

普通高等教育“十三五”重点规划教材

# 弧焊电源 及其数字化控制

第2版

华南理工大学 黄石生 © 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十三五”重点规划教

# 弧焊电源及其数字化控制

第2版

主编 黄石生  
参编 薛家祥 常云龙 朱锦洪  
陆沛涛 李 阳  
主审 吴毅雄



机械工业出版社

本书以电弧物理和电弧焊工艺对弧焊电源的电气性能要求为依据,围绕空载电压、外特性形成、调节性能和动特性四个基本问题,讲述了各类弧焊电源的原理、特点、结构、性能及应用。

为了更好地适应本学科的发展和不断满足新的教学需求,对本书进行了修订。书中较大幅度地压缩了应用愈来愈少的传统直流弧焊发电机、硅弧焊整流器等内容,适当减少了晶闸管弧焊整流器的内容,增加了节能省材、性能优良的弧焊逆变器和碳化硅类新型弧焊逆变器的原理、发展与前景,以及弧焊电源的数字化控制新技术、弧焊电源动态特性的数字描述、冷电弧焊电源技术、弧焊电源绿色保护用电等内容。

本书可作为高等院校材料成形及控制工程专业、焊接技术与工程专业的教材,也可供焊接技术人员学习参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

弧焊电源及其数字化控制/黄石生主编. —2 版. —北京:机械工业出版社, 2016. 12

普通高等教育“十三五”重点规划教材

ISBN 978-7-111-55372-4

I. ①弧… II. ①黄… III. ①电弧焊-电源-数字控制-高等学校-教材  
IV. ①TG434. 1-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 274881 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 王 荣 崔利平

责任校对:肖 琳 封面设计:路恩中

责任印制:李 洋

保定市市画美凯印刷有限公司印刷

2017 年 1 月第 2 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 19 印张 · 462 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-55372-4

定价:45.00 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:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

封面防伪标均为盗版

网络服务

机 工 官 网: [www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

机 工 官 博: [weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

教育服务网: [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

金 书 网: [www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

# 第2版前言

《弧焊电源及其数字化控制》第1版自2006年10月正式出版以来,受到国内众多高校师生的普遍欢迎。尽管使用情况良好,但也存在不足之处,而且在这近十年期间,弧焊电源技术不断在更新和发展,为了更好地适应本学科的发展和不断满足新的教学需求,对本书进行了修订。

本书在修订的过程中,在保持第1版主要特色、基本内容框架结构基本不变的基础上,对内容进行了适当的增加和精减,具体如下:

## 1. 基本思路和指导思想

(1) 本书能满足材料成形及控制工程专业、焊接技术与工程专业教学大纲的要求,对目前各校在专业设置上的较大差异有较强的适应性。

(2) 内容以反映成熟科学技术与产品为主,同时又把相对成熟的前沿技术成果做一原理、特点、应用前景的介绍,以开阔学生的眼界和思路。

(3) 理论教育紧密与生产实际(典型产品)、科学实验(较多学时实验课)相结合。

(4) 既可作为高校的专业教科书,又可作为科技参考书,以及工程技术人员培训和继续教育的教材。

## 2. 主要内容和特点

(1) 以电弧物理及电弧焊接工艺对弧焊电源的电气性能要求为依据,全书紧紧围绕空载电压、外特性的形成、调节性能和动态特性四个基本的、核心的问题,讲述各类弧焊电源的原理、特点、结构、性能及应用。

(2) 从电弧的电特性和弧焊工艺对弧焊电源电气性能的要求入手,按弧焊电源的发展和分类,从简单的机械控制类到电磁控制类,再到复杂的电子、微电子、智能控制类及其数字化控制技术原理,由浅入深,由易到难进行讲述。

(3) 通过本书的学习,使学生能够掌握各种常用弧焊电源及其控制技术的基本理论、基本知识和实验技能,并能根据不同弧焊工艺方法正确地选择、使用和维修弧焊电源。

## 3. 修订和新增主要内容

(1) 较大幅度地压缩了应用愈来愈少的传统直流弧焊发电机、硅弧焊整流器内容,适当减少了晶闸管弧焊整流器等内容,以及减少了应用较少的晶体管式弧焊逆变器介绍。

(2) 增加了节能省材、性能优良的弧焊逆变器新技术和碳化硅类新型弧焊逆变器的原理、发展与前景。

(3) 新增了弧焊电源的数字化控制新技术、弧焊电源动态特性的数字描述、冷电弧焊电源技术和弧焊电源绿色保护用电等新内容。

本书由华南理工大学黄石生、薛家祥、陆沛涛、李阳,沈阳工业大学常云龙,河南科技大学朱锦洪六位教授专家分工编写。黄石生编写和修订绪论和第1、2、6章及第5章的5.5

节。常云龙编写和修订第5章的5.1~5.4、5.6节。薛家祥编写和修订第7章的7.1~7.5、7.8节。朱锦洪编写和修订第4章。陆沛涛编写和修订第8章和附录。李阳编写和修订第3章及第7章的7.6、7.7节。全书由黄石生统稿并任主编。本书原主审兰州理工大学李鹤岐教授因疗养身体等原因，尊重李教授不再续任主审的意见，本次修订由上海交通大学吴毅雄教授任主审。本书在编写过程中，得到了机械工业出版社高等教育分社和有关院校师生的大力支持，在此谨致谢意。

鉴于作者的水平有限，书中难免会有不足之处，敬请读者批评指正。

编 者

# 第1版前言



根据教育部新颁布的新专业目录,全国大部分工科院校已将原热加工专业的铸造、焊接、锻压、热处理等四个专业合并为材料成形及控制工程大专业。2005年7月,机械工业出版社高等教育分社和机械口、教育部材料加工专业教学指导委员会在河北承德市召开年会,探讨了专业改造和教材建设的问题,并把《弧焊电源及其数字化控制》作为焊接专业方向的重点教材之一,列入“十一五”教材建设规划。

原高等院校的焊接专业骨干课程教材之一的《弧焊电源》,出版至今已有近20个年头,而在此期间,弧焊电源不仅本身有较大发展(如逆变式类型的突飞猛进的发展和全面推广应用),而且数字化控制技术也有日新月异的发展,并对弧焊电源的性能提高、产品档次的提升和实现多功能焊接工艺起了较大的作用。同时,为高等教育的发展和培养人才的需求,尚无质量较高、内容新的教科书,为此,有必要撰写和出版一本《弧焊电源及其数字化控制》教材。

## 1. 编写这本教材的基本思路和指导思想

(1) 这本书是高等工科类教育的一本新的教材,并能满足焊接专业或专业方向教学大纲的要求,对目前各校在专业与专业方向设置上的较大差异有较强的适应性。

(2) 内容以反映成熟科学技术与产品为主,同时又把相对成熟的前沿技术成果做一原理、特点、应用前景的介绍,以开阔学生的眼界和思路。

(3) 理论教育紧密与生产实际(典型产品)、科学实验(较多学时实验课)相结合。

(4) 既可作为高校的专业教科书,又可作为科技参考书,以及工程技术人员培训和继续教育的教材。

## 2. 主要内容和特点

(1) 以电弧焊接工艺对弧焊电源的电气性能要求为依据,全书紧紧围绕空载电压、外特性的形成、调节性能和动态特性四个基本的、核心的问题,讲述各类弧焊电源的原理、特点、结构、性能及应用。

(2) 从电弧的电特性和弧焊工艺对弧焊电源电气性能的要求入手,按弧焊电源的发展和分类,从简单的机械控制类到电磁控制类,再到复杂的电子、微电子、智能控制类及其数字化控制技术原理,由浅入深,由易到难进行讲述。

(3) 大幅度压缩被淘汰或使用愈来愈少的弧焊电源类型的内容,大幅度选用更新换代类型的内容,并以独立的章节专门介绍以数字化技术为主的弧焊电源控制技术。

(4) 通过本教材的学习,使学生能够掌握各种常用弧焊电源及其控制技术的基本理论、基本知识和实验技能,并能根据不同弧焊工艺方法正确地选择、使用和维修弧焊电源。

本书由华南理工大学黄石生、薛家祥、陆沛涛、李阳,沈阳工业大学常云龙,河南科技大学朱锦洪六位老师分工编写。黄石生编写绪论和第1、2、6章及第5章的5.5节。常云龙

编写第5章的5.1~5.4、5.6节。薛家祥编写第7章的7.1~7.5、7.7节。朱锦洪编写第4章。陆沛涛编写第8章和附录。李阳编写第3章及第7章的7.6节。全书由黄石生统稿并任主编。本书由兰州理工大学李鹤岐教授主审。在编写过程中,得到了机械工业出版社高等教育分社和有关院校师生的大力支持,在此谨致谢意。

鉴于作者的水平有限,书中难免会有不足之处,敬请读者批评指正。

编 者

# 目 录

## 第2版前言

## 第1版前言

## 绪论..... 1

- 0.1 弧焊电源的分类 ..... 1
- 0.2 各种弧焊电源的特点和应用 ..... 2
- 0.3 弧焊电源的由来及发展趋向 ..... 2
- 0.4 本课程的性质、任务、要求和  
分工 ..... 5

## 第1章 焊接电弧及其电特性..... 6

- 1.1 焊接电弧的物理本质和引燃 ..... 6
- 1.2 焊接电弧的结构和伏安特性 ..... 9
- 1.3 交流电弧 ..... 12
- 1.4 焊接电弧的分类及其特点 ..... 18
- 1.5 焊接电弧力及其种类和影响  
因素 ..... 22
- 思考题 ..... 24

## 第2章 弧焊电源的基本要求 ..... 25

- 2.1 弧焊电源的空载电压和外  
特性 ..... 25
- 2.2 弧焊电源的调节特性 ..... 35
- 2.3 弧焊电源的动特性 ..... 39
- 思考题 ..... 44

## 第3章 弧焊变压器 ..... 45

- 3.1 弧焊变压器的基本原理和  
分类 ..... 45
- 3.2 串联电抗器式弧焊变压器 ..... 52
- 3.3 动铁心式弧焊变压器 ..... 58
- 3.4 动线圈式弧焊变压器 ..... 62
- 3.5 抽头式弧焊变压器 ..... 65
- 思考题 ..... 67

## 第4章 直流弧焊发电机与硅弧焊 整流器 ..... 68

- 4.1 直流弧焊发电机的基本原理和  
分类 ..... 68
- 4.2 典型直流弧焊发电机 ..... 70
- 4.3 硅弧焊整流器的组成和分类 ..... 73
- 4.4 普通硅弧焊整流器 ..... 74
- 4.5 磁放大器式弧焊整流器 ..... 77
- 4.6 交直流两用及脉冲式硅弧焊  
整流器 ..... 88
- 思考题 ..... 92

## 第5章 晶闸管弧焊整流器 ..... 93

- 5.1 概述 ..... 93
- 5.2 晶闸管式弧焊整流器主电路 ..... 95
- 5.3 晶闸管移相触发电路 ..... 104
- 5.4 晶闸管式弧焊整流器外特性的  
控制方法 ..... 116
- 5.5 晶闸管式脉冲及矩形波交流  
弧焊电源 ..... 121
- 5.6 晶闸管式弧焊整流器典型产品  
简介 ..... 127
- 思考题 ..... 130

## 第6章 弧焊逆变器 ..... 131

- 6.1 弧焊逆变器概述 ..... 131
- 6.2 晶闸管式弧焊逆变器 ..... 142
- 6.3 晶体管式弧焊逆变器 ..... 151
- 6.4 场效应晶体管式弧焊逆变器 ..... 161
- 6.5 IGBT式弧焊逆变器 ..... 169
- 6.6 软开关型弧焊逆变器 ..... 185
- 6.7 SiC 功率器件与新一代 SiC 类  
弧焊逆变器 ..... 200
- 思考题 ..... 206

## 第7章 弧焊电源的数字化控制 ..... 207

- 7.1 弧焊电源控制系统概述 ..... 207

|                                |     |                              |     |
|--------------------------------|-----|------------------------------|-----|
| 7.2 弧焊电源数字化控制系统的<br>关键技术 ..... | 209 | 8.1 弧焊电源的选择 .....            | 269 |
| 7.3 弧焊电源的单片机控制 .....           | 224 | 8.2 弧焊电源的使用条件及相关<br>信息 ..... | 272 |
| 7.4 弧焊电源的全数字化控制 .....          | 244 | 8.3 安全和绿色环保用电 .....          | 277 |
| 7.5 弧焊电源的智能控制 .....            | 248 | 思考题 .....                    | 282 |
| 7.6 弧焊电源动态特性的数学<br>描述 .....    | 257 | <b>附录</b> .....              | 283 |
| 7.7 数字化控制弧焊电源产品<br>简介 .....    | 263 | 附录 A 电焊机型号编制方法 .....         | 283 |
| 7.8 本章小结 .....                 | 267 | 附录 B 常用弧焊电源的主要技术<br>数据 ..... | 286 |
| 思考题 .....                      | 268 | <b>参考文献</b> .....            | 291 |
| <b>第 8 章 弧焊电源的选择和使用</b> .....  | 269 | <b>符号说明</b> .....            | 296 |

# 绪 论

焊接作为一种制造技术方法，应用很广。它与国民经济各个部门，如汽车车辆、锅炉管道压力容器、矿山、冶金、桥梁、国防工业、农业机械、石油化工、机械制造、造船、集装箱、航空航天、宇宙飞行和海洋工程开发等方面的发展有着直接的关系。目前，工业发达国家的钢产量有 50% 左右是以焊接结构形式应用于生产。随着我国四个现代化建设的发展，特别是我国进入世界贸易组织和成为世界制造业中心之后，作为钢铁缝纫机技术的焊接技术将愈来愈显示出它的重要性。

电弧焊接是焊接方法中最主要的一个大类。按其工艺特点的不同，电弧焊大致又可分为焊条电弧焊、埋弧焊（或称熔剂层下埋弧焊）、氩弧焊、 $\text{CO}_2/\text{MAG}/\text{MIG}$  气体保护电弧焊和等离子弧焊等。

不同的电弧焊工艺方法需要相应的电弧焊机。例如，焊条电弧焊，需要由弧焊电源装置与焊钳所组成的电弧焊机；气体保护焊，则需要由弧焊电源装置、控制箱、带有送丝机和焊炬的焊接小车（自动焊用）或送丝机构、焊枪（半自动焊用）以及气路和水路系统等组成的半自动、自动电弧焊机。

弧焊电源是电弧焊机中的主要部分（核心部分），是对焊接电弧提供电能的一种装置，它必须具备电弧焊接所要求的主要电气特性。或者说，弧焊电源是提供电流、电压，并具有适合于弧焊（和电弧切割）工艺所需特性的设备。弧焊电源的控制，即是对弧焊电源电气性能的静动态特性与参数进行控制和调节。**本课程将对弧焊电源及其数字化控制技术的核心内容给予系统讲述。至于与其配套的其他设备和附件部分，将在有关课程中进行讲述。**

显然，没有性能良好、工作稳定的弧焊电源及其控制技术，要保证电弧的稳定燃烧和焊接过程的顺利进行，并得到良好的焊接接头是不可能的。没有先进的弧焊电源及其控制技术，要实现先进的弧焊工艺也是难以办到的。只有对弧焊电源及其数字化控制技术的基本理论、结构特点和电气特性等进行深入的研究，才能真正了解和正确使用弧焊电源，进而创造出新型的弧焊电源。

## 0.1 弧焊电源的分类

### 1. 弧焊电源及其控制技术的分类

弧焊电源可以分为以下四大类型：

- 1) 交流弧焊电源。
- 2) 直流弧焊电源。
- 3) 脉冲弧焊电源。
- 4) 弧焊逆变器（或称逆变式弧焊电源）。

## 2. 弧焊电源的控制技术分类

弧焊电源的控制技术可以分为以下几种类型：

- 1) 机械式控制。
- 2) 电磁式控制。
- 3) 模拟电子式控制。
- 4) 数字式控制。其中包括：①单片机控制；②PLC/PLD 控制；③ARM 控制；④DSP 控制。

## 0.2 各种弧焊电源的特点和应用

(1) 弧焊变压器 它把网路电压的交流电变成适宜于弧焊的低压交流电，由主变压器及所需的调节部分和指示装置等组成。它具有结构简单、易造易修、成本低、效率高等优点，但其电流波形为正弦波，电弧稳定性较差，功率因数低，一般应用于焊条电弧焊、埋弧焊和钨极氩弧焊等方法。

(2) 矩形波交流弧焊电源 它采用半导体控制技术来获得矩形波交流电流，其电弧稳定性好，可调参数多，功率因数高。它除了用于交流钨极氩弧焊（TIG）外，还可用于埋弧焊，甚至可代替直流弧焊电源用于碱性焊条电弧焊。

(3) 直流弧焊发电机 一般由特种直流发电机和获得所需外特性的调节装置等组成。它的空载损耗较大、效率低、噪声大、造价高、维修难，优点是过载能力强、输出脉动小，可用作各种弧焊方法的弧焊电源，也可由柴（汽）油机驱动用于没有供电电网的野外施工。

(4) 弧焊整流器 它是把交流电经降压整流后获得直流电的。它由主变压器、半导体整流元件以及获得所需外特性的调节装置等组成。与直流弧焊发电机相比，它具有制造方便、价格低、空载损耗小、噪声小等优点，而且大多数可以远距离调节，能自动补偿电网电压波动对输出电压、电流的影响。它可用作各种弧焊方法的电源。

(5) 弧焊逆变器 它把单相（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高频交流电，经降压后输出交流或直流电。整个过程由模拟电子电路控制或数字电路控制及反馈电路比较控制，使弧焊电源具有符合需要的外特性、调节特性和动特性，以及输出焊接电压、电流波形，甚至可实现多特性、多参数变换与优化匹配的柔性控制。它具有高效节电、重量轻、体积小、功率因数高、焊接性能好等独特的优点，可应用于各种弧焊方法，是一种最有发展前途的普及型弧焊电源。

(6) 脉冲弧焊电源 焊接电流以低频调制脉冲方式馈送，一般是由普通的弧焊电源与脉冲发生电路组成，也可由一个弧焊电源产生脉冲波形。它具有效率高、热输入较小、可在较宽范围内控制热输入、多参数变换与优化匹配等优点。这种弧焊电源用于对热输入比较敏感的高合金材料、薄板和全位置焊接，具有独特的优点。

每一类型弧焊电源，根据其结构特点不同，还可细分为多种形式，如图 0-1 所示：

## 0.3 弧焊电源的由来及发展趋向

焊接技术的发展与近代工业技术和科学的进步密切地联系在一起，弧焊电源也随着焊接

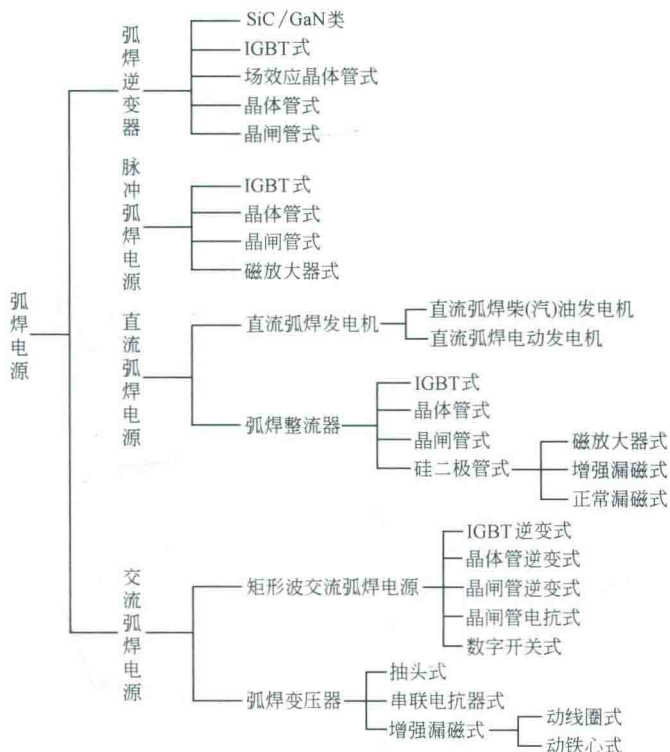


图 0-1 弧焊电源的分类

技术的发展而不断地向前发展。

18 世纪初发现了电弧，但当时工业水平较低，还不能为电弧提供足够的电能，因此利用电弧进行焊接还只是个设想。

随着电力工业的迅速发展，电能不仅可大量供应，而且成本较低，因而用电弧焊接金属材料成为现实。20 世纪 20 年代，由于焊接技术的发展，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，弧焊电源及其控制技术也有了很大的发展。

20 世纪 30 年代，随着工业生产进一步发展，不仅需要连接的产品数量增加了，而且出现了许多对连接质量要求高的产品，如车辆、大型远程航行的船舶、锅炉和桥梁等。为适应焊接生产量的迅速增加，从 40 年代初开始，焊接科学技术的发展迈入了一个新时期，首先研究成功了埋弧焊，随后航空、原子能等技术的发展，要求焊接高强钢和铝、钛及其合金等新型材料，出现了氩弧焊。50 年代又相继出现了  $\text{CO}_2$  焊等各种气体保护焊工艺，紧接着还研究成功了高能量密度的等离子弧焊，弧焊电源及其控制技术也相应地有了大幅度的发展。例如，40 年代开始出现了用硒片制成的弧焊整流器，到了 60 年代，由于大容量硅整流元件、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，与此同时其控制技术也从机械式控制发展到电磁式、模拟电子式控制。在 20 世纪 70 ~ 80 年代，可以说弧焊电源及其控制技术产生了新的飞跃，它表现为如下几方面：

1) 多种形式的弧焊整流器相继出现和完善，它们正在愈来愈多地取代直流弧焊发电机。有些工业发达国家，除在野外作业采用柴（汽）油弧焊发电机之外，基本上都采用弧焊整流器。

2) 研制成功多种形式的脉冲弧焊电源, 为进一步提高焊接质量和适应全位置焊接自动化提供了性能优良的弧焊电源。

3) 先后研制成功高效节能、小巧、性能好的晶闸管式、晶体管式和场效应晶体管式弧焊逆变器, 它具有更新换代的意义, 并正在逐步推广使用。

4) 半导体控制的矩形波交流弧焊电源陆续出现, 逐步代替传统式弧焊变压器。它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) 开发成功了与机器人配套使用的弧焊系统。

6) 控制技术的改进和发展

① 单旋钮调节, 即用一个旋钮就可以对弧焊电压、电流和短路电流上升率等同时进行调节, 并获得最佳配合。

② 通过电子或数字化控制电路获得多种形状的外特性, 以适应各种弧焊工艺发展的需要, 除获得常用的平特性、下降特性、恒流特性之外, 还可获得多种形状的外特性。

③ 可以提供多种电压、电流波形, 以满足某些弧焊工艺的特殊需要。

④ 低压小电流引弧, 在钨极氩弧焊引弧时, 空载电压只有 6V 或更低, 引弧后工作电压迅速提高。其优点是: 在短路接触引弧时, 由于电压低而不会出现过大冲击电流, 可防止工件和钨极严重污染; 不必加高频高压或脉冲高压就可引燃电弧, 防止对微机控制的干扰。

⑤ 电流电压值测试、显示系统的改进, 从指针式电压、电流表, 发展到数字电表和具有监测报警功能的检测系统, 还可在焊接前预置好焊接电流值与焊接电压值, 并把它显示出来。

⑥ 随着微机控制技术的发展, 出现了微机控制的弧焊电源, 具有记忆、预置焊接参数和在焊接过程中自动变换焊接参数等功能, 使弧焊电源的控制智能化。

20 世纪末 21 世纪初, 弧焊电源及其控制技术的发展进入高效、高性能和数字化的新阶段。

随着国民经济各工业部门的发展, 特别是在 20 世纪七八十年代, 实行对外开放、引进政策以来, 电弧焊机的研究和生产迅速发展, 新型电弧焊机相继出现。国外所拥有的各种基本形式的电弧焊机, 大多数在国内已能自己设计和制造, 并已拥有数千个电弧焊机制造厂家, 能够设计和生产几百个品种规格的电弧焊机, 其中弧焊电源就有 100 多个品种规格。

然而, 目前我国弧焊电源和电弧焊机制造、研究的状态, 与正在蓬勃发展的国民经济的需要仍不相适应, 产品的品种、数量、质量、性能和自动化程度还远不能满足各使用部门的要求, 与世界工业发达国家比较, 尚存在较大的差距。为了顺应我国社会主义现代化的需要, 广大焊接工程技术人员努力从事弧焊电源的科研和开发, 充分利用电子技术和大功率电子元件, 不断改善和提高产品的质量、可靠性和稳定性, 尤其是要大力发展高效节能省料、性能良好的新型弧焊电源, 研究和发展弧焊电源及其控制技术的基础理论, 积极研制微机控制的智能弧焊电源, 从而把弧焊电源的发展推到了一个新阶段。具体体现在如下几方面:

1) IGBT 式弧焊逆变器的出现, 经历了晶闸管式→晶体管式→场效应晶体管式→IGBT 式等结构形式、品种的变化和发展过程, IGBT 式逐步形成为主导的弧焊逆变器, 迅速推广和发展, 从硬开关型发展到软开关型, 近些年又在现有 Si 基功率器件基础上, 向宽带隙、高击穿电场、高热导率、高温稳定性等的新一代 SiC、GaN 基功率器件发展, 并在大功率应用场合下具有更高可靠性、更高性能、更高效率以及更加轻量化、模块化和智能化。

2) 数字化的控制技术向纵深发展,实现了从单片机控制→PLC/PLD 控制→ARM 控制→DSP 控制的发展过程。对弧焊电源电气性能的静、动态特性与多参数的变换、优化匹配,以及输出的电压、电流波形等进行任意的控制和调节以及储存,一机多功能,可对多种焊接材料进行高质量的焊接。为获得最佳的脉冲弧焊的工艺效果和便于对脉冲多参数的调节和优化匹配,还设有专家系统,进而通过对弧焊电源的静、动态特性的原理及其优化、协调数字化/智能化控制技术的研究,特别是充分了解和掌握动态特性,把熔焊工艺这个“粗活”做细、做好、做精。

3) 出现短路熔滴过渡电流波形的数字化控制,减少飞溅,提高焊接过程的稳定性,进而,借助现代微电子、信息技术,设计专门的新型控制系统,在短路弧焊过程中降低电弧重燃时出现的局部能量高峰,让电弧“变冷”,成为“冷电弧”,以满足超薄镀锌板的焊接和轻型铝合金等异种、复合材料的焊接,实现低热能、无飞溅、精密优质焊接工艺的特殊需求;完善一元化的调节技术;开发了双脉冲 MIG 弧焊电源,高精度控制脉冲 MIG 焊的多参数及其优化匹配,扩大稳定的工作调节范围,大幅度改善焊缝的成形与质量。

4) 多个弧焊电源的组合工作与协同数字化控制,实现双丝、三丝高速高效 MIG/MAG/脉冲焊/埋弧焊新焊接工艺。

## 0.4 本课程的性质、任务、要求和分工

(1) **性质** 本课程是理论性和实践性较强的专业课。

(2) **任务** 使学生掌握各种常用弧焊电源及其控制、数字化控制技术的基本理论、基本知识和实验技能,并能根据不同弧焊工艺方法正确地选择、使用和维护弧焊电源。

(3) **要求** 通过本课程的学习,应达到下列基本要求:

1) 了解电弧产生的机理,电弧静特性的形成,电弧的动特性;交流电弧的特点及其稳定燃烧的条件和影响因素。

2) 深入了解弧焊电源的性能与电弧稳定性、焊接参数稳定的关系,并能从工艺的角度对弧焊电源提出要求。

3) 掌握常用弧焊电源获得不同外特性的基本原理与调节方法。

4) 熟悉弧焊电源的性能特点,能正确选择与合理使用各种类型弧焊电源和具备排除常见故障的能力。

5) 掌握弧焊电源的控制和数字化技术的基本方法、特点、原理与应用。

(4) **本课程与其他课程的联系和分工**

1) 本课程的先修课程为“电工学”,其中的磁路、变压器、电抗器、直流发电机、硅整流电路、晶体管、晶闸管、场效应晶体管、IGBT、SiC 和 GaN 功率器件、快速整流管、电力电子、微电子、磁性材料等及其应用等与本门课程有关的基础理论知识部分。

2) 本课程应安排在认识实习和专业劳动之后,以便在授课前学生对各种弧焊方法及所用设备已有一定的感性认识。

3) 本课程为专业先行课之一,它为学习其他专业课提供必要的弧焊电源知识。

4) 本课程在电弧方面只讲授电弧的电特性,电弧的其他知识归在其他课程中讲授。

# 焊接电弧及其电特性

**内容提要：**本章论述焊接电弧的物理本质、形成、结构和伏安特性，着重研究焊接电弧的电特性及交流电弧燃烧的特点。

## 1.1 焊接电弧的物理本质和引燃

电弧是电弧焊接的热源，而弧焊电源则是电弧能量的供应者。弧焊电源电特性的好坏，直接影响到电弧燃烧的稳定性，而电弧是否稳定燃烧又直接影响到焊接过程的稳定性和焊缝的质量，甚至生产效率。所以，首先必须了解焊接电弧的物理本质，特别是电特性，然后才能研究电弧对弧焊电源电气性能的要求。

### 1.1.1 气体原子的激发、电离和电子发射

中性气体原来是不能导电的，为了在气体中产生电弧而通过电流，就必须使气体分子（或原子）电离成为正离子和电子。而且，为了使电弧能维持燃烧，电弧的阴极就要不断发射电子，这就必须不断地输送电能给电弧，以补充能量的消耗。

可见，焊接电弧也是气体放电的一种形式。它与其他气体放电的区别，在于它的阴极压降低、电流密度大，而**气体的电离和电子发射是电弧中最基本的物理现象**。

#### 1. 气体原子的激发与电离

（1）**气体原子的激发** 如果气体原子得到了外加的能量，电子就可能从一个较低的能级跳跃到一个较高能级，这时的原子处于“激发”状态。使原子跃至“激发”状态所需的能量，称为**激发能**。

（2）**气体原子的电离** 使电子完全脱离原子核的束缚，形成离子和自由电子的过程为电离。由原子形成正离子所需的能量称为**电离能**。

在焊接电弧中，根据引起电离的能量来源，有如下三种电离形式：

- 1) **撞击电离**。在电场中，被加速的带电质点（电子、离子）与中性质点碰撞后发生的电离。
- 2) **热电离**。在高温下，具有高动能的气体原子（或分子）互相碰撞而引起的电离。
- 3) **光电离**。气体原子（或分子）吸收了光射线的光子能而产生的电离。

气体原子产生电离的同时，带异性电荷的质点也会发生相互碰撞，使正离子与电子复合成中性质点，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。

#### 2. 电子发射

在阴极表面的原子或分子，接受外界的能量而释放出自由电子的现象称为**电子发射**。

电子发射所需的能量称为**逸出功**，以  $\varphi_y$  表示。物质的逸出功一般约为电离能的  $1/2 \sim 1/4$ 。逸出功不仅与元素种类有关，也与物质表面状态有很大关系。表面有氧化物或其他杂质时均可以显著减少逸出功。例如，钨极上含有钍或铈的氧化物时，其电子发射能力明显提高。

电子发射是引弧和维持电弧稳定燃烧的一个很重要的因素。按其能量来源的不同，可分为热发射、光电发射、重粒子碰撞发射和强电场作用下的自发射等。

(1) 热发射 物质的固体或液体表面受热后，其中某些电子具有大于逸出功的能量而逸出到表面外的空间中去的现象称为**热发射**。

热发射在焊接电弧中起着重要的作用，它随着温度的上升而增强。

(2) 光电发射 物质的固体或液体表面接受光射线的能量而释放出自由电子的现象称为**光电发射**。对于各种金属和氧化物，只有当光射线波长小于能使它们发射电子的极限波长时，才能产生光电发射。

(3) 重粒子撞击发射 能量大的重粒子（如正离子等）撞到阴极上，引起电子的逸出，称为**重粒子撞击发射**。重粒子能量愈大，电子发射愈强烈。

(4) 强电场作用下的自发射 物质的固体或液体表面，虽然温度不高，但当存在强电场并在表面附近形成较大的电位差时，使阴极有较多的电子发射出来，这就称为**强电场作用下的自发射**，简称**自发射**。电场愈强，发射出的电子形成的电流密度就愈大。自发射在焊接电弧中也起重要作用，特别是在非接触式引弧时，其作用更明显。

综上所述，焊接电弧是气体放电的一种形式。而习惯上把这种气体放电现象称为电弧燃烧，这是一种形象化的称呼。焊接电弧的形成和维持是在电场、热、光和质点动能的作用下，气体原子不断地被激发、电离以及电子发射的结果。同时，也存在负离子的产生，正离子与电子的复合。显而易见，引燃焊接电弧的能量来源主要靠电场及由其产生的热、光和动能。而这个电场就是由弧焊电源提供的空载电压所产生的，在某些条件下还需要短时叠加上一个较高的电压，才能引燃电弧。

### 1.1.2 焊接电弧的引燃

焊接电弧的引燃（引弧），一般有两种方式，即**接触引弧**和**非接触引弧**。引弧过程的电压、电流的变化，大致如图 1-1 所示。

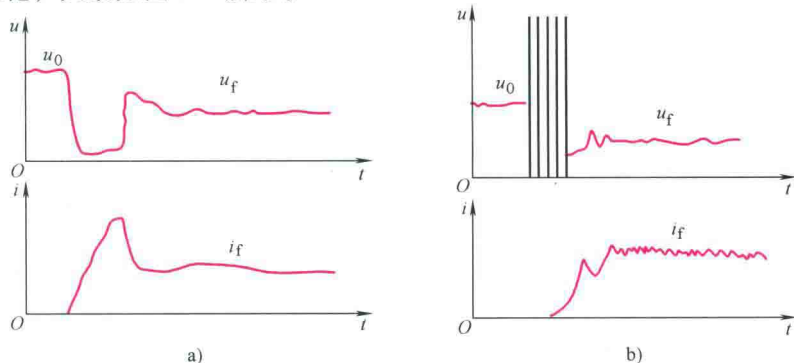


图 1-1 引弧过程的电压、电流变化曲线图

a) 接触引弧 b) 非接触引弧

$u_0$ —空载电压  $u_f$ —电弧电压  $i_f$ —电弧电流

## 1. 接触引弧

接触引弧即是在弧焊电源接通后,电极(焊条或焊丝)与工件直接短路接触,随后拉开,从而把电弧引燃起来。这是一种最常用的引弧方式。

由于电极和工件表面都不是绝对平整的,在短路接触时只是在少数凸出点上接触,如图 1-2 所示。通过这些接触点的短路电流,比正常的焊接电流要大得多。而接触点的面积又小,因此电流密度极大,这就可能会产生大量的电阻热,使电极金属表面发热、熔化,甚至汽化,引起热发射和热电离。随后在拉开电极的瞬间,电弧间隙极小,只有  $10^{-6}\text{cm}$  左右,使其电场强度达到很大的数值 ( $10^6\text{V/cm}$ )。

这样,即使在室温下都有可能产生明显的自发射,在强电场作用下,又使已产生的带电质点被加速、互相碰撞,引起撞击电离。随着温度的增加,光电离和热电离也进一步加强,使带电质点的数量猛增,从而能维持电弧的稳定燃烧。在电弧引燃之后,电离和复合(消电离)处于动平衡状态。由于弧焊电源不断供以电能,新的带电质点不断得到补充,弥补了消耗的带电粒子。焊条电弧焊和熔化极气体保护焊都是采用这种引弧方式。

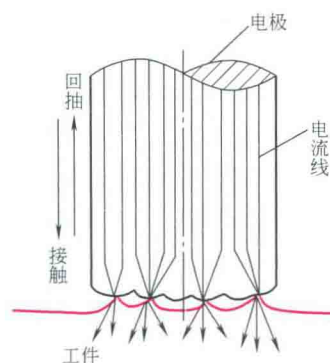


图 1-2 接触引弧示意图

## 2. 非接触引弧

非接触引弧,它是指在电极与工件之间存在一定间隙,施以高电压来击穿间隙,使电弧引燃。**非接触引弧采用引弧器才能实现**,它可分为高频高压引弧和高压脉冲引弧,如图 1-3 所示。高压脉冲引弧频率一般为 50Hz 或 100Hz,电压峰值为 3000 ~ 5000V;高频高压引弧

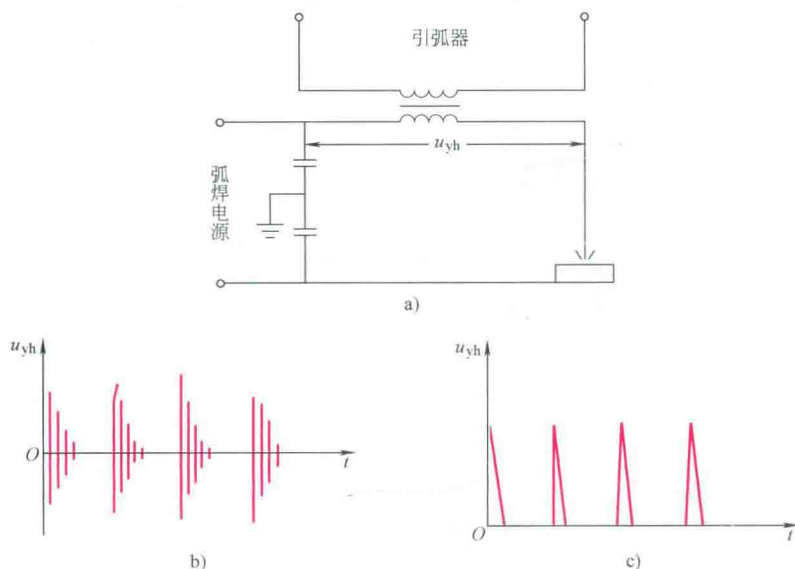


图 1-3 高频高压引弧和高压脉冲引弧示意图

a) 引弧器接入方式 b) 高频高压引弧电压波形 c) 高压脉冲引弧电压波形  
 $u_{yh}$ —引弧电压  $t$ —时间