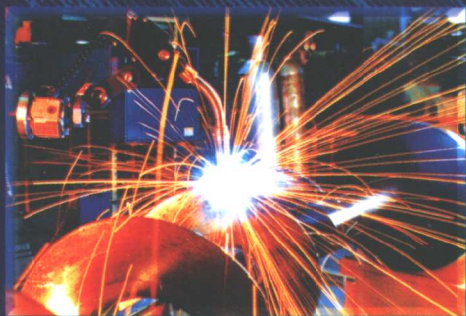


机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目



先进焊接制造技术丛书

中国焊接学会 组编



# 新型弧焊电源 及其智能控制

黄石生 编著



机械工业出版社  
China Machine Press

机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目

先进焊接制造技术丛书

中国焊接学会 组编

# 新型弧焊电源及其智能控制

黄石生 编著

蒋力培 主审



机械工业出版社

本书从介绍焊接电弧特性和弧焊工艺对弧焊电源电气性能的要求入手, 除对传统弧焊电源和发展历史作简介之外, 着重介绍随着电力电子技术和功率元器件发展而开发生产出来的新型弧焊电源, 按开关型(硬、软开关型)、模拟型和相移型三大类型进行叙述, 同时结合相关和交叉学科的发展, 介绍了智能控制, 计算机仿真和 CAD 设计技术。

本书可供大学以上程度, 焊接专业、机电一体化专业的教师、工程技术及相关学科的科技人员参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

新型弧焊电源及其智能控制/黄石生编著. —北京: 机械工业出版社, 2000

(先进焊接制造技术丛书)

ISBN 7-111-08319-9

I. 新 ... II. 黄... III. 电弧焊—电源—智能控制 IV. TG434.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 71636 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 武江 何月秋

封面设计: 姚毅 责任印制: 郭景龙

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2000 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

850mm×1168mm/32·10.5 印张·278 千字

0 001—3000 册

定价: 22.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换  
本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677—2527

# 先进焊接制造技术丛书

## 编委会名单

### 顾问委员会成员

潘际奎 关 桥 徐滨士 林尚扬

斯重遥 田锡唐 周振丰

主 任 陈剑虹

副主任 邹增大 单 平 崔树森

委 员 王其隆 任家烈 史耀武 霍立兴

黄石生 李志远 汪建华 蒋力培

秘 书 康 龙 武 江

## 序

焊接作为制造业的基础工艺与技术，在 20 世纪为工业经济的发展作出了重要的贡献。在人类引以为自豪的各个领域，如航空航天、核能利用、电子信息、海洋钻探、高层建筑等，都利用了焊接技术的优秀成果。

在今天，焊接作为一种传统技术又面临着 21 世纪的挑战。

一方面，材料作为 21 世纪的支柱已显示出五个方面的变化趋势，即从黑色金属向有色金属变化；从金属材料向非金属材料变化；从结构材料向功能材料变化；从多维材料向低维材料变化；从单一材料向复合材料变化。新材料的连接对焊接技术提出了更高的要求。

另一方面，先进制造技术的蓬勃发展，正从信息化、集成化、系统化、柔性化等几个方面对焊接技术的发展提出了越来越高的要求。

为了充分反映 20 世纪焊接技术的发展成果和 21 世纪对焊接技术提出的新的挑战，中国焊接学会组织了焊接行业最重要的 10 个领域中卓有成就的知名学者编写、出版了《先进焊接制造技术丛书》。同时邀请了焊接界德高望重的著名专家作为丛书编写顾问。

本丛书旨在全面介绍国内外先进焊接技术的发展现状和趋势，对我国焊接制造技术的发展起引导作用。

本丛书是高层次的普及型丛书，以知识性为主，深层次地介绍相关领域的高新技术内容和基本规律，面向广大的焊接工作者、研究人员、高等院校师生及相关领域专家。

本丛书的特点是突出“高、新”二字，有较宽的知识覆盖面，注意相关学科的渗透，有较高的收藏价值。

中国焊接学会在世纪之交以这套丛书奉献给广大的焊接工作者，是对焊接界为祖国经济腾飞及 20 世纪焊接技术的发展所作

贡献的回眸，也是焊接界对迎接 21 世纪新技术挑战的期盼。

原机械工业部技术发展基金委员会及机械工业出版社对本丛书的编辑出版提供了经济支持，在此一并表示深切的感谢。

丛书编委会主任

陈 剑 虹

# 前 言

根据中国焊接学会先进焊接制造技术丛书编委会第一次会议纪要精神和分工，由本人负责编著先进焊接制造技术丛书的《新型弧焊电源及其智能控制》分册。

本丛书编写的目的是全面系统地介绍国内外弧焊电源及其智能控制技术发展的现状和趋势，发展过程和规律，最新研究成果和应用。希望对弧焊电源的研究与制造技术起引导参考作用。为了便于了解该技术领域如何不断更新换代，适应弧焊工艺需求和用户对高档焊接工作愈来愈高的要求。本书从介绍焊接电弧电特性和弧焊工艺对弧焊电源电气性能的要求入手，除对传统弧焊电源和发展历史作简介之外，着重介绍随着电力电子技术和功率元器件发展而开发生产出来的新型弧焊电源，按开关型（硬、软开关型）、模拟型和相移型三大类型进行叙述，同时结合相关和交叉学科的发展，介绍智能控制、计算机仿真和 CAD 设计技术。

本书较大篇幅的内容取材于作者及其课题组多年来的科研成果，这些成果在国家（项目编号 59575058、59275208、59185021 等）和省（项目编号 936067、950262、950020）自然科学基金、科技攻关性项目支持下完成的，并先后荣获国家发明奖、省部科技进步奖、光华科技基金奖等十项和国家实用新型专利六项。部分技术成果已产业化。

本书属高层次的普及型丛书，以知识性为主，实用性为辅，以发展前沿与趋势为主，探索性成果为辅。可供大学以上程度，焊接专业、机电一体化专业的教师、工程技术和科技人员及相关学科的科技人员作教学、科研和开发生产的参考书。

黄石生教授编写大纲、前言、第 1、2、3、4 和 6 章，统稿，薛家祥博士编写第 5 章。编写过程胡庆彬、陈正明、高向东、李迪、蒋志林博士和李阳、陆沛涛、叶峰、罗倩、刘彬等老师参与编务或相关科研和博士论文的具体工作，并得到有关院校、所、

厂同行专家的指导帮助。机械工业出版社出版基金会给予出版经费资助和支持。国家和省自然科学基金和广东省广州市科委、国家计委、科委、机械部给予相关科研经费的支持。在此对上述的单位和个人谨致以衷心的感谢！

本书主审由北京石油化工学院蒋力培教授担任。

鉴于作者水平有限，书中可能存在不少缺点和错误，敬请读者批评、指正。

黄石生  
2000年2月





黄石生 男，1938年10月出生于广东。1964年7月毕业于华南理工大学机械工程系。教授、博士生导师，华南理工大学副校长兼惠州大学校长，教育部科技委员会、国家自然科学基金会评议组成员、机械工程学会理事、焊接学会常务理事、广州市政府决策咨询顾问。从事弧焊电源设备及机电一体化的教学科研工作，先后承担国家和地方科研项目三十多项，并以逆变系列技术和机器人焊接及智控技术为特色。获得国家发明奖、进步奖和省、部级科技进步二、三等奖十多项，专利6项，发表论文100多篇，著作7本。

# 目 录

序

前言

<b>第 1 章 弧焊电源概述</b> .....	1
1.1 基本要求及原理 .....	1
1.1.1 焊接电弧的电特性 .....	1
1.1.2 对弧焊电源的基本要求 .....	9
1.2 弧焊电源的分类与特点 .....	17
1.2.1 弧焊电源的分类 .....	17
1.2.2 机械调节型弧焊电源 .....	23
1.2.3 电磁控制型弧焊电源 .....	26
1.2.4 电子控制型弧焊电源 .....	29
1.3 弧焊电源的应用 .....	34
1.4 弧焊电源的发展现状和趋势 .....	35
<b>第 2 章 模拟式弧焊电源</b> .....	38
2.1 电力半导体器件 .....	38
2.2 模拟式晶体管弧焊电源 .....	50
2.2.1 外特性的控制 .....	51
2.2.2 动特性的控制 .....	52
2.2.3 对弧焊工艺方法适应性的控制 .....	56
2.2.4 输出电流波形的控制 .....	56
2.2.5 焊接过程电流变化的控制 .....	57
2.2.6 特点和应用 .....	58
2.3 模拟式晶体管脉冲弧焊电源 .....	58
2.3.1 外特性的切换 .....	59
2.3.2 电路工作原理 .....	63
2.3.3 特点与应用 .....	65
2.4 模拟式晶闸管弧焊整流器 .....	67

2.4.1	模拟控制电路原理 .....	70
2.4.2	触发电路原理 .....	74
2.4.3	缺相保护电路 .....	76
2.4.4	空载节电和填弧坑电路 .....	77
<b>第3章</b>	<b>硬开关型弧焊电源 .....</b>	<b>78</b>
3.1	硬开关型直流、脉冲弧焊电源 .....	78
3.1.1	硬开关型晶体管弧焊电源 .....	78
3.1.2	硬开关型晶闸管脉冲弧焊电源 .....	88
3.2	硬开关型弧焊逆变器 .....	92
3.2.1	弧焊逆变器的基本原理 .....	96
3.2.2	触发角控制弧焊逆变器 .....	108
3.2.3	电流控制式弧焊逆变器 .....	110
3.2.4	电压控制式弧焊逆变器 .....	112
3.2.5	弧焊逆变器发展方向 .....	130
<b>第4章</b>	<b>软开关型弧焊电源 .....</b>	<b>140</b>
4.1	软开关型逆变主电路基本形式及原理 .....	140
4.1.1	软开关型逆变主电路 .....	141
4.1.2	软开关型全桥逆变电路的拓扑结构 .....	147
4.1.3	相移控制电路及其新发展 .....	152
4.2	软开关型全桥弧焊逆变器 .....	158
4.2.1	软开关型全桥弧焊逆变器主电路原理 .....	158
4.2.2	软开关型全桥弧焊逆变器控制与驱动电路 .....	166
4.3	软开关型全桥弧焊逆变器技术讨论 .....	172
4.3.1	功率器件承受开关应力与开关损耗问题 .....	172
4.3.2	偏磁问题 .....	175
4.3.3	其他问题 .....	177
<b>第5章</b>	<b>弧焊电源的智能控制 .....</b>	<b>183</b>
5.1	弧焊电源的微机控制 .....	183
5.1.1	弧焊电源的单片机控制 .....	184
5.1.2	弧焊过程微机控制系统抗干扰措施 .....	201

5.1.3	弧焊电源的智能控制方法 .....	202
5.2	弧焊过程的熔滴过渡控制 .....	203
5.2.1	熔滴短路过渡的机理 .....	204
5.2.2	波控法的发展 .....	206
5.2.3	波形控制的效果 .....	212
5.3	弧焊电源与焊接质量的模糊控制 .....	212
5.3.1	模糊控制原理 .....	213
5.3.2	模糊控制的软硬件技术 .....	214
5.3.3	弧焊电源的模糊控制 .....	215
5.3.4	弧焊质量的模糊控制 .....	215
5.3.5	焊缝跟踪的模糊控制 .....	223
5.4	人工神经网络控制技术的应用 .....	225
5.4.1	人工神经网络控制原理 .....	226
5.4.2	人工神经控制的软硬件技术 .....	232
5.4.3	人工神经网络控制技术的应用 .....	233
5.5	机器人弧焊系统的智能控制 .....	240
5.5.1	弧焊机器人与电源设备的柔性化集成 .....	240
5.5.2	基于 PC 微机的机器人控制技术 .....	241
5.5.3	机器人用的新型弧焊电源 .....	243
5.5.4	机器人的多传感器智能信息融合技术 .....	243
<b>第 6 章</b>	<b>    弧焊电源的计算机仿真与 CAD .....</b>	<b>246</b>
6.1	电路计算机仿真与 CAD .....	247
6.1.1	电路计算机仿真与 CAD 的发展 .....	247
6.1.2	SPICE 与 Pspice .....	248
6.1.3	ICAP 4.0 和 WE 4.0 .....	250
6.2	弧焊逆变器电路级数学模拟 .....	251
6.2.1	单端正激式与双重正激单端式 .....	252
6.2.2	半桥式与全桥式 .....	257
6.2.3	逆变主电路比较分析 .....	262
6.3	主要器件模型及其瞬间响应 .....	263

6.3.1	基本半导体器件模型 .....	263
6.3.2	功率二极管开关过程、模型及仿真研究 .....	268
6.3.3	功率 MOSFET 开、关特性与模型 .....	276
6.3.4	IGBT 结构、开关特性、模型及仿真 .....	276
6.3.5	高频脉冲功率变压器与电抗器的模型 .....	283
6.3.6	控制电路与器件宏模型 .....	287
6.4	弧焊逆变器器件级模型及其仿真算法 .....	289
6.4.1	弧焊逆变器主电路器件级瞬态模型 .....	289
6.4.2	焊接电弧的随机模型及其仿真算法 .....	293
6.4.3	控制部分功能级模型 .....	297
6.5	程序设计与仿真实验 .....	299
6.5.1	结构化与面向对象的程序设计方法 .....	299
6.5.2	SAWI 软件的开发环境与工具 .....	301
6.5.3	用户界面资源的装载和响应 .....	302
6.5.4	功能框图和操作流程图 .....	303
6.5.5	弧焊逆变器的仿真与实验 .....	305
<b>参考文献</b> .....		<b>316</b>

# 第 1 章 弧焊电源概述

## 1.1 基本要求及原理

弧焊电源是为焊接电弧提供电能的一种装置。而焊接电弧的物理本质是一种气体导电现象，又是一种自持放电现象。电弧中的带电粒子主要是依靠电弧中气体介质的电离和电极的电子发射两个物理过程而产生的。弧焊电源要满足焊接电弧稳定工作（燃烧），就必须要求自身的电气性能满足焊接电弧的电特性要求。为此，首先要了解焊接电源电气性能提出的基本要求。

### 1.1.1 焊接电弧的电特性

#### (1) 焊接电弧的引燃

中性气体原来是不能导电的，要使其产生导电的物理现象，就要在两个电极之间施加一个电场，而且要足够强才能把电弧引燃起来。通常引燃电弧（引弧）用两种方式：接触式和非接触式。

接触式引弧是在弧焊电源接通之后，电极（焊条或焊丝）与工件直接短路接触，随后拉开，从而使电弧引燃起来。

非接触式引弧是指在电极与工件之间存在一定间隙，施以高电压（高频高压或高压脉冲）击穿间隙，使电弧引燃。

#### (2) 焊接电弧电特性的形成

1) 电弧电压 两电极之间产生电弧时，在电弧长度方向电场强度分布是不均匀的，通过实际测量得到的沿电弧长度方向的电压分布如图 1-1 所示。图中：

$$U_a = U_A + U_k + U_0$$

阳极区和阴极区在电弧中长度很小，分别约为  $10^{-4}$  和  $10^{-6}$ cm，因此可以认为两电极间距离即弧柱的长度。阳极区压降和阴极区

压降与弧长无关。而弧柱压降又可写成：

$$U_0 = IEI$$

式中  $I$  —— 电弧电流；

$E$  —— 弧柱电场强度；

$L$  —— 弧柱长度。

于是电弧电压  $U_a$  为

$$U_a = a + bl \quad (1-1)$$

式中  $a$  ——  $U_A + U_k$ ；

$b$  ——  $IE$ ；

$U_A$  —— 阳极压降；

$U_k$  —— 阴极压降。

弧柱温度一般要求较高，约  $5000 \sim 50000K$  范围，因气体种类和电流大小而异。

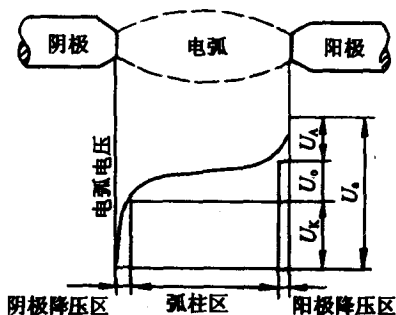


图 1-1 电弧各个电压分布

$U_A$ —阳极压降  $U_k$ —阴极压降  $U_0$ —弧柱压降  $U_a$ —电弧电压

2) 最小电压原理 自由电弧是两个电极之间的气体导体，它可以自由扩大和缩小其导电断面，电流一定，气体介质条件一定时稳定燃烧的电弧将自动选择一适当的断面，以保证弧柱中具有最低的电场强度，即固定弧长上的电压为最小，这就是最小电压原理。

3) 交流电弧 工频交流电弧每秒变换极性 50 次, 电流每秒 100 次经过零点。电流经过零点瞬间, 电弧中带电粒子进行复合, 电弧熄灭。过零点后重新点燃, 这种再点燃电弧的过程称为再引弧。再引弧所需电压称为再引弧电压。

如图 1-2 所示, 焊接回路中串入电阻, 其电弧燃烧过程示于图 1-2a 左侧。当电源电压  $U$  低于电弧电压  $U_a$  时, 电流为零, 电弧熄灭。当电源电压改变极性重新达到再引弧电压  $U_r$  时, 电弧才再引燃, 电流  $I$  渐增。这样瞬时熄弧时间较长, 电弧很不稳定。图 1-2b 电路中串入电感, 电弧电流滞后于电源电压, 电流为零时下半波电源电压瞬时值已达到再引弧电压, 电弧电流便可成为连续的, 电弧燃烧稳定, 可见, 为使交流电流能够连续, 交流电路中应接入足够大的电感。用弧焊变压器焊接时, 为使电弧电流连续, 应满足下列条件:

$$\frac{U_0}{U} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{m^2 + \frac{\pi^2}{4}} \quad (1-2)$$

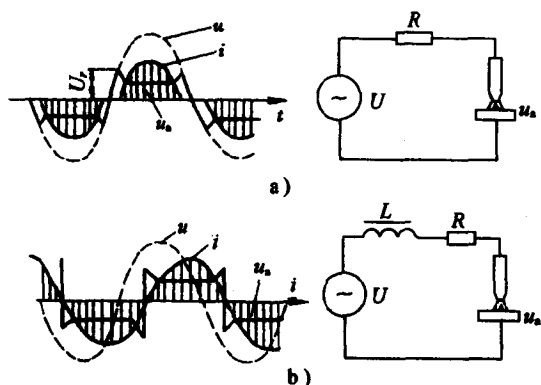


图 1-2 交流电源电弧电压电流波形

a) 电阻性电路 b) 电感性电路

式中  $U_0$  —— 变压器输出的空载电压;

$U$  —— 负载电压;



$$m = \frac{U_r}{U} = 1.3 \sim 1.5;$$

$U_r$  —— 再引弧电压。

再引弧电压高低取决于电极材料，气体介质与电流过零点后的电流上升速率  $\frac{di}{dt}$ ，热阴极、气体介质中含有低电离能元素，电流过零后上升速率高，则再引弧电压低。

4) 电弧静特性 当弧长一定电弧稳定燃烧时，两电极间总电压  $U_0$  与电流之间的关系曲线称为电弧静特性曲线，如图 1-3 所示。从图 1-3 中可以看到全部电弧静特性可以分为三个区段：A 段，电流密度较小，随着电流增加，电弧电压急剧下降，这一段为下降特性，也称为负阻特性。B 段，电流密度中等，随着电流增加电弧电压几乎保持不变，这一段是水平特性，也是负阻特性。C 段，电流密度大，随着电流增加电弧电压也随之明显上升，这一段是上升特性。

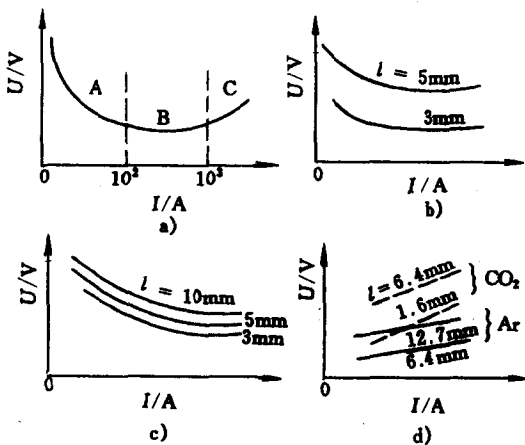


图 1-3 电弧静特性

- a) 电弧静特性全部    b) 焊条电弧焊的电弧静特性  
c) 钨极氩弧焊的电弧静特性    d) 熔化极气体保护焊的电弧静特性