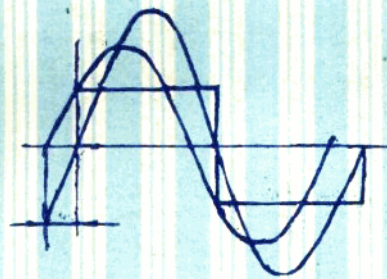


# 电焊设备



中国人民解放军空军第一航空技术专科学校

一九八九年六月

# 绪 论

焊接作为一种基本加工方法，应用很广。

电弧焊接是焊接方法中的一种，按其工艺特点的不同，可大致分为手工弧焊（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）、等离子弧焊等。

除电弧焊外还有其他多种焊接方法，如电阻焊等。

不同的电焊工艺方法需要不同的电焊设备。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，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气电焊设备；电阻焊需要大功率降压变压器，加压机构、压力传动机构、电极和控制箱等；埋弧焊则需要行走小车（自动焊）或大车，电源箱、控制箱、焊剂添加及回收装置等。

本课程内容共分三篇。第一篇介绍各种弧焊电源的组成、基本工作原理、特点及用途。第二篇主要介绍氩弧焊、 $\text{CO}_2$ 气体保护焊和等离子弧焊等焊接设备的组成、特点及工作原理。第三篇将分别介绍点焊（属电阻焊）机、埋弧自动焊设备的结构特点及其原理。

# 目 录

绪 论 .....	1
第一篇 弧焊电源 .....	1
概述 .....	1
第一章 焊接电弧及其电特性 .....	2
第一节 焊接电弧的物理本质 .....	2
第二节 焊接电弧的结构和伏安特性 .....	5
第三节 交流电弧 .....	8
第四节 焊接电弧的分类及其特点 .....	15
第二章 对弧焊电源的要求 .....	18
第一节 对弧焊电源外特性的要求 .....	18
第二节 对弧焊电源空载电压的要求 .....	23
第三节 对弧焊电源调节特性的要求 .....	24
第四节 对弧焊电源动特性的要求 .....	28
第三章 弧焊变压器 .....	35
第一节 弧焊变压器的特点及其分类 .....	35
第二节 弧焊变压器的漏抗 .....	39
第三节 动铁式弧焊变压器 .....	42
第四节 动圈式弧焊变压器 .....	48
第五节 串联电抗器式弧焊变压器 .....	53
第四章 硅弧焊整流器 .....	66
第一节 硅弧焊整流器的组成和分类 .....	66
第二节 增强漏磁类硅弧焊整流器 .....	69
第三节 弧焊整流器中的磁放大器 .....	74
第四节 无反馈磁放大器式硅弧焊整流器 .....	87
第五节 全部内反馈磁放大器式硅弧焊整流器 .....	90
第六节 部分内反馈磁放大器式硅弧焊整流器 .....	99
第七节 外反馈磁放大器式硅弧焊整流器和多特性硅弧焊整流器 .....	109
第八节 弧焊整流器动特性的改善 .....	111

第九节	其它型式硅弧焊整流器	114
第十节	硅弧焊整流器的故障及原因分析	119
<b>第五章</b>	<b>可控硅式弧焊整流器</b>	<b>121</b>
第一节	陡降外特性可控硅式弧焊整流器的波形连续问题	121
第二节	ZDK—500型可控硅式弧焊整流器	122
<b>第六章</b>	<b>直流弧焊发电机</b>	<b>140</b>
第一节	直流发电机的构造及工作原理	140
第二节	直流发电机的电枢反应	144
第三节	直流发电机的换向火花	147
第四节	他激、并激和复激式直流发电机	152
第五节	直流弧焊发电机的分类及其特性	157
第六节	差复激式弧焊发电机	166
第七节	裂极式弧焊发电机	175
第八节	换向极式弧焊发电机	179
第九节	多站式弧焊发电机	182
第十节	直流弧焊发电机的故障、原因及处理方法	186
<b>第七章</b>	<b>脉冲弧焊电源</b>	<b>187</b>
第一节	脉冲弧焊电源的特点和分类	187
第二节	磁放大器式脉冲弧焊电源	192
第三节	可控硅式脉冲弧焊电源	202
第四节	其它型式脉冲弧焊电源	224
<b>第八章</b>	<b>弧焊电源的选择、安装和使用</b>	<b>229</b>
第一节	弧焊电源的选择	229
第二节	弧焊电源的安装和使用	234
第三节	节约用电和安全用电	242
<b>第二篇</b>	<b>典型气体保护焊机</b>	<b>245</b>
<b>第九章</b>	<b>氩弧焊设备</b>	<b>245</b>
第一节	NSA—500—1型手工钨极交流氩弧焊机	245
第二节	JZYK300—2型交直流两用非熔化极手工氩弧焊控制箱	259
第三节	熔化极氩弧焊设备	262
<b>第十章</b>	<b>CO<sub>2</sub>气体保护焊设备</b>	<b>272</b>
第一节	CO <sub>2</sub> 气体保护焊设备的组成及原理	272
第二节	CO <sub>2</sub> 气体保护焊机的保养和常见故障的排除	284

<b>第十一章 等离子弧焊接及切割设备</b> .....	289
第一节 等离子弧的特性及等离子弧发生器.....	289
第二节 等离子弧焊接设备.....	298
第三节 等离子弧切割设备.....	304
<b>第三篇 点焊、埋弧焊设备</b> .....	309
<b>第十二章 点焊机</b> .....	309
第一节 概述.....	309
第二节 电极.....	311
第三节 加压机构.....	315
第四节 电源装置.....	318
第五节 DN 2—200型点焊机.....	326
第六节 KD 7型控制器.....	333
第七节 点焊机的使用与维护.....	348
<b>第十三章 埋弧自动焊机</b> .....	350
第一节 埋弧焊机的分类与结构特点.....	350
第二节 典型埋弧焊机控制电路原理.....	354
<b>附 录</b> .....	359
附录一 符号说明.....	359
附录二 电焊机型号编制办法.....	360
附录三 常用弧焊电源的主要技术数据.....	365

# 第一篇 弧焊电源

## 概 述

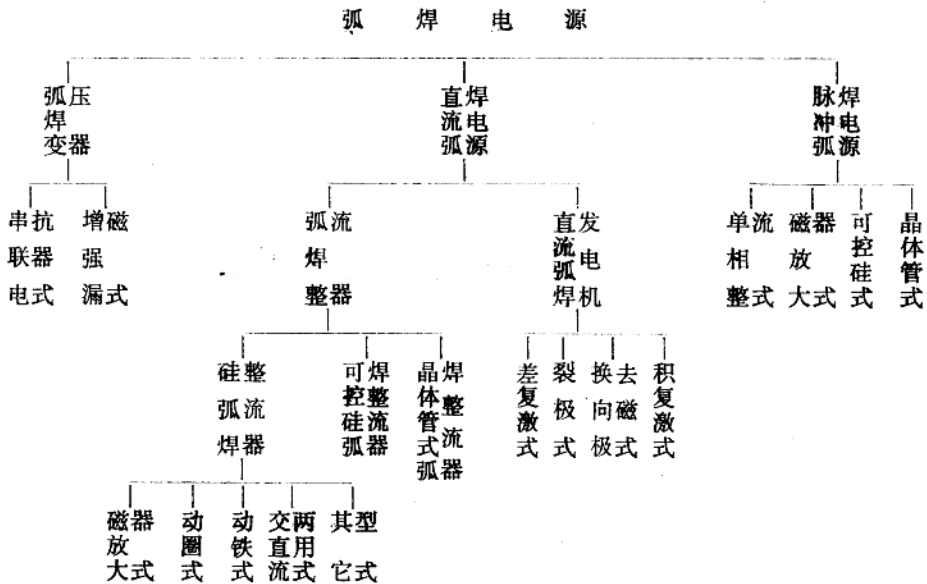
弧焊电源是电弧焊设备中的主要部分，是对焊接电弧供以电能的一种装置，这种装置具有符合电弧焊所要求的电气特性，以保证电弧的稳定燃烧和焊接过程的顺利进行。本篇着重介绍常用弧焊电源的结构特点、基本工作原理和电气特性以及使用和维护方法，以便了解弧焊电源的结构、原理，正确使用和维护弧焊电源。

### 一、弧焊电源的分类

弧焊电源按电流种类可分为三大类：

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。
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、特点及应用范围

1. 弧焊变压器 系交流弧焊电源，用以将电网的交流电转换成适宜于弧焊用的交流电，由初、次级绕组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、磁偏吹小、空载损失和噪音小等优点。但存在电弧稳定性较差、功率因数较低等缺点。它一般应用于手工弧焊、埋弧焊和钨极氩弧焊等。

2. 弧焊整流器 它是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、半导体整流元件组成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、空载损失和噪音小等优点。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。它可作各种弧焊的电源。

3. 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：以电磁力驱动并组成一体，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。

与弧焊整流器相比较，直流弧焊发电机的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，电网电压波动对输出电压、电流影响小。它可作各种弧焊的电源。

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，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。

# 第一章 焊接电弧及其电特性

内容提要 本章介绍焊接电弧的物理本质、结构、伏安特性，着重介绍电弧的电特性及交流电弧燃烧的特点。

## 第一节 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提供者。弧焊电源电特性的好坏会影响电弧燃烧的稳定性，而电弧是否稳定燃烧又直接影响焊接过程的稳定性和焊接质量。因

此，必须研究焊接电弧的物理本质和电弧的电特性，才能进而研究对弧焊电源的要求。

### 一、气体游离和电子发射

一般情况下气体是不能导电的，为了使气体导电形成电弧，就必须使气体分子（或原子）游离成为离子和电子。同时，为了维持电弧燃烧，就必须不断给电弧输送电能，以补充能量的消耗，这就要求电弧的阴极不断地发射电子。

气体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（气体分子和原子以及离子和电子的简称）在得到一定能量之后分离成电子或离子的过程，称为气体的游离。

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。

2. 光游离 气体分子或原子吸收了光射线的光子能而产生的游离。

3. 热游离 在高温下，具有高动能的气体粒子（分子和原子）彼此作非弹性碰撞而引起的游离。热游离在2000°K时已开始产生，在弧柱温度（5000°K至50000°K）时就非常明显了。

（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。

电子发射是引弧和维持电弧稳定燃烧的一个重要问题。按其能量来源不同可分为光电发射、热发射、自发发射和重粒子撞击发射。

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。

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，它随着温度的上升而增加。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程度会减慢下来。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。如钨极上含有钍或铈的氧化物时，热发射能力在高温时可增加数千倍。

3. 自发发射 物质的固体或液体表面，当存在强电场并在表面附近形成较大的电位差时，阴极将发射电子，称为自发发射，或称强电场发射。在既定温度下，自发发射能力随电场增强而增大。自发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，撞击阴极使其发射电子的能力愈强。

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波形大致如图 1—1 所示。

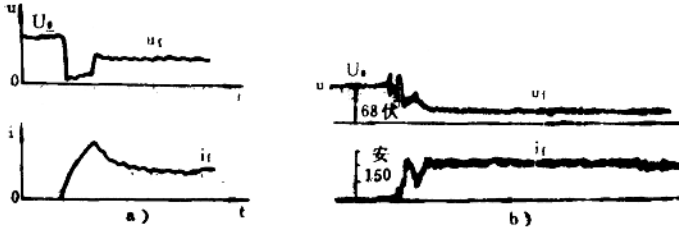


图 1—1 引弧过程的电压、电流波形

a) 接触引弧                      b) 非接触引弧

$U_0$ —空载电压                       $U_1$ —电弧电压                       $i_1$ —电弧电流

### (一) 接触引弧

接通弧焊电源后，电极（焊条或焊丝等）与工件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，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，随后在拉开电极的瞬间，电极间隙很小（弧长很短），电场强度达到很大的数值，例如当弧长为 $10^{-6}$ 厘米时，其场强可达 $10^8$ 伏特/厘米）。这样，即使在室温下也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，引起撞击游离。随着温度的升高，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，维持电弧的稳定烧燃。在电弧引燃之后，游离和中和处于动平衡状态，电源不断向电弧供以电能，弥补其消耗的能量。

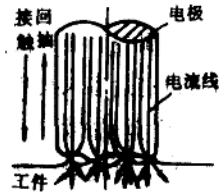


图 1—2 接触引弧示意图

由于电极材料不同，引弧时电子发射的主要形式是不同的。用高熔点的钨和碳作电极时，主要是热发射；而用低熔点的铝或铜作电极时，则以自发射为主；用熔点介于前二者之间的钢焊条或焊丝作电极时，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引燃，称为非接触引弧。

非接触引弧一般是利用引弧装置，产生高频高压电或高压脉冲帮助引弧，见图1—3所示。高压脉冲一般采用每秒50至100次，电压峰值为几千至一万伏。高频电一般采用振荡频率在150至260千赫、电压峰值为2500至5000伏的高频高压。

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与工件直接接触，不仅不会污染工件，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。

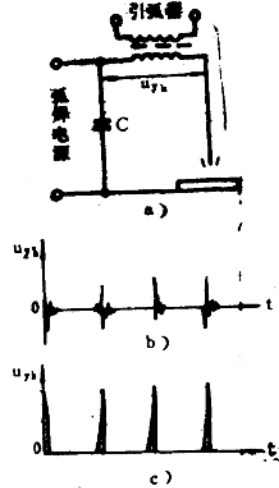


图1—3 高频和脉冲电压示意图

- a) 引弧器接入方式      b) 高频引弧电压波形  
c) 脉冲电弧电压波形       $u_{yh}$ —引弧电压

## 第二节 焊接电弧的结构和伏安特性

为了便于研究焊接电弧的电特性，即伏安特性，有必要先了解直流焊接电弧（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，即紧靠负电极区域的阴极区和紧靠正电极区域的阳极区以及它们之间的弧柱区，如图1—4所示。阴极区长约为 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 厘米，阳极区长约为 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 厘米，因此，电弧长度可以认为等于弧柱长度。

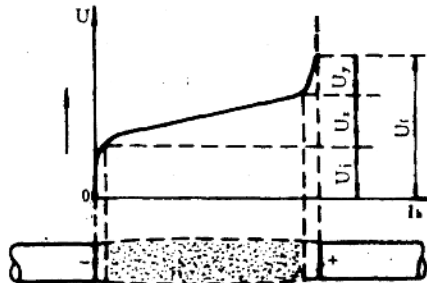


图1—4 电弧结构和压降分布

电极上紧靠电弧并流过大部分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。

电弧电压由三部分组成，即：

$$U_f = U_i + U_y + U_z$$

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与弧柱长度成正比。所以，电弧电压也可用下列经验公式表示：

$$U_f = a + b l_z$$

式中：  $a$ ——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）；

$l_z$ ——弧柱长度（毫米）。

## 二、焊接电弧的伏安特性

一定长度的电弧在稳定状态下，电弧电压 $U_f$ 和电弧电流 $I_f$ 之间的关系称为焊接电弧的静态伏安特性，简称焊接电弧的伏安特性或静特性。它可用下列的函数式来表示：

$$U_f = f(I_f)$$

实验证明，电弧电压与电流之间的关系不符合欧姆定律，电弧的电阻不是常数，而是随电流的改变而变化。当焊接电流在很大的范围内变动时，焊接电弧的伏安特性呈U形曲线，所以也称作U形特性。见图1—5所示。

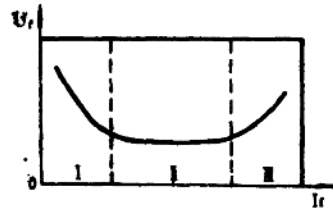


图 1—5 焊接电弧的伏安特性曲线形状

U形伏安特性曲线可看成由三段（I、II、III）组

成。在I段，电弧呈负阻特性，即电弧电阻随电流增大而减小，电弧电压随电流的增加而下降，是下降特性段。在II段，电弧呈等压特性，即电弧电流增加，电弧电压基本不变，是平特性段。在III段，电弧电流增加，电弧电压随着升高，两者近似线性关系，是上升特性段。

我们知道，电弧电压是阴极压降、阳极压降和弧柱压降之和。可见，如果了解每个区域

的压降和电流的关系，就可了解U形伏安特性曲线的形成机理。

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

在阴极区，当电弧电流 $I_f$ 较小时，阴极斑点的面积 $S_c$ 小于电极端部的面积，这时 $S_c$

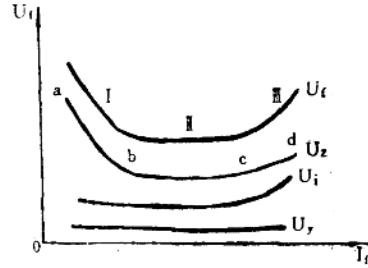


图1-6 电弧各区域的压降与电流的关系示意图

随 $I_f$ 的增大而增大，阴极斑点上的电流密度 $j_c = \frac{I_f}{S_c}$ 基本不变，这就意味着阴极的电场强度不变，即阴极压降 $U_c$ 不变，此时 $U_c = f(I_f)$ 为一水平线。随后， $I_f$ 继续增加，到阴极斑点面积与电极端部面积相等时， $S_c$ 已不能再增大，于是阴极斑点上面的电流密度 $j_c$ 就增加了，这就势必增加 $U_c$ ，以加剧阴极的电子发射，因此， $U_c$ 随 $I_f$ 的增加而上升。见图1-6曲线 $U_c$ 所示。

在弧柱区，可以把弧柱看成是一个近似均匀的导体，均匀导体的电压降可用下式表示：

$$U_z = I_f R_z = I_f \frac{l_z}{S_z \gamma_z} = j_z \frac{l_z}{\gamma_z}$$

式中  $R_z$ ——弧柱电阻；

$l_z$ ——弧柱长度；

$S_z$ ——弧柱截面积；

$\gamma_z$ ——弧柱的电导率；

$j_z$ ——弧柱的电流密度。

上述可见，当弧长一定，即 $l_z$ 一定时， $U_z$ 与 $j_z$ 和 $\gamma_z$ 有关，把 $U_z$ 和 $I_f$ 的关系分为三段(图1-6中曲线 $U_z$ 的ab、bc和cd段)来研究。

在ab段：电弧电流较小，随着 $I_f$ 的增大， $S_z$ 也增大，且 $S_z$ 扩大较快，使 $j_z = \frac{I_f}{S_z}$ 降低；又因 $I_f$ 增大，弧柱的温度和游离程度均增大，使 $\gamma_z$ 也增大。 $j_z$ 降低和 $\gamma_z$ 增大，都会使 $U_z$ 下降，所以这一段曲线是下降形状。

在bc段：随着 $I_f$ 的增大 $S_z$ 成比例增大， $j_z$ 基本不变， $\gamma_z$ 随温度升高到一定程度也不再增大，故 $U_z$ 近似为常数，这一段曲线为水平形状。

在cd段：电弧电流已相当大，随着 $I_f$ 的继续增大 $\gamma_z$ 仍基本不变，但 $S_z$ 已不能再扩大， $j_z$ 随 $I_f$ 的增大而增大，所以 $U_z$ 随 $I_f$ 的增大而上升，这一段曲线为上升形状。

图1-6中 $U_i$ 曲线是 $U_a$ 曲线、 $U_c$ 曲线和 $U_z$ 曲线的迭加。

不同的焊接方法，在其正常使用的范围内，并不包括电弧伏安特性的所有各段曲线。伏安特性的下降段由于电弧燃烧不易稳定，很少采用，只在小电流直流氩弧焊、钨极脉冲氩弧

焊的维弧中得到应用；伏安特性的水平段在手工弧焊和埋弧自动焊、不熔化极气电焊以及微弧等离子焊中得到应用；伏安特性的上升段在细焊丝大电流的气电焊、埋弧焊、等离子弧焊和 underwater 中得到应用。

上面着重研究了电弧的静特性，这里还要简介电弧的动特性。所谓电弧的动特性是对于一定弧长的电弧，当电弧电流以很快的速度变化时，在电流连续变化过程中，电弧电压和电流瞬时值之间的关系。

显然，电弧动特性包括了三个变量：电压 $u_f$ 、电流 $i_f$ 和时间 $t$ 。图1—7举例说明了电弧动特性的构成机理。图中，通过 $u_f = f(t)$ 和 $i_f = f(t)$ 曲线对应于 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 和 $t_4$ 等时刻，作出了动特性曲线 $u_f = f(i_f)$ 。

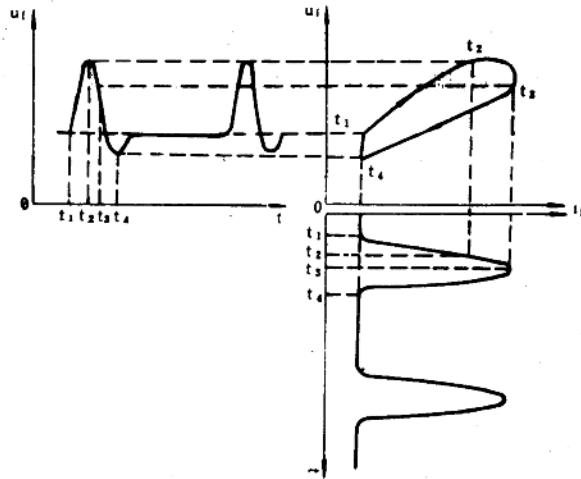


图1—7 电弧动特性的构成机理

$u_f$ —电弧电压       $i_f$ —电弧电流       $t$ —时间

如果电流变化速度很小，电弧物理状态（如温度）的变化可以跟上电流变化速度时，动特性曲线和伏安特性曲线就重合。当电流增长速度超过游离速度，或电流下降速度大于消游离速度时，则弧柱和电极斑点的尺寸和游离度的变化就跟不上电流的变化。这时，电弧的动特性曲线呈回线形状，这反映出电弧物理状态的惰性，回线的上面部分相当于电流增长的前沿，下面部分相当于电流减小的后沿。

### 第三节 交流电弧

前一节我们分析了直流焊接电弧，其结论对于交流焊接电弧也是适用的。但是交流电弧作为弧焊电源的负载，还有其特殊性。为了确定对弧焊电源的要求，有必要研究交流电弧的

特点。

### 一、交流电弧的特点

交流电弧的引燃、燃烧，就其物理本质而言，是和直流电弧相同的，同时它的电阻也是非线性的，所以也具有直流电弧那样的伏安特性。这时的 $U_f$ 和 $I_f$ 分别表示电弧电压和焊接电流的有效值。

但是，交流电弧一般是由50周按正弦规律变化的电源供电，每秒钟内电弧电流100次过零点，即电弧的熄灭和引燃过程每秒钟出现100次，使交流电弧放电的物理条件也随之改变，有其特殊的电和热的物理过程。这种电弧的稳定燃烧与弧焊电源的工作情况有很大的关系。

交流电弧的特点如下：

1. 电弧周期性地熄灭并引燃 交流电每半波电流经过零点并改变极性时，电弧熄灭，电弧空间温度下降，这就使电弧空间的带电粒子发生中和现象，降低了电弧空间的导电能力。同时，电压改变极性时，使上半周期内电极附近形成的空间电荷，力图往另一极运动，加强了中和作用，电弧空间的导电能力大大降低，使下半周期电弧重新引燃困难，只有当电源电压 $u$ 增至大于引燃电压 $u_{y_h}$ 后才有可能（参见下面图1—10）。如果焊接回路中没有足够的电感时，从上半波电弧熄灭至下半波电弧重新引燃之间可能有一段电弧熄灭时间。在熄弧时间内，电弧空间热量愈少，温度下降愈严重，将使 $u_{y_h}$ 增大，熄弧时间愈长，电弧也愈不稳定。若 $u_{y_h} > U_m$ （电源电压最大值），就不能重新引燃电弧。

2. 电弧电压和电流波形发生畸变 电弧电压和电流由于是交流的，电弧空间以及电极表面的温度是随时变化的，因而，电弧电阻就不是常数，而是随电弧电流 $i_f$ 的增大而减小的。这样，当电源电压 $u$ 按正弦曲线变化时，电弧电压 $u_f$ 和电流 $i_f$ 就不按正弦曲线变化，发生了畸变。电弧愈不稳定（ $U_{y_h}$ 愈大，熄弧时间愈长），畸变就愈大。

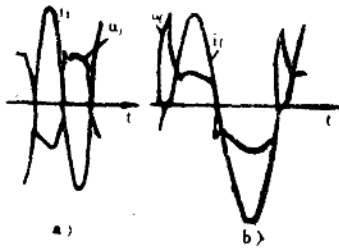
为了便于说明这两个特点，图1—8列举了埋弧焊电弧电压和电流的波形。图1—8a)是连续燃烧时的典型波形图，引弧电压在焊件是阴极的半个周期时超过电弧燃烧电压不多，电流曲线是连续的，而且形状近似正弦曲线。图1—8b)是不连续燃烧时的波形图，引弧电压峰值在焊件为阴极的一些半周期内超过电弧电压一倍多，电流曲线发生畸变并在半周期的开始处发生弯曲，这就说明电弧在燃烧中有中断。

3. 热的变化落后于电的变化 由于 $u_f$ 和 $i_f$ 变化很快，电及热的过程来不及达到稳定状态，使电弧空间热的变化落后于电的变化。

### 二、交流电弧连续燃烧的条件

上述已知，电弧的熄灭时间是交流电弧稳定性的重要特征参数，而它与电弧本身的参数，弧焊变压器的空载电压，电磁特性及焊接回路中的阻抗类型有密切的关系。只有对这些电参数进行深入的研究，才可能知道如何尽量减少熄弧时间，使交流电弧稳定地燃烧。

图1—9是交流电弧由弧焊变压器供电的原理简图。当电源电压按正弦变化时：



1-8 埋弧焊电弧电压和电流波形图  
a) 连续燃烧波形图 b) 不连续燃烧波形图

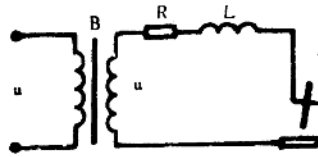


图 1-9 交流电弧供电原理图

$$u = U_m \sin \omega t$$

在电流实际数值较大时，电弧电压 $u_f$ 可以认为是常数，而且与引弧电压相差不大，所以假定 $U_{rh} = U_f$ 。又设 $i_f R$ 是焊接回路中电阻电压降的瞬时值， $\omega L \frac{di_f}{d\omega t}$ 是同一电路中电感电压降的瞬时值，那么原理图电路的电压平衡方程式就是：

$$U_m \sin \omega t = U_f + i_f R + \omega L \frac{di_f}{d\omega t}$$

下面研究二种不同电路性质对熄弧时间、交流电弧的稳定燃烧条件将会带来什么影响。

(一) 纯电阻性电路 假定焊接回路的电阻值远远大于电感值，焊接回路为纯电阻性电路 ( $R \neq 0, L = 0$ )。此时，原始方程式就为：

$$U_m \sin \omega t = U_f + i_f R$$

这种纯电阻性电路交流电弧燃烧情况见图 1-10 所示。

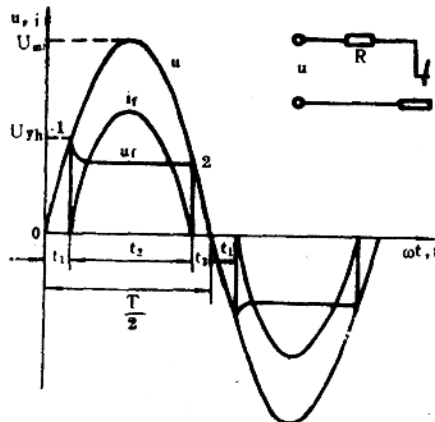


图 1-10 纯电阻性电路交流电弧的电压和电流曲线

当电源电压从零值变到引弧所需要的数值之前，电弧不燃烧（ $i_f = 0$ ），所以在 $t_1$ 时刻，如 $u = u_{yh}$ ，电弧引燃，引弧电压为：

$$u_{yh} = U_m \sin \omega t_1$$

则引燃时间：

$$t_1 = \frac{1}{\omega} \sin^{-1} \frac{U_{yh}}{U_m}$$

而到（ $t_1 + t_2$ ）时刻，电弧熄灭。电弧熄灭瞬间电压为：

$$u_{x1} = U_m \sin (\pi - \omega t_3) = U_m \sin \omega t_3$$

由于此时  $U_f = U_{x1}$

所以  $t_3 = \frac{1}{\omega} \sin^{-1} \frac{U_f}{U_m}$

电弧熄灭总的时间：

$$t_{x1} = t_1 + t_3 = \frac{1}{\omega} \left( \sin^{-1} \frac{U_{yh}}{U_m} + \sin^{-1} \frac{U_f}{U_m} \right)$$

根据以上分析，纯电阻性电路存在着电弧熄灭的时间，而影响到电弧的稳定燃烧。若使电弧熄灭时间减少，应该增大电源的空载电压，降低引弧电压和电弧燃烧电压，或者提高电源频率，然而，这些参数的变动将受到一定条件的限制。

（二）纯电感性电路 这种情况相当于弧焊变压器串入电抗线圈对电弧供电。为讨论方便，假定电抗线圈是纯电感性的（ $L \neq 0, R = 0$ ），并忽略弧焊变压器的内阻和漏磁，只是在小电流时才有较大的熄弧峰值和引弧峰值，而且电抗线圈又是线性的，即电感值不随电流而变化。此时，电弧电压和电流的变化曲线如图 1—11 所示。电压平衡方程式就为：

$$U_m \sin (\omega t + \varphi) = U_f + \omega L \frac{di_f}{d\omega t}$$

式中  $\varphi$ ——是电压在 $t = 0$ 时电流过零瞬间的移相角度。

从对图 1—11 的分析可以得知交流电弧连续燃烧的两个条件：

交流电弧连续燃烧的条件之一：必须在 $\omega t = 0$  和 $\omega t = \pi, 2\pi \dots$ 时使电弧电流 $i_f$ 正好过零点，即 $i_f = 0$ 。

把上式移项：

$$di_f = \frac{U_m}{L} \sin (\omega t + \varphi) dt - \frac{U_f}{L} dt$$

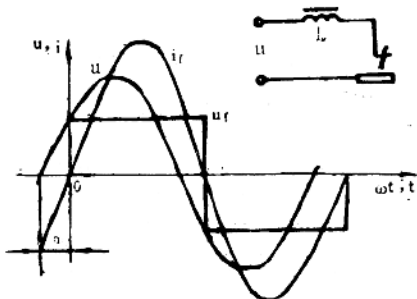


图 1—11 纯电感性电路交流电弧的电压和电流曲线



积分后得

$$i_f = - \left[ \frac{U_m}{\omega L} \cos(\omega t + \varphi) + \frac{U_f}{\omega L} \omega t \right] + C$$

由于  $t = 0$  时,  $i_f = 0$ , 代入上式得

$$C = \frac{U_m}{\omega L} \cos \varphi$$

而感抗  $X_L = \omega L$ , 经整理得:

$$i_f = \frac{U_m}{X_L} \left[ \cos \varphi - \cos(\omega t + \varphi) \right] - \frac{u_f}{X_L} \omega t$$

如果电感上的感应电势能够维持连续燃烧到下一半波的引弧时刻, 则交流电弧的燃烧是连续的, 也就是:

$$\omega t = \pi, 2\pi \dots \text{时}, i_f = 0$$

这样, 代入上式求得  $\cos \varphi$  值为

$$\cos \varphi = \frac{\pi U_f}{2 U_m}$$

在这里取  $u_f = U_f$ ,  $U_f$  ——  $u_f$  在水平段的数值。

因

$$U_m = \sqrt{2} U_0$$

$$\cos \varphi = 1.11 \frac{U_f}{U_0}$$

将  $\cos \varphi$  值代入电流方程式, 求得交流电弧连续燃烧的电流方程式为:

$$i_f = - \frac{U_m}{X_L} \cos(\omega t + \varphi) + \frac{U_f}{X_L} \left( \frac{\pi}{2} - \omega t \right)$$

由此可见, 这种电感性电路与电阻性电路不同, 只要有足够的电感, 当电源电压下降到小于电弧电压或电流为零时电弧都能维持燃烧。

交流电弧连续燃烧的条件之二: 当  $\omega t = 0, \pi, 2\pi \dots$  时, 电源电压应大于 (或等于) 电弧引燃电压, 即

$$U_m \sin \varphi \geq U_{yh}$$

也就是

$$\sin \varphi \geq \frac{U_{yh}}{U_m}$$

这时, 电弧可以立即重新引燃而不致熄灭。

把上述二个条件综合起来, 即把  $\omega t = 0$  和  $\omega t = \pi, 2\pi \dots$  时交流电弧引燃和连续燃烧的条件相结合, 便得到联立方程式:

$$\sin \varphi \geq \frac{U_{yh}}{U_m}$$

$$\cos \varphi = \frac{\pi U_f}{2 U_m}$$