



熔焊方法与工艺

马昊 张慧◎主编

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

熔焊方法与工艺

主 编 冯 昊 张 慧



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内容提要

本书根据劳动和社会保障部培训就业司最新颁发的教学大纲,并结合教学实践和焊接技术的发展状况编写而成。全书共8章,主要包括:焊接基础知识、焊条电弧焊、气焊气割与碳弧气刨、埋弧焊、熔化极气体保护电弧焊、钨极惰性气体保护焊、等离子弧焊接与切割及电渣焊、螺柱焊、高能束焊接等焊接方法与工艺。

本书可供焊接技术、机械制造、材料加工等专业及热加工工种的师生使用,也可作为岗位培训教材和相关工程技术人员的参考资料。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

熔焊方法与工艺 / 冯昊, 张慧主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2016.3

ISBN 978-7-5682-1952-5

I. ①熔… II. ①冯… ②张… III. ①熔焊—焊接工艺 IV. ①TG442

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 043707 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

82562903 (教材售后服务热线)

68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京通县华龙印刷厂

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 20.25

字 数 / 430 千字

版 次 / 2016 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

定 价 / 67.00 元

责任校对 / 陈玉梅

责任印制 / 边心超

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

本套教材根据劳动和社会保障部培训就业司最新颁发的教学大纲,结合职业技能鉴定需求和焊接专业特点编写而成。全套教材包括《熔焊方法与工艺》《焊接电工电子技术》《焊接工程制图与 CAD》《焊接结构与制造》《焊接检测技术》《熔焊基础与金属材料焊接》《工程材料与热加工基础》《机械工程基础(焊接专业)》《焊接安全与卫生》《金工实习(焊接专业)》《材料连接与切割技术》《电弧焊工艺》《钳工与冷作工艺》《钣金连接技术》等。

在教材的编写过程中,我们始终坚持了以下几个原则。

(1) 坚持中高级技能人才的培养方向,从职业(岗位)需求分析入手,强调实用性,使学生掌握一定理论知识,培养学生分析问题、解决问题的能力。并引导学生理论联系实际,提高学生操作技能水平。

(2) 紧密结合教育教学实际情况,化繁为简,化难为易,全书以国家职业资格标准为依据,力求使教材内容在覆盖职业技能鉴定的各项要求的基础上拓展外延,以满足不同层次的各级各类学校和工矿企业的需求。

(3) 突出教材的时代感,力求较多地引进新知识、新技术、新工艺、新方法、新材料等方面的内容,较全面地反映焊接技术发展趋势。

(4) 打破传统的教材编写模式,树立以学生为主体的教学理念,强调培养学生自主学习能力。

本套教材是基于编者多年的教学实践积淀而成。编写时,取材力求少而精,突出实用性,内容紧密结合工程实践。本套教材可供焊接技术、机械制造、材料加工等专业及热加工工种的师生使用,也可作为岗位培训教材和相关工程技术人员的参考资料。

目 录 *Contents*

绪 论	1
第 1 章 焊接基础知识	1
1.1 焊接电弧	1
1.2 焊接热过程	18
1.3 填充金属材料的熔化及熔滴过渡	24
1.4 母材熔化与焊缝成型	31
1.5 焊接接头、焊接位置和焊件坡口	40
第 2 章 焊条电弧焊	50
2.1 焊条电弧焊概述	50
2.2 焊条电弧焊设备及材料	52
2.3 焊条电弧焊工艺	88
2.4 焊条电弧焊的特殊方法	108
第 3 章 气焊气割与碳弧气刨	111
3.1 气割概述	111
3.2 气焊工艺	121
3.3 气割工艺	133
3.4 碳弧气刨	145
第 4 章 埋弧焊	156
4.1 埋弧焊概述	156
4.2 埋弧焊设备及材料	159
4.3 埋弧焊工艺	174
4.4 埋弧焊的其他方法	190

第5章 熔化极气体保护电弧焊	195
5.1 熔化极气体保护焊概述	195
5.2 熔化极气体保护焊设备与材料	197
5.3 MIG 焊和 MAG 焊	203
5.4 二氧化碳气体保护电弧焊	213
5.5 熔化极药芯焊丝电弧焊	230
第6章 钨极惰性气体保护焊	235
6.1 TIG 概述	235
6.2 TIG 焊设备与材料	243
6.3 TIG 焊工艺	247
6.4 TIG 焊的其他方法	254
第7章 等离子弧焊接与切割	258
7.1 等离子弧的产生及特性	258
7.2 等离子弧焊接	262
7.3 等离子弧切割	275
第8章 其他熔焊方法	284
8.1 电渣焊	284
8.2 螺柱焊	292
8.3 高能束焊接	298
参考文献	305

第1章

焊接基础知识

1.1 焊接电弧

电弧是所有电弧焊方法的能源。电弧是一种气体放电现象，它是带电粒子通过两电极之间气体空间的一种导电过程。焊接电弧是在加有一定电压的电极和工件之间产生的一种长时间而有力的气体放电现象，即在局部气体介质中有大量电子流通过的导电现象（见图1-1）。电弧焊就是利用这种焊接电弧产生的热能和机械能来熔化金属，形成焊接接头，最终达到连接金属的目的。

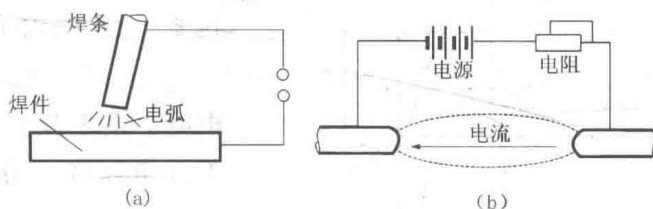


图1-1 焊接电弧示意图

1.1.1 焊接电弧的物理基础

1. 电弧的产生及其电场强度分布

通常情况下，气体的分子和原子呈中性，气体中没有带电粒子，即使在电场作用下，也不会产生气体导电现象。要使两电极之间的气体导电，必须具备以下两个条件。

- ①两电极之间有带电粒子；
- ②两电极之间有电场。

因此，如能采用一定的方法，改变两电极间气体粒子的电中性状态，使之产生带电粒子，这些带电粒子在电场的作用下运动，即形成电流，使两电极之间的气体空间

成为导体，从而产生了气体放电。

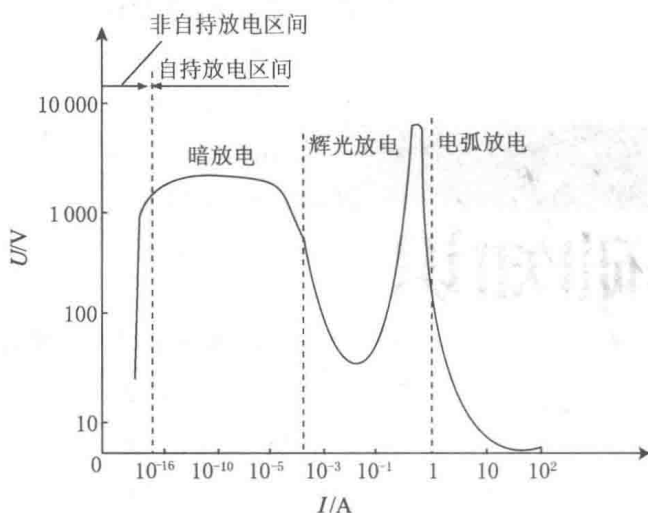


图 1-2 气体放电时的伏安特性曲线

加条件，放电过程仍能持续。根据放电电流的大小，气体放电分为暗放电、辉光放电和电弧放电三种形式。其中，电弧放电是气体放电现象中电压最低、电流最大、温度最高、发光最强的一种放电现象。借助这种特殊的放电过程，电能被转换成热能、机械能和光能。

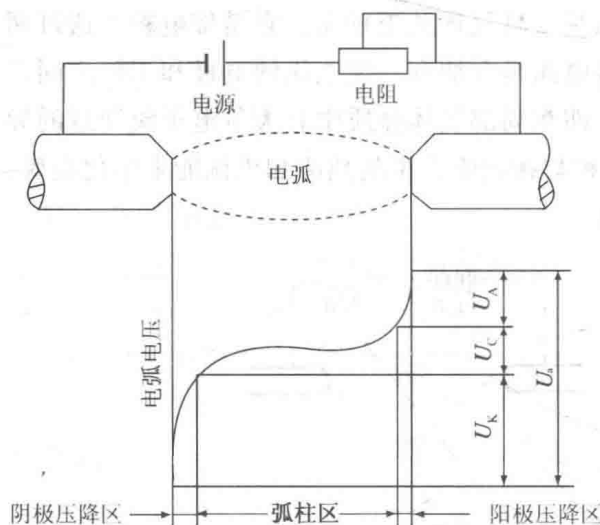


图 1-3 电弧及电场强度分布示意图

的区域，其电压 U_k 称为阴极电压降）、弧柱区（中间部分，其电压 U_c 称为弧柱电压降）、阳极区（阳极附近的区域，其电压 U_a 称为阳极电压降）。阳极区和阴极区占整个电弧长度的尺寸很小，约为 $10^{-2} \sim 10^{-6} \text{ cm}$ ，故可近似认为弧柱长度即为电弧长度。电弧的这种不均匀的电场强度分布，说明电弧各区域的电阻是不同的，即电弧电阻是非线性的。

电弧作为导体不同于金属导体，金属导电是通过金属内部自由电子的定向移动形成电流，而电弧导电时，电弧气氛中的电子、正离子、负离子都参与导电，其过程要复杂得多。

2. 电弧中带电粒子的产生

电弧两极间带电粒子的产生来源于气体粒子电离、电极发射电子和负离子形成等。其中气体的电离和阴极发射电子是电弧中产生带电粒子的两个基本物理过程。

(1) 气体的电离。

①电离与激励。在外加能量作用下，使中性的气体分子或原子分离成电子和正离子的过程称为气体电离。气体电离的实质是中性气体粒子（分子或原子）吸收足够的外部能量，使分子或原子中的电子脱离原子核的束缚而成为自由电子和正离子的过程。中性气体粒子失去第一个电子所需的最小外加能量称为第一电离能，失去第二个电子所需的能量称为第二电离能，依此类推。

电弧焊中的气体粒子电离现象主要是第一次电离。电离能通常以电子伏（eV）为单位。1 电子伏即为 1 个电子通过电位差为 1V 的两点间所需做的功，其数值为 $1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ 。为了便于计算，常把以电子伏为单位的能量转换为数值上相等的电离电压来表示。电弧气氛中常见气体粒子的电离电压见表 1-1。

表 1-1 常见气体粒子的电离电压

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

注：括号内的数字依次为二次、三次……电离电压。

当其他条件（如气体的解离性能、热物理性能等）一定时，气体电离电压的大小反映了带电粒子产生的难易程度。电离电压低，表示带电粒子容易产生，有利于电弧导电；相反，电离电压高表示带电粒子难以产生，电弧导电困难。当中性气体粒子受外加能量作用而不足以使其电离时，但可能使其内部的电子从原来的能级跃迁到较高的能级，这种现象称为激励。使中性粒子激励所需要的最低外加能量叫做激励能，若以伏为单位来表示，则称为激励电压。表 1-2 为常见气体粒子的激励电压。

表 1-2 常见气体粒子的激励电压

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	19.3	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	CO ₂	

激励时由于电子未脱离原子的束缚，所以受激粒子仍呈中性。受激粒子处于不稳定的受激状态，处于激励状态的时间极短（一般为 $10^{-2} \sim 10^{-8}$ s）。处于激励状态的粒子有自发地恢复到常态的趋势，将自己的能量以辐射光的形式释放出来，表现为电弧的辐射光，或继续受到外加能量的作用而电离。

由此可见，当电弧空间同时存在电离电压（或激励电压）不同的几种气体时，在外加能量的作用下，电离电压（或激励电压）较低的气体粒子将先被电离（或激励）。如果这种气体供应充足，则电弧空间的带电粒子将主要由这种气体的电离来提供，所需要的外加能量也主要取决于这种较低的电离电压，因而为提供电弧导电所要求的外加能量也较低。焊接时，为提高电弧的稳定性，往往加入一些电离电压较低、易电离的元素作为稳弧剂，也就是基于此种原因。

任何中性气体粒子在一定的外加能量作用下都会产生电离与激励，电弧气氛中往往是电离与激励同时存在。外加能量可以通过不同方式作用于中性气体粒子，但使之电离与激励所必需的最低能量数值，并不因施加能量方式的不同而改变，即对于确定的气体粒子其电离电压和激励电压都是固定数值。

②电离种类。根据外加能量来源的不同，气体电离种类可分为热电离、场致电离和光电离三种。

a. 热电离。气体粒子受热的作用而产生电离的过程称为热电离。它实质上是由于气体粒子的热运动形成频繁而激烈地碰撞产生的一种电离过程。

电弧中带电粒子数的多少对电弧的稳定起着重要作用。单位体积内电离的粒子数与气体电离前粒子总数的比值称为电离度（ α ），即

$$\alpha = \frac{\text{电离后的中性粒子密度}}{\text{电离前的中性粒子密度}}$$

热电离的电离度与温度、气体压力及气体的电离电压有关。随着温度的升高，气体压力的减小及电离电压的降低，电离度随之增加，电弧中带电粒子数增加，电弧的稳定性增强。

b. 场致电离在两电极间的电场作用下，气体中的带电粒子被加速，电能将转换为带电粒子的动能。当带电粒子的动能增加到一定数值时，则可能与中性粒子发生非弹

性碰撞而使之产生电离,这种电离称为场致电离。

在普通焊接电弧中,因弧柱的温度一般在 $5\,000\sim 30\,000\text{ K}$ 之间,而电场强度仅为 10 V/cm 左右,所以在弧柱区热电离是产生带电粒子的主要途径,电场作用下的电离则是次要的。在电弧的阴极压降区和阳极压降区,电场强度可达 $10^5\sim 10^7\text{ V/cm}$,远高于弧柱区,因而会产生显著的场致电离现象。

热电离和场致电离本质上都属于碰撞电离。在碰撞过程中,由于电子的质量远小于其他气体粒子,速度快,动能大,因而当其与中性气体粒子碰撞时,几乎可以将其全部动能传递给中性粒子而转化为中性粒子的内能(这种碰撞称为非弹性碰撞),使中性粒子电离或激励。

c. 光电离。中性气体粒子受到光辐射的作用而产生的电离过程称为光电离。焊接电弧的光辐射只可能使K、Na、Ca、Al等金属蒸汽直接引起光电离,而对焊接电弧气氛中的其他气体则不能直接引起光电离。因此,光电离只是电弧中产生带电粒子的一种次要途径。

(2) 阴极发射电子。在电弧焊中,电弧气氛中的带电粒子一方面由电离产生,另一方面则由阴极电子发射获得。两者都是电弧产生和维持不可缺少的必要条件。由于从阴极发射的电子,在电场的加速下碰撞电弧导电空间的中性气体粒子而使之电离,这样就使阴极电子发射充当了维持电弧导电的“原电子之源”。因此,阴极电子发射在电弧导电过程中起着特别重要的作用。

①电子发射与逸出功。阴极中的自由电子受到一定的外加能量作用时,从阴极表面逸出的过程称为电子发射。电子从阴极表面逸出需要能量,1个电子从金属表面逸出所需要的最低外加能量称为逸出功(A_w),单位是电子伏。因电子电量为常数 e ,故通常用逸出电压(U_w)来表示, $U_w=A_w/e\text{ (V)}$ 。逸出功的大小受电极材料种类及表面状态的影响。表1-3为几种金属材料的逸出功。由表可见,当金属表面存在氧化物时逸出功都会减小。

表1-3 几种金属材料的逸出功

金属种类		W	Fe	Al	Cu	K	Ca	Mg
A_w/e	纯金属	4.54	4.48	4.25	4.36	2.02	2.12	3.73
/V	表面有氧化物	—	3.92	3.9	3.85	0.46	1.8	3.31

②阴极斑点。阴极表面通常可以观察到炼亮的区域,这个区域称为阴极斑点,它是发射电子最集中的区域,即电流最集中流过的区域。阴极斑点的形态与阴极的类型有关。当采用钨或碳作阴极材料时(通常称为热阴极),其斑点固定不动;而当采用钢、铜、铝等材料作阴极时(通常称为冷阴极),其斑点在阴极表面做不规则的游动,甚至可观察到几个斑点同时存在。由于金属氧化物的逸出功比纯金属低,因而氧化物处容易发射电子。氧化物发射电子的同时自身被破坏,因而阴极斑点有清除氧化物的

作用。阴极表面某处氧化物被清除后另一处氧化物就成为集中发射电子的所在。于是,斑点游动力图寻找在一定条件下最容易发射电子的氧化物。如果电弧在惰性气体中燃烧,阴极上某处氧化物被清除后不再生成新的氧化物,阴极斑点移向有氧化物的地方,接着又将该处氧化物清除。这样就会在阴极表面的一定区域内将氧化物清除干净,显露出金属本色。这种现象称为“阴极清理”或“阴极破碎”作用。

③电子发射的类型。根据外加能量形式的不同,电子发射可分为热发射、场致发射、光发射和粒子碰撞发射四种类型。

a. 热发射。阴极表面因受热的作用而使其内部的自由电子热运动速度加大,动能增加,一部分电子动能达到或超出逸出功时产生的电子发射现象称为热发射。

热发射的强弱受材料沸点的影响。当采用高沸点的钨或碳作阴极时(其沸点分别为 5 950 K 和 4 200 K),电极可被加热到 3 500 K 以上的高温,此时,通过热发射可为电弧提供足够的电子。

焊接时,阴极表面受到热的作用,温度很高,其内部的自由电子运动速度加快,达到一定程度时,便飞出金属表面,产生热发射。温度越高,热发射作用越强烈。电子从阴极发射时,将从阴极表面带走热量,对金属表面产生冷却作用。当电子被阳极接受时,将恢复金属内部的自由电子,并向其放出逸出功,使表面加热。

b. 场致发射。当阴极表面空间存在一定强度的正电场时,阴极内部的电子将受到电场力的作用。当此力达到一定程度时电子便会逸出阴极表面,这种电子发射现象称为场致发射。

当采用钢、铜、铝等低沸点材料作阴极时(其沸点分别为 3 013 K、2 868 K 和 2 770 K),阴极加热温度受材料沸点限制不可能很高,热发射能力较弱,此时向电弧提供电子的主要方式是场致发射电子。实际上,电弧焊时纯粹的场致发射是不存在的,只不过是采用冷阴极时以场致发射为主,热发射为辅而已。

电极间的电压越高,金属的逸出功越小,则场致发射作用越大。由于电场提供了电场能,相当于降低了电极的逸出功,因此场致发射时,电子从电极表面带走的热能比热发射带走的要少。

c. 光发射。当阴极表面受到光辐射作用时,阴极内的自由电子能量达到一定程度而逸出阴极表面的现象称为光发射。光发射在阴极电子发射中居次要地位。

d. 粒子碰撞发射。电弧中高速运动的粒子(主要是正离子)碰撞阴极时,把能量传递给阴极表面的电子,使电子能量增加而逸出阴极表面的现象称为粒子碰撞发射。这种发射伴随着从阴极逸出的电子首先与正离子中和成中性粒子,并释放出电离能的过程。因此,当电离能与正离子的撞击能之和为电子逸出功的两倍时,阴极才能发射出一个有效电子。

焊接电弧中,阴极区有大量的正离子聚积,正离子在阴极区电场作用下被加速,获得较大动能,撞击阴极表面可能形成碰撞发射。在一定条件下,这种电子发射形式也是焊接电弧阴极区提供导电所需要带电粒子的主要途径之一。

实际焊接过程中,上述几种电子发射形式常常是同时存在,相互促进,相互补充。例如,在引弧过程中,热发射和电场发射起主要作用。使用高沸点的材料钨或碳作为阴极,阳极区的带电粒子主要为热发射电子。若铜或铝为阳极,撞击发射和电场发射就为主要作用。而钢作为阴极时,则热发射、撞击发射、电场发射都在起作用。

(3) 带电粒子的消失。电弧导电过程中,在产生带电粒子的同时,伴随着带电粒子的消失过程。在电弧稳定燃烧时,上述二者处于动平衡状态。带电粒子在电弧空间的消失主要有扩散、复合两种形式和电子结合成负离子等过程。

① 扩散。电弧空间中如果带电粒子的分布不均匀,则带电粒子将从密度高的地方向密度低的地方迁移而使密度趋于均匀,这种现象称为带电粒子的扩散。

焊接电弧中,弧柱中心部位比周边温度高,带电粒子密度大,因而这种扩散总是从弧柱中心向周边扩散。各种带电粒子中电子的质量最小,运动速度最大,因此电子的扩散速度比离子高,容易扩散到电弧周边上来。当电弧周边上的电子密度增加后将阻碍电子的继续扩散,这时由于正负电荷的吸引作用,又促使正离子向电弧周边扩散。这种扩散的结果,不仅使弧柱中心带电粒子数减少,还将中心的一部分热量带到电弧周边。为保持电弧的稳定燃烧,电弧本身必须再多产生一部分带电粒子和热量来弥补上述损失。

② 复合。电弧空间的正负带电粒子(正离子、负离子、电子)在一定条件下相遇而结合成中性粒子的过程称为复合。

复合主要是在电弧的周边进行。这是因为弧柱中心温度较高,所有粒子本身的热运动能量都很大,只能产生更多的带电粒子,不可能产生复合。在电弧周边温度较低,带电粒子数较少,弧柱中心的带电粒子会向周边扩散并降低能量,然后复合成中性粒子。电子与正离子复合时将以辐射和热能的形式释放出电离能和各自的一部分动能。交流电弧焊接时,电流过零的瞬间电弧熄火,电弧空间温度迅速降低,这时会产生带电粒子的大量复合,使电弧空间带电粒子减少,可能导致电弧复燃困难。

(4) 负离子的形成与影响。在一定条件下,有些中性原子或分子能吸附电子而形成负离子。由于电弧周边温度较低,因而中性粒子易与从电弧中心扩散出来的动能较低电子相遇而形成负离子。

中性粒子吸附电子而形成负离子时,其内能不是增加而是减少的(以热或辐射光的形式释放出来)。减少的这部分能量称为中性粒子的电子亲和能。电子亲和能大的元素,形成负离子的倾向大。由于大多数元素的电子亲和能较小,所以不易生成负离子。电弧中可能遇到的F、Cl、O₂、OH、NO等元素均具有一定的电子亲和能,都可能形成负离子。

负离子的产生,使得电弧空间的电子数量减少,导致电弧导电困难,电弧稳定性降低;负离子虽然所带电荷量与电子相等,但因其质量比电子大得多,运动速度低,易与正离子复合成中性粒子,故不能有效地担负转送电荷的任务。

1.1.2 焊接电弧的导电特性

焊接电弧的导电特性是指参与电荷的运动并形成电流的带电粒子在电弧中产生、运动和消失的过程。在焊接电弧的弧柱区、阴极区和阳极区三个组成区域中，它们的导电特性是各不相同的。

1. 弧柱区的导电特性

弧柱的温度很高，且随电弧气体的介质、电流大小的不同而异，大约在 5 000 ~ 50 000 K 之间。电弧稳定燃烧时，弧柱与周围气体介质处于热平衡状态。当弧柱温度很高时，可使其中的大部分中性粒子电离成电子和正离子。由于正离子和电子的空间密度相同，两者的总电荷量相等，所以宏观上看弧柱呈电中性。由此可见，弧柱是包含有大量电子、正离子等带电粒子和中性粒子等聚合在一起的气体状态。这种状态又称为电弧等离子体。

电弧等离子体虽然对外呈现电中性，但由于其内部有大量电子和正离子等带电粒子，所以仍具有良好的导电性能。这些带电粒子在电场的作用下运动，形成弧柱中的电流。弧柱中负离子的数量很少，可以忽略不计。因而，弧柱中的电流由向阴极运动的正离子流和向阳极运动的电子流组成。由于电子和正离子在同一电场中所受的电场力相同，而电子的质量远比正离子的质量小，即电子的运动速度比正离子的速度要大得多，因此弧柱中的电流主要由电子流构成。

弧柱单位长度上的电压降（即电位梯度）称为弧柱电场强度 E 。 E 的大小表征了弧柱的导电性能，弧柱的导电性能好，则所要求的 E 值小。显然，当弧柱中通过大电流时，电离度提高， E 值将减少。电场强度 E 和电流 I 的乘积 EI ，相当于电源供给每单位弧长的电功率，它将与弧柱的热损失相平衡。电弧在 H_2 、 He 等气体介质中燃烧时，由于这些气体比空气轻，粒子运动速度大，带走的热量多，在电流一定时，为了平衡就需要增加电弧单位长度的电功率（即加大 E 值）。另外，多原子气体在分解成单原子时也要吸收热量，也会使 E 值变大。 I 一定， E 变大，弧柱的产热功率提高，因而弧柱的温度也升高。当弧柱外围有强迫气流冷却时， E 也将提高，弧柱温度也会升高。由此可见：

① 电场强度 E 的大小与电弧的气体介质有关；

② E 的大小将随弧柱的热损失情况而自行调整。

上述两种现象表明，弧柱在稳定燃烧时，有一种使自身能量消耗最小的特性。即当电流和电弧周围条件（如气体介质种类、温度、压力等）一定时，稳定燃烧的电弧将自动选择一个确定的导电截面，使电弧的能量消耗最小。当电弧长度也为定值时，电场强度的大小即代表了电弧产生热量的大小。因此，能量消耗最小时的电场强度最低，即在固定弧长上的电压降最小，这就是最小电压原理。

电流和电弧周围条件一定时，如果电弧截面面积大于或小于其自动确定的截面，都会引起电场强度 E 增大，使消耗的能量增多，违反最小电压原理。因为电弧截面增

大时,电弧与周围介质的接触面增大,电弧向周围介质散失的热量增加,要求电弧产生更多的能量与之相平衡,即要求 EI 增加。因焊接电流 I 是一定的,所以只能是电弧电场强度 E 增加才能使 EI 增加;反之,若电弧截面减小,则在 I 一定的情况下,电流密度必然增加,导致 E 增大。所以说,电弧将自动确定一个截面,在这一截面下,使 EI 最小,即消耗的能量最小。

2. 阴极区的导电特性

阴极区是指靠近阴极的很小一个区域,在电弧中,它一方面向弧柱区提供电弧导电所需的电子流,另一方面接受由弧柱传来的正离子流。由于电极材料种类及工作条件(电流大小、气体介质等)不同,阴极区的导电形式和特性也不同。

(1) 热发射型。当采用热阴极且使用较大电流时,阴极区可加热到很高的温度,这时阴极主要靠热发射提供电子流来满足弧柱导电的需要。这种情况下,阴极斑点在电极表面十分稳定,其面积较大而且比较均匀,紧挨阴极表面的弧柱不呈收缩状态。阴极区的电流密度与弧柱区也相近,阴极区电压降很小。

热发射时电子从阴极表面带走的热量可以从以下两条途径得到补充:一是正离子冲击阴极表面而将能量传递给阴极,并且正离子在阴极表面复合电子,释放出的电离能也使阴极加热;二是电流流过阴极时产生的电阻热使阴极加热。通过上述能量补充,可使阴极维持较高的温度,保证持续的热发射。大电流钨极氩弧焊时,这种热发射型导电占主导地位。

(2) 电场发射型。当采用冷阴极或虽然采用热阴极但使用较小电流时,因为不可能加热到很高的温度,不足以产生较强的热发射来提供弧柱导电所需要的电子流,则在靠近阴极的区域,正电荷过剩而形成较强的正电场,并使阴极与弧柱之间形成一个正电性区——阴极区。这个正电场的存在,可使阴极产生场致发射,向弧柱提供所需要的电子流。同时阴极发射出来的电子被加速,使其动能增加,在阴极区可能产生场致电离。场致电离产生的电子与阴极发射出来的电子合在一起构成弧柱所需的电子流,场致电离产生的正离子与弧柱来的正离子,在电场作用下一起奔向阴极,使得阴极区保持正离子过剩,出现正电性,维持场致发射。另外,当这些正离子到达阴极时,将其动能转换为热能,对阴极的加热作用增强,使阴极的热发射作用增大,呈现热——场致发射,为弧柱提供足够的电子流。这种形式的导电中,为了提高阴极区的电场强度,按照最小电压原理,阴极区将自动收缩截面,以提高正离子流即正电荷的密度,维持阴极的电子发射能力。在小电流钨极氩弧焊和熔化极气电焊时,这种场致发射型导电起主要作用。

在采用冷阴极或虽然采用热阴极但使用较小电流的情况下,实际上是热发射型和场致发射型两种阴极导电形式并存,而且相互补充和自动调节。阴极区的电压降,主要取决于电极材料的种类、电流大小和气体介质的成分,一般在几伏至几十伏之间。当电极材料的沸点较高或逸出功较小时,热发射型导电的比例较大,阴极压降较小,反之,则场致发射型导电的比例较大,阴极压降也较大。电流较大时,一般热发射型

导电的比例增大, 阴极压降减小。

3. 阳极区的导电特性

阳极区是指靠近阳极的很小一个区域, 在电弧中, 它的主要作用是接受弧柱中送来的电子流, 同时向弧柱提供所需的正离子流。

(1) 阳极斑点。在阳极表面也可看到烁亮的区域, 这个区域称为阳极斑点。弧柱中送来的电子流, 集中在此处进入阳极, 再经电源返回阴极。阳极斑点的电流密度比阴极斑点的小, 它的形态与电极材料及电流大小有关。由于金属蒸汽的电离电压比周围气体介质的低, 因而电离易在金属蒸汽处发生。如果阳极表面某一区域产生均匀的金属熔化和蒸发, 或这些区域的蒸发比其他区域更强烈, 则这个区域便成为阳极导电区。在大气或氧化性气氛中燃烧的电弧, 由于金属阳极上有氧化物存在, 而一般金属的熔点与沸点皆低于金属氧化物的熔点和沸点, 所以纯金属处比金属氧化物处更容易产生蒸发。阳极斑点便会自动寻找纯金属而避开氧化物, 因而在阳极表面上跳跃移动。

(2) 阳极区导电形式。阳极不能发射正离子, 弧柱所需要的正离子流是由阳极区的电离提供的。由于条件不同, 阳极区的导电形式有以下两种。

①阳极区的场致电离。当电弧电流较小时, 阳极前面的电子数必将大于正离子数, 形成负的空间电场, 并使阳极与弧柱之间形成一个负电性区——阳极区。只要弧柱的正离子得不到补充, 这个负电场就继续增大。阳极区内的带电粒子被这个电场加速, 使其在阳极区内与中性粒子碰撞产生场致电离, 直到这种电离生成的正离子能满足弧柱需要时, 阳极区的电场强度才不再继续增大。电离生成的正离子流向弧柱, 产生的电子流向阳极。这种导电方式中阳极区压降较大。

②阳极区的热电离。当电弧电流较大时, 阳极的过热程度加剧, 金属产生蒸发, 阳极区温度也大大提高。阳极区内的电离方式将由金属蒸汽的热电离取代高能量电子的碰撞产生的场致电离, 完成阳极区向弧柱提供正离子流的作用。这种情况下阳极区的压降较低。大电流钨极氩弧焊时属于这种阳极区导电机构。

1.1.3 焊接电弧的工艺特性

电弧焊以电弧为能源, 主要利用其热能及机械能。焊接电弧是与热能及机械能有关的工艺特性, 主要包括电弧的热能特性、电弧的力学特性和电弧的稳定性等。

1. 电弧的热能特性

(1) 电弧热的形成机构。电弧可以看做是一个把电能转换成热能的柔性导体, 由于电弧三个区域的导电特性不同, 因而产热特性也不同。

①弧柱的产热。弧柱是带电粒子的通道。在这个通道中带电粒子在外加电场的作用下运动, 电能转换为热能和动能。在弧柱中, 带电粒子并不是直接向两极运动, 而是在频繁而激烈地碰撞过程中沿电场方向运动。这种碰撞是无规则的紊乱运动, 可能是带电粒子之间的碰撞, 也可能是带电粒子与中性粒子之间的碰撞。碰撞过程中带电粒子达到高温状态, 把电能转换成热能。由于质量上的差异, 电子运动速度比正离子

运动速度大得多,因此从电源吸取电能转换为热能的作用几乎完全由电子来承担,在弧柱中外加电能大部分将转换为热能。

单位长度弧柱的电能为 EI ,它的大小决定了弧柱产热量的大小。当电弧处于稳定状态时,弧柱的产热与弧柱的热损失(对流、传导和辐射等)处于动平衡状态。当电弧电流一定时,单位长度弧柱产热量由 E 决定, E 的数值按最小电压原理自行调节。 I 一定, E 升高,则弧柱的产热量增加,弧柱温度升高,焊件获得的热量也增加。根据这一特点,在实际焊接中往往采取措施强迫冷却弧柱,使电弧截面减小, E 增大,从而获得能量更集中、温度更高的电弧。

一般电弧焊时,弧柱损失的热能中对流损失约占 80% 以上,传导与辐射损失约占 10% 左右,所以仅剩很少一部分能量通过辐射传给焊丝和焊件。当电流较大有等离子流产生时,等离子流可把弧柱的一部分热量带给焊件,从而增加焊件的热量。

②阴极区的产热。阴极区与弧柱区相比,长度很短,且靠近电极或焊件(由接线方法决定),所以直接影响焊丝的熔化或焊件的加热。阴极区存在电子和正离子两种带电粒子。这两种带电粒子在不断地产生、运动和消失,同时伴随着能量的转换与传递。由于弧柱中正离子流所占比例很小,可以认为它的产热对阴极区的影响很小,可忽略不计。影响阴极区能量状态的带电粒子全部在阴极区产生,并由阴极区提供足够数量的电子来满足弧柱导电的需要,因此可从这些电子在阴极区的能量平衡过程来分析阴极区的产热。

阴极区提供的电子流与总电流 I 相近,这些电子在阴极压降 U_k 的作用下逸出阴极并被加速,获得的总能量为 IU_k ;电子从阴极表面逸出时,将从阴极表面带走相当于逸出功的能量,对阴极有冷却作用,这部分能量总和为 IU_w ;电子流离开阴极区进入弧柱区时,将带走与弧柱温度相应的热能,这部分能量为 IU_T (U_T 为弧柱温度的等效电压)。所以阴极区总的产热功率 P_k 应为:

$$P_k = IU_k - IU_w - IU_T$$

所产热量主要用于对阴极的加热和阴极区的散热损失。焊接时,这部分能量可被用来加热填充材料或焊件。

③阳极区的产热。阳极区的电流由电子流和正离子流两部分组成,因正离子流所占比例很小,可忽略不计,只考虑电子流的能量转换效应。到达阳极的电子能量由电子经阳极压降区被 U_A 加速而获得的动能 IU_A 、电子从阴极逸出时吸收的逸出功 IU_w 和从弧柱区带来的与弧柱温度相应的热功率为 IU_T 三部分组成,因此阳极区的总产热功率 P_A 为:

$$P_A = IU_A + IU_w + IU_T$$

所产热量主要用于对阳极的加热和散热损失。在焊接过程中,这部分能量也可用于加热填充材料或焊件。

(2) 电弧的温度分布。电弧各部分的温度分布受电弧产热特性的影响,使电弧组