

高等学校试用教材

# 弧 焊 电 源

北京航空航天大学 郑宜庭  
华南理工大学 黄石生 合编

GAO DENG XUE  
XIAO JIAO CAI

机械工业出版社

高等学校试用教材

# 弧 焊 电 源

北京航空航天大学 郑宜庭  
华南理工大学 黄石生 合编



机械工业出版社

本书是根据 1984 年全国焊接专业原教材编审委员会制订的新教学大纲编写的《弧焊电源》教材。

该书着重论述了焊接电弧电特性、弧焊工艺对弧焊电源的基本要求，弧焊变压器、弧焊发电机、硅弧焊整流器、晶闸管式弧焊整流器、脉冲弧焊电源、弧焊逆变器和矩形波交流弧焊电源的基本原理、结构、性能特点和应用。另外，简介了有关弧焊电源的选择、安装和使用等实用知识。

本书作为高等工业学校焊接专业教材，亦可供焊接工程技术人员参考。

## 弧 焊 电 源

北京航空航天大学 郑宜庭  
华南理工大学 黄石生 合编

\*

责任编辑：董连仁

封面设计：方 芬

责任印制：郭 炜

\*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本 787×1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·印张 14<sup>1</sup>/<sub>4</sub>·字数 346 千字

1980 年 8 月成都第一版

1988 年 11 月北京第二版·1988 年 11 月北京第八次印刷

印数 30,201—35,200·定价：2.85 元

\*

ISBN 7-111-00849 9/TG 198 (课)

## 前 言

本书是全国高等院校焊接专业《弧焊电源》课程的教材，是根据1984年原全国焊接专业教材编审委员会制订的新的教学大纲编写的。

本书着重论述了焊接电弧特性和弧焊工艺对弧焊电源的基本要求，弧焊变压器、弧焊发电机、硅弧焊整流器、晶闸管式弧焊整流器、脉冲弧焊电源、弧焊逆变器和矩形波交流弧焊电源的基本原理、结构、性能特点和应用。另外，简介了有关弧焊电源的选择、安装和使用等实用知识。

本书作为高等工业院校焊接专业教材，亦可供焊接工程技术人员参考。

本书由北京航空航天大学郑宜庭同志与华南理工大学黄石生同志合编，郑宜庭统一整理；吉林工业大学李树槐同志主审；上海电焊机厂董锦桓同志、沈阳工业大学董挺同志、西安交通大学苏保善同志、上海交通大学朱正行同志、清华大学施克仁同志和山东工业大学刘世厚同志参加了审稿工作。本书的绪论、第一、二、七、八、九章和附录由黄石生编写；第三、四、五、六章由郑宜庭编写。

本书在编写过程中，承蒙各兄弟院校、研究所和工厂有关专家、工程技术人员的大力支持和帮助，在此致以衷心的感谢。

由于编者水平有限，本书可能存在不少缺点和错误，敬请读者批评指正。

编者于1987年6月

## 符 号 说 明

根据国标GB315—64《电工设备文字符号编制通则》并考虑本专业使用习惯，对书中所采用符号说明如下：

符号	名 称	符号	名 称
$U_0$	空载电压	$I_0$	空载电流
$U_s(U)$	电源电压	$I_y$	电源电流有效值
$U_{sh}$	引弧电压	$I_m$	脉冲电流峰值
$U_f, u_f$	分别表示电弧电压有效值（或平均值）和瞬时值	$I_f$	基本电流
$U_j$	交流绕组电压有效值	$I_{fb}$	反馈电流
$U_k$	控制电压	$R_f(R_k)$	电弧电阻
$I_f, i_f$	分别表示电弧电流有效值（或平均值）和瞬时值	$I_{wd}$	稳态短路电流
		$I_{sd}$	空载至短路瞬时短路电流峰值
		$I'_{sd}$	经0.05s后的瞬时短路电流
		$I_{fd}$	负载至短路瞬间短路电流峰值
$R$	电阻（器）	FL	分流器
$L$	电感（器）	K	开关
$C$	电容（器）	AN	按钮
DK	电抗（器）	HK	转换开关
W	电位器	RD	熔断器
F	发电机	J	继电器
DF	风扇电动机	CJ	接触器
$N$	绕组（线圈、匝数）	ZL	整流器
$N_j$	交流绕组、匝数	ZD	指示灯
$N_k$	控制绕组、匝数	BZ	二极管
$N_B$	补偿绕组、匝数	BG	三极管
B	变压器	BW	稳压管
MB	脉冲变压器	UJT	单结晶体管
WY	稳压器	SCR	晶闸管元件
LH	互感器	BC	程控单结晶体管

# 目 录

绪论 .....	1	§ 5-4 有反馈磁放大器式弧焊整流器 .....	94
第一章 焊接电弧及其电特性 .....	5	§ 5-5 磁放大器原理小结 .....	109
§ 1-1 焊接电弧的物理本质和引燃 .....	5	§ 5-6 磁放大器式弧焊整流器的动特性 .....	110
§ 1-2 焊接电弧的结构和伏安特性 .....	8	§ 5-7 其它形式的硅弧焊整流器 .....	115
§ 1-3 交流电弧 .....	12	参考文献 .....	117
§ 1-4 焊接电弧的分类及其特点 .....	17	第六章 晶闸管式弧焊整流器 .....	118
参考文献 .....	21	§ 6-1 概述 .....	118
第二章 对弧焊电源的基本要求 .....	22	§ 6-2 主电路 .....	120
§ 2-1 对弧焊电源外特性的要求 .....	22	§ 6-3 触发电路 .....	130
§ 2-2 对弧焊电源调节性能的要求 .....	32	§ 6-4 外特性的控制电路 .....	142
§ 2-3 对弧焊电源动特性的要求 .....	35	§ 6-5 ZX5系列晶闸管式弧焊整流器 .....	145
参考文献 .....	40	参考文献 .....	148
第三章 弧焊变压器 .....	42	第七章 脉冲弧焊电源 .....	149
§ 3-1 弧焊变压器的基本原理和分类 .....	42	§ 7-1 脉冲弧焊电源的概述 .....	149
§ 3-2 串联电抗器式弧焊变压器 .....	48	§ 7-2 晶闸管式脉冲弧焊电源 .....	152
§ 3-3 动铁心式弧焊变压器 .....	54	§ 7-3 晶体管式脉冲弧焊电源 .....	160
§ 3-4 动线圈式弧焊变压器 .....	58	§ 7-4 磁放大器式脉冲弧焊电源 .....	169
§ 3-5 抽头式弧焊变压器 .....	61	§ 7-5 单相整流式脉冲弧焊电源 .....	172
参考文献 .....	65	参考文献 .....	175
第四章 直流弧焊发电机 .....	66	第八章 新型弧焊电源 .....	176
§ 4-1 直流发电机的电枢反应及换向 .....	66	§ 8-1 弧焊逆变器 .....	176
§ 4-2 弧焊发电机的基本原理和分类 .....	68	§ 8-2 矩形波交流弧焊电源 .....	188
§ 4-3 直流弧焊发电机的动特性 .....	70	参考文献 .....	192
§ 4-4 差复激式弧焊发电机 .....	72	第九章 弧焊电源的选择和使用 .....	194
§ 4-5 裂极式弧焊发电机 .....	76	§ 9-1 弧焊电源的选择 .....	194
§ 4-6 换向极式弧焊发电机 .....	79	§ 9-2 弧焊电源的安装和使用 .....	197
参考文献 .....	82	§ 9-3 节约用电和安全用电 .....	201
第五章 硅弧焊整流器 .....	83	参考文献 .....	204
§ 5-1 硅弧焊整流器的组成和分类 .....	83	附录 .....	205
§ 5-2 无反馈磁放大器(饱和电抗器) .....	84	附录一 电焊机型号编制方法 .....	205
§ 5-3 无反馈磁放大器式弧焊整流器的工作 原理 .....	87	附录二 常用弧焊电源的主要技术数据 .....	208
		附录三 国际标准(DIS700—79) .....	214

# 绪 论

焊接作为一种基本加工方法，应用很广。它与国民经济各个部门，如矿山、冶金、国防工业、农业机械、石油化工、机械制造、造船、航空、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，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手工弧焊（或称药皮焊条手工弧焊）、埋弧焊（或称熔剂层下埋弧焊）、气体保护焊（或称气电焊）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，手工弧焊，需要由电源装置、焊钳所组成的电弧焊机；气体保护焊，则需要由电源装置、控制箱、焊接小车（自动焊用）或送丝机构（半自动焊用）、焊枪、气路和水路系统等组成的电弧焊机。

弧焊电源是电弧焊机中的主要部分，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，即是本课程将给予系统讲述的核心内容。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，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，要实现先进的弧焊工艺也是难于办到的。只有对弧焊电源的基本理论、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。

## 一、弧焊电源的分类、特点和用途

### （一）弧焊电源的分类

弧焊电源可以分为四大类型：

1. 交流弧焊电源；
2. 直流弧焊电源；
3. 脉冲弧焊电源；
4. 逆变式弧焊电源。

### （二）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，一般应用于手工弧焊、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手工弧焊。

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、噪音大、造价高、维修难，优点是过载能力强、输出脉动小、可用

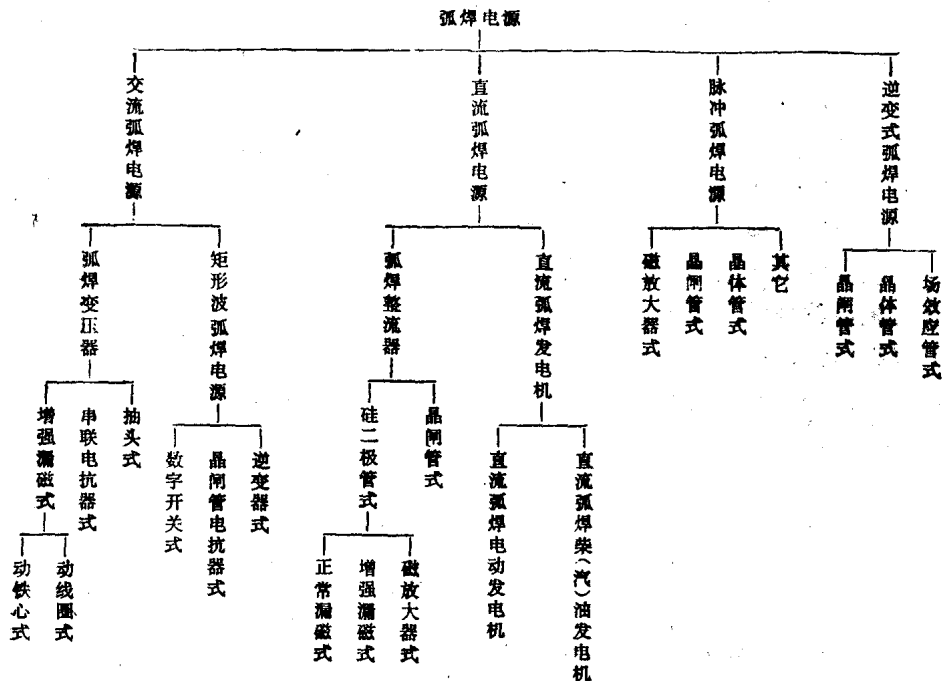
作各种弧焊方法的电源，也可由柴油机驱动用于没有电源的野外施工。

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。与直流弧焊发电机比较，它具有制造方便、价格低、空载损耗小、噪音小等优点，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芝的中频交流电，经降压后输出交流或直流电。整个过程由电子电路控制，使电源具有符合需要的外特性和动特性。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调制电路组成，也有其他结构型式。它具有效率高、输入线能量较小、可在较宽范围内控制线能量等优点。这种弧焊电源用于对热输入量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，还可细分为多种型式，详见下表：



## 二、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理想。

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，弧焊电源也有了很大的发展。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。



20世纪30年代,随工业生产进一步发展,不仅需要联接的产品数量增加了,而且出现了许多对联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,研究成功了埋弧自动焊。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CO<sub>2</sub>焊等各种气体保护焊新工艺,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。在70~80年代,可以说弧焊电源的发展产生了新的飞跃,它表现为如下几方面:

1. 多种型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,基本上都用弧焊整流器。

2. 研制成功多种型式的脉冲弧焊电源 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. 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 例如,除常用的平特性、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升高。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把电弧引燃起来,能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,甚至可在焊接前就调节好焊接电流与焊接电压值并能把它显示出来。

(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,使弧焊电源智能化。

我国解放前,工业基础十分薄弱。焊接技术和弧焊电源等设备也是十分落后的,只能利用气焊和手工弧焊对机械零件进行修补。重要的金属结构,则全部采用铆接。那时,全国没有一家电弧焊机制造厂,焊接材料和电弧焊机几乎全部依赖于国外进口。

解放后,在中国共产党的领导下,随着国民经济各工业部门的发展,特别是在70、80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型式的电弧焊机,大多数在国内已能自己设计和制造,并已拥有数百个电弧焊机制造厂家,能够设计和生产200多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四个现代化的需要，必须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，研究和发发展弧焊电源的基础理论，积极研制微电脑控制的智能弧焊电源，从而把弧焊电源的发展推向一个新阶段。

### 三、本课程的性质、任务、要求和分工

#### (一) 性质

本课程是理论性和实践性较强的专业课。

#### (二) 任务

使学生掌握各种常用弧焊电源的基本理论、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、使用弧焊电源。

#### (三) 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、规范稳定性的关系，并能从工艺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) 熟悉各种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。

#### (四) 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》中的磁路、变压器、直流发电机、硅整流电路、晶体管、晶闸管及其应用等章节，为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，有关电弧的其他知识归在其他课程中讲授。

### 参 考 文 献

- [1] 黄石生主编：《弧焊电源》，机械工业出版社，1980.7。
- [2] 机械工程手册编辑委员会：《电机工程手册》第35篇电焊机，机械工业出版社，1980.9。
- [3] Deutscher Fachverlag: European Welding Engineering and Equipment, 1/1986。
- [4] 全国电焊机行业技术情报网：国外电焊机产品技术水平资料汇编，1985.4。
- [5] 全国电焊机行业技术情报网：《电焊机译文集》，1984.6。
- [6] H. Irniger: Moderne Stromquellen für elektrische Schweißverfahren, Zeitschrift für Schweisttechnik Nr. 7/1980。
- [7] 张九海等：矩形波交流电源的研制及工艺试验，焊接学报，1985.3。
- [8] 施秉周：《发展中的我国电焊机行业》，《电焊机》，1984.No3。

# 第一章 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会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焊接过程的稳定性和焊缝的质量。首先，我们必须了解焊接电弧的物理本质和电特性，然后才能进而研究电弧对弧焊电源电气性能的要求。

### 一、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，为了使电弧维持燃烧，要求电弧的阴极不断发射电子，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，和其他气体放电的区别在于它的阴极压低、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。

#### （一）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另一个较高能级，这时原子处于“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，称为电离。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（原子）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。

气体原子在产生电离的同时，带异性电荷的质点也会发生相互碰撞，使正离子和电子复合成中性质点，即产生中和现象。当电离速度和复合速度相等时，电离就趋于相对稳定的动平衡状态。应指出，原子或分子除释放出自由电子形成正离子和电子之外，有时在电离气体中还存在着原子或分子与电子结合成为负离子的过程，所产生负离子对电弧的稳定性有不利影响。

各种元素吸附电子形成负离子的倾向决定于它与电子亲和能的大小，以  $E_e$  表示。电子亲和能愈大的元素形成负离子的倾向愈大。而元素的电子亲和能的大小是由原子构造所决定的。卤族元素（F、Cl、Br、I等）的电子亲和能最大。在电弧中可能遇到的O、O<sub>2</sub>、OH、NO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O、Li等气体具有一定的电子亲和能，所以都可能形成负离子。几种常见气体和元

素的电子亲和能  $E_a$ , 见表 1-1。由表可知惰性气体 Ar、He 的电子亲和能最小, 所以不可能形成负离子。

## (二) 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  $\phi$  表示。物质的逸出功一般约为电离能的  $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{4}$ 。逸出功不仅与元素种类有关 (见表 1-1), 还与物质表面状态有很大关系。表面有氧化物或其它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。

表1-1 电弧中常见气体及元素的电离能 $E_I$ 、逸出功 $\phi_y$ 、亲和能 $E_a$

气体	$\frac{E_I}{\text{eV}}$	$\frac{E_a}{\text{eV}}$	元素	$\frac{E_I}{\text{eV}}$	$\frac{E_a}{\text{eV}}$	$\frac{\phi_y}{\text{eV}}$	元素	$\frac{E_I}{\text{eV}}$	$\frac{E_a}{\text{eV}}$	$\frac{\phi_y}{\text{eV}}$
He	24.58	<0	Al	5.98	0.52~1.19	4.25	Cs	3.38	0.23	1.81
Ar	15.76	<0	Cr	6.76	0.98	4.59	Pd	4.18	0.27	2.16
N <sub>2</sub>	15.50	<0	Ti	6.82	0.39	3.95	K	4.34	0.30	2.22
N	14.53	0.54	Mo	7.10	1.3	4.29	Na	5.14	0.35	2.33
H <sub>2</sub>	15.60	<0	Mn	7.43	—	3.38	Ba	5.21	—	2.4
H	13.60	0.8	Ni	7.63	1.28	4.91	Li	5.39	0.616	2.38
O <sub>2</sub>	12.5	0.44	Mg	7.64	—	3.64	La	5.61	—	3.3
O	13.61	2.0	Cu	7.72	1.8	4.36	Ca	6.11	—	2.96
CO <sub>2</sub>	13.8	—	Fe	7.87	0.58	4.40	B	8.30	0.3	4.30
CO	14.01	—	W	7.98	—	4.50	I	10.45	3.17	2.8~6.8
HF	15.57	—	Si	8.15	1.46	4.80	Br	11.84	3.51	—
			Cd	8.99	—	4.10	Cl	13.01	3.76	—
			C	11.26	1.33	4.45	F	17.42	3.62	—

注: 1. 表中的数值因资料来源不同, 有些差异, 仅供参考;

2. eV—电子伏特。

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动能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作用, 它随着温度上升而增强。

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。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，气体原子不断的被激发、电离以及电子发射的结果。同时，也存在负离子的产生，正离子和电子的复合。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。

## 二、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。

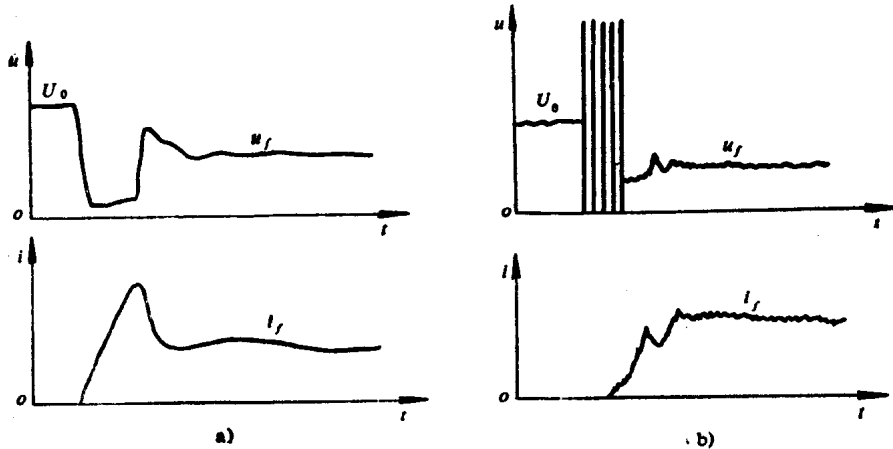


图1-1 引弧过程的电压、电流变化

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

### (一) 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，只是在少数突出点上接触，见图 1-2。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。这就可能产生大量的电阻热，使电极金属表面发热、熔化，甚至气化，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  $10^{-6}$ cm 左右，使其电场强度达到很大的数值（可达  $10^6$  V/cm）。这样，即使在室温下都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，电离和中和（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，弥补了消耗的带电质点和能量。

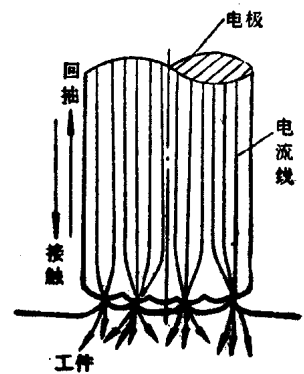


图1-2 接触引弧示意图

手工焊条电弧焊和熔化极气体保护焊都采用这种引弧方式。

## (二) 非接触引弧

它是指在电极与工件之间存在一定间隙，施以高电压击穿间隙，使电弧引燃。

非接触引弧需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。高压脉冲引弧的频率一般为 50 或 100Hz，电压峰值为 3000~5000V；高频高压引弧则需用高频振荡器，它每秒振荡 100 次，每次振荡频率为 150~260kHz 左右，电压峰值为 2000~3000V。

可见，这是一种依靠高电压使电极表面产生电子的自发射，而把电弧引燃的方法，这种引弧方法主要应用于钨极氩弧焊和等离子弧焊。引弧时，电极不必与工件短路，这样不仅不会污染工件和电极的引弧点，而且也不会损坏电极端部的几何形状，还有利于电弧的稳定燃烧。

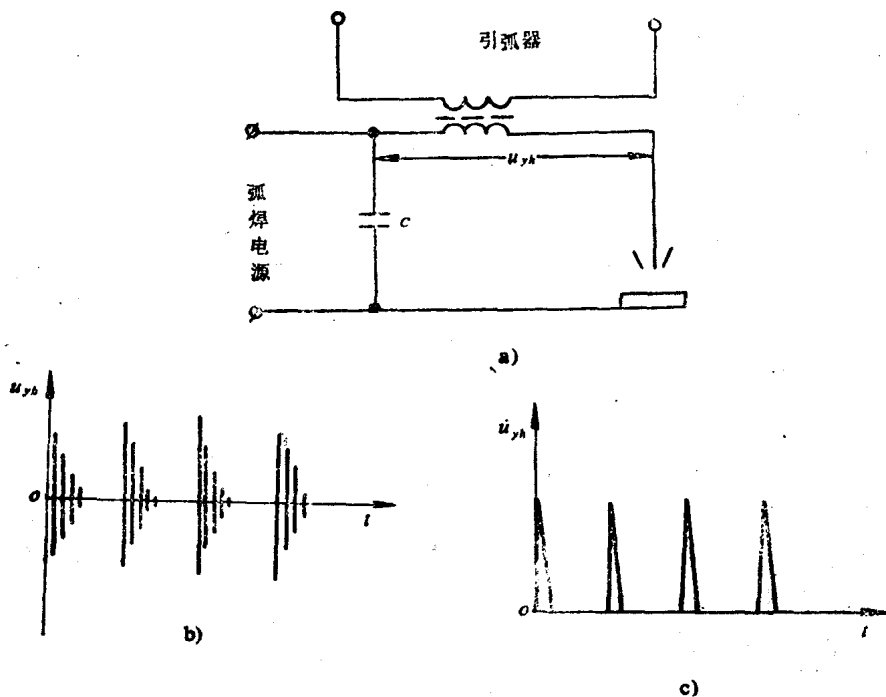


图1-3 高频和脉冲引弧示意图

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

## § 1-2 焊接电弧的结构和伏安特性

前面分析了焊接电弧的物理本质和形成。现在介绍它的结构和电特性，即伏安特性，包括静特性和动特性。直流电弧和交流电弧是焊接电弧的两种最基本的形式。为了便于理解，首先从直流焊接电弧（以下简称焊接电弧）入手讨论。

### 一、焊接电弧的结构及压降分布

电弧沿着其长度方向分为三个区域，见图 1-4。电弧与电源正极所接的一端称阳极区，与负极相接的那端称阴极区。阴极区和阳极区之间的部分称弧柱区，或称正柱区、电弧等

离子区。阴极区的宽度仅约  $10^{-5} \sim 10^{-6} \text{cm}$ ，而阳极区的宽度仅约  $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{cm}$ ，因此，电弧长度可以认为近似等于弧柱长度。弧柱部分的温度高达  $5000 \sim 50000 \text{K}$ 。

沿着电弧长度方向的电位分布是不均匀的。在阴极区和阳极区，电位分布曲线的斜率很大，而在弧柱区电位分布曲线则较平缓，并可认为是均匀分布的，见图 1-4。这三个区的电压降分别称为阴极压降  $U_c$ 、阳极压降  $U_a$  和弧柱压降  $U_s$ 。它们组成了总的电弧电压  $U_f$ ，并可用下式表示：

$$U_f = U_c + U_a + U_s \quad (1-1)$$

由于阳极压降基本不变（可视为常数），而阴极压降  $U_c$  在一定条件下（指的是电弧电流、电极材料和气体介质等），基本上也是固定的数值；弧柱压降  $U_s$  则在一定气体介质下与弧柱长度成正比。显而易见，弧长不同，电弧电压也不同。

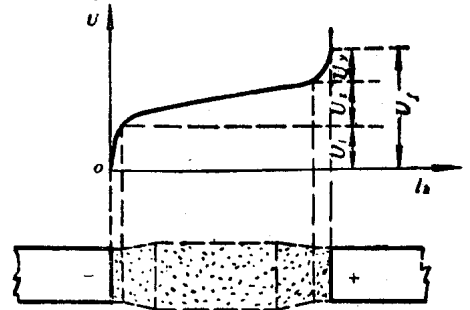


图1-4 电弧结构和电位分布

## 二、焊接电弧的电特性

焊接电弧的电特性包括静特性和动特性。

### (一) 焊接电弧的静特性

一定长度的电弧在稳定状态下，电弧电压  $U_f$  与电弧电流  $I_f$  之间的关系，称为焊接电弧的静态伏安特性，简称伏安特性或静特性。可用下列函数表示：

$$U_f = f(I_f) \quad (1-2)$$

焊接电弧是非线性负载，即电弧两端的电压与通过电弧的电流之间不是成正比例关系。当电弧电流从小到大在很大范围内变化时，焊接电弧的静特性近似呈 U 形曲线，故也称为 U 形特性，见图 1-5 所示。

U 形静特性曲线可看成由三段(I、II、III)组成。在 I 段，电弧电压随电流的增加而下降，是下降特性段；在 II 段，呈等压特性，即电弧电压不随电流而变化，是平特性段；在 III 段，电弧电压随电流增加而上升，是上升特性段。

现在研究静特性各段形状的形成机理。由式(1-1)可知，电弧电压是阴极压降、阳极压降和弧柱压降之和。因此，只要弄清了每个区域的压降和电流的关系，则不难理解为何会形成 U 形特性。

在阳极区，阳极压降  $U_a$  基本上与电流无关， $U_a = f(I_f)$  为一水平线，见图 1-6  $U_a$  曲线。

在阴极区，当电弧电流  $I_f$  较小时，阴极斑点（在阴极上电流密度高的光点）的面积  $S_c$  小于电极端部的面积。这时， $S_c$  随  $I_f$  增加而增大，阴极斑点上的

电流密度  $j_c = \frac{I_f}{S_c}$  基本上不变。这意味着阴极的电场强度不变，因而  $U_c$  也不变。此时， $U_c = f(I_f)$  为一水平线。到了阴极斑点面积和电极端部面积相等时， $I_f$  继续增加，则  $S_c$  不能再扩张，于是  $j_c$  也就随着增大了。这势必造成  $U_c$  增大，以加剧阴极的电子发射。因此， $U_c$  随  $I_f$  的增大而上升。见图 1-6  $U_c$  曲线。

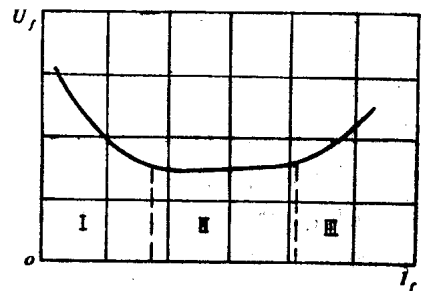


图1-5 焊接电弧的静特性曲线形状

在弧柱区，可以把弧柱看成是一个近似均匀的导体。其电压降可用下式表示：

$$U_s = I_f R_s = I_f \frac{l_s}{S_s \gamma_s} = j_s \frac{l_s}{\gamma_s} \quad (1-3)$$

式中  $R_s$  为弧柱电阻； $l_s$  为弧柱长度； $S_s$  为弧柱截面积； $\gamma_s$  为弧柱的电导率； $j_s$  为弧柱的电流密度。

可见，当弧柱长  $l_s$  一定时， $U_s$  与  $j_s$  和  $\gamma_s$  有关。可把  $U_s$  与  $I_f$  的关系分为  $ab$ 、 $bc$ 、 $cd$  三段（见图 1-6 的  $U_s$  曲线）来分析。

在  $ab$  段：电弧电流较小， $S_s$  随  $I_f$  的增加而扩大，而且  $S_s$  扩大较快，使  $j_s = \frac{I_f}{S_s}$  降低。

同时， $I_f$  增加使弧柱的温度和电离度均增高，因而  $\gamma_s$  增大。由式 (1-3) 可见， $j_s$  减小和  $\gamma_s$  增大，都会使  $U_s$  下降，所以  $ab$  段是下降形状。

在  $bc$  段：电弧电流中等大小， $S_s$  随  $I_f$  成比例地增大， $j_s$  基本不变，此时  $\gamma_s$  不再随温度增加。

故  $U_s = j_s \frac{l_s}{\gamma_s} \approx$  常数， $bc$  段为水平形状。

在  $cd$  段：电弧电流很大，随着  $I_f$  的增加， $\gamma_s$  仍基本不变，但  $S_s$  不能再扩大了， $j_s$  随着  $I_f$  的增加而增加，所以  $U_s$  随  $I_f$  的增加而上升。 $cd$  段为上升形状。

综上所述，把  $U_s$ 、 $U_i$  和  $U_e$  曲线叠加起来，即得到 U 形静特性曲线—— $U_f = f(I_f)$ 。

对于各种不同的焊接方法，它们的电弧静特性曲线是有所不同的，而且在其正常使用范围内，并不包括电弧静特性曲线的所有部分。静特性的下降段由于电弧燃烧不稳定而很少采用。手工弧焊、埋弧焊多半工作在静特性的水平段，即电弧电压只随弧长而变化，与焊接电流关系很小；不熔化极气体保护焊、微束等离子弧焊、等离子弧焊也多半工作在水平段；当焊接电流较大时才工作在上升段；熔化极气体保护焊（氩弧焊和  $\text{CO}_2$  焊）和 underwater 焊接基本上工作在上升段。几种常用焊接方法的电弧静特性曲线，见图 1-7。

## (二) 焊接电弧的动特性

上面讨论的电弧静特性是在稳定状态下得到的，例如图 1-8 中的  $abcd$  电弧静特性曲线。但是，在某些焊接过程中，电流和电压都在高速变动的时候，使电弧达不到稳定状态。

所谓焊接电弧的动特性，是指在一定的弧长下，当电弧电流很快变化的时候，电弧电压和电流瞬时值之间的关系—— $u_f = f(i_f)$ 。

如果图 1-8 中的电流由  $a$  点以很快的速度连续增加到  $d$  点，则随着电流增加，使电弧空间的温度升高。但是后者的变化总是滞后于前者。这种现象称为热惯性。当电流增加到  $i_t$  时，由于热惯性关系，电弧空间温度还没达到  $i_t$  时稳定状态的温度。由于电弧空间温度低，弧柱导电性差，阴极斑点与弧柱截面积增加较慢，维持电弧燃烧的电压不能降至  $b$  点，而将提高到  $b'$  点。以此类推。对应于每一瞬间电弧电流的电弧电压，就不在  $abcd$  实线上，而是在  $ab'c'd$  虚线上。这就是说，在电流增加的过程中，动特性曲线上的电弧电压，比静特性曲线上的电弧电压值高。反之，当电弧电流由  $i_t$  迅速减小到  $i_t$  时，同样由于热惯性的影响，

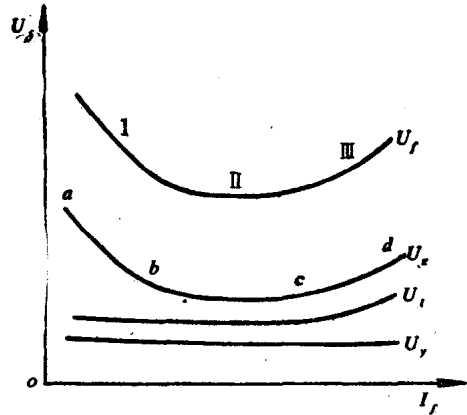


图 1-6 电弧各区域的压降与电流的关系图



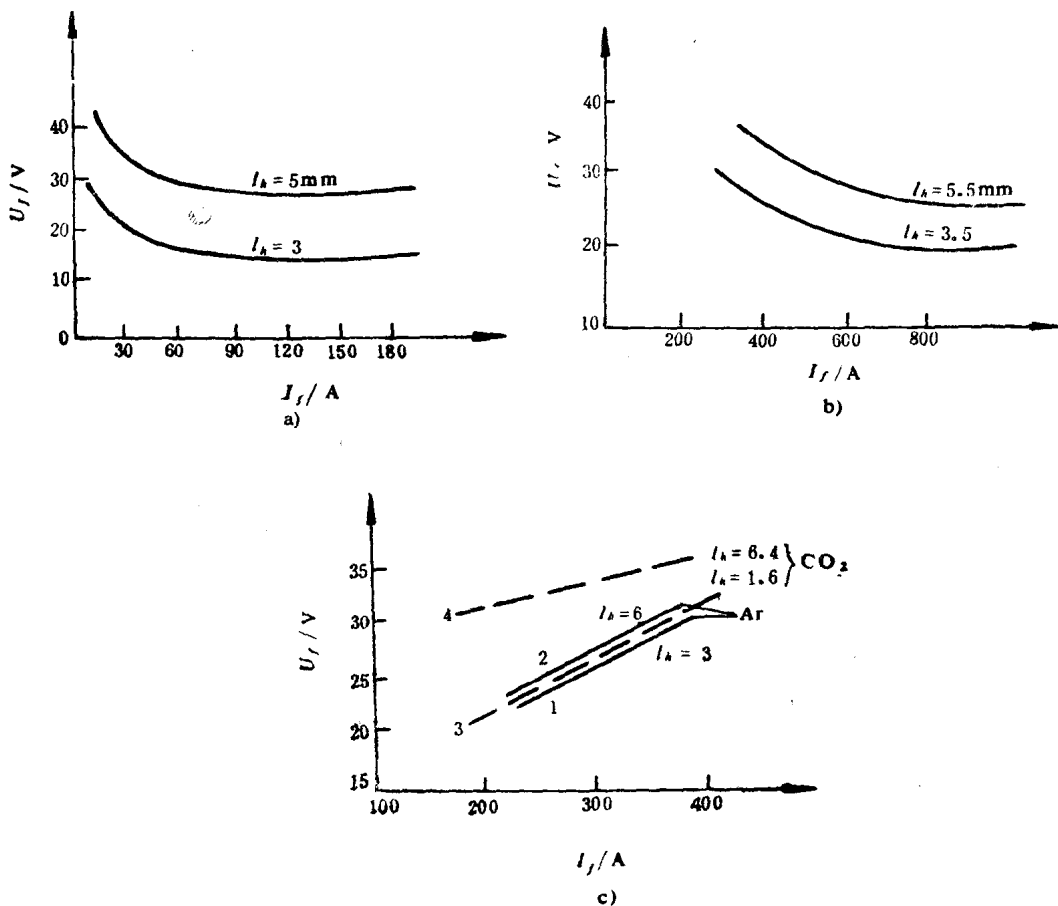


图1-7 几种常用弧焊方法的电弧静特性曲线  
 a) 手工弧焊 b) 埋弧焊 (直流电源, 焊丝  $\phi = 2.4\text{mm}$ )  
 c) 熔化极气体保护焊 (1, 2 曲线, 焊丝  $\phi = 1.6\text{mm}$ )

电弧空间温度来不及下降。此时, 对应每一瞬时电弧电流的电压将低于静特性之电压, 而得到  $ab''c''d$  曲线。图中的  $ab''c''d$  和  $dc'b'a$  曲线为电弧的动特性曲线。电流按不同规律变化时将得到不同形状的动特性曲线。电流变化速度愈小, 静、动特性曲线就愈接近。

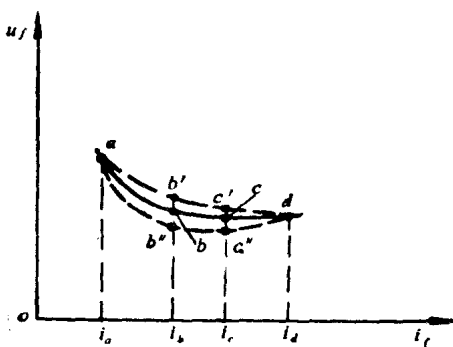


图1-8 电弧的动特性曲线