



普通高等教育材料成型及控制工程  
系列规划教材

# 弧焊电源及控制

胡绳荪 杨立军 编



化学工业出版社



普通高等教育材料成型及控制工程  
系列规划教材

# 弧焊电源及控制

胡绳荪 杨立军 编



化学工业出版社

·北京·

本书系统阐述了焊接电弧的电气特性和焊接工艺对弧焊电源的要求,弧焊电源的基本电气特性,电子控制弧焊电源的基础知识,弧焊变压器、晶闸管式弧焊整流器、弧焊逆变器的基本原理、结构、性能特点及其应用,弧焊电源的数字控制技术,以及弧焊电源的选择、安装和安全使用等。全书注重有关电源的基础理论与弧焊电源特点的分析和讲述,注重理论与实践的结合,注重思路与能力的培养,是一本紧跟弧焊电源科技发展与工程实际应用的教材。

本书是普通高等教育材料成型及控制工程专业(焊接方向)、焊接专业主干课程的教材,亦可作为材料加工工程专业硕士研究生相关课程的参考教材,对于从事焊接加工的工程技术人员也具有一定的参考价值。

### 图书在版编目(CIP)数据

弧焊电源及控制/胡绳荪,杨立军编.—北京:化学工业出版社,2010.7  
ISBN 978-7-122-08717-1

I. 弧… II. ①胡…②杨… III. 电弧焊-电源  
IV. TG434.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第102319号

---

责任编辑:彭喜英  
责任校对:王素芹

文字编辑:高震  
装帧设计:周遥

---

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)  
印 装:化学工业出版社印刷厂  
787mm×1092mm 1/16 印张12½ 字数302千字 2010年8月北京第1版第1次印刷

---

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址:<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

---

定 价:25.00元

版权所有 违者必究

# 普通高等教育材料成型及控制工程系列规划教材 编审委员会

主 任 李春峰

委 员 (按姓氏笔画排序)

王文先	王东坡	王成文	王志华	王惜宝	韦红余
龙文元	卢百平	田文彤	毕大森	刘 峰	刘雪梅
刘翠荣	齐芳娟	池成忠	许春香	杨立军	李 日
李云涛	李志勇	李金富	李春峰	李海鹏	吴志生
沈洪雷	张金山	张学宾	张柯柯	张彦敏	陈茂爱
陈翠欣	林小婷	孟庆森	胡绳荪	秦国梁	高 军
郭俊卿	黄卫东	焦永树			

## 序

材料成型及控制工程专业是1998年国家教育部进行专业调整时，在原铸造专业、焊接专业、锻压专业及热处理专业基础上新设立的一个专业，其目的是为了改变原来老专业口径过窄、适应性不强的状况。新专业强调“厚基础、宽专业”，以拓宽专业面，加强学科基础，培养出适合经济快速发展需要的人才。

但是由于各院校原有的专业基础、专业定位、培养目标不同，也导致在人才培养模式上存在较大差异。例如，一些研究型大学担负着精英教育的责任，以培养科学研究型和科学研究与工程技术复合型人才为主，学生毕业以后大部分攻读研究生，继续深造，因此大多是以通识教育为主。而大多数教学研究型和教学型大学担负着大众化教育的责任，以培养工程技术型、应用复合型人才为主，学生毕业以后大部分走向工作岗位，因此大多数是进行通识与专业并重的教育。而且目前我国社会和工厂企业的专业人才培养体系没有完全建立起来；从人才市场来看，许多工厂企业仍按照行业特征来招聘人才。如果学生在校期间的专业课学得少，而毕业后又不能接受继续教育，就很难承担用人单位的工作。因此许多学校在拓宽了专业面的同时也设置了专业方向。

针对上述情况，教育部高等学校材料成型及控制工程专业教学指导分委员会于2008年制定了《材料成型及控制工程专业分类指导性培养计划》，共分四个大类。其中第三类为按照材料成型及控制工程专业分专业方向的培养计划，按这种人才培养模式培养学生的学校占被调查学校的大多数。其目标是培养掌握材料成形及控制工程领域的基础理论和专业基础知识，具备解决材料成形及控制工程问题的实践能力和一定的科学研究能力，具有创新精神，能在铸造、焊接、模具或塑性成形领域从事设计、制造、技术开发、科学研究和管理等工作，综合素质高的应用型高级工程技术人才。其突出特色是设置专业方向，强化专业基础，具有较鲜明的行业特色。

由化学工业出版社组织编写和出版的这套“材料成型及控制工程系列规划教材”，针对第三类培养方案，按照焊接、铸造、塑性成形、模具四个方向来组织教材内容和编写方向。教材内容与与时俱进，在传统知识的基础上，注重新知识、新理论、新技术、新工艺、新成果的补充。根据教学内容、学时、教学大纲的要求，突出重点、难点，力争在教材中体现工程实践思想。体现建设“立体化”精品教材的宗旨，提倡为主干课程配套电子教案、学习指导、习题解答的指导。

希望本套教材的出版能够为培养理论基础和专业扎实、工程实践能力和创新能力强、综合素质高的材料成形及加工的专业性人才提供重要的教学支持。

教育部高等学校材料成型及控制工程专业教学指导分委员会主任

李春峰

2010年4月

# 前 言

《弧焊电源及控制》是高等院校材料成型及控制工程专业焊接方向的主要课程之一。随着电子技术、控制技术、计算机技术的发展，新型弧焊电源及控制技术也得到相应的发展，为了满足学生学习的要求，编写了本教材。

本书系统介绍了有关焊接电弧的电特性和弧焊工艺对弧焊电源的要求，弧焊电源的基本特性，弧焊变压器、弧焊整流器、弧焊逆变器、数字控制弧焊电源的基本原理、结构、性能特点及其应用，简单介绍了弧焊电源的选择、安装和使用等知识。

本书重点介绍了弧焊电源的基本电气特性以及各种弧焊电源获得基本电气特性的方法。在弧焊变压器（第3章）中，首先介绍了普通变压器理论，并在此基础上介绍了弧焊变压器的特点和工作原理；在电子控制型弧焊电源介绍中，首先是将电子控制型弧焊电源中一些共性的问题抽取出来，编写了第4章电子控制型弧焊电源基础；并在此基础上重点介绍了晶闸管式弧焊整流器（第5章）和逆变弧焊电源（第6章）；第7章重点介绍了有关弧焊电源的数字控制技术。

本书共分8章，其中第1、2、4、5、7、8章由天津大学的胡绳荪教授编写；第3、6章由天津大学的杨立军副教授编写；胡绳荪教授负责全书的统稿工作。天津理工大学的韦福水教授认真审阅了本书的全稿，提出了许多宝贵意见，作者在此表示衷心的感谢。

本书可以作为“材料成型及控制工程”、“焊接”等本科专业的教材，又可以作为“材料加工工程”专业硕士研究生相关课程的参考教材。

由于编者的水平有限，本书恐有错误和不当之处，敬请读者批评指正。

编 者  
2010年5月

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1	3.1.3 铁芯磁性材料的磁性能 .....	40
1.1 弧焊电源概述 .....	1	3.2 变压器的结构与基本原理 .....	42
1.2 弧焊电源的分类、特点与应用 .....	1	3.2.1 变压器的基本结构与基本参数 .....	42
1.2.1 机械调节型弧焊电源 .....	2	3.2.2 变压器的工作原理 .....	43
1.2.2 电磁控制型弧焊电源 .....	3	3.2.3 变压器的外特性 .....	50
1.2.3 电子控制式弧焊电源 .....	3	3.3 弧焊变压器的特性及其分类 .....	50
1.2.4 脉冲弧焊电源 .....	5	3.3.1 弧焊变压器的外特性 .....	51
1.3 弧焊电源的发展 .....	5	3.3.2 弧焊变压器的调节特性 .....	53
复习思考题 .....	6	3.3.3 弧焊变压器的分类 .....	53
<b>第 2 章 弧焊电源的基本电气特性</b> .....	7	3.3.4 弧焊变压器的损耗与效率 .....	54
2.1 焊接电弧 .....	7	3.4 串联电抗器式弧焊变压器 .....	55
2.1.1 焊接电弧的物理本质 .....	7	3.4.1 电抗器 .....	55
2.1.2 焊接电弧的结构 .....	11	3.4.2 分体式弧焊变压器 .....	57
2.1.3 焊接电弧的电特性 .....	12	3.4.3 同体式弧焊变压器 .....	58
2.1.4 焊接电弧的负载特点 .....	15	3.5 增强漏磁式弧焊变压器 .....	58
2.2 弧焊电源的基本要求 .....	19	3.5.1 动铁芯式弧焊变压器 .....	58
2.2.1 电源的基本电气特性 .....	19	3.5.2 动绕组式弧焊变压器 .....	61
2.2.2 弧焊工艺对弧焊电源的基本 要求 .....	19	3.5.3 抽头式弧焊变压器 .....	64
2.2.3 弧焊电源中的相关电源技术 .....	20	复习思考题 .....	66
2.3 弧焊电源的外特性 .....	20	<b>第 4 章 电子控制型弧焊电源基础</b> .....	67
2.3.1 电源外特性的基本概念 .....	20	4.1 电力半导体器件 .....	67
2.3.2 “电源-电弧”系统的稳定性 .....	22	4.1.1 晶闸管 .....	67
2.3.3 电源外特性曲线的选择 .....	23	4.1.2 功率晶体管 .....	70
2.4 弧焊电源的调节特性 .....	29	4.1.3 场效应晶体管 .....	72
2.4.1 弧焊电源调节特性的概念 .....	29	4.1.4 绝缘栅双极型晶体管 .....	74
2.4.2 弧焊电源的输出参数及调节 范围 .....	30	4.2 电子控制型弧焊电源的基本工作 原理 .....	77
2.4.3 弧焊电源的负载持续率与额 定值 .....	31	4.3 电子控制型弧焊电源的外特性 控制 .....	78
2.5 弧焊电源的动态特性 .....	32	4.3.1 外特性控制的基本原理 .....	79
2.5.1 弧焊电源动特性的基本概念 .....	32	4.3.2 电源外特性控制的应用 .....	81
2.5.2 电弧动态变化的特点及其对弧焊电源 动特性的要求 .....	33	4.3.3 电流、电压信号的检测 .....	84
2.5.3 弧焊电源动特性标准和评价 方法 .....	35	4.4 电子控制弧焊电源的调节特性控制 .....	87
复习思考题 .....	36	4.4.1 电子控制型弧焊电源中的稳压 电源 .....	88
<b>第 3 章 弧焊变压器</b> .....	37	4.4.2 脉冲弧焊电源的矩形波脉冲发 生器 .....	90
3.1 变压器基础知识 .....	37	4.5 电子控制弧焊电源的动态特性 控制 .....	91
3.1.1 电与磁的常用量与基本定律 .....	37	4.5.1 电子电抗器控制 .....	92
3.1.2 磁路及其计算 .....	39	4.5.2 波形控制原理 .....	92



复习思考题 .....	95	6.5.4 动特性控制 .....	146
<b>第5章 晶闸管式弧焊整流器</b> .....	96	6.6 IGBT 逆变式弧焊电源实例 .....	147
5.1 概述 .....	96	6.6.1 主电路 .....	147
5.2 三相可控整流电路 .....	97	6.6.2 控制电路 .....	148
5.2.1 三相半控桥式整流电路 .....	97	6.6.3 其他电路 .....	150
5.2.2 三相全控桥式整流电路 .....	101	6.7 软开关 IGBT 逆变式弧焊电源 (简介) .....	150
5.2.3 六相半波可控整流电路 .....	104	6.8 逆变式交流方波弧焊电源 (简介) .....	153
5.2.4 带平衡电抗器双反星形可控整流 电路 .....	105	复习思考题 .....	154
5.3 晶闸管移相触发电路 .....	110	<b>第7章 数字化弧焊电源</b> .....	155
5.3.1 对触发电路的要求 .....	110	7.1 数字化弧焊电源的概念和特点 .....	155
5.3.2 晶闸管触发脉冲移相控制 电路 .....	112	7.1.1 数字化弧焊电源的概念 .....	155
5.4 ZX5 系列晶闸管式弧焊整流器 .....	117	7.1.2 数字化弧焊电源的基本结构 .....	156
5.4.1 概述 .....	117	7.1.3 数字化弧焊电源的特点 .....	156
5.4.2 主电路 .....	118	7.2 DSP 控制系统 .....	157
5.4.3 晶闸管触发脉冲移相控制 电路 .....	118	7.2.1 DSP 的基础知识 .....	157
5.4.4 信号控制电路 .....	122	7.2.2 DSP 工作原理及最小硬件系统 .....	159
5.4.5 稳压电源电路 .....	125	7.3 数字化弧焊电源的基本结构 .....	162
复习思考题 .....	125	7.3.1 电源系统的总体结构 .....	162
<b>第6章 逆变式弧焊电源</b> .....	126	7.3.2 数字控制系统的基本结构与 功能 .....	164
6.1 概述 .....	126	7.4 弧焊电源的数字控制 .....	166
6.1.1 逆变式弧焊电源的基本结构与 分类 .....	126	7.4.1 PWM 信号的数字控制 .....	166
6.1.2 逆变式弧焊电源的逆变形式 .....	127	7.4.2 电源特性的数字控制 .....	170
6.1.3 逆变式弧焊电源的分类 .....	127	7.4.3 人机交互系统 .....	172
6.1.4 逆变式弧焊电源的特点 .....	128	7.4.4 通信功能 .....	176
6.2 逆变电路 .....	129	复习思考题 .....	178
6.2.1 逆变电路的基本形式 .....	130	<b>第8章 弧焊电源的选择与使用</b> .....	180
6.2.2 各种逆变电路的特点与应用 .....	133	8.1 弧焊电源的选择 .....	180
6.3 输入输出电路 .....	134	8.1.1 弧焊电源电流种类的选择 .....	180
6.3.1 输入整流滤波电路 .....	134	8.1.2 弧焊电源特性的选择 .....	180
6.3.2 输出整流滤波电路 .....	135	8.1.3 弧焊电源功率的选择 .....	183
6.4 时间比率控制及驱动电路 .....	136	8.1.4 根据工作条件和节能要求选择弧焊 电源 .....	184
6.4.1 时间比率控制 .....	136	8.2 弧焊电源的安装和使用 .....	185
6.4.2 PWM 控制器 .....	138	8.2.1 弧焊电源的安装 .....	185
6.4.3 驱动电路 .....	140	8.2.2 弧焊电源的使用 .....	186
6.5 逆变式弧焊电源的特性控制 .....	142	8.2.3 弧焊电源的安全使用 .....	187
6.5.1 电源的自然输出特性 .....	142	复习思考题 .....	188
6.5.2 外特性控制 .....	143	<b>参考文献</b> .....	189
6.5.3 调节特性控制 .....	145		



# 第 1 章 绪 论

焊接是指通过适当的手段，使分离的物体（同种材料或异种材料）产生原子或分子间结合而成为一体的连接方法。在金属连接中，往往采用加热或者加压，或者两者并用，并且用或者不用填充材料，使分离金属达到原子或分子间的结合，形成永固的连接。

焊接是现代制造技术中的一种基本加工方法，广泛应用于造船、机械、冶金、石油化工、海洋工程、航空、航天以及国防工业等领域。从几十万吨载重的巨轮到不足 1 克的微电子元件，在生产中都不同程度地依赖焊接。焊接已经渗透到加工制造业的各个领域，直接影响着产品的质量、可靠性和寿命以及生产的成本、效率和市场反应速度。

我国采用焊接加工的钢材总量早已突破了 1 亿吨，是世界上最大的焊接大国。由于焊接加工在国民经济建设中发挥着无可替代的重要作用，因此发展我国制造业，尤其是装备制造行业，必须高度重视焊接技术的同步提高。焊接技术的提高与焊接电源的发展是密切相关的。

## 1.1 弧焊电源概述

焊接有很多方法，电弧焊（arc welding）是目前应用最广泛的焊接方法。它是采用电极与工件之间的电弧作为热源来加热熔化工件进行焊接的。电弧焊主要包括焊条电弧焊（SMAW）、埋弧焊（SAW）、钨极氩弧焊（GTAW 或 TIG 焊接）、等离子弧焊（PAW）和熔化极气体保护电弧焊（GMAW 或者 MIG 焊接、MAG 焊接）等。

不同的电弧焊方法需要相应的电弧焊机。例如，焊条电弧焊，需要由弧焊电源和焊钳组成的电弧焊机；熔化极气体保护电弧焊需要由弧焊电源、焊接小车（自动焊用）、送丝机构、焊枪、气路和冷却水路系统等组成的电弧焊机。

弧焊电源是电弧焊机中的核心部分，是供给焊接电弧电能（提供电流和电压），并具有适宜于电弧焊工艺电气特性的设备。

性能良好、工作稳定的弧焊电源是保证电弧稳定燃烧和焊接过程顺利进行，并得到良好焊接接头的必要条件之一。没有先进的弧焊电源，要实现先进的弧焊工艺是不可能的。只有熟知弧焊电源的基本理论、结构特点和电气特性，才能真正了解和正确使用弧焊电源；只有对弧焊电源及其控制技术进行深入研究，才能创造出新型的弧焊电源。

本课程将系统讲述弧焊电源的基本理论、结构特点和电气特性，而对于电焊机的其他设备，将在有关课程中进行讲述。

本章主要介绍弧焊电源的基本概念、弧焊电源的分类以及各种弧焊电源的主要特点。

## 1.2 弧焊电源的分类、特点与应用

弧焊电源的分类方法很多，不同的分类方法用途不同。按电源输出电流的种类分类，可分为直流弧焊电源、交流弧焊电源和脉冲弧焊电源；按电源内部的关键器件分类，分为交流弧焊变压器、直流弧焊发电机、弧焊整流器和弧焊逆变器等；按弧焊电源的输出特性分类，

分为平特性（恒压特性）电源、缓降特性电源、垂直陡降特性（恒流）电源以及多特性电源等；按不同弧焊方法应用的弧焊电源分类，又可以分为焊条电弧焊电源、埋弧焊电源、等离子弧焊电源、氩弧焊电源、CO<sub>2</sub> 焊接电源等。

目前应用较多的是按电源外特性控制机构分类的基础上，再根据电源电路及主要控制方式进行分类，图 1-1 表示了弧焊电源分类的结果。

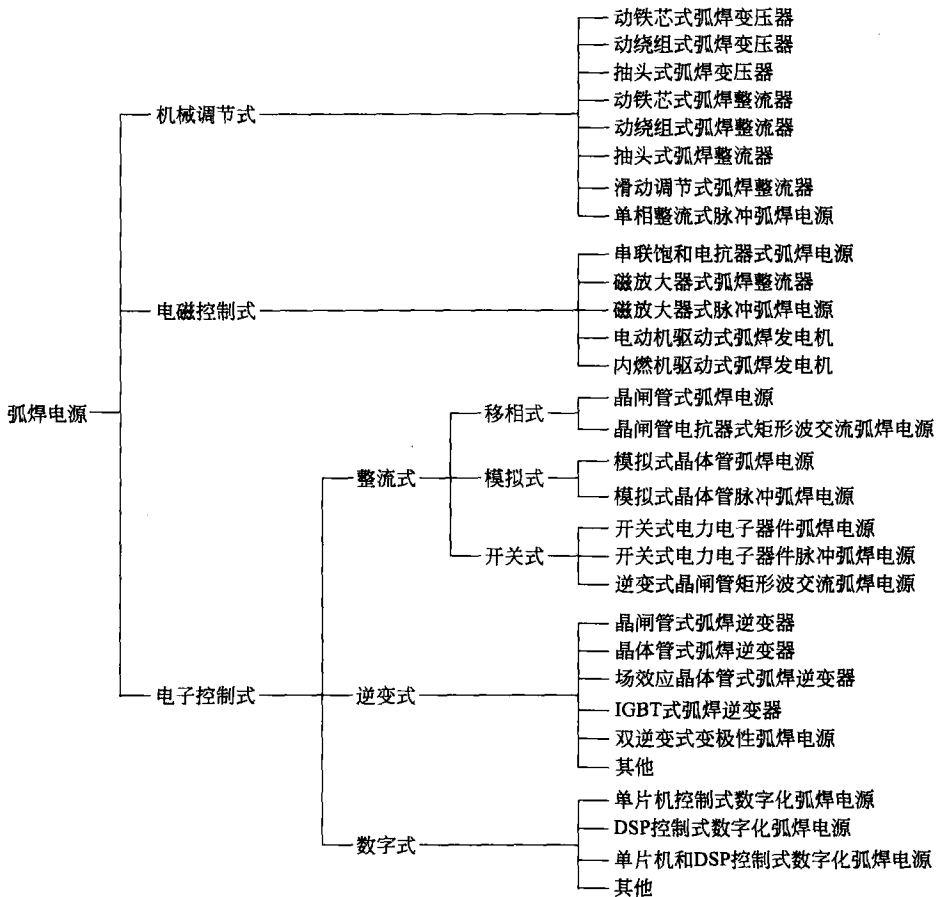


图 1-1 弧焊电源的分类

### 1.2.1 机械调节型弧焊电源

机械调节型弧焊电源是借助于机械装置实施特性调节的弧焊电源。该类弧焊电源的主要电气特性是由电源结构所决定的，其输出的大小也是通过机械装置实施调节的。

目前采用的机械调节型弧焊电源主要是弧焊变压器，以及在弧焊变压器基础上发展的弧焊整流器。

根据机械装置结构形式的不同，弧焊变压器又分为动绕组式弧焊变压器、动铁芯式弧焊变压器（动铁芯式弧焊变压器）、抽头式弧焊变压器。

弧焊变压器将网路电压的交流电变成适宜于弧焊的低压交流电，用于交流电弧焊。

弧焊变压器基础上的弧焊整流器是在一般弧焊变压器的输出端增加一套二极管整流装置，变交流电输出为直流电输出，从而用于直流电弧焊。相应的弧焊整流器为动绕组式弧焊

整流器、动铁芯式弧焊整流器、抽头式弧焊整流器以及滑动调节式弧焊整流器等。

该类电源具有结构简单、易造易修、成本低、适应性强等优点。但是该类电源的输出参数调节不灵活、不精细，焊接电流脉动较大，电弧稳定性较差，功率因数低，一般用于焊接质量要求不高的金属结构焊条电弧焊、埋弧焊以及钨极氩弧焊等弧焊工艺。

### 1.2.2 电磁控制型弧焊电源

电磁控制型弧焊电源一般是通过调节弧焊电源内部电磁器件的电磁状态来调节电源的特性。例如通过调节激励电流来改变饱和电抗器或直流发电机铁芯的磁饱和程度，从而控制弧焊电源的特性。该类电源一般输出的是直流电，因此主要用于直流电弧焊。

电磁控制型弧焊电源主要指磁放大式弧焊整流器和直流弧焊发电机。

① 磁放大器式弧焊整流器主要由普通的降压变压器、磁放大器、硅整流器以及直流输出电抗器组成。电源的输出电气特性与磁放大器的磁状态密切相关，它是通过控制一个较小的直流电流来改变磁放大器中铁芯的饱和程度，从而获得所需的电源外特性与输出电参数。该类电源体积大而笨重，耗材多，电磁惯性较大，电源动态特性差，一般用于直流的焊条电弧焊和钨极氩弧焊；当电源为平特性时，可以用于熔化极气体保护焊。

② 直流弧焊发电机多数由电动机和特殊的直流发电机以及获得所需外特性的调节装置等组成。该电源坚固耐用，过载能力强、输出电流稳定，脉动小，可用于各种弧焊。但是它的效率低、电能和材料消耗大，噪声大、制造复杂、空载损耗大。

由于电磁控制型弧焊电源是耗材、耗能产品，因此属于淘汰产品。只有采用柴油机或汽油机代替电动机的直流弧焊发电机在野外施工场合还具有一定的应用价值。

### 1.2.3 电子控制式弧焊电源

电子控制式弧焊电源又称为电子弧焊电源。其特点是借助电子线路来实现弧焊电源各种特性的控制，还可以通过电子线路对焊接电流波形等进行控制。

该类电源具有以下特点：

- ① 可以对弧焊电源的外特性进行任意控制，从而满足各种焊接方法、焊接工艺的要求；
- ② 可以输出直流、脉冲甚至交流电流，可调参数多；
- ③ 具有良好的动态特性，系统控制的响应速度快；
- ④ 可控性好，便于进行编程和计算机控制；
- ⑤ 电路比较复杂。

该类电源大多采用了变流技术，根据采用的关键变流技术可以分为整流式弧焊电源和逆变式弧焊电源。由于数字控制技术的飞速发展，将数字控制技术应用于弧焊电源又产生出数字化弧焊电源。因此，本书将电子控制型弧焊电源分为整流式、逆变式和数字式三种。

#### 1.2.3.1 整流式弧焊电源

整流式弧焊电源是把交流电经降压整流以获得直流电的设备。该类弧焊电源有采用可控整流器件的，也有采用一般二极管整流后再利用功率半导体器件调整输出电流或电压的。根据弧焊电源中核心半导体器件的工作原理不同，整流式弧焊电源又可以分为移相式、模拟式和开关式三种。

(1) 移相式弧焊电源采用大功率晶闸管器作为整流器件，采用晶闸管的移相控制。此类弧焊电源包括晶闸管式弧焊整流器（包括晶闸管式脉冲弧焊电源）、晶闸管电抗器式矩形波

交流弧焊电源等。

(2) 模拟式弧焊电源是在二极管整流的基础上，采用了功率晶体管作为电源输出电流或电压的调节器件，功率晶体管工作在模拟状态。

(3) 开关式弧焊电源是在二极管整流的基础上，作为电源输出电流或电压调节器件的功率半导体器件（例如功率晶体管）工作在开关状态。

与电磁控制型弧焊电源比较，整流式电子控制型弧焊电源具有制造方便、价格低、耗材少、节约电能、电磁惯性小、电源动态特性好、可控性强、噪声小等优点，可作为各种电弧焊的电源。

### 1.2.3.2 逆变式弧焊电源

采用了逆变变流技术的弧焊电源称为逆变式弧焊电源。根据逆变器中采用的功率开关半导体器件不同，又可细分为晶闸管式逆变弧焊电源、晶体管式逆变弧焊电源、场效应晶体管式逆变弧焊电源、IGBT 式逆变弧焊电源等。另外，还包括采用双逆变技术的交流逆变弧焊电源、变极性弧焊电源。

随着新型功率开关半导体器件的发展及其在逆变弧焊电源中的应用，各种新型逆变电源也会不断出现。

逆变弧焊电源是把单相（或三相）交流电经整流后，由逆变器转变为几百至几万赫兹的中频交流电，再经中频变压器降压后输出交流或直流电。它具有高效节能、体积小、重量轻、功率因数高、可控性能好、动态响应快、利于焊接电流波形控制等优点，可作为各种电弧焊的电源。

### 1.2.3.3 数字式弧焊电源

采用数字控制技术的弧焊电源可以称为数字式弧焊电源。数字控制技术目前主要用于逆变弧焊电源或者整流式弧焊电源。在弧焊电源数字控制中，把电压、电流等模拟量变成数字量，模拟电路控制系统变为数字信号处理系统。根据目前采用的数字处理系统，可以分为单片机控制式数字化弧焊电源、DSP 控制式数字化弧焊电源、单片机和 DSP 双机控制的数字化弧焊电源、双 DSP 控制的数字化弧焊电源等。

随着数字技术的发展，将会出现各种新的数字化处理器，相应的新型数字化弧焊电源也将得到发展。

采用数字控制的弧焊电源具有下述特点。

① 柔性化控制和多功能的集成。系统的各种控制是通过软件的方式加以实现（以软代硬），系统的控制是柔性的，而且通过软件可以实现焊机的多种功能，即多功能集成。

② 控制精度高。数字系统的控制精度与系统的位数有关，同样条件下，系统的位数越高，系统的控制精度越高。

③ 稳定性好。数字控制系统受环境温度以及噪声的影响较小，可靠性高。

④ 产品的一致性。模拟系统的性能受元器件参数性能变化的影响比较大，而数字系统基本不受影响，因此数字系统便于测试和调试，易于大规模生产。

⑤ 弧焊电源的功能升级方便。采用数字控制系统，通过修改软件可使焊机功能得到升级。

可见，数字控制弧焊电源性能更高，适用能力更强，可以用于各种电弧焊方法，但是其价格较贵，主要用于焊接质量要求较高的工程结构焊接。

#### 1.2.4 脉冲弧焊电源

脉冲弧焊电源以低频（或高频）脉冲方式输出电流或电压，即输出的焊接电流或焊接电压呈周期性变化。脉冲弧焊具有输入线能量小、线能量调节范围宽、焊接熔滴过渡可控等优点，主要用于气体保护电弧焊、等离子弧焊、埋弧焊等，对于焊接热敏感性大的合金材料、对线能量要求严格的结构以及薄板和全位置焊接具有独特的优势。各种脉冲弧焊电源引领着脉冲电弧焊工艺进入了一个新的发展期，其应用越来越广泛。

### 1.3 弧焊电源的发展

19 世纪初俄国科学家发现了电弧放电现象。1885 年别那尔道斯发明碳极电弧可看做是电弧作为热源应用的创始，从此开始了焊接技术发展的新纪元。而电弧真正用于工业则是在 1892 年发明金属极电弧后，特别是 1930 年前后出现了药皮焊条，金属极电弧焊得到了发展，电弧焊真正大量用于了工业。20 世纪 40 年代焊接技术的发展迈入了一个新时期，首先是埋弧焊的问世；随着航空、原子能等技术的发展，为了满足铝、镁及其合金等新型材料的焊接，出现了氩弧焊；20 世纪 50 年代又相继出现 CO<sub>2</sub> 等各种气体保护焊，紧接着研究成功了高能量密度的等离子弧焊等。

随着电弧焊接技术的发展，弧焊电源也相应得到发展。最初用于电弧焊的弧焊电源是直流弧焊发电机，到 20 世纪 20 年代，除直流弧焊发电机外，已开始采用构造简单、成本低廉的交流弧焊变压器；20 世纪 40 年代开始出现了用硒片制成的弧焊整流器；到了 20 世纪 60 年代，由于大容量硅整流器件、晶闸管的问世，为发展硅弧焊整流器、晶闸管式弧焊整流器等提供了条件；到 20 世纪 70、80 年代，弧焊电源的发展更是出现了飞跃：多种形式的弧焊整流器相继出现和完善，各种形式的脉冲弧焊电源相继研制成功。自 1972 年第一台晶闸管逆变弧焊电源在美国研制成功后，各种高效节能，性能良好的晶闸管式、晶体管式、场效应管式、绝缘栅双极型晶体管（IGBT）式的弧焊逆变电源相继研究成功，特别是到了 20 世纪 90 年代，功率半导体器件取得突破性进展，逆变弧焊电源的工业化进程也随之发生跃变。目前，逆变弧焊电源已经成为主要的弧焊电源产品之一。在美国，逆变弧焊电源的产量占弧焊电源总产量的比例已超过 30%，而日本已超过 50%。

20 世纪 90 年代初期 Fronius 公司的 Lahnsteiner. Robert 指出，现代气体保护电弧焊（GMAW）电源应满足多方面的不同需求，如适合于短路过渡焊接、脉冲焊接、射流过渡焊接和高熔敷率焊接等；大量焊接参数的设计必须实现 Synergic 控制（一元化控制）以使焊接电源便于操作；为满足新的质量控制要求，焊接电源必须实时记录焊接参数、识别偏差量。基于上述思想，伴随着新型的功能强大的数字信号处理器 DSP 的出现，Fronius 公司在 1994 年推出了全数字化焊接电源，随后世界各大焊接电源生产企业也推出了各自的数字化焊接电源产品，由此，弧焊电源开始进入了又一个新的发展时期。

弧焊电源从诞生到目前已有 100 多年的历史，它总是随着科技的进步而发展。20 世纪 70 年代以来，弧焊电源的发展可以说是日新月异，其发展可以概括以下几个方面。

(1) 多种电子控制型的弧焊电源相继出现和完善，目前已经基本取代了电磁控制型弧焊电源。许多经济发达国家，除在野外作业仍采用柴（汽）油内燃机驱动的弧焊发电机之外，基本上都选用电子控制型弧焊电源。

(2) 各种脉冲弧焊电源的应用, 进一步提高了焊接质量, 促进了全位置焊接的自动化。

(3) 各种高效、节能、轻便、焊机性能良好的逆变弧焊电源得到了飞速发展, 逐渐成为主导产品之一。

(4) 各种矩形波交流弧焊电源和变极性弧焊电源的出现, 逐步代替了传统的弧焊变压器, 进一步提高了交流电弧的稳定性, 扩大了交流弧焊电源的应用范围。

(5) 应用了现代的控制理论和技术, 例如模糊理论控制技术、数字控制技术、变结构控制技术、复合控制技术等, 实现了任意外特性的控制与切换、动态特性控制、熔滴过渡波形控制、焊接参数程序控制、焊接参数一元化控制、模糊控制、焊接专家系统控制等。

(6) 微机控制技术在弧焊电源中得到了广泛的应用, 弧焊电源具有记忆、存储、预置以及焊接过程中焊接参数自动变换等功能, 计算机网络技术使弧焊电源可以实现远程监控、性能升级等。

社会的进步, 经济建设的发展对制造加工技术不断提出新的要求, 计算机视觉、人工智能、机器人等先进技术的飞速发展促使制造业技术的进步与变革。对于焊接加工, 如何提高焊接生产的效率、保证焊接接头质量成为现代焊接加工的关键。而人工智能技术、计算机视觉技术、数字化信息处理技术、机器人技术等现代高新技术的引入, 也促使弧焊技术向着焊接工艺高效化、焊接电源数字化、焊接质量控制智能化、焊接生产过程柔性化等方向发展。今后的弧焊电源将进一步向着轻量化、模块化、集成化、柔性化、智能化、网络化、节能、环保等方向发展, 而且随着人们能源意识、环保意识的加强, 节能环保型的绿色弧焊电源必将成为未来弧焊电源发展的重要方向之一。

### 复习思考题

1. 什么是弧焊电源? 什么是电弧焊机? 二者的区别是什么?
2. 弧焊电源在焊接过程中的作用是什么?
3. 机械调节型弧焊电源的特点是什么? 其代表性弧焊电源有哪些?
4. 电磁控制型弧焊电源的特点是什么? 其代表性弧焊电源有哪些?
5. 电子控制型弧焊电源的特点是什么? 其代表性弧焊电源有哪些?
6. 比较机械调节型弧焊电源、电磁控制型弧焊电源、电子控制型弧焊电源的特点, 说明其相同点、不同点以及电源的发展历程。
7. 脉冲弧焊电源的特点是什么? 脉冲弧焊电源主要可调参数有哪些?
8. 脉冲弧焊电源中脉冲参数的调节对焊接过程有什么影响?
9. 现代电子控制型弧焊电源中应用了哪些控制技术?
10. 今后弧焊电源的发展趋势是什么?

# 第 2 章 弧焊电源的基本电气特性

弧焊电源是向焊接电弧提供电能的一种装置，是电弧焊机的核心。弧焊电源的电气特性对焊接质量有重要的影响，没有高性能的弧焊电源就不可能有高质量的焊接接头。

弧焊电源的负载是电弧。电弧与一般电阻等负载不同，具有鲜明的特点。因此，弧焊电源的电气特性不仅要满足电源的一般要求，而且还必须满足电弧负载及各种弧焊工艺的特殊要求。

本章首先介绍焊接电弧的物理本质及其电特性，以及常用弧焊方法中电弧的基本特点，并在此基础上重点介绍弧焊电源的基础知识、弧焊电源的基本电气特性。

## 2.1 焊接电弧

焊接电弧是在一定电压的两电极间或电极与焊接工件间的气体介质中产生的强烈而持久的放电现象，如图 2-1 所示。两电极间的电压以及电弧消耗能量的补充依赖于弧焊电源。

### 2.1.1 焊接电弧的物理本质

#### 2.1.1.1 气体放电的概念

焊接电弧是一种气体放电现象。一般气体放电可以分为两大类：气体的非自持放电和自持放电。

(1) 气体的非自持放电是指在气体放电过程中，不能够产生足够的带电粒子使放电过程维持下去，而是要一直依靠外加措施（如加热、光照射等），才能维持气体放电。

(2) 气体的自持放电是指在气体放电过程中，能够产生足够多的带电粒子，使放电过程维持下去，这种放电只需要开始时通过外加措施产生放电所需要的带电粒子，一旦形成放电，即使取消外加措施，放电过程仍然可以维持下去。

在气体的自持放电中，由于放电机构、电流大小的不同，自持放电特性与形式也不同。气体的自持放电可以分为暗放电、辉光放电和电弧放电三种形式。放电形式与放电电流、电压之间的关系如图 2-2 所示。如图可见，与其他气体放电形式相比，低电压、大电流是焊接电弧的显著特点之一。

#### 2.1.1.2 焊接电弧的物理机制

一般的气体是由中性分子或原子组成，不含带电粒子，因此是不导电的。要使两电极间的气体导电，必须要使气体中产生足够多的带电粒子，并在电场作用下产生带电粒子的定向运动，从而形成一定的电流，也就形成了强烈持久的气体放电现象，即形成了焊接电弧。

气体的电离和阴极的电子发射是电弧中带电粒子产生的主要来源。

(1) 气体电离 在一定条件下，中性气体粒子（分子或原子）分离为正离子和电子的现象称为电离。

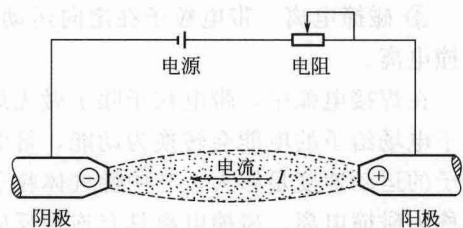


图 2-1 电弧放电示意图



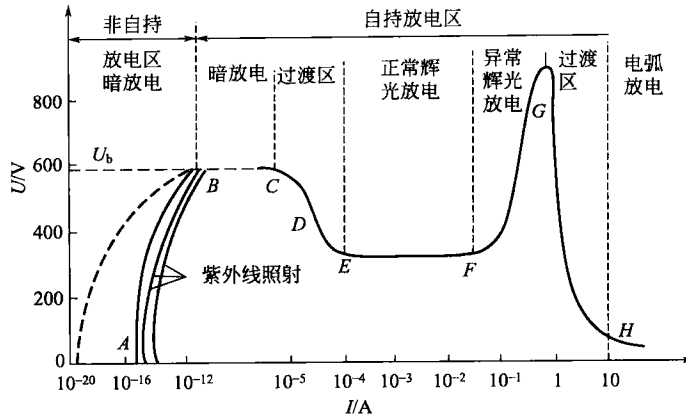


图 2-2 气体放电的伏安特性曲线

在焊接电弧中，气体电离主要有以下几种：

- ① 热电离。中性气体粒子受热的作用而产生的电离称热电离。
- ② 场致电离。中性气体粒子受电场作用而产生的电离称场致电离。
- ③ 光电离。中性气体粒子吸收了光射线的光子能而产生的电离称光电离。
- ④ 碰撞电离。带电粒子在定向运动过程中，与中性气体粒子发生碰撞而引起的电离称碰撞电离。

在焊接电弧中，带电粒子除了做无规则的热运动外，在电场作用下，还会做定向运动。由于电场给予的电场能会转换为动能，带电粒子在电场作用下的定向运动为加速运动。当带电粒子的运动速度足够大，与中性气体粒子发生非弹性碰撞而使之电离，这种因碰撞产生的电离称为碰撞电离。碰撞电离具有连锁反应的性质，会使带电粒子成倍增加。

在碰撞电离的同时，带异性电荷的质点也会发生碰撞，使正离子和电子复合成中性粒子，即产生复合现象，当电离速度和复合速度相等时，电离与复合就趋于相对稳定的动平衡状态。如果发生电子和中性粒子碰撞，还可能产生负离子，负离子对电弧的稳定性有不利影响。

(2) 电子发射 固体金属中的自由电子在外加能量的作用下，由金属表面逸出的现象称为电子发射。

在焊接电弧系统中，阴极和阳极表面都可能发生电子发射的现象，但是，只有从阴极发射出来的电子在电场作用下参与导电过程，而从阳极发射出来的电子因受电场的排斥，不可能参与导电过程。因此，阴极发射电子对产生和维持电弧稳定燃烧是非常重要的。

电极的电子发射需要一定的外加能量。使一个电子由金属电极表面逸出所需要的最低外加能量称为逸出功  $W_w$  (eV)。因为电子电量  $e$  是一个常数，通常亦以逸出电压  $U_w$  来表示逸出功的大小，其中， $W_w/e = U_w$  (V)。逸出功的大小与电极材料种类、表面状态和金属电极表面氧化物情况有关。

金属内部的电子，只有在接受外加能量作用后其能量超出逸出功时才能冲破金属表面而发射到外部空间。由于外加能量形式和电子发射的机制不同，焊接电弧中阴极发射电子主要有以下四种。

- ① 热发射。当阴极表面承受热作用而产生电子发射现象称为热发射。阴极金属内部的自由电子受热作用后其热运动速度增加，当其动能大于电子发射所需要的逸出功时，则飞出

阴极表面，进入电弧空间。

热发射在焊接电弧中起着重要作用，随着温度上升而增强。

② 电场发射。当阴极表面附近空间存在一定强度的正电场时，金属内的电子受到电场力（静电库仑力）作用达到一定数值时，电子会逸出金属表面，这种现象称电场发射。电场强度越强，则阴极的电子越容易逸出，阴极发射电子数量越多。

电场发射电子的密度不仅与电场强度有关，而且与电极温度及电极材料有关。

③ 光发射。当阴极表面接受光辐射时，也可使金属内的自由电子能量增加，从而冲破金属表面的束缚而逸出，这种现象称光发射。

④ 粒子碰撞发射。高速运动的粒子（电子或离子）碰撞电极表面时，将能量传给电极表面的电子，使其能量增加而逸出金属表面，这种现象称为粒子碰撞发射。

焊接电弧中阴极区前面有大量的正离子聚积，由于空间电荷的存在使阴极区形成一定强度的电场，正离子在此电场作用下被加速而冲向阴极，形成碰撞发射。在一定条件下，这种电子发射形式是电弧阴极区提供导电所需电子的主要途径。当带有一定运动速度的正离子到达阴极时，将其动能传递给阴极。它将首先从阴极取出一个电子与自己复合而成为中性粒子，如果这种碰撞还能使另一个电子飞出电极表面到电弧空间，就使电弧空间的电子数目增加。

(3) 其他物理过程 电弧导电是个复杂的过程，除了气体电离、阴极电子发射等物理过程外，同时还存在着扩散、复合和负离子产生等过程。

① 带电粒子的扩散过程是指电弧中带电粒子从密度高的地方向密度低的地方移动而趋于均匀化的过程。

② 负离子产生过程是指在一定条件下，某些中性原子或分子与电子结合形成负离子的过程。在电弧燃烧时，如果大量的电子与中性粒子结合形成负离子，会引起电弧导电困难，从而使电弧稳定性下降。

③ 带电粒子的复合过程是指电弧空间的正负带电粒子（正离子、负离子和电子），在一定条件下结合形成中性粒子的过程。

综上所述，焊接电弧是气体放电的一种形式。由于中性气体是不能导电的，为了使气体导电并产生电弧，就必须使气体中产生足够的带电粒子；而且为了维持电弧稳定燃烧，要求电弧的阴极不断发射电子，电弧中气体不断电离，这就必须不断地输送电能给电弧，以补充其能量的消耗。

焊接电弧的形成和维持是在电场、热、光和质点动能的共同作用下，气体分子、原子不断地被激发、电离以及阴极电子发射的结果，同时伴随着一些其他过程，如扩散、复合、负离子的产生等。

### 2.1.1.3 焊接电弧的引燃

焊接电弧的引燃过程是短暂的，就其内在物理过程而论，它又是异常激烈和复杂的，其间经历着带电粒子的产生、扩散、复合、负离子形成等一系列变化。作为变化之本的能量传送与转化贯穿着整个过程。从外部形态及表征进行观察，随着电极端部与工件（为另一极）之间距离的微小变化，相应发生着温度的骤然升高、强光的突然辐射、电参数的跳跃式变化以及声和力的强弱变化等。弄清电弧的引燃过程不仅可以深入理解电弧的物理本质，而且可以明确引弧过程对于电源特性的要求。

焊接电弧的引燃（引弧），一般有两种方式：接触引弧和非接触引弧。熔化极焊接电弧