

高等学校试用教材

# 弧焊电源

华南工学院黄石生主编

机械工业出版社

754341

高等学校试用教材

# 弧 焊 电 源

华南工学院黄石生 主编



机械工业出版社



A729983

**内容简介** (弧焊电源) 主要论述焊接电弧的电特性, 弧焊工艺对弧焊电源的基本要求, 以弧焊变压器、硅弧焊整流器、脉冲弧焊电源为重点, 分别介绍了弧焊变压器、硅弧焊整流器、可控硅式弧焊整流器、直流弧焊发电机、脉冲弧焊电源和晶体管式弧焊电源的基本原理、结构特点及应用。此外, 对弧焊电源的选择原则、安装和使用, 也作了简单的介绍。

书中内容着重加强基础理论, 并与实践相结合, 反映了当前国内的先进技术水平和新的科研成果。

此书主要是供高等工业院校焊接专业师生作教材使用, 亦可供焊接工程技术人员参考。

## 弧 焊 电 源

华南工学院黄石生 主编

\*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

四川新华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本 787 × 1092 1/16 · 印张 15 1/2 · 字数 379 千字

1980 年 7 月成都第一版·1980 年 7 月成都第一次印刷

印数 0,001—6,500 · 定价: 1.60 元

\*

统一书号: 15033 · 4845

# 前 言

本书是根据高等学校一机部对口专业座谈会的精神，和焊接专业教材编写会议所决定的教学大纲编写的。

本书论述焊接电弧的电特性，弧焊工艺对弧焊电源的基本要求，以弧焊变压器、硅弧焊整流器、脉冲弧焊电源为重点，介绍各类弧焊电源的基本原理、结构特点及其应用。并介绍弧焊电源的选择原则、安装和使用。本书主要供高等工业学校焊接专业师生作试用教材，亦可供焊接工程技术人员参考。

本书由华南工学院黄石生同志主编、侯迈同志和华中工学院王文翰同志协编，并由沈阳机电学院董挺同志主审、梁文广及洪秋华同志协审。在编书过程中，承蒙有关院校、科研机关、工厂企业等单位的大力支持和帮助，在此谨致衷心的感谢。

一九七九年五月

# 目 录

绪 论	1
一、弧焊电源的分类、特点和用途	1
二、国内外弧焊电源的发展简史	3
三、本课程的性质和任务	4
第一章 焊接电弧及其电特性	6
§ 1-1 焊接电弧的物理本质	6
§ 1-2 焊接电弧的结构和伏安特性	9
§ 1-3 交流电弧	16
§ 1-4 焊接电弧的分类及其特点	24
第二章 对弧焊电源的要求	28
§ 2-1 对弧焊电源外特性的要求	28
§ 2-2 对弧焊电源空载电压的要求	34
§ 2-3 对弧焊电源调节特性的要求	35
§ 2-4 对弧焊电源动特性的要求	38
第三章 弧焊变压器	44
§ 3-1 弧焊变压器的特点及其分类	44
§ 3-2 弧焊变压器的漏抗	47
§ 3-3 动铁式弧焊变压器	56
§ 3-4 动圈式弧焊变压器	63
§ 3-5 串联电抗器式弧焊变压器	68
第四章 硅弧焊整流器	80
§ 4-1 硅弧焊整流器的组成和分类	80
§ 4-2 增强漏磁类硅弧焊整流器	82
§ 4-3 弧焊整流器中的磁放大器	87
§ 4-4 无反馈磁放大器式硅弧焊整流器	98
§ 4-5 全部内反馈磁放大器式硅弧焊整流器	101
§ 4-6 部分内反馈磁放大器式硅弧焊整流器	109
§ 4-7 外反馈磁放大器式硅弧焊整流器和多特性硅弧焊整流器	115
§ 4-8 弧焊整流器动特性的改善	117
§ 4-9 其它型式硅弧焊整流器	119
§ 4-10 硅弧焊整流器常见故障的分析	130
第五章 可控硅式弧焊整流器	131
§ 5-1 陡降外特性可控硅式弧焊整流器的波形连续问题	131
§ 5-2 ZDK—500型可控硅式弧焊整流器	132

第六章 直流弧焊发电机	147
§ 6-1 直流弧焊发电机的分类及工作原理	147
§ 6-2 差复激式弧焊发电机	157
§ 6-3 裂极式弧焊发电机	165
§ 6-4 换向极式弧焊发电机	169
§ 6-5 多站式弧焊发电机	172
第七章 脉冲弧焊电源	175
§ 7-1 脉冲弧焊电源的特点和分类	175
§ 7-2 磁放大器式脉冲弧焊电源	180
§ 7-3 可控硅式脉冲弧焊电源	188
§ 7-4 其它型式脉冲弧焊电源	207
第八章 弧焊电源的选择、安装和使用	212
§ 8-1 弧焊电源的选择	212
§ 8-2 弧焊电源的安装和使用	216
§ 8-3 节约用电和安全用电	223
附录:	226
附录一 符号说明	226
附录二 电焊机型号编制办法	227
附录三 常用弧焊电源的主要技术数据	230
附录四 弧焊变压器的漏抗计算	236
附录五 主要参考资料	243

# 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、农业、石油、化工、机械、造船、航空和海洋开发等方面的发展有着直接的关系。随着我国实现四个现代化的需要，焊接技术将越来越显示出它的重要性。

电弧焊接是焊接方法中的一种，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，需要由对电弧供以电能的电源装置和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）或送丝机构（半自动焊）、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，是对焊接电弧供以电能的一种装置，这种装置具有符合电弧焊接所要求的电气特性，也正是本课程中将给予较为系统讲述的内容。至于与弧焊电源配套的其他设备部分将在《焊接方法与设备》的课程中讲述。

显然，没有性能稳定的弧焊电源，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，要实现先进的焊接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。

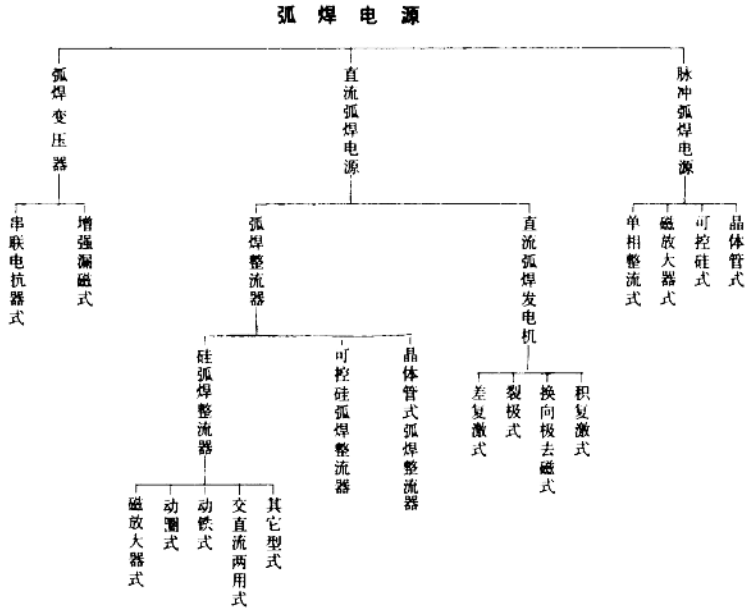
## 一、弧焊电源的分类、特点和用途

### （一）弧焊电源的分类

弧焊电源按电流种类可分为三大类型：

1. 交流弧焊电源 如弧焊变压器。
2. 直流弧焊电源 如弧焊整流器和直流弧焊发电机。弧焊整流器又可分为硅弧焊整流器、可控硅式弧焊整流器和晶体管式弧焊整流器。
3. 脉冲弧焊电源。

在每一类型的弧焊电源中根据其结构特点不同可细分为多种型式，见下图示：



弧焊电源分类图示

## (二) 各种弧焊电源的特点及应用范围

1. 弧焊变压器 它系交流弧焊电源，用以将电网的交流电变成适宜于弧焊的交流电，由初、次级相隔的主变压器及所需的调节和指示装置等组成。它具有结构简单、易造易修、成本低、磁偏吹很小、空载损失小、噪音小等优点。但存在电弧稳定性较差（相对于直流弧焊电源）、功率因数较低等缺点。它一般应用于手工弧焊（使用酸性焊条）、埋弧焊（大容量的弧焊变压器）和钨极氩弧焊等。

2. 弧焊整流器 它是把交流电经整流装置获得直流电的弧焊电源。一般由初、次级绕组相隔的主变压器、半导体整流元件组以及为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、噪音小等优点。其中，磁放大器式、可控硅式和晶体管式等弧焊整流器还可远距离调节，能自动补偿电网电压波动对输出电压、电流的影响。它可作各种弧焊的电源。

3. 直流弧焊发电机 直流弧焊发电机系直流弧焊电源，一般由特种直流发电机，以及为获得所需外特性的调节装置等组成。按不同的驱动动力分类：以电力驱动并组成一体，称为直流弧焊发电机；以柴（汽）油机驱动并组成一体，称直流弧焊柴（汽）油发电机。

直流弧焊发电机与弧焊整流器相比，缺点是噪音及空载损失较大，效率稍低而价格较高；优点是过载能力强，输出脉动小，电网电压波动的影响小。它可用作各种弧焊的电源。

4. 脉冲弧焊电源 焊接电流以低频调制脉冲方式馈送，一般由普通的弧焊电源与适当的脉冲发生电路组成。按其结构特点，可分为单相整流式、磁放大器式、可控硅式和晶体管式等。按不同的方法可以作出不同的分类。它主要用作气体保护焊和等离子弧焊以及手工弧焊的电源，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，对于热敏感性大的高合金材料、薄板和全位置等焊接具有独特的优点。



## 二、国内外弧焊电源的发展简史

焊接技术的发展是与近代工业技术和科学的进展密切地联系在一起。弧焊电源也随着焊接技术的发展而不断地发展起来。

1802年俄国学者发现了电弧，并指出了可以利用它熔化金属，但在当时工业水平下，还不能为维持大能量电弧提供有足够功率的电源，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，而且成本又较低，弧焊电源本身也有了很大的改进。在二十世纪二十年代，除直流弧焊电源外，已开始采用构造简单、成本低廉的交流弧焊变压器。

二十世纪三十年代，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更高的产品，如车辆、大型远程航行的船舶、锅炉和桥梁等。加之冶金科学的发展，又出现了厚涂料的优质焊条，更显示了焊接方法的优越性。为适应焊接生产量的迅速增加，至三十年代后期研究成功了焊剂层下自动埋弧焊。二十世纪四十年代初，焊接科学技术的发展又迈入了一个新时期。首先，由于航空、原子能等技术的发展，要求焊接以新材料制成的新产品。这些新材料是化学活泼性强的金属，如铝、镁、钛、锆及其合金等，而这些新产品对焊接质量要求很高，氩弧焊就是为适应这种要求而发展起来的新焊接方法。五十年代又相继出现了 $\text{CO}_2$ 焊等各种气体保护焊。紧接着又成功研究了高能量密度的等离子弧焊。随着这些新型焊接工艺方法的涌现，弧焊电源也相应有了大幅度的发展。四十年代开始出现用硒片制成的弧焊整流器。到了六十年代，大容量硅整流元件、可控硅元件问世，为发展新的硅弧焊整流器打开了新的道路。在六、七十年代期间，可以说，弧焊电源的发展实现了新的飞跃：

1. 出现了多种型式的弧焊整流器 例如抽头式、磁放大器式、动铁式、动圈式、可控硅式、滑动变压器式、附加变压器式、高压引弧式和交、直流两用式等弧焊整流器。它们具有代替直流弧焊发电机的趋向。有些先进的工业国家，直流弧焊发电机除特殊用途外，基本已被弧焊整流器所取代。

2. 出现了多种型式的脉冲弧焊电源 例如单相整流式、磁放大器式、可控硅式和晶体管式等脉冲弧焊电源，为进一步提高焊接质量和适应全位置焊接自动化，提供更为有利的条件。

3. 七十年代出现了新型弧焊电源——晶体管式弧焊电源 据一些学者认为，这是一种很有发展前途的弧焊电源。目前，它还处在进一步试验阶段。

在这期间，弧焊电源的新飞跃，不仅表现在种类的大量增加，还表现在广泛地应用电子学、控制技术、电子计算机等方面的理论知识和最新成就，来不断地提高弧焊电源的质量，改善电气性能，实现高度自动化调节和革新其制造工艺等。

例如在弧焊变压器方面，它虽有不足之处，但由于具有前述一系列优点，因而与直流弧焊电源比较，目前它的使用仍占较大的比例，而且针对其弱点，还在不断的改进和完善之中。如为了提高其焊接性能，采用改善焊接电流波形办法，使电流过零点时具有较快的增长率；采用电子控制技术（可控硅、晶体管之类）进行调节和控制，除了可以任意组成各种伏安特性之外，还易于保持焊接电流或电压恒定不变、进行网路电压补偿和热补偿；采用远距离调

节,采用移相补偿电容器提高功率因数和设置防触电安全装置等等。这样,有可能使这种在目前包括先进工业国家在内,还用得较多的交流弧焊变压器的使用范围扩大了,甚至可部分代替直流弧焊电源来使用。有些经改进的弧焊变压器,用来焊铝时可不加稳弧高压电也照样很稳定。

在弧焊整流器方面,采用多特性(平特性和下降特性)、多用性(交、直流两用)的弧焊整流器。采用单旋钮控制,即焊接电流和电压的调节,采用单一个旋钮控制,可得到理想的焊接规范,并大大简化了操作;采用模拟控制,模拟回路的电流值可采用为焊接回路的 $1/1000$ ,其他与主回路完全相似,输出端接上与电弧相当的电阻负载,并构成反馈系统,可达到改善弧焊电源的动特性和消除电网电压波动影响的效果;采用集成电路式电压和温度补偿控制,它用在可控硅式弧焊整流器中,当电网电压和周围温度变化时,由比较回路取出信号,经集成电路式运算放大器的作用,使焊接电流和电压维持不变。采用精密控制电源,如在1安以下时,调节精度达 $0.05$ 安,并可自动消除电网电压和弧长变化的影响;在弧焊整流器内部设有电流递增和电流衰减环节,防止引弧时电流冲击和提高填补弧坑的质量。应用于全位置自动焊的弧焊电源,为保证各个位置均一无异的焊缝成形,采用了程序控制、电子计算机技术对焊接规范参数实现自动调节,精确地控制了熔池的深度和成形系数,提高熔敷效率。这种程控数控技术应用于脉冲弧焊电源,其优越性尤为突出。

在直流弧焊发电机方面,虽然有被弧焊整流器所取代的趋向,但有些国家还对其加以改进提高,尤其是用于野外作业的直流弧焊柴油发电机—整流器组,它与带电刷的直流弧焊发电机相比,效率可提高 $20\%$ ,重量减轻 $50\%$ 。

此外,在弧焊电源的制造工艺上也有不断的改进。例如,提高主要零部件的通用化程度和加工精度,改进铁心叠装和绕线工艺,采用加压叠装代替插件叠装铁心,采用盘式线圈,采用H级绝缘,改革铁心结构形式等使产品结构、体积、重量和质量均有显著的提高。

我国解放前,长期处于半封建、半殖民地社会,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,全国没有一个电弧焊机制造厂,焊接材料和电焊机几乎全依赖于国外进口。

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,电弧焊机(包括弧焊电源)产品由测绘、仿制一般的通用电弧焊机,逐步过渡到自行设计和制造各种大型、特种、专用电弧焊机、弧焊电源。特别是六、七十年代,新型弧焊电源、电弧焊机相继出现,现在国外所拥有的各种基本型式的弧焊电源、电弧焊机,我国大多已能自己设计和制造了。已生产出来并投入使用的就有上百个品种。全国生产弧焊电源、电弧焊机的工厂就有上百家。但目前我国弧焊电源、电弧焊机制造、研究的状态和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、质量和自动化程度还远不能满足各使用部门的要求,与世界先进工业国家比较,尚存在较大的差距,为了实现社会主义的四个现代化的需要,还必须大搞科学研究,特别是基础理论研究,大搞技术改革,促进弧焊电源、电弧焊机行业的迅猛发展。

### 三、本课程的性质和任务

本课程是一门专业课,其任务是使学生掌握各类型弧焊电源的基本理论、基础知识和实

验技能，并能根据不同的焊接方法正确的选择、使用弧焊电源。具体来说，学生通过本课程的学习，应达到以下要求：

(1) 了解电弧产生的机理，电弧伏安特性，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和规范稳定性的关系，并能从工艺角度对弧焊电源提出要求。

(3) 掌握常用弧焊电源的基本结构、基本原理，熟悉它的性能和特点。

(4) 能正确选择与合理使用各种弧焊电源，能测试弧焊电源的主要技术性能，并具有分析弧焊电源常见故障的能力。

# 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、结构、伏安特性,着重研究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

电弧是电弧焊的热源,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。因此,必须研究焊接电弧的物理本质和电弧的电特性才能进而研究电弧对弧焊电源的要求。

### 一、气体游离、电子发射和带电粒子的中和

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)游离成为离子和电子。同时,为了使电弧维持燃烧,就必须不断输送电能给电弧,以补充能量的消耗,这就要求电弧的阴极不断发射电子。

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降低、电流密度大,而气体的游离和电子发射是电弧中最基本的物理现象。

(一) 气体的游离 中性的气体粒子在得到一定能量之后分离成电子和离子的过程,称为气体的游离。

在这里把气体分子和原子以及离子和电子都简称为气体粒子。

气体的游离根据其能量的来源可分以下几种:

1. 撞击游离 气体粒子在运动过程中相互碰撞得到足够的能量而引起游离的现象称为撞击游离。撞击并不一定都能引起游离,只有撞击粒子传给被撞击粒子的动能大于该元素的游离势(即为了使电子释放所需要的能量)时,才会释放出自由电子而发生中性粒子的游离。常见气体和元素的游离势 $E_i$ 见表1-1。

当撞击动能较小时,只引起被撞粒子的电子由低能级轨道向高能级轨道的转移,称为激励,这是一种不稳定状态。

2. 光游离 气体原子或分子吸收了光射线的光子能而产生的游离。并非所有波长的光射线都能引起光游离,只有光射线波长小于极限波长(即能引起光游离的最小波长)时才能产生。所有气体的光游离极限波长都比紫外线短,因此,只有波长比紫外线短的光射线才能引起光游离。

3. 热游离 在高温下,具有高动能的气体粒子(分子或原子)彼此作非弹性碰撞而引起的游离,称为热游离。热游离在 $2000^{\circ}\text{K}$ 时已开始产生,在弧柱温度( $5000^{\circ}\text{K}$ 至 $50000^{\circ}\text{K}$ 以上)时就非常明显了。

在这里应指出,在气体粒子产生游离的同时,带异性电荷的粒子也会发生碰撞使正离子和电子复合成中性粒子,即产生中和现象。当游离速度和复合速度相等时,游离趋于相对稳

定的动平衡状态。此外，原子或分子除释放出自由电子形成正离子和电子过程之外，实际上，有时游离气体中还存在着原子或分子结合电子成为负离子的过程，而且负离子的出现对于电弧的物理过程影响很大。气体原子和一个电子结合生成负离子时所放出的能量称为电子亲和能，以  $E_e$  表示。亲和能愈大，原子就愈易和电子结合。但是，愈难失去电子，即游离势愈高的原子，并不一定就愈易和电子结合。只有游离势高，亲和能也高的元素才容易生成负离子。元素的游离势与亲和能之和称为电负性。电负性愈大，原子愈可能得到电子。电子亲和能  $E_e$  和元素的电负性（以Li的电负性为1计算）见表1-1。

表1-1 电弧中常见气体及元素的游离势  $E_i$ 、逸出功  $\phi$ 、亲和能  $E_e$  及电负性值

气体	$E_i$ (ev)	$E_e$ (ev)	电负性	元素	$E_i$ (ev)	$E_e$ (ev)	$\phi$ (ev)	电负性	元素	$E_i$ (ev)	$E_e$ (ev)	$\phi$ (ev)	电负性
He	24.58	< 0	—	Al	5.98	0.52~ 1.19	4.25	1.5	Cs	3.38	0.23	1.81	0.7
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	1.6	K	4.34	0.30	2.22	0.8
N	14.53	0.54	3.0	Mo	7.10	1.3	4.29	—	Na	5.14	0.35	2.33	0.9
H <sub>2</sub>	15.60	< 0	—	Mn	7.43	—	3.38	—	Ba	5.21	—	2.4	0.9
H	13.60	0.8	2.1	Ni	7.63	1.28	4.91	—	Li	5.39	0.616	2.38	1.0
O <sub>2</sub>	12.5	0.44	—	Mg	7.64	—	3.64	1.2	La	5.61	—	3.3	—
O	13.61	2.0	3.5	Cu	7.72	1.8	4.36	—	Ca	6.11	—	2.96	1.0
CO <sub>2</sub>	13.8	—	—	Fe	7.87	0.58	4.40	—	B	8.30	0.3	4.30	2.0
CO	14.01	—	—	W	7.98	—	4.50	—	I	10.45	3.17	2.8~ 6.8	2.4
HF	15.57	—	—	Si	8.15	1.46	4.80	1.8	Br	11.84	3.51	—	2.8
				Cd	8.96	—	4.10	—	Cl	13.01	3.76	—	3.0
				C	11.26	1.33	4.45	2.5	F	17.42	3.62	—	4.0

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。

(二) 电子发射 固体或液体表面的原子或分子，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游离势的  $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{4}$ 。逸出功不仅与元素种类有关（见表1-1），也与物质表面状态有很大关系，如表面有氧化物或其它杂质均可大大减少逸出功。

电子发射是引弧和维持电弧稳定燃烧的一个很重要的问题。按其能量来源不同可分为光电发射、热发射、自发发射和重粒子碰撞发射。

1. 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，光电发射也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。

2. 热发射 物质的固体或液体表面受热后，其中有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。在温度不高时，热发射很弱，随着温度的上升，热发射迅速增强，但升到很高的温度后热发射的增强速度会减慢下来。金属表面有氧化物及杂质时，逸出功大为降低。所以，弧焊时，电极表面的电子发射能力可以通过渗入某些物质或氧化物来提高。例如钨极上含有钍或铈的氧化物时，热发射能力在高

温下可增加数千倍。

3. 自发射 物质的固体或液体表面，虽然温度不甚高，但当存在强电场并在表面附近形成较大的电位差时，在阴极有较多的电子发射出来，这就称为自发射，或称强电场发射。

电场愈强，则在既定温度下发射电子的电流密度就愈大。自发射在焊接电弧中也起着重要作用，特别是在非接触式引弧或电极为低熔点材料时，其作用更为明显。

4. 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。

综上所述，焊接电弧是气体放电的一种形式。焊接电弧的产生和维持是由于在光、热、电场和动能的作用下，气体粒子不断的被激励、游离（同时又存在着中和）以及电子发射的结果。

## 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。引弧过程的电压和电流的变化大致如图 1-1 所示。

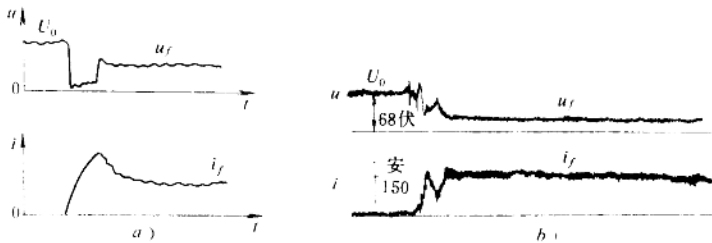


图1-1 引弧过程的电压、电流变化

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

在弧焊电源接通后，电极（焊条或焊丝等）与工件直接接触短路并随后拉开而引燃电弧。这是一种最常用的引弧方式。

当接触短路时，由于电极和工件表面都不是绝对平整的，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，甚至蒸发、汽化，引起相当强烈的热发射和热游离。随后在拉开电极瞬间，电弧间隙极小，例如只有 $10^{-6}$ 厘米时，使其电场强度达到很大的数值（可达 $10^6$ 伏特/厘米）。这样，即使在室温下都可产生明显的自发射，同时，又使已产生的带电粒子被加速，并在高温条件下互相碰撞，引起

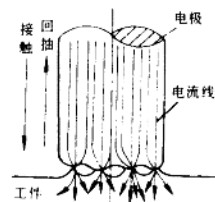


图 1-2 接触引弧示意图

撞击游离。随着温度的增加，光游离和热游离也进一步起作用，从而使带电粒子的数量猛增，维持电弧的稳定燃烧。在电弧引燃之后，游离和中和（消游离）处于动平衡状态，由于弧焊电源不断供以电能，新的带电粒子不断得到补充，弥补了消耗的带电粒子和能量。

由于电极材料不同，引弧时电子发射的主要形式是不同的。例如用高熔点的钨或碳作电极时，主要是热发射；而用低熔点的铜或铝作电极时，以自发射为主；用钢焊条或焊丝作电极时，由于其熔点介于前两者之间，故热发射和自发射均起一定作用。

## (二) 非接触引弧

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点燃，这就称为非接触引弧。

非接触引弧一般是利用引弧器的，从原理上可分高频高压电引弧和高压脉冲引弧，见图 1-3 所示。高压脉冲一般采用 50~100 次/秒，电压峰值为 5000~10000 伏。高频电一般采用每秒振荡 50 次，每次振荡频率为 150~260 千赫左右，电压峰值为 2500~5000 伏。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中，由于引弧时电极不必跟工件短路，不仅不会污染工件的引弧点，而且也不会损坏电极端部的几何形状，还有利于电弧燃烧的稳定性。

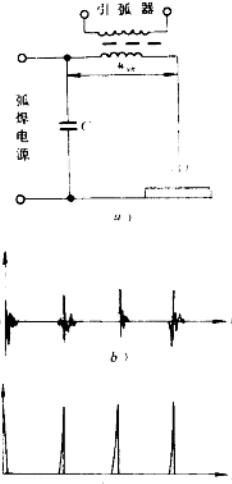


图 1-3 高频和脉冲引弧示意图

- a) 引弧器接入方式
  - b) 高频引弧电压波形
  - c) 脉冲引弧电压波形
- $u, u_0$ —引弧电压  $t$ —时间

## § 1-2 焊接电弧的结构和伏安特性

前面着重研究了焊接电弧的物理本质，现在进而研究焊接电弧的电特性，即伏安特性。为了便于研究，首先有必要了解一下直流焊接电弧（下面简称焊接电弧）的具体结构和压降分布的情况。

### 一、焊接电弧的结构及压降分布

电弧沿着其长度方向可以分为三个区域，见图 1-4 所示。紧靠负电极的区域称为阴极区，紧靠正电极的区域称为阳极区，它们之间是弧柱区。阴极区的距离约为  $10^{-5} \sim 10^{-6}$  厘米，而阳极区的距离约为  $10^{-3} \sim 10^{-4}$  厘米，因此，电弧长度可以认为等于弧柱长度。

电极上紧靠电弧并流过大部分电弧电流的那块光亮的斑点称为电极的活性斑点。在负极上的活性斑点称为阴极斑点；在正极上的活性

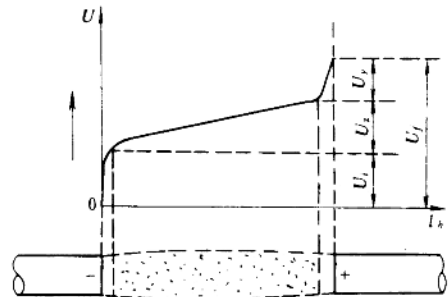


图 1-4 电弧结构和压降分布

斑点称为阳极斑点。阴极斑点的尺寸通常比阳极斑点小些。

沿着电弧长度方向的电压分布是不均匀的，靠近电极部分产生强烈的电压降，这是由于电弧电流通过金属电极和游离气体之间边界的特殊条件所引起的。沿着弧柱长度方向的电压降可以认为是均匀分布的。

总的电弧电压由三部分组成。

$$U_f = U_i + U_y + U_z \quad (1-1)$$

式中  $U_f$ ——电弧电压；

$U_i$ ——阴极压降；

$U_y$ ——阳极压降；

$U_z$ ——弧柱压降。

由于阳极压降基本不变（可视为常数）；而阴极压降  $U_i$  在一定条件下（电极材料和气体介质等）基本上也是固定的数值；弧柱压降  $U_z$  则在一定气体介质下和弧柱长度成正比。所以，电弧电压也可用下列经验公式表示：

$$U_f = a + bl \quad (1-2)$$

式中  $U_f$ ——电弧电压（伏）；

$a$ ——阴极和阳极压降之和，即  $U_i + U_y$ ；

$b$ ——弧柱单位长度压降（伏特/毫米）；

$l$ ——弧长（毫米），弧长等于弧柱长度。

下面对电弧的三个区域的物理过程作分析。

（一）弧柱区的物理过程 弧柱区是在阴极区和阳极区中间的区域。它的长度比阴极区和阳极区大得多，占电弧长度的绝大部分。

弧柱由电子、离子、激励和未激励的中性原子和分子组成。在弧柱中直接进行着带电粒子（电子和离子）的产生和复合的过程。由于弧柱含有大量的带电粒子，所以具有良好的导电能力。在弧柱的径向上，带电粒子分布不均匀，中心密度大而周围密度小。在弧柱长度方向上，带电粒子的分布是均匀的。

1. 弧柱区的电压 弧柱的电位梯度（或称电场强度）由总的弧柱电压降除以弧柱长度得到。一般认为它沿着电弧长度方向的电位梯度是不变的，其值随气体种类、电流值的不同而异，一般为 3 ~ 50 伏特/厘米。电位梯度与电流的乘积就是从电源供给单位弧长的功率。这个电能其中一部分是补偿散失到外围的热损失。在大气压下的电弧，热损失以热传导为主。如果电弧周围气体是  $H_2$ ，由于它较轻，粒子运动速度大，带走的热量多。为了达到能量的平衡，电弧需要输入的电能较大，即电位梯度较大。又如  $H_2$ 、 $N_2$  是双原子气体，在它们分离成原子时，所需带走的热量也较大，即电位梯度也大。氩是单原子气体，而且重量较大，所带走的热量较小，即电位梯度小。可见，弧柱的电压降与电弧间隙的气氛有关，弧柱的导热愈强，所需的弧柱电位梯度愈高，弧柱的电压降愈高。

此外，往电弧中加入高电负性元素而形成负离子时，也有相似的作用。这时电子数减少，弧柱维持同样电流所需的电压降增大。

在电极材料发生蒸发的情况下，弧柱电位梯度取决于电极材料的游离势  $E_i$ （表 1-2），可见，电极材料的游离势愈高，电弧的实际游离势也提高，弧柱的电位梯度也升高，使电压降增大。



表 1-2 弧柱电位梯度与电极材料的关系

参 数	电 极 材 料											
	Al	B	Sn	Pb	Ag	Ni	Cu	Pd	Cd	Pt	Zn	C
游离势 $E_i$ (eV)	5.98	8.30	7.34	7.42	7.57	7.63	7.72	8.33	8.99	9.0	9.39	11.26
弧柱电位梯度 $E$ (伏特/厘米)	24	38	35	42	37	38	38	42.5	55	57	51	85

2. 弧柱中的电流 弧柱中的电流即单位时间内在电弧电场方向上传递的电荷量。

正离子和电子在电场力作用下沿着电场力的方向相对着移动。这些带电粒子的移动就形成了电流，因此，弧柱的电流由电子流  $I_e$  和正离子流  $I_i$  组成。

由于电子质量比离子质量小得多，电子运动速度远远超过离子的运动速度， $I_i/I_e$  约为 1/1000，因此，弧柱中的电流主要是电子传递的。电弧中的电流可以近似等于电子流的数值。

$$\text{故总的电流 } I_f = I_e + I_i \approx I_e$$

电子流的数值可用下式求得：

$$I_e = en_e V_e S$$

式中  $e$ ——电子电荷量；

$n_e$ ——电子浓度；

$V_e$ ——在电场方向的电子速度；

$S$ ——弧柱截面积。

由此可见，电子浓度愈大，电弧电流值愈高。现分述如下：

(1) 电子浓度  $n_e$ ，取决于游离度的数值，它和弧柱气体的压力、温度和气氛的游离势有关，在这里游离势不能简单地用单一气体或单一元素的游离势的数值来分析，因为在实际条件下，焊接电弧不是燃烧在单一气体之中，而是在各种游离势值的气体和蒸气的混合气氛中燃烧。试验研究表明，具有最低游离势的元素最为重要，混合气体的实际游离势接近于该种元素的游离势，因此，可以通过改变电弧气氛的成分来调节实际的游离势。例如，采用含有稀土元素的活性焊丝或涂料将使游离度增大，增大电弧电流的数值，降低弧柱的电位梯度和弧柱温度，使弧柱尺寸加大，从而降低电弧的能量密度。

(2) 电子运动速度，电子运动速度正比于电场强度和电子迁移率：

$$V_e = b_e E$$

式中  $V_e$ ——电子速度；

$b_e$ ——电子迁移率；

$E$ ——弧柱电场强度。

而电子迁移率  $b_e$  与电子在电场内两次撞击之间的自由行程  $\lambda_e$  及电子的热运动速度  $V_0$  有关，可用下式表示：

$$b_e = \alpha \frac{e \lambda_e}{m V_0}$$

式中  $\alpha$ ——系数，接近于 1；

$e$ ——电子电荷量；

$m$ ——电子质量；