

气体保护焊工艺

殷树言 编著
张九海



哈尔滨工业大学出版社

气体保护焊工艺

殷树言 编著
张九海

0416/21

哈尔滨工业大学出版社



660385

内 容 简 介

本书共分六章,前两章系统地介绍了气体保护焊的基本理论,后四章力求利用基本理论去说明TIG焊、MIG焊、MAG焊、CO₂焊和脉冲焊等方法的实质和应用中的问题,并给出了大量的图表和数据。本书总结了作者多年的教学与科研的实践经验,并综合了国内外的大量文献。内容丰富、深入浅出、联系实际。

本书可作为大专院校学生和研究生的教学参考书,还可供焊接工程技术人员参考,也可作为从事气体保护焊工作人员的培训教材。

气 体 保 护 焊 工 艺

殷树言 编著
张九海

*

哈尔滨工业大学出版社出版
新华书店首都发行所发行
哈尔滨建筑工程学院印刷厂印刷

*

开本787×1092 1/16 印张19.125 字数383 000

1989年7月第1版 1989年7月第1次印刷

印数 1—6 000

ISBN 7-5603-0146-0/TG·9 定价: 3.55元

前 言

气体保护焊是近十几年来飞速发展的一种弧焊方法。由于其焊接质量好和经济效益高，而在先进的工业国家得到了广泛的应用，就焊接工作量而言，该法已占40~50%。我国也在大力推广这种焊接方法。

我校和国内许多单位在气体保护焊的科研和应用方面做了大量的工作。同时，我校还为前铁道部、前电子工业部和辽宁成人教育中心等部门开办过培训班，编写了教材。本书是在科研、教学实践的成果和经验基础上写成的。

本书力求在文字上通俗易懂，着重从物理概念上阐述气体保护焊的基本理论，并尽量做到理论联系实际。为便于指导生产，在书中还给出了大量的数据和图表。

本书共分六章，其中第一章、第三章和第五章由张九海副教授编著，第二章、第四章和第六章由殷树言副教授编著。初稿完成后承蒙吉林工业大学李树槐教授审阅，在此谨致以衷心的感谢。

由于我们的水平有限，难以全面、准确地反映出气体保护焊工艺的内容，错误在所难免，希望读者批评指正。

编著者

1988年8月

目 录

第一章 焊接电弧	1
第一节 电弧的物理基础.....	1
第二节 焊接电弧的产热及温度分布.....	28
第三节 电弧力及影响因素.....	33
第四节 交流焊接电弧的特点.....	42
第五节 磁场对电弧的作用.....	57
第六节 气体介质对电弧形态、熔滴过渡及焊缝成形的影响.....	65
第二章 熔滴过渡与焊缝成形	76
第一节 焊丝熔化.....	76
第二节 熔滴过渡.....	80
第三节 母材加热和焊缝成形.....	109
第三章 钨极氩弧焊	120
第一节 钨极氩弧焊的特点及应用.....	120
第二节 交流钨极氩弧焊机.....	130
第三节 钨极氩弧焊工艺.....	143
第四章 熔化极氩弧焊	152
第一节 冶金特点.....	153
第二节 MIG焊和MAG焊工艺.....	157
第五章 脉冲氩弧焊	181
第一节 钨极脉冲氩弧焊的工艺特点.....	181
第二节 熔化极脉冲氩弧焊.....	192
第三节 其他脉冲焊接方法.....	204
第四节 脉冲氩弧焊设备.....	208
第六章 CO₂ 气体保护电弧焊	230
第一节 概述.....	230
第二节 CO ₂ 气体保护焊的冶金特点.....	231
第三节 CO ₂ 气体保护焊时电弧及熔滴过渡特点.....	243
第四节 CO ₂ 气体保护焊工艺.....	254
第五节 CO ₂ 气体保护焊设备及其发展趋势.....	277
参考文献	299

第一章 焊接电弧

电弧是所有电弧焊接方法的能源。到目前为止，电弧焊在焊接方法中占据着主要地位，一个重要的原因就是因为它能有效地把电能转换成熔化焊接过程中所需要的热能和机械能。为了认识和发展电弧焊方法，首先必须清楚电弧是怎样实现这种能量转换和焊接中是怎样利用这种能源的，本章将从电弧的物理本质——导电机理入手，分析电弧的产热和产力机构、交流电弧的特点、磁场对电弧的作用及气体介质对电弧的影响等。

第一节 电弧的物理基础

电弧并不是一般燃烧现象，这里既没有燃料，也没有伴随燃烧过程的化学反应。电弧实质是在一定条件下通过两极之间的气体空间的一种导电现象（图1-1），是一种气体放电现象。借助这种特殊的气体放电过程，电能转化为热能、机械能和光能。焊接时主要是利用其热能和机械能来达到连接金属的目的。要理解电弧现象，必须先了解气体放电现象的一般规律。

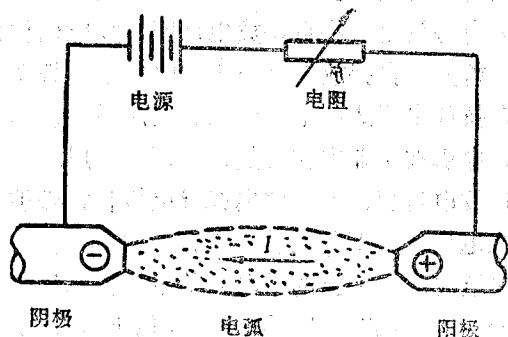


图1-1 电弧的示意图

一、气体放电的基本概念

不论固体、液体还是气体，能否呈现导电性，都取决于在电场作用下是否拥有可自由移动的带电粒子。金属本身拥有大量的自由电子，所以在金属导体两端只要加上电压，自由电子便产生定向运动形成电流。但是正常状态下的气体不含带电粒子，是由中性分子或原子组成，它们虽然可以自由移动，但不会受电场作用而产生定向运动，所以是不导电的。因此，要使正常状态的气体导电，必须先有一个产生带电粒子的过程，然后才能呈现导电性能。金属中自由电子可以自由移动，而金属中离子则不能自由移动，但气体中所有组成粒子，皆可以自由移动，所以气体的导电过程和规律与金属有显著的不同。

当金属导电时，导电部分的电流与电压之间的关系遵循欧姆定律 $I = U/R$ （图1-2b），而气体导电时，其导电部分电流与电压的关系不遵循欧姆定律，而是一个很复杂的关系（图1-2a）。这是因为金属导电时，在整个导电区间其导电机构基本不发生变化，而气体放电时，在不同条件下和不同的导电区间，其导电机构也显著不同。在较小的电流区间，气体导电所需要的带电粒子不能通过导电过程本身产生，而需要外加措施

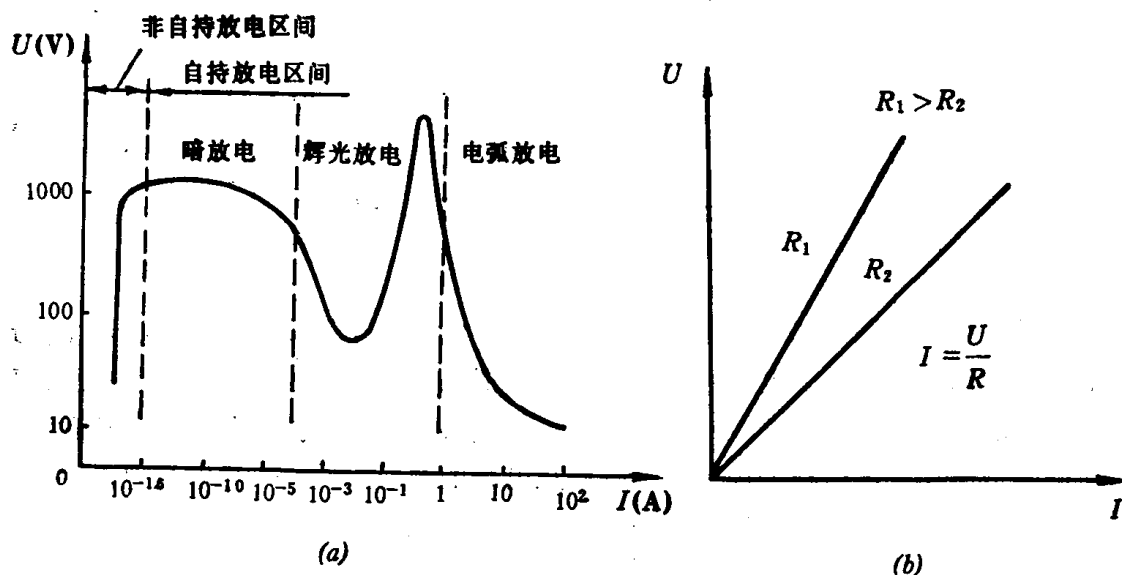


图1-2 气体放电与金属导电的伏安特性

(a) 气体放电; (b) 金属导电

来造成带电粒子（加热，施加一定能量的光子等），随着外加措施的有无，则决定带电粒子的存在与否，即决定了它的导电性能。这种气体导电现象称为非自持放电。当电流大于一定数值时，气体导电过程本身就可以产生维持导电所需要的带电粒子，这种气体放电只在开始时需要外加措施制造带电粒子，进行诱发（通常称“点燃”），一旦放电开始，取消外加诱发措施，放电过程仍可以自己继续下去，放电过程自身能够产生维持放电所需要的带电粒子。这种放电过程称为自持放电。在自持放电区间，放电机构也因电流数值的不同而不同，其特性也有显著的差异，自持放电又分为：暗放电、辉光放电和电弧放电等三种基本形式。电弧是几种自持放电形式中电压最低、电流最大、温度最高、发光最强的一种气体放电现象。因此，电弧在工业中作为热源被广泛应用。

电弧是一种气体导电现象，又是一种自持放电过程，要理解电弧导电机理，必须了解电弧中带电粒子的产生过程以及带电粒子在电场作用下的运动特点。

电弧是由两个电极和它们之间的气体空间组成的。电弧的带电粒子主要依靠气体空间的电离和电极的电子发射两个物理过程所产生的，同时伴随着一些其他过程，如解离、激励、扩散、复合、负离子的产生等。

1. 电离与激励

在一定条件下中性气体分子或原子分离为正离子和电子的现象称为电离。气体分子或原子在常态下是由数量相等的正电荷（原子核）和负电荷（电子）构成的一个稳定系统，对外界呈中性。要使其电离就要破坏这种稳定系统，需要对这个系统施加外来能量。常态下的气体粒子（分子或原子），受外来能量作用失去一个或多个电子后则成为正离子。使中性气体粒子失去第一个电子所需要的最低外加能量称为第一电离能，通常以电子伏特(eV)为单位。若以伏特表示则为电离电压，生成的正离子称为一价正离子，这种电离称为一次电离。一个电子伏特就是一个电子通过一伏电位差空间所得的能量，其数值等于 $1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ 。在电工学中，为计算方便起见，常把用电子伏特为单位的能量转换为数值上相等的电压来处理，单位为伏特。因此在实用中常直接用电离电压（单

位为伏特) 来表示气体电离的难易。以伏表示的电离电压在数值上等于以电子伏特表示的电离能。要使中性气体粒子失去第二个电子则需要更大的电离电压, 称为第二电离电压, 生成的离子称为二价离子, 这种电离称为二次电离, 依此类推。普通焊接电弧中当焊接电流较小时只存在一次电离, 而在大电流和压缩焊接电弧中, 电弧温度达到几万度时可以出现二次或三次电离, 即使这种情况下一次电离仍居主要地位, 所以一般书籍中只列出各种气体一次电离的电离电压。自由状态气体原子的第一电离电压在3.9V(Cs)到24.5V(He)之间, 第二电离电压在十几伏到几百伏之间。一次电离电压低的粒子, 二次电离电压不一定还低, 这由粒子的原子结构决定。电弧气氛中可能遇到的气体的电离电压列于表1-1。

表 1-1 常见气体粒子的电离电压

元素	电 离 电 压(V)	元素	电 离 电 压(V)
H	13.5	Ni	7.6(18)
He	24.5(54.2)	Cr	7.7(20;30)
Li	5.4(75.3;122)	Mo	7.4
C	11.3(24.4;48;65.4)	Cs	3.9(33;35;51;58)
N	14.5(29.5;47;73;97)	Fe	7.9(16;30)
O	13.5(35;55;77)	W	8.0
F	17.4(35;63;87;114)	H ₂	15.4
Na	5.1(47;50;72)	C ₂	12
Cl	13(22.5;40;47;68)	N ₂	15.5
Ar	15.7(28;41)	O ₂	12.2
K	4.3(32;47)	Cl ₂	13
Ca	6.1(12;51;67)	CO	14.1
NO	9.5	Al	5.96
OH	13.8	Mg	7.61
H ₂ O	12.6	Ti	6.81
CO ₂	13.7	Cu	7.68
NO ₂	11		

注: 括号内的数字依次为二次、三次、……电离电压。

不仅原子状态的气体粒子可以被电离, 分子状态的气体粒子也可以直接被电离。当电子从气体分子中被分离出来时, 一般情况下需要克服两层约束(原子对电子的约束和分子对电子的约束), 所以需要的电离电压比原子状态时的电离电压要高一些, 如H(原子)为13.5V, 而H₂(分子)为15.4V。然而, 也有些气体原子结合为分子时反而使电子和原子的联系减弱, 故分子的电离电压反而比原子的电离电压低, 如NO分子的电离电压为9.5V, 而N原子和O原子的电离电压分别为14.5V和13.5V。

气体电离电压的高低说明电子脱离原子或分子所需要的外加能量的高低, 亦即说明在某种气氛中产生带电粒子的难易, 在相同的外加能量条件下, 电离电压低的气体提供带电粒子较容易, 从这个角度看, 有利于电弧的稳定。但电离电压高低只是影响电弧稳定的许多因素之一, 而不是唯一的因素。因为气体的其他性能(如解离性能, 热物理性

能等)反过来会影响整个电弧空间的能量状态,带电粒子的产生和移动过程等。因此,在分析焊接电弧现象时,不能仅从电弧气体的电离电压来分析,还需要考虑气体各种性质的综合作用。

当电弧空间同时存在几种电离电压不同的气体时,在外加能量的作用下,电离电压较低的气体粒子先被电离,如果这种低电离电压气体供应充分,则电弧空间的带电粒子将主要依靠这种气体的电离过程来提供,所需要的外加能量也主要由这种气体的电离电压所决定。由表1-1可知,Fe的电离电压为7.9V,比CO₂或Ar的电离电压(13.7;15.7)低很多,因此在钢材的气体保护焊接时,如果焊接电流较大时,电弧空间将充满铁的蒸气,电弧空间的带电粒子将主要由铁蒸气的电离过程提供,电弧气氛的电离电压将由铁蒸气的电离电压来决定。在这种情况下为提供电弧导电所需要的带电粒子,要求的外加能量级可以较低。

前面提到常态下的中性气体粒子内部的原子核与电子构成一个稳定系统,中性粒子受外来能量作用失去电子而电离是这个稳定系统被破坏的一种可能结果。但也存在另一种可能的结果,即当中性粒子受外来能量作用其大小还不足以使电子完全脱离气体原子或分子,但可能使电子从较低的能级转移到较高的能级时,则中性粒子的稳定状态也被破坏,这种状态称为激励。使中性粒子激励所需要的最低外加能量称为最低激励电压(也是以伏表示),某些气体的最低激励电压见表1-2。

表 1-2 常见气体粒子的最低激励电压

元素	激励电压(V)	元素	激励电压(V)	元素	激励电压(V)
H	10.2	K	1.6	CO	6.2
He	19.8	Fe	4.43	CO ₂	3.0
Ne	16.6	Cu	1.4	H ₂ O	7.6
Ar	11.6	H ₂	7.0	Cs	1.4
N	2.4	N ₂	6.3	Ca	1.9
O	2.0	O ₂	7.9		

激励状态的粒子可以具有不同的能级,由于电子尚未脱离粒子,所以粒子对外界呈中性。因此粒子的激励状态是一种非稳定状态,它处于激励状态的时间是很短暂的,根据激励能级的不同为 $10^{-2} \sim 10^{-8}$ s。较高能级的激励粒子继续接受外来能量可以使其电离,或者将自己的能量以辐射能的形式释放出来,表现为电弧的辐射光而恢复到原来的稳定状态。能级低的激励粒子,可能与其他粒子碰撞将能量传递给其他粒子而恢复其稳定状态。接受能量的其他粒子可能解离,激励或电离。因此,粒子的激励过程,虽然不是直接产生带电粒子的过程,但也是与电离过程和电弧特性有密切关系的物理现象。

任何中性粒子在接受外界一定数值能量的条件下,会产生电离与激励。外加能量可以通过不同方式施于中性粒子,但使之电离与激励所必需给予它的最低能量数值,并不因施加能量的方式不同而改变,即电离和激励电压都是确定数值。外界能量传递给自由运动的气体粒子,从本质上讲,只有两种能量传递途径:一种是碰撞传递,另一种是光辐射传递。

(1) 碰撞传递 气体粒子在空间总是处于不规则的运动状态,只有在绝对零度(K)时,气体粒子将停止运动。各个粒子以某一速度运动时,具有一定的动能,而且可能互相频繁地碰撞,粒子在相互碰撞时将进行能量转移,以这种形式传递能量称为碰撞传递。

气体粒子的相互碰撞可能有两种情况:非破坏性的弹性碰撞和破坏性的非弹性碰撞。弹性碰撞时气体粒子间只产生动能的传递和再分配,相互碰撞的两粒子动能之和基本不变,粒子的内部结构不发生任何变化,这种碰撞的结果只能使粒子的运动速度发生变化。因此,弹性碰撞只能引起粒子温度的变化,不能产生电离与激励过程。弹性碰撞是在气体粒子拥有的动能较低时产生的。当气体粒子拥有较大的动能时,则产生非弹性碰撞,使被碰撞的气体粒子的内部结构发生变化,在碰撞时部分或全部动能转换为内能,如果此内能大于激励电压,则粒子被激励,如果此能量大于电离电压,则粒子将被电离。被激励的粒子如果继续受到非弹性碰撞,内能积累达到电离电压时也将产生电离。只有非弹性碰撞才产生电离过程,为气体空间制造带电粒子。

电弧空间的气体中不只含有中性气体粒子,而且含有电子和正离子,这些粒子都以某一速度运动,中性气体粒子同样也受到它们的碰撞而接受它们传递的能量。相互碰撞的两物体的能量传递情况与它们的质量有密切关系,电子的质量远远小于气体原子、离子或分子的质量,因此当具有足够能量的电子与中性粒子进行非弹性碰撞时,它的动能几乎可以全部传递给中性粒子,转换为中性粒子的内能,使其激励与电离。当中性粒子之间进行碰撞时,由于它们的质量相近,则只能将这部分能量传递给被碰撞的粒子,传递的能量最多不超过原动能的一半,因此在电弧中通过碰撞传递使气体粒子电离的过程中,电子的作用是所有粒子中最重要的。

由上面的讨论可以看到,要通过粒子的碰撞,增加中性粒子的内能使之达到电离,关键是提高粒子的动能,尤其是提高电子的动能。电弧中高温和电场的存在都是提高粒子动能的有利条件,高温可以提高所有粒子(中性粒子、电子、离子)的动能,而电场强度是提高带电粒子(电子、离子)动能的条件。实际电弧过程通过粒子间的碰撞将能量传给中性粒子并使之电离,是电弧本身制造带电粒子维持其导电的最主要途径。

(2) 光辐射传递 向气体粒子传递能量的另一种途径是光辐射传递,也就是说中性气体粒子可以接受外界以光量子形式所施加的能量,提高其内能并改变其内部结构,使气体粒子被激励或电离。光量子的能量可以 $h\gamma$ 表示(h —普朗克常数; γ —光辐射频率)。因此气体粒子接受光量子作用产生激励的条件是:

$$h\gamma \geq W_e = eU_e \quad (1-1)$$

式中 W_e 为激励能(J); e 为电子电荷量(C); U_e 为气体粒子的激励电压(V)。

而气体粒子接受光量子作用产生电离的条件是:

$$h\gamma \geq W_i = eU_i \quad (1-2)$$

式中 W_i 为电离能(J); U_i 为电离电压(V)。

以光量子形式传递给气体粒子的能量可以全部转换为粒子的内能。当光量子能量超过气体粒子的电离能时,则其余部分将转换为电离生成的电子的能量,即

$$h\gamma = eU_i + \frac{1}{2}mv^2$$

式中 m ——电子的质量, g;

v ——被电离出来的电子运动速度, m/s。

电弧本身发出多种频率的光辐射, 因此电弧本身就具有向气体粒子提供辐射能量的条件, 中性粒子接受弧光辐射能可以产生激励与电离, 制造带电粒子维持电弧的导电。但是在一般焊接电弧中, 通过光辐射传递形式制造带电粒子与碰撞传递相比, 则是次要的。

2. 电离种类

电弧中气体粒子的电离因外加能量种类的不同而分为三类:

(1) 热电离 气体粒子受热的作用而产生的电离称为热电离。根据气体分子运动理论可以知道, 气体温度的高低意味着气体粒子 (包括中性粒子、电子和离子) 总体能量的高低, 亦即气体粒子平均速度的高低。

气体粒子的平均运动速度与温度的关系如下:

$$\bar{c} = 1.87 \times 10^{-10} \sqrt{\frac{T}{m}} \quad (1-3)$$

式中 $\bar{c}$ ——气体粒子的平均运动速度, m/s;

T ——气体的绝对温度, K;

m ——粒子的质量, g。

由上式可知, 气体的温度越高, 气体粒子的运动速度也越高, 即动能也越大。在一定温度下, 气体粒子的质量越小其运动速度越高。由于气体粒子的热运动是无规则的运动, 粒子之间将发生频繁的碰撞, 若粒子的运动速度足够高 (即动能足够大), 粒子之间可能发生非弹性碰撞, 引起气体粒子的激励或电离。因此, 热电离实质上是由于粒子之间的碰撞而产生的一种电离过程。

电弧中不仅含有常态的中性气体粒子, 而且也含有电子、正离子和激励状态的中性粒子等多种粒子, 这些粒子都有相互碰撞的机会, 而发生电离可能性最大的是电子对激励状态的中性粒子或对常态中性粒子的碰撞, 因为电子在与中性粒子进行非弹性碰撞时, 几乎全部能量都传给中性粒子促使其电离。

气体中各个粒子在同一温度下的热运动, 运动速度是不一样的, 有的高或低于平均运

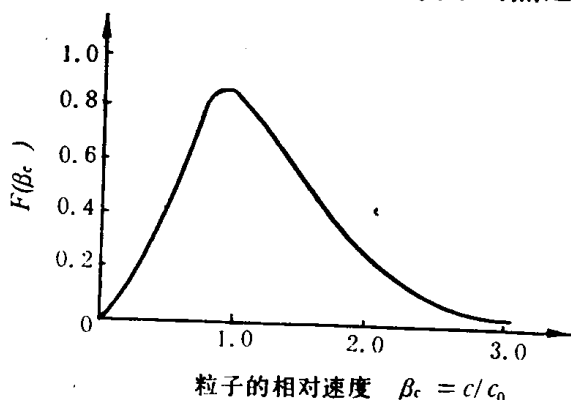


图1-3 气体粒子运动的麦克斯韦曲线分布

c ——气体粒子的实际速度; c_0 ——气体粒子中绝大多数粒子具有的速度, $c_0 = 0.89 \bar{c}$; $\bar{c}$ 为平均速度; $F(\beta_c)$ 某一速度的粒子与总数的比值

动速度, 根据气体粒子运动速度是按麦克斯威尔 (Maxwell) 曲线分布的, 如图1-3所示。气体中所有粒子包括电子的运动速度的分布都遵循这个规律。因此在某一温度下, 粒子所具有的动能并不都相同, 只有拥有大于电离电压能量的那部分粒子才可能引起中性粒子的电离。气体中单位体积内被电离的粒子数与气体粒子电离前总数的比率为电离度。一般以 x 表示: $x = (\text{电离后的电子或离子密度}) / (\text{电离前的中性粒子密度})$ 。

根据印度科学家萨哈 (Saha) 的推导, 假设气体中各粒子处于热平衡状态, 则热电离与气体温度、气体压力、气体电离电压等因素存在以下关系:

$$\frac{x^2}{1-x^2} p = 3.16 \times 10^{-7} T^{2.5} e^{\frac{-eU_i}{kT}} \quad (1-4)$$

式中 p ——气体压力, $1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$;
 T ——气体温度, K;
 e ——电子的电量, C;
 k ——波耳茨曼常数, $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$;
 U_i ——气体的电离电压, V;
 e ——自然对数的底, $e = 2.718$ 。

由这个关系式所决定的电离度 x 与温度 T 的曲线关系如图1-4所示。

由萨哈公式及图1-4可以看出热电离时的电离度随温度的升高, 压力的减少, 电离电压的减少而增加。

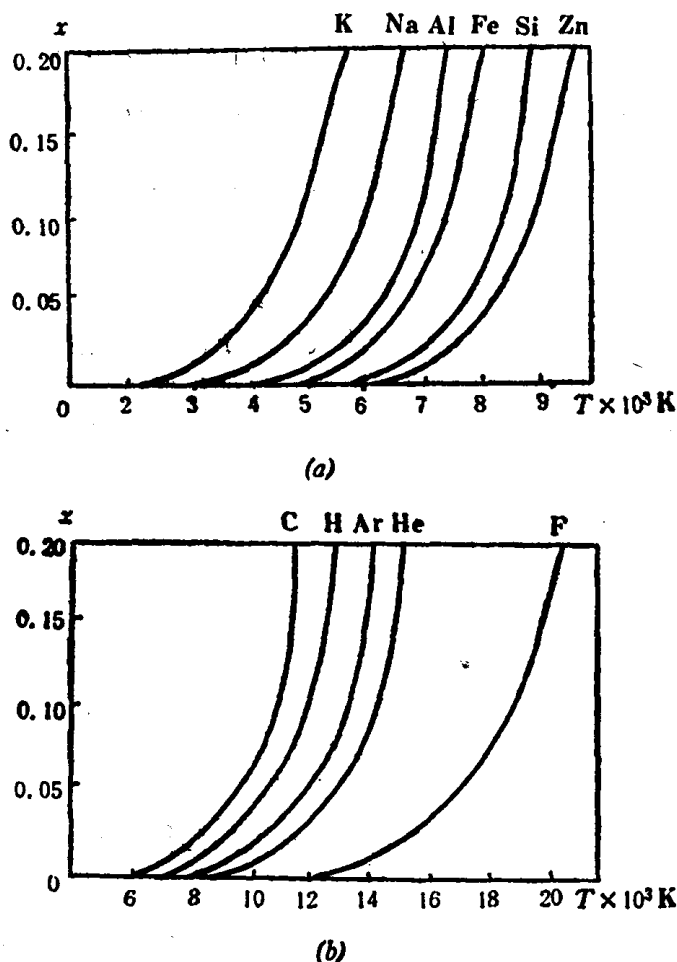


图1-4 热电离的电离度 x 与温度 T 的关系

当几种气体组成混合气体时则各组分气体的电离度在同一温度和气压下, 因其电离电压的差别而显著不同, 低电离电压气体的电离过程, 在提供电弧需要的带电粒子方面起着关键作用。例如当电弧气氛中含有 Ca 、 Fe 、 O_2 、 H_2 时 (电离电压分别为 6.1, 7.8,

萨哈公式是单一气体热电离度的表达式, 如果某气体中混有其他成分时, 各种气体电离程度不一样, 此时电子密度与电离前中性粒子密度的比例称为实效电离度。混合气体的电离电压称为实效电离电压。利用萨哈公式求实效电离度时需代入实效电离电压。理论与实际都证明混合气体的实效电离电压主要决定于电离电压较低的气体成分, 即使这种气体占有较小的比例。例如铁蒸气中混有钾蒸气时, 其实效电离电压与混入的钾蒸气的比例关系如图 1-5 所示。铁蒸气电离电压为 7.9V 而钾蒸气电离电压为 4.3V。当钾蒸气含量超过 5% 时, 则实效电离电压显著下降而接近钾的电离电压。因此电弧焊时为了提高电弧的稳定性, 在电弧气氛中只需要加入少量的低电离电压物质可取得显著的效果。

12.2, 15.4V),当温度为5000K,气压为一个大气压时,其电离度之比如下:

$$x_{\text{Ca}} : x_{\text{Fe}} : x_{\text{O}_2} : x_{\text{H}_2} = 1 : 1.74 \\ \times 10^{-2} : 3.24 \times 10^{-8} : 6.63 \times 10^{-11}$$

由上面的关系式可以认为,如果电弧气氛中只要含有一定Ca蒸气,则此混合气体中的带电粒子主要由Ca蒸气的电离所提供。

一般在常压下的焊接电弧中,电子是电弧的主要带电粒子,电子密度的数量级为 10^{14} 个/cm³时,即可维持电弧的正常导电。实效电离度为 10^{-4} 数量级时即可满足小电流电弧导电的需要,亦即一万个中性粒子中有一个中性粒子被电离即可。一般焊接电弧的电离度只有 $0.1 \times 10^{-3} \sim 0.6 \times 10^{-3}$ 的数量级。而在强迫冷却,强迫压缩或大电流的电弧中,电弧温度达到一万度或几万度以上时,实效电离度的数量级才可能达到 $10^{-1} \sim 1$ 的程度。

由于弧柱的温度一般在5000K到30000K范围,所以热电离是弧柱部分产生带电粒子的最主要途径。

电弧的温度很高,电弧中的多原子气体是由两个以上原子构成的气体分子,由于热的作用将分解为原子,这种现象称为热解离。在热电离之前气体分子首先产生热解离。热解离也需要外加能量,是吸热反应。气体分子产生热解离所需要的最低能量称为解离能。不同气体分子的解离能也不同。电弧气氛中常遇到的几种气体的解离能如表1-3。

表 1-3 几种气体的解离能

解离过程	解离能(eV)	解离过程	解离能(eV)
$\text{H}_2 \rightarrow \text{H} + \text{H}$	4.4	$\text{NO} \rightarrow \text{N} + \text{O}$	6.1
$\text{N}_2 \rightarrow \text{N} + \text{N}$	9.1	$\text{CO} \rightarrow \text{C} + \text{O}$	10.0
$\text{O}_2 \rightarrow \text{O} + \text{O}$	5.1	$\text{CO}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{O}$	5.5
$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH} + \text{H}$	4.7		

各种气体的解离度(解离数/分子总数)与气体种类和温度有关。几种气体的解离度与温度的关系如图1-6所示。

由于解离能皆低于电离能,电弧中气体分子受热作用时首先大量解离成原子,然后由大量原子和少量分子产生电离。气体解离过程伴随着吸热作用,所以它除了影响带电粒子的产生过程外,还对电弧的电和热性能产生显著的影响。焊接时电弧的不同保护气氛引起许多不同现象常与气氛的解离过程有密切关系。例如在 CO_2 、 N_2 等气氛中,在相同电弧长度下,电弧电压和电弧温度要比单原子气体Ar的电弧电压和电弧温度高,就是因为 CO_2 、 N_2 等多原子气体在高温下首先发生解离,吸收大量解离能,

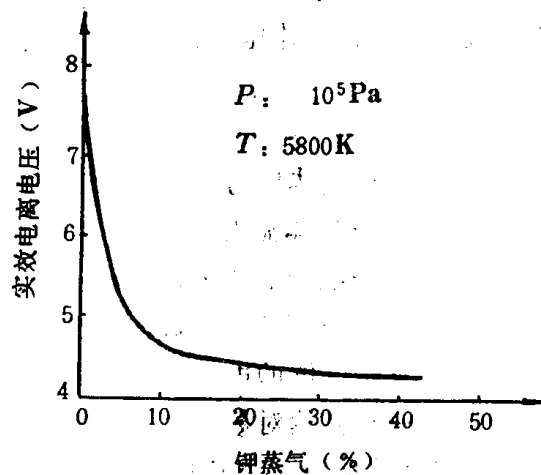


图1-5 铁与钾的混合蒸气中实效电离电压与钾蒸气含量的关系

强迫电弧收缩所造成的。

(2) 电场作用下的电离 当气体中不存在电场时, 无论是带电粒子还是中性粒子, 总体看来只作无规则无定向的运动且相互频繁的碰撞。此时粒子的动能主要决定于气体的温度。当气体中有电场作用时, 则带电粒子除了作无规则的热运动外, 尚产生一个受电场影响的定向运动。正、负带电粒子定向运动方向相反, 电场对带电粒子在电场方向的运动起加速作用, 电能将转换为带电粒子的动能。当带电粒子的动能在电场的影响下增加到足够的数值, 则可能与中性粒子产生非弹性碰撞而使之电离, 这种电离称为电场作用下的电离。由于带电粒子是在充满气体粒子的空间运动, 事实上它将一边与气体粒子发生碰撞, 一边沿电场方向运动, 如图1-7所示。其总的运动趋势虽与电场方向一致, 但是每次碰撞后的运动方向都是变化的, 而并不一定与电场方向一致。电场对带电粒子的加速作用事实上只能在与其他粒子的每两次碰撞之间路程中产生, 两次碰撞之间的路程长度为粒子的自由行程, 所有自由行程的平均值称为平均自由行程。在平均自由行程内电场对带电粒子(如果电荷量为 e)所能施加的最大动能(平均自由行程与电场方向平行时)只能是

$$W_k = \lambda E e \quad \text{J} \quad (1-5)$$

式中 λ ——平均自由行程, cm;

E ——电场强度, V/cm;

e ——一个电子的电荷量, $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ 。

根据气体分子运动理论可知在同一气体粒子的气体中, 中性气体粒子的平均自由行程 λ_g 为:

$$\lambda_g = \frac{1}{4\sqrt{2}\pi r_g^2 n_g} \quad \text{cm} \quad (1-6)$$

式中 r_g ——气体粒子的半径, cm;

n_g ——气体粒子的密度, 个/cm³。

如果气体中同时有离子和电子存在时, 则离子的平均自由行程 λ_i 为:

$$\lambda_i = \frac{1}{4\pi r_g^2 n_g} \quad \text{cm} \quad (1-7)$$

电子的平均自由行程 λ_e 为:

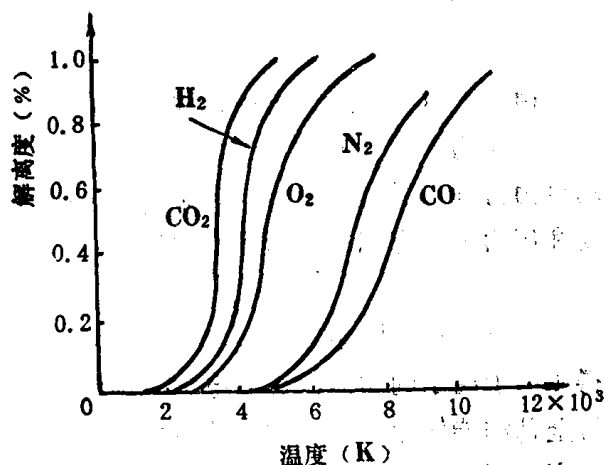


图1-6 几种气体的解离度与温度的关系

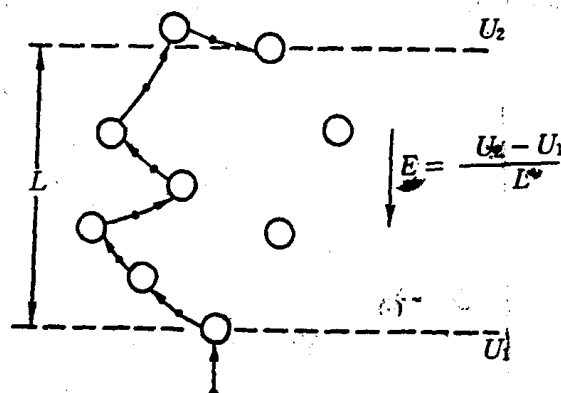


图1-7 电场作用下电子在气体中的运动

○—气体原子；·—电子； U_1 、 U_2 为1、2点的电位； E —电场强度

$$\lambda_e = \frac{1}{\pi r_g^2 n_g} \text{ cm} \quad (1-8)$$

由上式可知, 平均自由行程与气体粒子的半径平方和气体的密度成反比。由于气体密度与压力和温度有关, 当温度一定时平均自由行程与压力成反比, 当压力一定时, 平均自由行程与温度成正比。当某一气体中同时存在中性粒子、离子和电子时, 在一定温度和压力下, 它们自由行程的比例为:

$$\lambda_e : \lambda_i : \lambda_g = 4\sqrt{2} : \sqrt{2} : 1 \quad (1-9)$$

可见, 在相同条件下, 电子的平均自由行程比离子大4倍, 在电场作用下电子可获得4倍于离子的动能, 又因电子质量比离子小得多, 它与中性粒子发生非弹性碰撞时可将其全部动能转换为中性粒子的内能。如果电子的总能量超过中性粒子的电离能, 则产生电离。因此, 电场作用下的电离现象也主要是电子与中性粒子的非弹性碰撞引起的。

在强电场的作用下, 电子受到电场的加速作用, 与中性或受激励的粒子相撞, 可以生成一个新的电子与正离子, 然后这两个电子继续前进会分别又与中性粒子碰撞, 又可生成两个新的电子, 以此类推, 使带电粒子快速增加, 这种在强电场作用下的电离具有连锁反应的性质, 如图1-8所示。但是带电粒子的增加是有一定限度的。这是因为在电弧导电中, 除了电离过程外, 还同时存在着带电粒子的消失的过程。

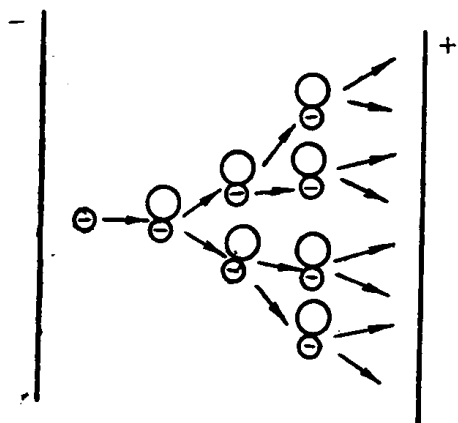


图1-8 连锁反应电离过程示意图

在普通电弧中由于弧柱部分的电场强度较弱, 数量级为10V/cm左右, 电子在平均自由行程中所获得的动能较小, 一般比热作用给予它的动能要小得多, 所以在弧柱中热电离是主要形式, 电场作用下的电离是次要的。而在阴极压降区和阳极压降区(在阴极和阳极前面的极小区间), 电场强度可能达到很高数值(数量级达 $10^5 \sim 10^7$ V/cm), 只有在这两个区域才可能产生电场作用下的电离现象。

(3) 光电离 中性粒子接受光辐射的作用而产生的电离现象称为光电离。电弧本身就可以产生不同波长的光辐射, 光电离也是一种产生带电粒子的可能途径。光辐射引起中性粒子电离的条件是 $h\nu \geq eU_i$, 因此并不是所有的光辐射皆可发生电离现象, 对电离能不同的气体都存在一个产生光电离的临界波长。波长越小, 能量越强, 只有当接受的光辐射波长小于临界波长时, 中性气体粒子才可能直接被电离, 临界波长的数值可由下式确定。

$$\because h\nu = eU_i \quad \nu_0 = \frac{c}{\lambda_0}$$

$$\therefore \lambda_0 = \frac{hc}{eU_i} \quad (1-10)$$

式中 h —— 普朗克常数;

ν_0 —— 临界光辐射频率, Hz;

λ_0 —— 临界光辐射波长, m;

c ——光速, m/s;

eU_i ——电离能, J。

式(1-10)中常数代入数值后则为:

$$\lambda_0 = 12360 \frac{1}{U_i} \text{ \AA} \quad (1-11)$$

式中 $\text{\AA} = 10^{-10} \text{ m}$ 。

上式中代入不同气体的电离能数值, 则可得出该气体光电离所要求的辐射光的临界波长。电弧中经常遇到的气体临界波长如表1-4所示。

表 1-4 常见气体的光电离的临界波长

气 体	K	Na	Al	Ca	Mg	Cu	Fe	O	H	CO	N	Ar	He
电离能 (eV)	4.3	5.1	5.96	6.1	7.61	7.7	7.8	13.5	13.5	14.1	14.5	15.7	24.5
临界波长 (Å)	2874	2423	2073	2026	1624	1605	1585	915	915	876	852	787	504

由表 1-4 可见, 这些气体光电离所要求的临界波长皆在紫外线光谱区内 ($8\text{\AA} \sim 4000\text{\AA}$), 而可见光 ($4000\text{\AA} \sim 7000\text{\AA}$) 几乎对所有气体都不能直接引起光电离。通过实际测量可知, 电弧的光辐射波长在 $1700\text{\AA} \sim 50000\text{\AA}$ 区间, 包括红外线, 可见光和紫外线。由表1-4可以看到电弧的光辐射对K、Na、Ca、Al等金属蒸气可能直接引起光电离, 而对其他气体则不能直接引起光电离。但对于后面这些气体如果已处于激励状态, 则可能受光辐射作用而引起电离。实际上光电离也是电弧中产生带电粒子的一个次要途径。

3. 电子发射

电弧中起导电作用的带电粒子除依靠电离过程产生外, 还要从电极表面发射出来。在焊接电弧中电极只能发射电子而不能发射离子。从电极表面发射电子的过程在阴极和阳极皆可能产生。当阴极或阳极表面接受一定外加能量的作用, 电极中的电子可能冲破金属电极表面的约束而发射到电弧空间, 这种现象称为电子发射。但是自阴极发射出来的电子在电场作用下参加导电过程, 而自阳极发射出来的电子因受到电场的排斥, 不可能参加导电过程, 只能对阳极区空间电荷的数量产生一定的影响。因此这里只讨论阴极表面的电子发射现象。

使一个电子由金属表面飞出所需要的最低外加能量称为逸出功(U_w), 单位是电子伏特。因电子电量 e 是一个常数, 通常亦以 $W_w/e = U_w$ (V)来表示逸出功的大小。逸出功的大小与金属材料种类, 金属表面状态和金属表面氧化物质有关。几种金属及其氧化物的逸出功列于表1-5。

由表1-5可见所有金属表面带有氧化物时其逸出功皆减小。

金属表面状态不同时, 逸出功的数值也不一样, 当钨极表面敷以Cs、Ba、Th、Zr等物质时, 则逸出功的数值也减小, 如表1-6所示。

表 1-5

几种金属及其氧化物的逸出功

金属种类		W	Fe	Al	Cu	K	Ca	Mg
逸出功(eV)	纯金属	4.54	4.48	4.25	4.36	2.02	2.12	3.78
	金属氧化物		3.92	3.9	3.85	0.46	1.8	3.31

表 1-6

纯钨极与含其他物质钨极的逸出功

钨极成分	W	W-Ce	W-Ba	W-Th	W-Zr
逸出功 U_w (eV)	4.54	1.36	1.56	2.63	3.14

因此,常用的钨极为提高电子发射能力和改善工艺性能,在钨极中加入Th、Ce等成分,这可以提高钨极电流容量和改善引弧性能。

金属内部的电子只有在接受外加能量作用后,其能量级升高超出逸出功才能冲破金属表面的束缚而发射到外部空间,由于外加能量形式不同,电子发射机构可分为如下四种。

(1) 热发射 金属表面承受热作用而产生电子发射现象称为热发射。因为金属内部的自由电子受热作用后其热运动速度增加,当其动能满足下式时,则飞出金属表面:

$$\frac{m_e V_e^2}{2} \geq e U_w \quad (1-12)$$

式中 m_e —— 电子质量, kg;

V_e —— 电子热运动速度, m/s;

e —— 一个电子电量, C;

U_w —— 逸出功, J。

电子自金属表面的发射现象与被加热到沸点的水面的水蒸气蒸发现象相似。水蒸气自水面蒸发将从水面带走蒸发热,电子发射也将从金属表面带走热量而对金属表面产生冷却作用。电子发射时从金属表面带走能量的数值为 $I U_w$,其中 I 为发射的总电子流, U_w 为逸出功。相反,当这些电子被另外金属表面接受时,它们将由空间漂游态又恢复为金属内部的自由电子,这些电子将向接受它们的金属表面放出逸出功,使金属表面加热,其接受的能量也是 $I U_w$ 。

金属表面热发射电子流密度 i 与金属表面的温度成指数关系:

$$i = A T^2 e^{-\frac{e U_w}{k T}} \text{ A/m}^2 \quad (1-13)$$

式中 A —— 与材料表面状态有关的常数;

T —— 金属表面温度, K;

e —— 一个电子的电量, C;

U_w —— 逸出功, J;

k —— 波耳茨曼常数;

e —— 自然对数的底。