <sub>2</sub> 气体保护电弧焊的焊接材料 .....	199	8.3.1 焊剂 .....	243
6.5.1 保护气体 .....	199	8.3.2 电渣焊用电极材料 .....	245
6.5.2 焊丝 .....	200	8.4 丝极电渣焊设备与工艺 .....	246
6.6 飞溅问题与控制 .....	202	8.4.1 丝极电渣焊设备 .....	246
6.7 CO <sub>2</sub> 气体保护电弧焊工艺 .....	203	8.4.2 丝极电渣焊焊接参数 .....	248
6.7.1 焊前准备 .....	203	8.5 丝极电渣焊操作工艺过程 .....	251
6.7.2 焊接参数的选择 .....	204	8.5.1 焊前准备 .....	251
6.8 CO <sub>2</sub> 气体保护电弧焊其他方法 .....	210	8.5.2 焊接过程 .....	251
6.8.1 药芯焊丝 CO <sub>2</sub> 气体保护电 弧焊 .....	210	8.6 电渣焊其他方法 .....	252
6.8.2 波形控制 CO <sub>2</sub> 气体保护 电弧焊和 STT 控制法 .....	212	8.6.1 板极电渣焊 .....	252
<b>第7章 等离子弧焊接与喷涂</b> .....	214	8.6.2 熔嘴电渣焊 .....	252
7.1 等离子弧的特性 .....	214	8.6.3 管极电渣焊 .....	254
7.1.1 等离子弧的形成 .....	214	<b>第9章 高能束焊接</b> .....	255
7.1.2 等离子弧的能量特性 .....	215	9.1 高能束焊接的特点 .....	255
7.1.3 等离子弧的类型及应用 .....	216	9.1.1 热源 .....	255
7.1.4 等离子弧的静特性及对电源外 特性的要求 .....	217	9.1.2 高能束焊接的焊缝成形特点 .....	256
7.1.5 双弧现象及防止措施 .....	218	9.2 电子束焊 .....	257
7.2 等离子弧焊接 .....	220	9.2.1 电子束焊原理及分类 .....	257
7.2.1 工艺特点及应用 .....	220	9.2.2 真空电子束焊设备 .....	258
7.2.2 焊枪 .....	220	9.2.3 电子束焊的特点及应用 .....	262
7.2.3 焊接方法及焊接参数的选择 .....	224	9.2.4 电子束焊的焊接参数 .....	263
7.3 等离子弧焊接其他方法 .....	233	9.2.5 电子束在其他加工中的应用 .....	267
7.3.1 粉末等离子弧堆焊 .....	233	9.3 激光焊 .....	268
7.3.2 等离子弧—MIG 焊 .....	235	9.3.1 激光的产生及特性 .....	268
7.3.3 磁控等离子弧堆焊 .....	236	9.3.2 激光焊的分类 .....	269
7.4 粉末等离子弧喷涂 .....	236	9.3.3 激光焊的特点及应用 .....	270
<b>第8章 电渣焊</b> .....	240	9.3.4 激光焊工艺 .....	271
8.1 电渣焊概述 .....	240	9.3.5 激光焊设备的选择与应用 .....	275
8.1.1 电渣焊的基本原理 .....	240	9.3.6 激光焊的新技术 .....	278
8.1.2 电渣焊的特点 .....	240	9.3.7 其他激光加工工艺 .....	279
8.1.3 电渣焊的分类及应用 .....	241	<b>第10章 电阻焊</b> .....	285
		10.1 概述 .....	285
		10.2 点焊连接 .....	286
		10.2.1 点焊连接原理 .....	286
		10.2.2 点焊连接工艺 .....	291



10.2.3	常用金属材料的点焊连接	296	11.3.3	爆炸焊连接	386
10.2.4	点焊连接技术新进展	302	<b>第12章</b>	<b>钎焊工艺基础</b>	388
10.3	凸焊连接	304	12.1	钎焊的润湿、填缝过程	388
10.3.1	凸焊连接原理及工艺	305	12.1.1	钎料的润湿	388
10.3.2	常用金属材料的凸焊连接	308	12.1.2	钎料的填缝过程	390
10.4	缝焊连接	312	12.2	钎焊的去膜过程	391
10.4.1	缝焊连接原理及工艺	312	12.2.1	钎剂去膜	392
10.4.2	常用金属材料缝焊连接	316	12.2.2	气体介质去膜	392
10.5	对焊连接	319	12.2.3	机械及物理去膜	397
10.5.1	电阻对焊连接原理及工艺	320	12.3	钎料与母材的相互作用	398
10.5.2	闪光对焊连接原理及工艺	322	12.3.1	母材向钎料的溶解	398
10.5.3	材料对焊	329	12.3.2	钎料组分向母材的扩散	401
10.6	高频焊连接	330	12.4	钎焊材料	403
10.6.1	高频焊原理	330	12.4.1	钎焊材料概况	403
10.6.2	高频焊典型应用	332	12.4.2	软钎料与钎剂	405
10.7	电阻焊连接设备	333	12.4.3	硬钎料与钎剂	411
10.7.1	电阻焊设备组成	333	12.4.4	贵金属钎料	421
10.7.2	电阻焊设备主要技术参数	345	<b>第13章</b>	<b>钎焊工艺方法与应用</b>	422
10.7.3	电极材料与结构	348	13.1	钎焊方法与设备	422
10.8	电阻焊连接质量检验与监控	350	13.1.1	钎焊方法的分类	422
10.8.1	电阻焊连接质量检验标准与 检验方法	350	13.1.2	常用钎焊方法与设备	422
10.8.2	电阻焊连接过程质量监测 与控制	356	13.1.3	特种钎焊方法与设备	431
<b>第11章</b>	<b>固相焊连接</b>	358	13.2	钎焊生产过程	433
11.1	摩擦焊	358	13.2.1	钎焊结构设计	433
11.1.1	概述	358	13.2.2	钎焊前的表面制备	438
11.1.2	连续驱动摩擦焊	359	13.2.3	钎焊焊件的装配和固定	440
11.1.3	搅拌摩擦焊	364	13.2.4	钎焊工艺过程	441
11.1.4	其他摩擦焊方法	368	13.2.5	钎焊后处理工序	444
11.2	扩散焊	370	13.3	常用材料的钎焊	445
11.2.1	概述	370	13.3.1	钢及不锈钢的钎焊	445
11.2.2	扩散焊工艺	372	13.3.2	铝及其合金的钎焊	448
11.2.3	特殊的扩散焊工艺	374	13.3.3	铜及其合金的钎焊	451
11.2.4	典型材料扩散焊技术	375	13.3.4	铝和铜的钎焊	452
11.2.5	扩散焊设备	378	<b>第14章</b>	<b>微电子连接技术概述</b>	456
11.3	固相焊连接其他工艺方法	380	14.1	集成电路的封装	456
11.3.1	变形焊连接	380	14.2	微电子器件的连接技术应用	457
11.3.2	超声波焊连接	384	14.2.1	传统连接工艺应用	457
			14.2.2	梁式引线和面键合技术	459
			14.2.3	自动载带组焊技术	461

14.3 电路板组装微连接技术·····	463	14.4.1 传统锡铅钎料的问题·····	467
14.3.1 波峰焊·····	463	14.4.2 无铅钎料研究存在的问题·····	468
14.3.2 再流焊·····	465	14.4.3 常用的无铅钎料合金系·····	468
14.4 微电子连接无铅钎焊技术·····	467	<b>参考文献</b> ·····	470

# 绪 论

## 0.1 材料连接技术概况

材料连接技术是制造技术的重要组成部分，一般包括焊接技术、机械连接技术和胶接技术。

材料连接技术是随着人类利用材料的历史的发展而不断发展的。在进入工业文明以前，人类就开始运用连接技术，如机械连接技术、胶接技术以及焊接技术中的锻焊、钎焊等。20世纪初电弧应用于焊接产生了电弧焊，在造船、汽车、桥梁、航空航天等工业领域创造出了许多大型焊接结构，使焊接成为一种重要的连接技术。

选择何种连接方法完成连接，主要考虑材料的强度、负载的类型与方向、结构工作的可靠性、使用环境、维护、生产成本以及外观等因素。机械连接包括螺纹连接、铆接、销钉、扣环和快动连接等方法，一般是可拆卸或半可拆卸连接，不受材料冶金因素影响，可以达到较高的连接强度；其缺点是连接接头往往较笨重，消耗材料多。胶接是利用胶粘剂完成连接的，一般有热固性胶粘剂和热塑性胶粘剂两种，可以连接任意搭配的同种或异种材料，接头外观好，生产成本低；但接头强度一般较低，多数胶粘剂的使用温度不高，一些胶粘剂会受到细菌等因素的破坏以及水分、溶剂等的腐蚀。焊接接头的特点是强度大，形成永久性连接，因焊接方法的多样而能满足多方面的使用要求；但焊接接头往往是经过局部加热过程完成的，因此会产生内应力，且受到复杂的冶金因素的影响。

新型材料、新构件和新器件对连接技术提出了新的要求，促进传统连接技术的不断改进与连接技术的创新。例如：①新型或特种材料及异种材料构件的连接；②复杂产品、构件和器件精密连接；③焊接过程的自动化与智能控制；④太空等特殊环境工作条件下的焊接；⑤复杂焊接产品质量的可靠性检测与寿命评估；⑥传统连接工艺的改进及新型焊接工艺方法的开发；⑦绿色连接技术和再利用修复技术等。

机械连接根本上是机械设计的问题，制造过程相对简单。焊接工艺可以制造牢固、轻便、密封性好的接头的特点，在制造业中具有不可替代的作用，其制造过程由于工艺的复杂性以及对劳动强度、质量等的要求，具有很大的研究和发展空间，这也是本书的重点内容。从上述对连接技术的发展要求也可以看出，焊接技术在连接技术中居于重要地位。

目前新材料、电子技术、计算机技术及机器人技术的发展已渗透到焊接技术各领域中，为焊接技术提供了发展机遇，焊接技术也在许多技术领域占有越来越重要的地位。以新技术应用多且使用条件严酷的飞机以及航空发动机的研制和生产为例，焊接逐渐替代许多机械连接方法，成为主导工艺方法之一。焊接技术的应用与发展不仅减轻飞机、发动机的重量，而且还为飞机和航空发动机结构设计新构思提供技术支持，促进其性能的提高。国外航空发动机结构中广泛采用了各种焊接技术，焊接结构件在喷气发动机零部件总数中所占比例已超过50%，焊接的工作量已占发动机制造总工时的10%左右。我国在此方面还与世界先进水平

有较大差距。

## 0.2 焊接方法的发展

在国家标准 GB/T 3375—1994《焊接术语》中给焊接的定义：“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，使工件达到结合的一种加工方法”，也可以认为焊接是指通过适当的手段使分离的物体产生原子(分子)间结合而连接成一体的连接方法。其主要的加工材料是金属，本书也主要讨论金属的焊接方法。

早在几千年之前，人类就开始使用钎焊和锻焊方法。目前工业技术中的焊接技术大都起源于 19 世纪的科学技术，在 20 世纪得到迅速发展。

在利用电弧热源方面，碳弧在 19 世纪初被发现，1885 年出现了碳弧焊，这被看成是电弧作为焊接热源应用的开始；1892 年发现了金属极电弧，电弧焊开始真正应用于工业生产；20 世纪初，相继发明了薄药皮焊条和厚药皮焊条，将其用作金属极电弧焊中的电极；1935 年埋弧焊被发明，电弧焊开始向机械化方向发展；20 世纪 40 年代初开始，惰性气体保护电弧焊开始在生产中大量应用；1953 年出现了 CO<sub>2</sub> 气体保护焊；随后在 1957 年就有了等离子弧焊接与切割。至此，目前现代工业应用的基本的电弧焊方法都已出现，电弧焊继续向自动化、智能化、高效化方向发展。

在电弧焊发展的同时，利用其他热源或能源的焊接方法也在不断发展。1886 年，出现了电阻焊；1901 年出现了氧乙炔气焊；20 世纪 30 年代开始，电阻焊开始被大量使用；1956 年出现了分别以超声和电子束作为焊接热源的超声波焊和电子束焊；1957 年出现了以摩擦热作为热源的摩擦焊；20 世纪 60 年代初，激光器被发明，1965 年和 1970 年就相继出现了以激光束作为热源的脉冲激光焊和连续激光焊。

每一种新热源的出现，都可能伴随着新的焊接方法的问世。焊接技术发展到今天，几乎运用了一切可以利用的热源，包括火焰、电弧、电阻热、超声波、摩擦热、电子束、激光、微波、太阳能等。但是，对焊接热源及其他能源的研究与开发仍在继续，近年来采用两种热源叠加(电弧 + 激光)的焊接技术以及摩擦热加上机械搅拌作用的搅拌摩擦焊技术成功地得到应用。

在制造业中，焊接是一种十分重要的加工工艺。据工业发达国家统计，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。焊接不仅可以解决各种钢材的连接，而且还可以解决铝、铜等有色金属及钛、锆等特种金属材料的连接，因而已广泛地应用于机械制造、造船、海洋开发、汽车制造、机车车辆、石油化工、航空航天、原子能、电力、电子技术、建筑及家用电器等部门。

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、空间等特殊条件下的焊接。

## 0.3 焊接的实质与分类

金属是依靠金属键结合在一起的。由图 0-1 可以看到，两个原子间的结合力的大小是引力与斥力共同作用的结果。当原子间的距离为  $r_A$  时，结合力最大。对于大多数金属， $r_A \approx$

0.3~0.5nm, 当原子间的距离大于或小于 $r_A$ 时, 结合力都显著降低。从理论来讲, 为了实现材料原子之间的连接, 就是当两个被连接的固体材料表面接近到相距 $r_A$ 时, 就可以在接触表面上进行扩散、再结晶等物理化学过程, 从而形成键合。然而, 事实上即使是经过精细加工的表面, 在微观上也是凹凸不平的, 更何况在材料表面上还常常带有氧化膜、油污和水分等吸附层, 这样就会阻碍材料表面的紧密接触。

焊接过程的实质就是采用物理化学方法克服被连接物体(金属)表面的凹凸不平、表面氧化物及其他表面杂质, 使被连接物体(金属)能接近到原子晶格距离并形成结合力。在工程上已获得广泛应用的焊接方法很多, 尽管实现焊接的方法和手段不同, 但它们所达到的效果是相同的, 即实现原子间的冶金结合。

焊接方法种类繁多, 新的方法仍在不断涌现, 对焊接方法进行分类的方法也有所不同。有的根据焊接方法的热源和保护方法来分类, 有的根据工艺特征来分类, 由此出现了一元坐标法、二元坐标法、族系法等分类方法。其中, 最常见的是族系法, 按照焊接工艺特征来进行分类。按照这种分类方法, 可以把焊接方法分为熔焊、压焊和钎焊三大类, 在每一大类方法中又分成若干小类, 如图0-2所示。

### 1. 熔焊

熔焊是将待焊件在待焊处的局部加热熔化, 连接处的界面熔合, 然后冷却结晶形成焊缝的焊接方法。熔焊方法需要一个或多个能量密度足够高的热源加热金属材料使之熔化。根据焊接热源的不同, 熔焊方法又可细分为: 以化学热作为热源的气焊、铝热焊; 以熔渣电阻热作为热源的电渣焊; 以电弧作为主要热源的电弧焊, 包括焊条电弧焊、埋弧焊、熔化极氩弧焊、CO<sub>2</sub>气体保护电弧焊、钨极氩弧焊、等离子弧焊等; 以高能束作为热源的电子束焊和激光焊等。

熔焊时, 被焊材料局部是在不承受外加压力的情况下被加热熔化, 需要在焊接区采取有效的隔离空气的措施, 焊接接头要经历复杂的冶金过程, 两种被焊材料之间必须具有必要的冶金相容性。

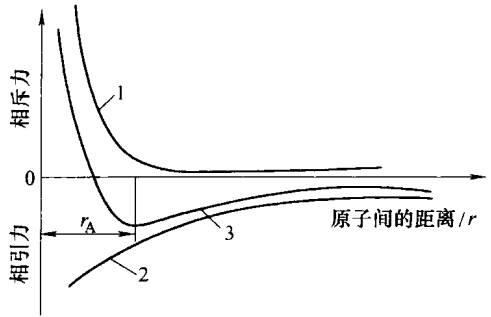


图 0-1 原子之间的作用力与距离的关系  
1—斥力 2—引力 3—合力

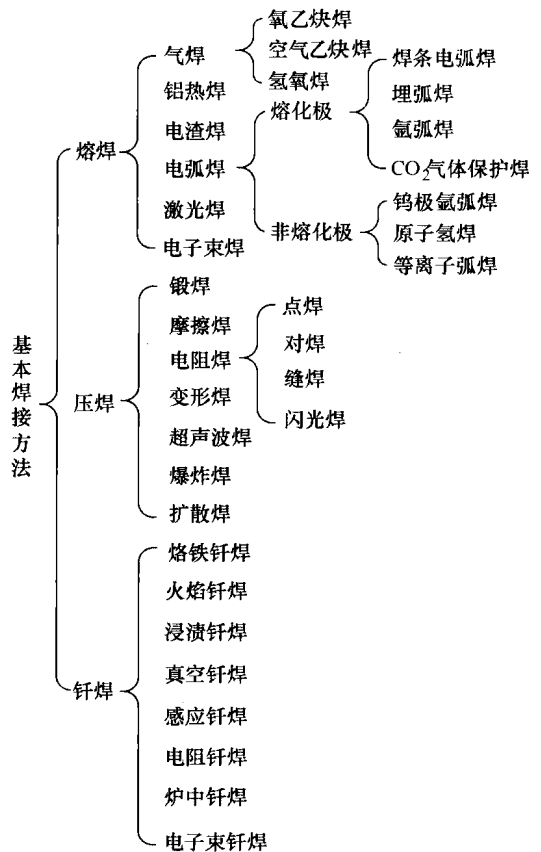


图 0-2 焊接方法分类

近年来,激光+电弧的双热源焊接工艺是熔焊方法较新的技术。

## 2. 压焊

压焊是在焊接过程中必须对焊件施加压力(加热或不加热)以完成焊接的连接方法。其中,施加压力的大小同材料的种类、焊接温度、焊接环境和介质等因素有关,而压力的性质可以是静压力、冲击压力或爆炸力。

多数压焊过程中,焊接区金属仍处于固相状态,依赖于在压力(不加热或伴以加热)作用下产生的塑性变形、再结晶和扩散等作用形成接头,强调压力对形成连接接头的主导作用。但是,采用加热可促进焊接过程的进行和更易于实现焊接。在少数压焊过程中(电阻点焊、电阻缝焊等),焊接区金属已经熔化并同时被施加压力:加热→熔化→冶金反应→凝固→固态相变→形成接头,类似于熔焊的一般过程。但是,通过对焊接区施加一定的压力可以提高焊接接头的质量。

压焊种类繁多,包括锻焊、电阻焊、高频感应焊、冷压焊、超声波焊、摩擦焊、爆炸焊等。

近年来,压焊方法新的技术主要有搅拌摩擦焊、激光辅助搅拌摩擦焊和激光-高频焊等复合焊接工艺。

## 3. 钎焊

钎焊是利用熔点比被焊材料的熔点低的金属或合金作钎料,经过加热使钎料熔化而母材不熔化,液态钎料通过毛细作用填充接头接触面的间隙,润湿被焊材料表面,通过液相与固相之间相互扩散而实现连接。钎焊的热源可以是化学反应热,也可以是间接热能。根据使用钎料熔点的高低,钎焊方法又可分为硬钎焊和软钎焊,其中硬钎焊使用的钎料熔点高于450℃,软钎焊使用的钎料熔点低于450℃。根据钎焊的热源和保护条件的不同也可分为:火焰钎焊、感应钎焊、炉中钎焊、浸渍钎焊、电阻钎焊等。

钎焊加热温度较低,母材不熔化。但焊前必须采取一定的措施清除被焊工件表面的油污、灰尘、氧化膜等。这是使工件润湿性好、确保接头质量的重要措施。

钎焊时由于加热温度比较低,故对工件材料的性能影响较小,焊件的应力变形也较小。但钎焊接头的强度一般比较低,耐热能力较差。

目前,由于用含铅钎料钎焊的电子产品大量废弃,其中的铅会污染地下水及环境,因此无铅钎料钎焊是钎焊技术发展的一个重要方向。

## 0.4 本课程的性质和教学内容

本课程是材料成形及控制工程专业(焊接方向)的主要专业理论课程之一,概括了几乎所有的焊接工艺方法的基本原理和技术。本课程的教学目的在于让学生全面了解和掌握焊接方法的工艺原理及设备功能,培养学生综合运用所学专业基础知识,提高学生分析问题和解决问题的能力,使学生将来在工作中能够学以致用,能够根据实际需要,选用合适的连接方法及设备,制定相关的连接工艺,为研究和解决具体实际的材料连接问题打下坚实的基础。

学习本课程需要的预备知识包括大学物理、电工及电子学、弧焊电源、金属学及热处理等。本课程的主要内容有:

1) 电弧物理特性、熔滴过渡、焊缝成形等方面的基础理论,以及电弧焊电源的基本

知识。

- 2) 各种电弧焊方法的基本原理、焊接工艺及设备。
- 3) 电渣焊的基本原理、焊接工艺及设备。
- 4) 高能密度焊(电子束焊和激光焊)的基本原理、焊接工艺及设备, 以及相关的焊接方法。
- 5) 压焊的各种电阻焊方法的基本原理、焊接工艺及设备。
- 6) 压焊的摩擦焊、扩散焊、爆炸焊、超声波焊等方法的基本原理、工艺及设备。
- 7) 钎焊的基本理论, 各种钎焊工艺及设备、微电子连接技术。

# 第 1 章 电弧焊基础

电弧焊(Arc Welding)是利用电弧作为热源的熔焊方法,简称弧焊。在电极与工件之间产生的电弧可有效地把电能转换成焊接过程所需要的热能,加热熔化工件进行焊接,电弧的这种能量转换和利用就是电弧焊的基础。该方法是目前应用最广泛的焊接方法。本章讨论的主要内容:电弧的物理基础、电弧的工艺特性、电弧的加热、焊丝的熔化、金属的熔滴过渡和焊缝成形的规律等。

## 1.1 电弧的物理基础

### 1.1.1 电弧的物理本质

焊接电弧是由焊接电源供给的,具有一定电压的两电极间或电极与母材间,在气体介质中产生的强烈而持久的放电现象。图 1-1 所示为电弧放电示意图。

电弧是气体放电(也称气体导电)的一种形式。气体导电不同于金属导电,不遵循欧姆定律,呈现出一个非线性的复杂关系,如图 1-2 所示。在不同条件下和不同电流区间,导电机构明显不同。

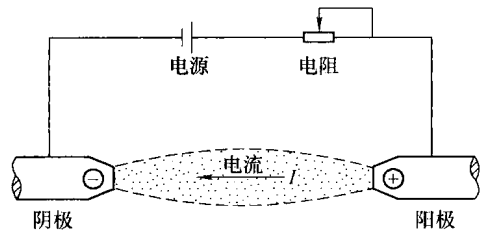


图 1-1 电弧放电示意图

1) 在电流较小的区间,气体导电所需要的带电粒子不能通过导电过程本身产生,必须依靠外加措施(加热、光照射等)来产生带电粒子,否则导电过程就不能维持,这种气体放电现象称为非自持放电。

2) 当电流大于一定数值时,气体放电本身就可产生维持导电所需要的带电粒子,这种气体放电只在开始时需要外加措施产生带电粒子,一旦放电开始,即使取消外加措施,放电仍能继续下去,这种放电过程称为自持放电。在自持放电区间,其放电特征也因电流数值的不同而明显不同,据此又可分为暗放电、辉光放电和电弧放电三种基本形式。与其他气体放电形式相比,电弧放电是电压最低、电流最大、温度最高、发光最强的一种气体放电现象。借助这种放电过程,将电能转换为热能、机械能和光能。焊接主要是利用其热能和机械能来加热熔化金属,并形成焊缝。

正常状态的气体是由中性的分子或原子组成,不含带电粒子,因而是导电的。要使正常状态的气体导电,必须有一个产生带电粒子的过程。电弧中带电粒子的产生主要依靠两个电极之间气体的电离和电极的电子发射两个物理过程。当中性气体中连续不断地产生足够多的带电粒子,同时在两电极之间有足够高的电压作用,带电粒子便会产生定向运动,形成一定的电流,也就产生了强烈的电弧放电。



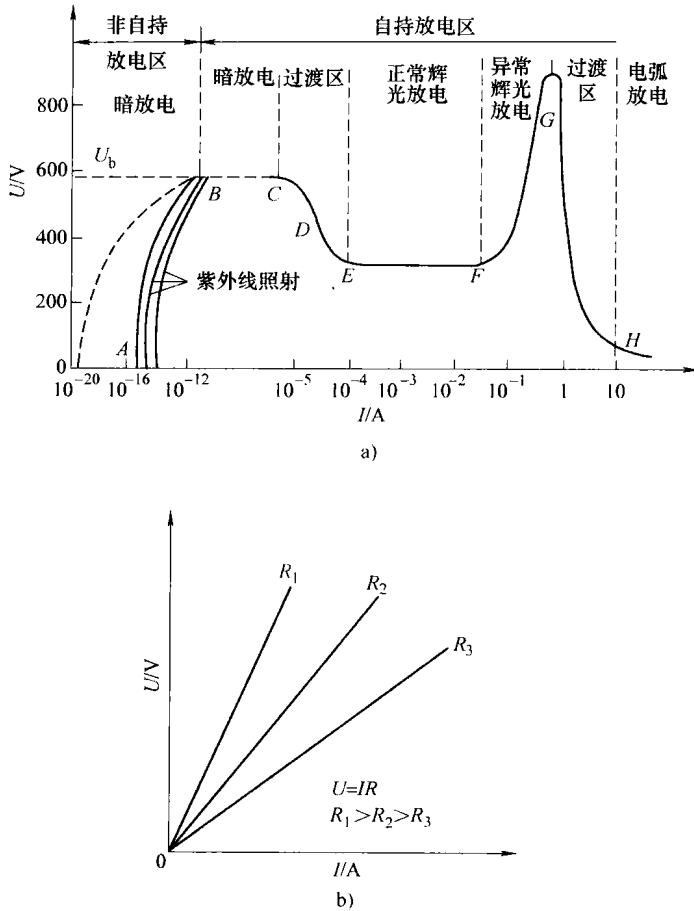


图 1-2 气体导电与金属导电的伏安特性  
a) 气体导电 b) 金属导电

### 1. 带电粒子的产生

在电弧中产生带电粒子主要有电离、电子发射等方式。

(1) 电离 在一定条件下，中性气体粒子(分子或原子)失去一个或若干个电子而成为正离子的现象称为电离。气体粒子失去一个电子的电离称为一次电离，依此类推有二次电离、三次电离、四次电离。

电弧焊过程中的电离主要是一次电离，二次电离以上的电离很少。常见气体粒子的电离电压见表 1-1。电弧中气体粒子的电离主要有热电离、场致电离、光电离等几种形式。

表 1-1 常见气体粒子的电离电压

元 素	电离电压/V	元 素	电离电压/V
H	13.5	C	11.3 (24.4, 48, 65.4)
He	24.5 (54.2)	N	14.5 (29.5, 47, 73, 97)
Li	5.4 (75.3, 122)	O	13.5 (35, 55, 77)