

# 弧焊电源

沈阳市机电工业学校 任廷春 主编



机械工业出版社

TG434.1  
5  
3

中等专业学校试用教材

# 弧 焊 电 源

沈阳市机电工业学校 任廷春 主编



机械工业出版社

622856



B

## 前 言

本书是根据原机械委中等专业学校《弧焊电源》教学大纲编写的。

书中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、弧焊整流器为重点，分别介绍了弧焊变压器、直流弧焊发电机、弧焊整流器、脉冲弧焊电源、晶体管式弧焊电源、逆变式弧焊电源、矩形波交流弧焊电源的基本原理和结构特点，对常用弧焊电源作了较详细的介绍，对弧焊电源的使用与维护也阐述得比较充分。本书主要供中等专业学校焊接专业师生作教材使用，对焊接工程技术人员也有一定的参考价值。

本书由沈阳市机电工业学校任廷春主编，四川省机械工业学校雷世明和新疆机械电子工业学校彭远江协编。雷世明编写第二章和第五章 1~3 节；彭远江编写第三章；其余部分由任廷春编写。主审为华中理工大学卢本。

在编写和审稿过程中得到许多兄弟学校有关同志的大力支持，在此向他们表示感谢。此外，编写时查阅了大量参考资料，也在此向原作（编）者表示谢意。

限于编者的水平，书中缺点和错误在所难免，衷心希望读者给以批评指正。

编者 1988年9月

# 目 录

绪论	1	一、结构原理	45
一、弧焊电源在电弧焊中的作用	1	二、对多站式弧焊变压器的要求	45
二、弧焊电源的分类、特点及用途	1	三、特点及产品介绍	46
三、弧焊电源的状况和发展趋势	3	§ 2-5 动圈式弧焊变压器	46
四、本课程的性质和任务	4	一、结构特点	46
第一章 焊接电弧及对弧焊电源的要求	5	二、工作原理	47
§ 1-1 焊接电弧的物理本质	5	三、规范调节	49
一、焊接电弧的分类	5	四、特点及产品介绍	50
二、电弧中带电粒子的产生	5	§ 2-6 动铁式弧焊变压器	52
三、焊接电弧的引燃	9	一、结构特点	52
四、焊接电弧的结构及电弧各区导电机构	10	二、工作原理	52
§ 1-2 焊接电弧的伏安特性	14	三、规范调节	54
一、电弧静特性	14	四、产品介绍	56
二、电弧动特性	18	§ 2-7 抽头式弧焊变压器	59
§ 1-3 对弧焊电源的要求	20	一、结构特点	59
一、对弧焊电源外特性的要求	20	二、原理及规范调节	59
二、对弧焊电源空载电压的要求	25	三、产品介绍	60
三、对弧焊电源调节特性的要求	25	第三章 直流弧焊发电机	61
四、对弧焊电源动特性的要求	28	§ 3-1 直流弧焊发电机的基本原理及分类	61
第二章 弧焊变压器	32	一、直流发电机的一般原理	61
§ 2-1 弧焊变压器的基本原理及分类	32	二、直流弧焊发电机的基本工作原理	64
一、对弧焊变压器的要求	32	三、直流弧焊发电机的分类	67
二、弧焊变压器的基本原理	34	§ 3-2 差复励式弧焊发电机	67
三、弧焊变压器的分类	36	一、工作原理	67
§ 2-2 分体式弧焊变压器	37	二、规范调节	68
一、结构特点	37	三、产品介绍	69
二、工作原理	37	§ 3-3 裂极式弧焊发电机	73
三、规范调节	39	一、结构特点	73
四、产品及其特点	40	二、工作原理	73
§ 2-3 同体式弧焊变压器	41	三、规范调节	74
一、结构特点	41	四、动特性	75
二、工作原理	41	§ 3-4 换向极式弧焊发电机	75
三、规范调节	43	一、结构特点	75
四、特点及产品介绍	43	二、工作原理	76
§ 2-4 多站式弧焊变压器	43	三、规范调节	77
		四、产品介绍	77

§ 3-5 多站式弧焊发电机 .....	78	六、交直流两用式弧焊整流器 .....	122
一、结构特点 .....	78	七、多站式弧焊整流器 .....	123
二、工作原理 .....	78	§ 4-8 晶闸管式弧焊整流器 .....	123
三、规范调节 .....	79	一、晶闸管式弧焊整流器的特点 .....	123
第四章 弧焊整流器 .....	80	二、电路 .....	124
§ 4-1 弧焊整流器的组成及分类 .....	80	三、工作原理 .....	124
一、弧焊整流器的组成 .....	80	四、调整与使用 .....	133
二、弧焊整流器的分类 .....	81	五、特点与用途 .....	133
§ 4-2 磁饱和电抗器 .....	82	六、晶闸管式弧焊整流器的特殊功能 控制 .....	134
一、磁饱和电抗器的作用 .....	82	第五章 新型弧焊电源 .....	136
二、磁饱和电抗器的结构和 基本工作原理 .....	83	§ 5-1 脉冲弧焊电源 .....	136
三、磁饱和电抗器的反馈 .....	86	一、脉冲弧焊电源的特点及分类 .....	136
§ 4-3 无反馈磁饱和电抗器式弧焊 整流器 .....	88	二、单相整流式脉冲弧焊电源 .....	138
一、结构 .....	88	三、磁饱和电抗器式脉冲弧焊电源 .....	140
二、工作原理 .....	88	四、晶闸管式脉冲弧焊电源 .....	143
三、产品介绍 .....	93	§ 5-2 晶体管式弧焊电源 .....	150
§ 4-4 全部内反馈磁饱和电抗器式弧焊 整流器 .....	94	一、概述 .....	150
一、结构 .....	94	二、模拟式晶体管弧焊电源 .....	151
二、工作原理 .....	95	三、开关式晶体管弧焊电源 .....	154
三、偏移绕组 .....	97	四、晶体管式脉冲弧焊电源 .....	157
四、电压负反馈绕组 .....	98	§ 5-3 逆变式弧焊电源 .....	158
五、产品介绍 .....	99	一、逆变式弧焊电源概述 .....	159
§ 4-5 部分内反馈磁饱和电抗器式弧焊 整流器 .....	103	二、逆变式弧焊电源的种类及特点 .....	160
一、结构 .....	103	§ 5-4 矩形波交流弧焊电源 .....	163
二、工作原理 .....	103	一、概述 .....	163
三、产品介绍 .....	107	二、逆变式矩形波交流弧焊电源 .....	164
§ 4-6 磁饱和电抗器式弧焊整流器的 动特性 .....	110	三、晶闸管电抗器式矩形波交流弧焊 电源 .....	165
一、磁饱和电抗器动特性在焊接回路 中的表现 .....	111	第六章 弧焊电源的使用与维护 .....	167
二、磁饱和电抗器式弧焊整流器动特 性的改善 .....	112	§ 6-1 弧焊电源的选择与安装 .....	167
§ 4-7 其它型式硅弧焊整流器 .....	113	一、弧焊电源的选择 .....	167
一、增强漏磁式弧焊整流器 .....	113	二、弧焊电源的安装 .....	170
二、抽头式弧焊整流器 .....	117	§ 6-2 弧焊电源的使用 .....	174
三、自调电感式弧焊整流器 .....	119	一、弧焊电源使用基本知识 .....	174
四、滑动变压器式弧焊整流器 .....	121	二、弧焊电源的串并联使用 .....	175
五、高压引弧式弧焊整流器 .....	122	三、弧焊电源的改装 .....	177
		§ 6-3 弧焊电源的故障排除 .....	182
		一、弧焊变压器的故障排除 .....	182
		二、直流弧焊发电机的故障排除 .....	182
		三、弧焊整流器的故障排除 .....	187
		四、故障排除实例 .....	188

VI

§ 6-4 节约与安全用电.....	189	二 电气图用图形符号.....	195
一、节约用电.....	189	三 电焊机型号编制方法.....	197
二、安全用电.....	191	四 常用弧焊电源的主要技术数据.....	201
附录.....	194	主要参考资料.....	206
一 符号说明.....	194		

# 绪 论

## 一、弧焊电源在电弧焊中的作用

焊接是一种不可拆卸的联接方法，是金属热加工方法之一。焊接与铸造、锻压、热处理、金属切削加工等加工方法一样，是机器制造、石油化工、矿山、冶金、航天、航空、造船、原子能、电子等工业部门中的一种基本生产手段。没有现代焊接技术的发展，就不会有现代的工业和科学技术。

电弧焊是焊接方法中应用最为广泛的一种。据一些工业发达国家的最新统计，电弧焊在焊接生产总量中所占的比例一般都在60%以上。根据其工艺特点不同，电弧焊可分为手工电弧焊、埋弧焊、气体保护电弧焊和等离子弧焊等多种。

不同材料、不同结构的工件，需要采用不同的电弧焊工艺方法，而不同的电弧焊工艺方法则需用不同的电弧焊机。例如，操作方便、应用最为广泛的手工电弧焊，需要由对电弧供电的电源装置和焊钳组成的手弧焊机；锅炉、化工、造船等工业广为应用的埋弧焊，需要由电源装置、控制箱和焊车等组成的埋弧焊机；适于焊接化学性质活泼金属的气体保护电弧焊，需要由电源装置、控制箱、焊车（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气体保护弧焊机；适于焊接难熔金属的等离子弧焊，则需要由电源装置、控制系统、焊炬或焊车（自动焊）、气路和水路系统等组成的等离子弧焊机。

弧焊电源是电弧焊机的重要组成部分，是对焊接电弧供给电能的装置，它应满足电弧焊所要求的电气特性，也正是本课程将要系统讲述的内容。与弧焊电源配套的其它装置和设备部分，将在《焊接方法与设备》课程中讲述。

显然，弧焊电源电气性能的优劣，在很大程度上决定了电弧焊机焊接过程的稳定性。没有性能稳定的弧焊电源，要保证焊接电弧的稳定燃烧和焊接过程的顺利进行，从而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和焊接过程自动化也是难以办到的。因此，我们应该对弧焊电源的基本理论、结构特点和电气性能进行深入的研究，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，使焊接质量和生产效率得到进一步提高。

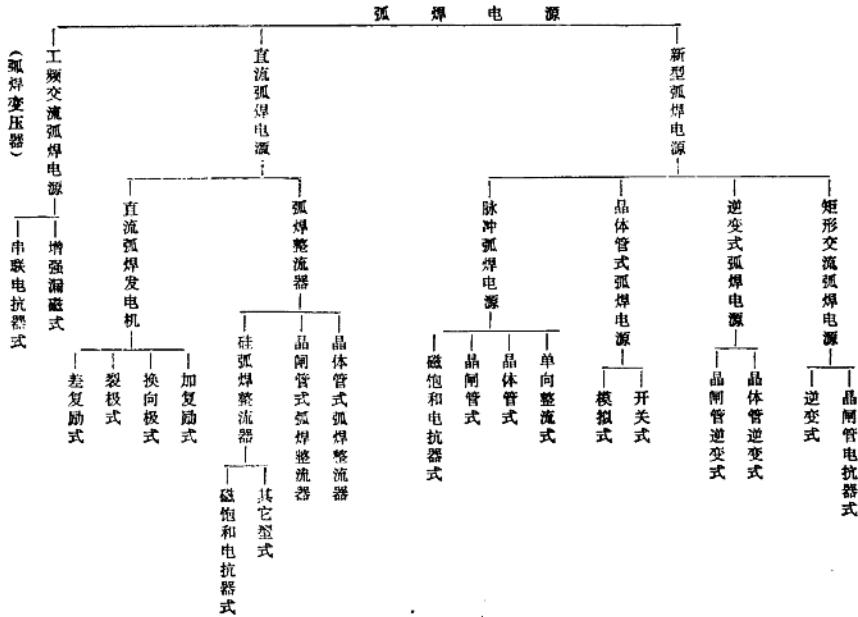
## 二、弧焊电源的分类、特点及用途

弧焊电源种类很多，分类方法也不尽相同。本书将弧焊电源分为工频交流弧焊电源、直流弧焊电源和新型弧焊电源三种类型。每一类型的弧焊电源根据其结构特点不同又可分为多种型式，如下图所示。

下面分述各种弧焊电源的特点及用途。

### （一）工频交流弧焊电源

工频交流弧焊电源主要是指弧焊变压器。弧焊变压器的作用，是将电网的交流电变成适合于电弧焊的交流电。它是由初、次级绕组相隔离的主变压器、调节装置和指示装置等组成，配上焊钳即可进行手工电弧焊。弧焊变压器具有结构简单、易造易修、成本低、磁偏吹小、空载损失小、噪音小等优点，但存在电弧稳定性差、功率因数较低等缺点。它一般用于



酸性焊条手工电弧焊、埋弧焊和钨极惰性气体保护电弧焊等。

## (二) 直流弧焊电源

直流弧焊电源分为直流弧焊发电机和弧焊整流器，它们可作为各种弧焊的电源。

直流弧焊发电机，由特种直流发电机、调节装置和指示装置等组成。按驱动动力的不同，直流弧焊发电机可分为两种：以电动机驱动并与发电机构成一体者，称为直流弧焊电动发电机；以柴（汽）油驱动者，称为直流弧焊柴（汽）油发电机。与弧焊整流器相比，直流弧焊发电机制造复杂，噪声及空载损耗大，效率稍低，价格稍高；但其过载能力强，输出脉动小，受电网电压波动的影响小。

弧焊整流器，是由初、次级绕组相隔离的主变压器、整流器及为获得所需外特性的调节装置，指示装置等组成。由于弧焊整流器的作用，是由交流电网经整流器组来获得直流的，因此，它与直流弧焊发电机相比，具有制造方便、价格低、空载损耗小、噪音小等优点。其中磁饱和电抗器式、晶闸管式和晶体管式等弧焊整流器还可以远距离调节焊接规范，能自动补偿电网电压波动对输出电压和电流的影响。

## (三) 新型弧焊电源

新型弧焊电源是近年来出现的弧焊电源，主要有脉冲弧焊电源、晶体管式弧焊电源、逆变式弧焊电源和矩形波交流弧焊电源。

脉冲弧焊电源具有效率高、输出线能量调节范围宽等特点，主要用作气体保护电弧焊和等离子弧焊，对于热敏感性大的高合金材料、薄板和全位置焊接具有独特的优点。

晶体管式弧焊电源可得到任意形状的外特性，规范调节范围宽，控制性能好，主要用作氩弧焊、等离子弧焊和脉冲弧焊的电源。



逆变式弧焊电源具有高效节能、体积小、动特性好等优点。矩形波交流弧焊电源由于输出电流过零点时间短，正负半波通电时间和电流比值可以自由调节，特别适合于铝及铝合金钨极氩弧焊。

### 三、弧焊电源的状况和发展趋势

焊接技术的发展是与近代工业和科学技术的发展相互促进、紧密联系的。弧焊电源又是弧焊技术发展水平的主要标志，它的发展与弧焊技术的发展也是互相促进、密切相关的。

1802年俄国学者发现了电弧放电现象，并指出利用电弧热能熔化金属的可能性。但在当时的条件下，电力生产水平低下，不能提供维持电弧燃烧的大功率电源，因此利用电弧焊接，当时只是个理想。

19世纪末，随着电力工业的发展，人们有条件研究电弧的实际应用。1882年俄国学者发明了碳极电弧焊接法。而电弧焊真正应用于工业，则是在1892年出现了金属极电弧焊接方法以后。当时，电力工业发展较快，弧焊电源本身也有了很大改进。到20世纪20年代，除直流弧焊发电机外，已开始应用结构简单、成本低廉的弧焊变压器。

随着生产的进一步发展，不仅需要焊接的产品数量增加了，而且许多产品对焊接质量要求也提高了，加之焊接冶金科学的发展，20世纪30年代，在薄药皮焊条的基础上，又研制成功了焊接性能优良的厚药皮焊条，更显示了焊接方法的优越性。这个时期，由于机器制造、电机制造工业及电力拖动、自动控制等新科学技术的发展，也为实现焊接过程机械化、自动化提供了物质条件和技术条件，于是在30年代后期研制成功了自动埋弧焊。20世纪40年代初，由于航空、原子能等技术的发展，迫切需要轻金属或合金，如铝、镁、钛、锆及其合金等。这些材料的化学性能活泼，产品对焊接质量的要求又很高，氩弧焊就是为了满足上述要求而发展起来的新的焊接方法。50年代又相继出现了CO<sub>2</sub>焊等各种气体保护电弧焊，它们具有成本较低、生产效率高、适用范围广等特点。随后，又研制成功了焊接高熔点金属材料的高能量密度的等离子弧焊。

各种焊接方法的出现，促进了弧焊电源的飞速发展，40年代开始出现了用硒片制成的弧焊整流器。到了60年代，由于大容量的硅整流元件、晶闸管元件的问世，为发展新的弧焊整流器开辟了道路。70年代以来，又相继研制成功了晶体管式弧焊电源、逆变式弧焊电源、矩形波交流弧焊电源。

弧焊电源的飞速发展，不仅表现在弧焊电源种类的大量增加，而且还表现在广泛应用电子技术、控制技术、电子计算机技术等方面的理论知识和最新成就，来不断提高弧焊电源的质量，改善其电气性能。例如，为提高弧焊变压器焊接电弧的稳定性，采用改善焊接电流波形的方法来提高焊接电流过零点时的上升速度，或加装脉冲稳弧装置。

在直流弧焊发电机方面，有些国家对其加以改进提高，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%，重量减轻了50%。

在弧焊整流器方面，采用多特性、多用性的弧焊整流器；采用单旋钮控制，可大大简化操作；采用模拟控制，模拟电路构成反馈系统，可达到改善动特性和消除电网电压波动的影响；采用集成电路式电压和温度补偿控制；设置电流递增和电流衰减环节，防止引弧冲击和提高填满弧坑的质量。应用于全位置自动焊的弧焊电源，为保证各个位置焊缝成形一致，采用程控数控技术对焊接参数实现自动调节。

此外，在弧焊电源的结构和制造工艺方面也有不断的改进和提高。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，采用优质绝缘材料，改革铁心结构形式等，使弧焊电源的结构、体积、重量和质量等方面均有明显的提高。

当前，随着电子计算机在工业中逐渐得到推广和普及，在弧焊电源中也得到越来越广泛的应用。国内已研制成与焊接机器人和自动变位机配套的弧焊电源，它大大提高了焊接过程的稳定性和焊接质量。

#### **四、本课程的性质和任务**

本课程以《电工学》、《工业电子学》和《机械零件》等课程为基础，是焊接专业理论性较强的一门专业课。它包括焊接电弧及对弧焊电源的要求，常用弧焊电源的种类、结构、工作原理、性能、特点及使用、维护等内容。学生在完成本课程后，应能达到下列要求：

1. 了解焊接电弧产生机理及其电特性，掌握交流电弧的特点及其稳定燃烧条件。
2. 深入了解弧焊电源的性能和常用弧焊方法对弧焊电源的要求。
3. 掌握常用弧焊电源基本结构和工作原理，熟悉其性能和特点，并且有正确选择、安装和使用的能力。
4. 能测试常用弧焊电源的主要性能指标，并对常见故障具有分析和排除的能力。

# 第一章 焊接电弧及对弧焊电源的要求

## § 1-1 焊接电弧的物理本质

电弧是电弧焊的能量，它能有效而方便地把弧焊电源供给的电能转换为电弧焊过程所需要的热能和机械能。弧焊电源性能的好坏会直接影响电弧燃烧过程的稳定性，进而影响焊接过程的稳定性和焊接接头的质量。因此，必须首先了解焊接电弧的物理本质和焊接电弧的伏安特性，才能进一步提出焊接电弧对弧焊电源的要求。

### 一、焊接电弧的分类

焊接电弧的种类与弧焊电源的类型、电弧的状态、电弧周围的介质和电极材料有关。从不同的角度，焊接电弧可分类如下：

按焊接电流种类，可分为交流电弧、直流电弧、脉冲电弧。

按电弧状态，可分为自由电弧、压缩电弧。手工电弧焊电弧是自由电弧，等离子弧属于压缩电弧。

按电弧周围介质，可分为手工电弧焊电弧（明弧）、焊剂层下“燃烧”的电弧（埋弧）、气体保护电弧焊电弧（明弧，包括活性气体保护、惰性气体保护和混合气体保护）以及介于明弧和埋弧之间的电弧（磁性焊剂气体保护焊电弧、药芯焊丝气体保护焊电弧）。

按电极材料，可分为非熔化极电弧、熔化极电弧。例如，钨极氩弧焊电弧是非熔化极电弧；CO<sub>2</sub>气体保护焊是熔化极电弧。

### 二、电弧中带电粒子的产生

正常状态下，气体不含有带电粒子（电子、正离子、负离子），是由中性的分子或原子组成的。要使正常状态下的气体产生电弧导电，必须使气体分子或原子电离为带电粒子。同时，为了使电弧维持“燃烧”，还必须不断地输送电能给电弧，以补充气体电离时所消耗的能量，这就要求电弧的阴极要不断发射电子。

电弧是气体放电的一种形式。如图 1-1 所示，把两根碳（或钨）电极串联一个电阻，接上适当的电源，使两根电极接触一下再拉开，这样在两根电极之间就产生了电弧。和其它气体放电的区别在于，电弧的阴极压降低、电流密度大。电弧中的气体电离和阴极电子发射是最主要的物理现象，同时也伴随着激励、复合、负离子产生等其它一些现象。

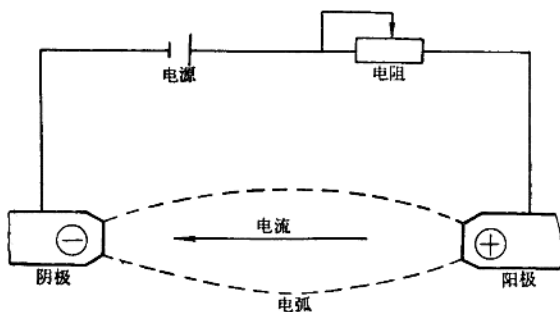


图 1-1 电弧产生示意图

## (一) 气体电离

气体与自然界中的一切物质一样都是由原子组成的，原子又是由带正电荷的原子核和按一定轨道围其转动并带负电荷的电子组成的。核外电子，由于受到原子核的静电吸引力作用不能随便脱离其运动轨道，因此电子与原子核之间保持着一种动平衡的稳定状态。此时，原子核中的正电荷数与周围电子的负电荷数相等，对外不显电性。如果中性的气体粒子（分子或原子）受到外加能量的作用，就会使原子中的电子获得足够能量，从而摆脱原子核对其的静电吸引而成为自由电子。同时，气体原子由于失去带负电荷的电子而变成带正电荷的正离子。这种在外加能量作用下使中性的气体原子分离成带电粒子（正离子和电子）的现象称为气体电离。两电极间的气体被加热后之所以能够导电，就是因为气体产生了电离。

气体原子分离出一个外层电子所需要的最小能量称电离能或电离功。当用电子伏特(eV)来衡量它时，又称电离势或电离电位，以 $E_i$ 表示。一个电子伏特相当于一个电子在电场中移动电位差为1V的路程所产生的能量变化。“电子伏特”不能与“伏特”相混淆。气体电离势的大小与其原子内部的结构有关，所以，不同气体电离时所需的电离势也不同。电离势大表示气体难电离，也就是难导电，电离势小表示气体容易电离，导电也容易。常见气体和元素的电离势 $E_i$ 见表1-1。由表1-1可以看出：碱金属的电离势较低，气体的电离势都较高，惰性气体的电离势更高。这就是为什么在含K、Na等稳弧剂的气氛中比较容易导电、引弧，电弧燃烧也比较稳定的重要原因。

表1-1 电弧中常见气体及元素的电离势 $E_i$ 、电子亲和能 $E_q$ 、逸出功 $\phi_y$ 

气体	$\frac{E_i}{\text{eV}}$	$\frac{E_q}{\text{eV}}$	元素	$\frac{E_i}{\text{eV}}$	$\frac{E_q}{\text{eV}}$	$\frac{\phi_y}{\text{eV}}$	元素	$\frac{E_i}{\text{eV}}$	$\frac{E_q}{\text{eV}}$	$\frac{\phi_y}{\text{eV}}$
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	6.67	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	4.26	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	11.81	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：表中的数值因资料来源不同，仅供参考。

有时，中性气体粒子虽然受到外加能量的作用，但外加能量不够大，电子只是从能级较低的内层轨道跳到能级较高的外层轨道，未能摆脱原子核的束缚，这种现象称为激励。受激励的电子处于一种不稳定的状态，若不能继续得到外界能量，它就要自动返回原来低能级的轨道上去，并放出光辐射能。

根据电离能量的来源不同，气体电离形式可分为三种：（1）碰撞电离，这种电离的特点是，被电场中加速的带电粒子与原子和分子相碰撞而产生电离；（2）光电离，它是由于原子吸收光辐射波的能量而产生的电离；（3）热电离，即在热能作用下，气体粒子具有很高的动

能，它们在不规则的相互碰撞中产生的电离。

在高温焊接电弧中，主要是热电离，而且进行很激烈。我们知道，气体温度的高低标志着气体粒子不规则运动的强弱。气体温度越高，气体粒子的运动速度也越高，即动能越大。因此，具有高能量的气体粒子在不规则的热运动中将频繁发生碰撞，从而引起电离或激励。

单一气体产生热电离的程度可用萨克 (Saha) 公式表示 (数值方程)

$$\frac{x^2}{1-x^2} p = 3.16 \times 10^{-7} T^{2.5} e^{-E_i/kT} \quad (1-1)$$

式中  $x$  —— 电离度，即已电离的粒子 (电子或离子) 密度与电离前中性气体粒子密度之比；

$p$  —— 气体压力 (atm)；

$T$  —— 气体热力学温度 (K)；

$e$  —— 自然对数的底， $e = 2.718$ ；

$E_i$  —— 气体电离势 (eV)；

$k$  —— 玻耳兹曼常数 ( $1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ )。

从式 (1-1) 可以看出，气体的电离度与气体电离势、温度、压力有关。按式 (1-1) 可以求出各种气体在不同温度下的电离度。在气压  $p = 101 \text{kPa}$  (1atm) 情况下，热电离的电离度  $x$  与温度  $T$  的关系见图 1-2。

由图可见，当温度较低时，电离度  $x$  几乎等于零，随着温度的升高，电离度迅速增加。当温度增加到一定程度再进一步升高时，电离度增加很少，因为这时大部分中性气体粒子已被电离，进一步增加电离度很困难了。还可以看出，在同一温度下，电离势小的气体其电离度大，即电离进行得比较充分。如用混合气体作保护气体时，其电离和导电情况主要取决于电离势较小的气体，这就是为什么在电弧空间里，若加入少量的电离势较低的气体后就可以明显地改善电弧导电性能的重要原因。

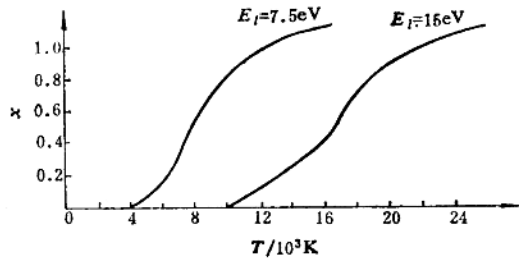


图1-2  $x = f(T)$  关系曲线

应当指出，在气体产生电离的过程中，在一定条件下，有些气体原子能吸附一个电子而成为负离子。气体原子吸附电子形成负离子时，其内部能量不是增加而是减少。减少这部分能量称电子亲和能，以  $E_e$  表示。亲和能以热能或辐射能的形式释放出。各种元素吸附电子形成负离子的倾向取决于它的电子亲和能。电子亲和能越大的元素，形成负离子的倾向越大。但是，电离势越高的元素，并不一定越易和电子结合，只有电离势高、亲和能也高的元素才易生成负离子。

另外，电弧空间的正负带电粒子 (正离子、负离子、电子) 在一定条件下相遇可能复合成中性原子。复合包括电子与正离子的复合和正离子与负离子的复合。电弧中产生负离子及与带电粒子的复合作用，将导致电弧导电困难，从而使电弧的稳定性下降。

## (二) 阴极电子发射

阴极表面在外加能量作用下连续向外发射出电子的现象称阴极电子发射。焊接时，电极

之间的气体电离是产生电弧的重要条件。但是，只有气体电离而阴极不发射电子，没有电流通过，那末电弧还不能形成。因此，阴极电子发射和气体电离一样，两者都是电弧产生和维持的必要条件。

一般金属中，原子构成晶格且呈紧密排列，所以离原子核较远的最外层电子因受到周围原子核的静电吸引力作用易形成自由电子（金属之所以是电和热的良导体，正是金属内部存在着自由电子）。自由电子在金属原子和离子的空间作不规则运动（见图 1-3），由于其周围为其它电子和离子所环绕，它所受的力是均衡的。但当它运动到金属表面时，其周围电荷分布就不再是均衡的了，电荷全部集中在它的一侧（见图 1-4）。因此，在一般情况下，电子是不能离开金属表面向外发射的。要使电子逸出金属电极表面而产生电子发射，必须加给电子一定能量。电子从阴极表面逸出所需要的能量称逸出功，从  $\phi$  表示。物质的逸出功一般约为电离势的  $1/2 \sim 1/4$ 。逸出功不仅与元素的种类有关（见表 1-1），而且与电极的表面状态有关，如表面有氧化物或其它杂质，均可使逸出功大大降低。

根据供给能量来源的不同，阴极电子发射可分为热电子发射、场致电子发射、光电子发射和撞击电子发射等四种形式。这四种电子发射在焊接电弧中一般都存在。根据阴极所用的材料不同，其主要的发射形式也不同，有的以热电子发射为主，有的以场致电子发射为主，而光电子发射和撞击电子发射在焊接电弧中占次要地位。

热电子发射是由于阴极表面被加热达到很高温度，表面的电子因获得足够的能量而逸出。实验证明，当阴极表面温度达到  $2000 \sim 2500 \text{ K}$  时就能产生明显的热电子发射。温度越高，阴极产生的热电子发射进行得越激烈。另外，当金属表面有氧化物及杂质时，其逸出功大大降低。所以电弧焊时，阴极表面的电子发射能力可以通过掺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（W 的  $\phi$  为  $4.50 \text{ eV}$ ，W-Th 的  $\phi$  为  $2.63 \text{ eV}$ ），热电子发射能力在高温下可增加数千倍。

场致电子发射是由于阴极表面附近有强电场存在，在强电场作用下，阴极表面的电子可以获得足够能量，克服阴极内部正电荷对它的静电吸引力而从阴极表面发射出来。这种由于在电场作用下而产生的电子发射称为场致电子发射。电场越强，场致电子发射也越强，甚至可以在室温时发生。场致电子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。例如，当采用铜或铝等熔点较低的材料做阴极（称冷阴极）进行焊接时，由于受材料本身熔点的限制，阴极表面无法达到很高温度，在这种情况下，其热电子发射的作用较弱，主要是靠场致电子发射。当采用钨、碳等熔点较高的材料做阴极（称热阴极）时，由于它们可以被加热到很高温度，表面温度可达  $4000 \sim 5000 \text{ K}$ ，使电子获得足够能量而进行强烈的热电子发射，这时场致电子发射就退于次要地位了。

⊕ —— 正离子  
○ —— 电子

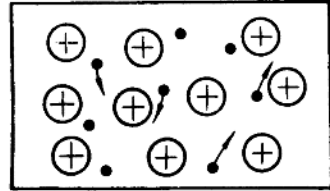


图 1-3 自由电子在金属内部作不规则运动的情况

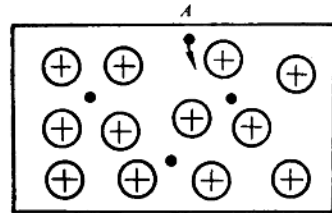


图 1-4 自由电子在金属中运动到表面 A 点的情况

光电子发射,是指阴极表面接受光辐射波的能量而产生的电子发射现象。撞击电子发射,是运动速度较高、能量较大的正离子撞击阴极表面,将能量传递给阴极而产生的电子发射。

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,是在热、光和电场作用下,中性气体粒子不断被电离、激励(同时也伴随着复合)以及阴极电子发射的结果。

### 三、焊接电弧的引燃

上面所讨论的气体电离和阴极电子发射是电弧燃烧的必要条件。把造成两电极间气体发生电离和阴极发射电子而引起电弧燃烧的过程称为焊接电弧的引燃(引弧)。焊接电弧的引燃一般有两种方式:即接触引弧和非接触引弧。

#### (一) 接触引弧

弧焊电源接通后,将两电极(焊条、焊丝与工件)直接短路接触,并随后拉开焊条(或焊丝)而引燃电弧,称为接触引弧。接触引弧是一种最常用的引弧方式。接触引弧的过程如下:

当电极与工件短路接触时,由于电极和工件表面都不是绝对平整的,所以只是在少数突出点上接触(见图1-5)。短路电流比正常的焊接电流要大得多,又加之接触点的面积又小,因此电流密度极大。根据焦耳-楞次定律( $Q = 0.24I^2Rt$ )可以知道,由于电流的热效应,使接触部分的金属温度剧烈地升高而熔化,甚至蒸发、气化,引起强烈的热电子发射和热电离。随后在拉开电极瞬间,由于电弧间隙极小,电源电压作用在此小间隙上,使其电场强度达到很大数值。这样,即使在室温下亦能产生明显的场致电子发射现象。同时,又使已产生的带电粒子被加速,引起碰撞电离。在上述因素的作用下,引燃电弧。在电弧引燃之后,电离和复合处于动平衡状态。由于弧焊电源不断供给能量,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。

在拉开电极的瞬间,弧焊电源电压由短路时的零值增高到引弧电压值所需要的时间称电压恢复时间。电压恢复时间对于焊接电弧的引燃及焊接过程中电弧的稳定性具有重要的意义。这个时间长或短,是由弧焊电源的特性决定的。在电弧焊时,对电压恢复时间要求越短越好,一般不超过0.05 s。如果电压恢复时间太长,则电弧就不容易引燃及造成焊接电弧不稳定。

#### (二) 非接触引弧

引弧时,电极与工件之间保持一定间隙,然后在电极和工件之间施以高电压击穿间隙使电弧引燃,这种引弧方式称非接触引弧。

非接触引弧一般是利用引弧器进行的。根据工作原理可分为高频高压引弧和高压脉冲引弧,如图1-6所示。高频电一般采用每秒振荡50次,每次振荡频率为150~260kHz左右,电压峰值为2500~5000 V。高压脉冲一般频率为50~100Hz,峰值电压为5000~10000 V。可见,这是一种依靠高压电使电极表面产生场致电子发射来引燃电弧的方法。

在一定的介质条件下,空气隙的击穿电压与间隙大小和气体压力有关。间隙越大,所需击穿电压越高;气体压力越低,所需击穿电压越低。但是,在接近真空状态时,由于气体的碰撞电离作用下降,引弧也有一定困难。

这种引弧方式主要应用于钨极氩弧焊和等离子弧焊。由于引弧时电极无需和工件接触,

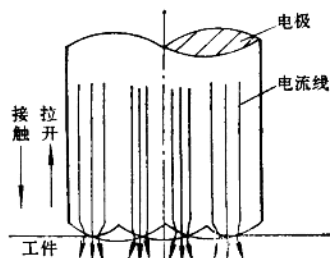


图1-5 接触引弧示意图

这样不仅不会污染工件上的引弧点，而且也不会损坏电极端部的几何形状，有利于电弧燃烧的稳定性。

#### 四、焊接电弧的结构及电弧各区导电机构

##### (一) 焊接电弧的结构

焊接电弧沿其长度方向可分为三个区域，如图1-7所示。紧靠负电极的区域称阴极区，紧靠正电极的区域称阳极区，阴极区和阳极区之间的区域是弧柱。阴极区的长度约为  $10^{-5} \sim 10^{-6}$  cm，阳极区的长度约为  $10^{-3} \sim 10^{-4}$  cm，因此，弧长（电弧长度）可以认为等于弧柱长度。

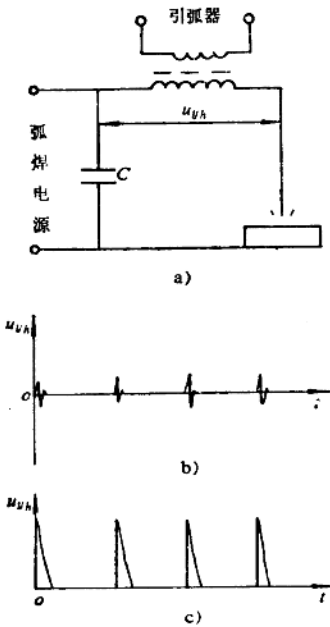


图1-6 高频和脉冲引弧示意图

- 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  $u_{yh}$ —引弧电压瞬时值

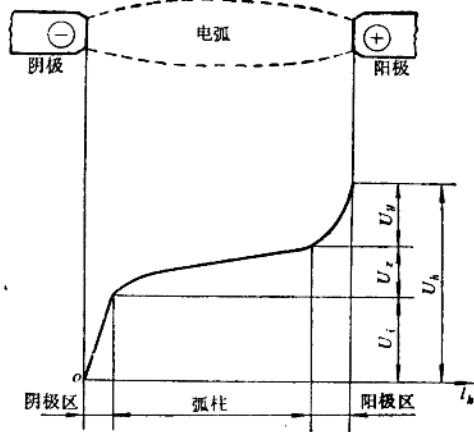


图1-7 电弧结构和压降分布示意图

电极表面上紧靠电弧并流过大部分电弧电流的光亮斑点，称为电弧的活性斑点。在负电极表面上的活性斑点称阴极斑点；在正电极表面上的活性斑点称阳极斑点。通常阴极斑点的尺寸比阳极斑点的尺寸小些，但其亮度比阳极斑点大。

沿着弧长方向电压分布是不均匀的。阴极区和阳极区产生的压降较大，这是由于电弧电流通过电极与电离气体之间边界的特殊条件所引起的。沿弧柱方向的本身压降可以认为是均匀分布的。

电弧电压由三部分组成：

$$U_h = U_i + U_y + U_a \quad (1-2)$$

式中  $U_h$ ——电弧电压；

$U_i$ ——阴极压降；



$U_+$ ——阳极压降；

$U_a$ ——弧柱压降。

在一定条件下（电弧电流、电极材料和气体介质等），阳极压降  $U_+$  和阴极压降  $U_c$  可视为常数，因此，式（1-2）可用下面经验公式来表示：

$$U_a = a + bl_a \quad (1-3)$$

式中  $a$ ——阴极压降和阳极压降之和（V）；

$b$ ——单位长度弧柱压降（V/mm）；

$l_a$ ——弧柱长度（mm），近似等于弧长。

## （二）电弧各区的导电机构

1. 弧柱的导电机构 弧柱是阴极区和阳极区之间的部分，它的长度比阴极区和阳极区大得多，占弧长的绝大部分。弧柱是由自由电子、正负离子、激励和未激励的中性气体粒子组成的。在弧柱中所进行的过程比较复杂，弧柱是自由电子、负离子向正电极转移和正离子向负电极转移的通道，同时又是直接进行电离及复合的区域。由于弧柱中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，带电粒子分布不均匀，弧柱中心带电粒子密度大，导电性好，而周围带电粒子密度小，导电性差。在弧柱长度方向上，带电粒子的分布一般认为是均匀的。

弧柱的电场强度等于弧柱压降除以弧柱长度，一般认为它沿着弧长方向是不变的，在电弧电流一定时，它取决于电弧气体的压力和种类，一般为3~50 V/cm。电弧中气体的压力越大，弧柱的导热性越强，所需的弧柱电场强度越高，弧柱的压降也越大。如果电弧中的气体是  $H_2$  气，由于它的质量较小，粒子运动速度大，带走热量多，电弧需要输入的电能较多，即电场强度大。同时， $H_2$  或  $N_2$  是双原子气体，在它们分离成原子时，所需带走的热量较多，也促使电场强度增大。 $Ar$  是单原子气体，而且质量较大，所带走的热量较小，即电场强度小。此外，如果电弧中含有电负性高的元素，由于易形成负离子，使弧柱中自由电子数目减少，因此，弧柱维持同样大的电流产生的压降要增大。

在电极材料发生蒸发的情况下，弧柱的电场强度取决于电极材料的电离势  $E_i$ （见表 1-2）。可见，电极材料的电离势越高，弧柱的电离势也提高，弧柱的电场强度和弧柱压降也增大。

表1-2 弧柱电场强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
电离势 $E_i/eV$	5.98	8.30	7.34	7.42	7.57	7.63	7.72	8.33	8.99	9.0	9.39	11.26
弧柱电场强度 $E/(V \cdot cm^{-1})$	24	38	35	42	37	38	38	42.5	55	57	51	85

弧柱中的电流，是单位时间内在电弧电场方向上传递的电荷量，由相对移动的电子流  $I_e$  和正离子流  $I_i$  组成。

正离子和电子在同一个电场力的作用下，由于电子的质量比正离子的质量小得多，因此在同一电场作用下，电子的运动速度远远大于正离子的运动速度，即电子流  $I_e$  比正离子流  $I_i$  大得多， $I_e/I_i \approx 0.001$ 。略去正离子流，则弧柱中的电流可以近似等于电子流的数值，即