



全国高技术重点图书
新材料领域

焊接电弧物理与 焊条工艺性设计

王宝 著

机械工业出版社

全国高技术重点图书
新材料领域

焊接电弧物理与 焊条工艺性设计

王 宝 著
张文钺 审



机械工业出版社

本书从焊接电弧物理现象的研究入手,以大量实验为基础,探讨焊条金属熔滴过渡形态与焊条工艺性的关系;分析熔滴过渡形态的形成条件;研究焊条电弧焊电弧行为及其影响因素;提出焊条熔滴过渡主导力的概念;预测焊条熔滴过渡形态及焊条工艺性。本书还介绍了钛钙型焊条、低氢型焊条、纤维素型焊条以及不锈钢焊条的电弧物理特性。最后本书总结了焊条工艺性设计的一般原则。为开展焊条工艺性研究及进行焊条工艺性设计提供理论指导。

本书可供从事焊接技术研究工作的科研人员和焊材生产企业的工程技术人员阅读,也可供大、专院校焊接专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

焊接电弧物理与焊条工艺性设计/王宝著. —北京:机械工业出版社, 1998. 4

(全国高技术重点图书·新材料领域)

ISBN 7-111-06024-5

I. 焊… II. 王… III. ①焊接电弧-物理性能②焊条-设计 IV. TG40

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 25547 号

出版人:马九荣(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:俞逢英 版式设计:冉晓华 责任校对:张佳

封面设计:姚毅 责任印制:

北京第二外国语学院印刷厂印刷 · 新华书店北京发行所发行

1998 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

850mm×1168mm^{1/32}·10.5 印张· 272 千字

0 001— 3000 册

定价:21.50 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

序 言

焊条电弧焊时会产生电弧过程，伴随电弧过程会发生许多物理现象，如多变的电弧形态、焊条的加热及熔化、金属的蒸发、熔滴的形成和过渡以及飞溅现象等。所有这些物理现象都与焊条的工艺性有着密切联系，这些物理现象的变化都将对焊条工艺性产生直接或间接的影响。

国内外不少学者曾对焊条电弧焊电弧物理的某些问题进行过许多研究，发表了相当多的学术论文和著作，这对于认识焊条电弧焊电弧物理某些特性无疑是十分宝贵的。然而，与气体保护电弧焊电弧物理现象的研究相比，焊条电弧焊方面的研究要少得多，由于焊条电弧焊电弧物理过程的特殊性和复杂性，增加了认识这一概念的困难。使得焊条电弧焊某些电弧物理特性与焊条工艺特性之间内在的、直接和间接的联系，至今仍缺乏完整、系统的概念。

焊接电弧物理特性与焊条工艺特性的内在联系是客观存在的，但仅仅承认这种联系是不够的，重要的是应研究这种联系的具体方面，从一个新的角度——电弧物理特性这一概念出发，重新认识和评价已熟知的和未知的某些焊条工艺现象，探求和归纳出焊条电弧物理特性对其工艺特性的影响规律，并运用这一规律指导焊条工艺性设计，这对于从事焊条研究和生产的科技人员无疑是十分重要的。

研究焊条工艺特性与电弧物理特性的关系，并将其进行总结与概括，其目的是指导焊条工艺性设计。将这一思想概括为“焊条工艺性设计的电弧物理基础”这一命题。应该说明的是，对这一个新课题作者不是在抽象的概念上探讨电弧焊电弧物理的全部理论，而是从焊条工艺性设计的应用角度出发，研究涉及这一问题的某些方面。正因为如此，本书并不追求向读者介绍焊接电弧

物理的系统概念，而是从实用出发，重点讨论实际遇到的与焊条工艺性有关的电弧物理特性的某些问题；本书不重点讨论焊接电弧物理现象的本质，而是以实验为基础，注重电弧物理某些特性影响的表现和最终结果，并总结和归纳出具有实用意义的概念或原则。从实用这一角度出发，作者本人在书中甚至引进了看起来与电弧物理概念不相称的内容，如书中对气孔问题的讨论，然而这一问题对于应用焊接电弧物理的有关理论进行某种焊条工艺性设计时是必须综合考虑的，这一点只有在进行该类焊条工艺性设计的实际工作中才会体会到。

还应该说明的是，以焊接电弧物理有关理论为基础探讨的焊条设计问题，并不是、也不可能是包括焊条设计的全部内容，例如，根据焊条的使用要求可设计焊条的合金系统，根据焊件的施工条件，采取冶金手段消除焊接裂纹等缺陷，这些内容当然应在焊条设计时首先考虑，而且是必须解决的基本问题，上述内容主要涉及的是焊接冶金学、金属材料的焊接性等理论问题。而本书要研究的则是焊条设计的另外一方面的理论：焊条工艺性设计的电弧物理基础，即设计一个工艺性优良的焊条所需要的焊接电弧物理知识。焊接电弧物理知识与上述焊接冶金学、金属材料焊接性的知识有密切联系，并在许多内容上，前者为后者所包容，但是作为焊条工艺性设计的电弧物理基础，这一理论是后者所不能取代的。而这两方面基础知识，都是焊条设计所需要的。

作者作为本单位学科带头人，直接参与或领导焊接材料应用理论和开发课题的研究，从每种测试手段的设计、建立和完善，每一项具体试验的操作及结果的分析，直到理论上的总结概括，在作者长期的具体实践中逐渐形成了“焊条工艺性设计电弧物理基础”这一概念，并以此主题多次为焊接专业的大学生和研究生开设了课程。“焊接电弧物理与焊条工艺性设计”一书体现了作者近20余年来从事教学及科研工作的成果。

应当说明，书中引用的大部分实验资料大都是在作者的指导和亲自参与下和作者的学生们共同完成的。其中也有一些实验是

作者所在单位太原理工大学焊接材料研究所的教师与作者合作完成的。书中在引用这些内容时有的作了说明或在文中加注，已经发表的，必要时在参考文献中列出。

由于作者实验工作和水平的局限，书中疏漏、错误之处难以避免。本书的出版将使作者与读者之间得到广泛交流和探讨，使错误得到纠正，疏漏得以弥补，这是作者十分期待的结果。

王 宝

1997 年 9 月

目 录

序言

第一章 焊接电弧物理特性及其研究方法	1
第一节 焊接电弧的物理本质	1
一、气体粒子的电离与复合	1
二、弧柱的导电机理	6
三、阴极区和阳极区的导电机理	7
第二节 焊接电弧的某些物理特性	11
一、电弧的极性斑点	11
二、焊接电弧的温度	12
三、焊条金属熔滴的温度	14
四、电弧的能量分配和焊条的熔化	15
第三节 研究焊条电弧物理特性的试验方法	21
一、焊条熔滴及电弧行为的测试	21
二、焊条熔渣和熔滴某些物理特性的测试	30
三、焊条工艺稳定性的测试	35
第二章 焊条熔滴过渡现象及工艺特性	40
第一节 焊条熔滴过渡现象	40
一、焊条熔滴过渡形态的分类	40
二、焊条不同熔滴过渡形态的波形分析	50
三、常见焊条的熔滴过渡形态	58
第二节 焊条熔滴过渡形态与焊条的工艺特性	59
一、关于电弧的稳定性	60
二、焊条电弧焊时的飞溅现象	62
三、焊接时的烟雾	74
四、焊条熔滴过渡形态对工艺性的影响	75

第三章 焊条熔滴过渡形态的形成条件	78
第一节 渣壁过渡的形成条件	78
一、关于焊条熔滴的颗粒度	78
二、焊条套筒的影响	96
三、药皮厚度的影响	104
第二节 爆炸过渡和喷射过渡的形成条件	112
一、碳的氧化及对焊条熔滴过渡的影响	112
二、碳的不同过渡方式对熔滴行为的影响	114
三、熔渣的氧化还原性对碳在熔滴过渡过程中 作用的影响	118
四、药皮中石墨对熔滴过渡形态的影响	121
五、碳对焊条熔滴过渡形态影响规律的实用意义	127
第三节 焊条熔滴过渡形态的预测	129
一、决定焊条熔滴过渡形态的主导力	129
二、焊条熔滴过渡形态的预测	146
第四章 焊条电弧焊电弧形态及其 对电弧稳定性的影响	153
第一节 焊条电弧焊电弧形态的分类	153
一、连续型电弧和断续型电弧	153
二、集中型电弧和散开型电弧	155
三、活动型电弧和非活动型电弧	156
第二节 焊条熔滴过渡形态对电弧行为的影响	157
一、粗熔滴过渡时的电弧行为	157
二、渣壁过渡时的电弧行为	160
三、爆炸和喷射过渡时的电弧行为	162
第三节 药皮成分及类型对电弧行为的影响	164
一、稳弧剂对电弧行为的影响	164
二、不同类型焊条的电弧行为分析	166
三、电弧稳定性结点图及焊条电弧稳定性的判定	171
第四节 焊条电弧焊交流电弧的某些特性	176

一、交流电弧的一般特性	176
二、焊条药皮造渣成分对交流电弧稳定性的影响	179
三、焊条电弧焊交流电弧形态的某些特征	180
第五章 碳钢焊条的电弧物理特性	185
第一节 钛钙型和钛型碳钢焊条的电弧物理特性	185
一、钛钙型和钛型碳钢焊条熔滴过渡特征	185
二、钛钙型和钛型碳钢焊条的电弧行为	201
三、钛钙型和钛型碳钢焊条药皮水分 对电弧物理特性的影响	205
第二节 大理石-萤石型碳钢焊条电弧物理特性	212
一、影响大理石-萤石型碳钢焊条熔滴过渡特性的因素	212
二、大理石-萤石型碳钢焊条的电弧特性	227
三、大理石-萤石型碳钢焊条熔滴的短路过渡行为	234
第三节 高纤维素型焊条熔滴过渡特性	243
一、高纤维素型焊条熔滴过渡时的主导力	244
二、高纤维素型焊条熔滴过渡形态	245
第六章 不锈钢焊条某些电弧物理特性	258
第一节 钛钙型和钛型不锈钢焊条的工艺稳定性	258
一、焊条工艺稳定性的概念	258
二、焊条工艺稳定性的评定	258
三、焊条工艺稳定性的影响因素	261
四、影响不锈钢焊条工艺稳定性诸因素间的关系	266
五、提高不锈钢焊条工艺稳定性的途径	267
六、钛钙型和钛型不锈钢焊条工艺性设计的实例	268
第二节 异质焊芯不锈钢焊条的设计	279
一、低碳钢焊芯不锈钢焊条的设计	279
二、焊芯和药皮共同合金化的不锈钢焊条的设计	283
三、高合金异质焊芯不锈钢焊条的设计	285
第三节 大理石-萤石型不锈钢焊条的电弧物理特性	286
一、大理石-萤石型不锈钢焊条熔滴过渡特性	286

二、大理石-萤石型不锈钢焊条的飞溅现象	290
三、大理石-萤石型不锈钢焊条的工艺稳定性	291
第七章 焊缝的气孔与焊条设计	295
第一节 钛型不锈钢焊条焊接时的气孔及其影响因素	295
一、钛型不锈钢焊条气孔产生的原因分析	295
二、药皮原始含水量对气孔的影响	296
三、药皮实际含水量对气孔的影响	300
四、气孔沿焊缝方向移动的规律	301
五、钛型不锈钢焊条防止气孔的途径	304
第二节 钛钙型碳钢焊条焊接时的气孔	305
一、钛钙型碳钢焊条药皮含水量对气孔影响的试验	305
二、钛钙型碳钢焊条药皮含水量与气孔关系的探讨	306
三、钛钙型碳钢焊条抗气孔性的判定	309
第八章 焊条工艺性设计的若干原则	313
第一节 控制熔滴过渡形态的设计原则	313
一、实现渣壁过渡的设计原则	313
二、碱性焊条的工艺性设计原则	314
三、实现喷射过渡的设计原则	315
第二节 采用合金剂的设计原则	316
一、药皮中加入合金剂的设计方案	316
二、焊芯及药皮共同过渡合金的设计方案	317
三、高合金异质焊芯、药皮辅加铁粉的设计方案	317
第三节 提高工艺稳定性及控制飞溅和 药皮水分的设计原则	318
一、提高工艺稳定性的设计原则	318
二、控制飞溅的设计原则	318
三、控制药皮含水量的设计原则	319
参考文献	323

第一章 焊接电弧物理特性及其研究方法

第一节 焊接电弧的物理本质

一、气体粒子的电离与复合

电弧是一种强烈的气体放电现象。电弧焊接时,通过电弧过程把电能转化为热能,用以熔化焊条(或焊丝)和母材,以实现金属的焊接。

大家知道,在正常的情况下,空气是不导电的,但是如果创造某种条件,比如加热电极之间的空气,或用射线照射空气,或者在两极间加上强的电场,那么在两极间就可能发生放电现象。放电按照强弱。可分为暗放电、火花放电、辉光放电,直到发生电弧放电。

在某一条件下,空气为何会导电呢?这是由于空气中的气体粒子(包括分子和原子)接受一定的能量后,中性的分子或原子周围运动着的电子活动能力增加,当达到一定能量时,电子可能脱离原来的轨道,从低的能级越升到高的能级,这一现象称为激励。假如外界给原子的能量更大,使电子完全脱离原子核的引力范围而跑掉,这时由于原子失去了外层的一个(或几个)电子而变成正离子,使其带有正电性,而脱离原子的电子,具有负电性。这种把中性粒子(原子或分子)解离成带有正电性粒子和负电性粒子的过程称作电离。中性粒子被电离后形成的正离子和电子,在电场作用下,分别向阴极和阳极移动,带电粒子的定向移动,在宏观上形成了电流。

气体粒子发生电离需要一定的能量,在物理学中,把中性气体粒子,发生电离所需要的最小能量称作该元素的电离能,单位为电子伏,若以 V 表示则为电离电位(压)。电离电位的大小,可

表示气体粒子被电离的难易程度，电离电位越高越难电离，表 1-1 列出了一些元素的电离电位^[1]。

表 1-1 一些元素的电离电位(U_i) (V)

元素	Cs	K	Na	Ba	Li	Al	Ca	Cr	Ti	Mo	Mn	Ni	Mg	Cu
U_i	3.89	4.34	5.14	5.21	5.39	5.95	6.11	6.76	6.82	7.10	7.43	7.63	7.64	7.72
元素	Fe	W	Si	Cd	C	Cl	H	O	CO	N	Ar	F	He	
U_i	7.87	7.98	8.15	8.99	11.26	13.01	13.60	13.61	14.01	14.53	15.76	17.42	24.58	

由表 1-1 可以看出，Cs、K、Na、Ca 等金属元素的电离电位很低，而 H、O、N 等气体的电离电位较高，Ar、He 等惰性气体的电离电位更高。因此，在焊条药皮中常将含 K、Na 等元素的化合物或天然矿物作为稳弧剂。

中性气体粒子被电离所吸收的能量有以下几种形式：一种是气体粒子相互碰撞得到能量，使其电离，这种电离称作碰撞电离；气体粒子获得热能发生电离称作热电离；气体粒子受到射线的照射，吸收光子能而发生电离称作光电离。焊接电弧的弧柱温度可达到 5000~30000K，因此在弧柱中热电离成为主要电离形式。光电离和碰撞电离的作用相对较小。

气体粒子在弧柱吸收各种形式的能量而被电离，其电离程度不仅决定于该种元素的电离能，而且与温度、气体压力等因素有关。对于 Cs、K、Ca、Y 等元素的电离度，可以根据变换后的沙格(M·N Saha)公式计算^[2]：

$$\alpha = 0.18 p^{-\frac{1}{2}} T^{\frac{3}{2}} a \exp(-5800 U_i / T)$$

式中 α ——气体电离度(%)；

p ——弧柱的大气压(Pa)；

T ——绝对温度(K)；

a ——量子系数；

U_i ——某元素的电离电位(同电离能)(V)。

按这一关系式求得在不同的弧柱气压下温度和各元素电离度

的关系(图 1-1)。

由图 1-1 看出,在一定的弧柱压力下,随着温度的升高,各元素的气体电离度增大;还可以看出,在一定的温度下,元素的电离能越小,电离度越大。

如果弧柱中存在着两种以上的气体,此时某一温度下混合气体的电离度,实际上取决于电离电位较低的元素含量和电离电位的大小。例如文献[2]研究的由硅、铁、锰、铬、钙分别与铯组成的混合气体的有效电离电位 U_0 , 研究结果表明,混合气体的电离电位 U_0 决定于电离电位较低的元素铯的浓度,当 $w(\text{Cs}) < 2\%$ 时,随着铯浓度增大,混合气体的有效电离电位急剧减小,而随着铯的浓度进一步增大其 U_0 进一步降低,直至趋于铯的电离电位。图 1-2 是金属蒸气的有效电离电位 U_0 与蒸气中铯浓度的关系曲线。

图 1-2 中曲线描述了在电弧混合气体中,低电离电位的元素(有人称“离化剂”)的重要作用。在电弧气氛中哪怕是加入少量的“稳弧剂”(又称离化剂),就会明显地降低有效电离电位。

图 1-2 中的试验结果具有重要的实际意义。在焊条设计中经

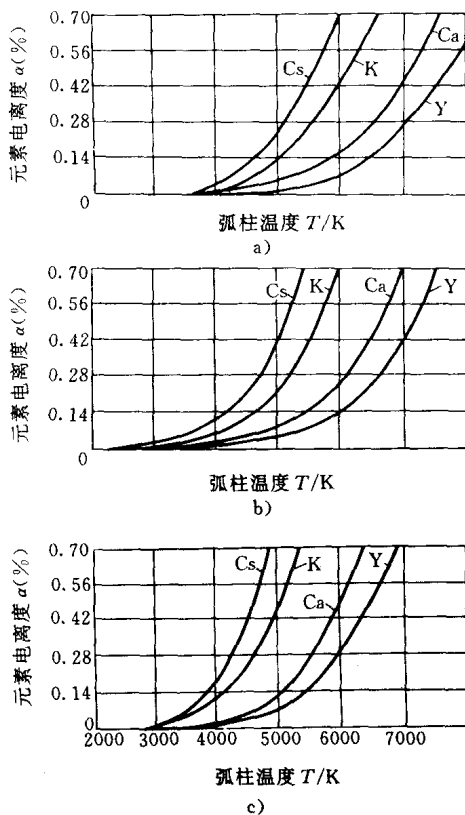


图 1-1 各元素的电离度与温度和压力的关系^[2]

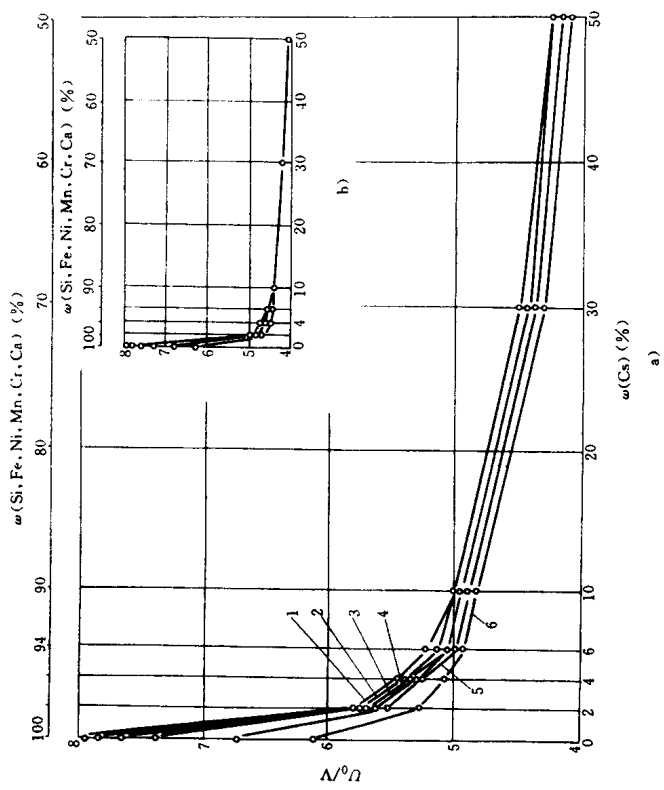


图 1-2 金属蒸气有效电离电压 U_0 与 Cs 浓度的关系 [2]

a) 试验温度 6000K b) 试验温度 3000K

弧柱气体成分: 1—Cs-Si 2—Cs-Fe

3—Cs-Ni 4—Cs-Mn 5—Cs-Cr 6—Cs-Ca

常利用这一规律，在药皮中加入少量电离电位较低的元素作为添加剂，可提高焊条的稳弧性。

以上叙述的是在电弧气氛中气体粒子的电离。与电离过程同时，在电弧气氛中还在进行着另一个过程——带电粒子的复合。

在一定的温度下，某种气体粒子的电离为什么会保持一定的程度而不继续发展？这是因为中性粒子的电离与复合这两个相反过程同时进行，并在一定的条件下达到平衡。因此说，气体在某一温度下的电离度，实际是电离与复合过程达到平衡时的电离度。当温度改变时，这一平衡被破坏，电离与复合过程在新的条件下建立起新的平衡。

电离与复合过程可以用下列反应式描述



式中 A ——中性气体粒子；

A^+ ——电离后带正电荷的离子；

e^- ——带负电荷的电子；

eU_i ——电离能。

式(1-1)中表示的复合过程是，正离子吸收电子形成了中性的粒子，同时放出电离能。

应该提到的是，不仅离子可以中和成中性粒子，放出电离能，而且受激的中性粒子的外围电子也会在一定条件下由高能级恢复到低能级上来，并且以光能的形式将原来激励的能量释放出来。

除了电离、复合、激励以及受激粒子的恢复以外，还应该提到关于负离子的形成。这里所讲的负离子不是指电子，而指的是在弧柱中发生热电离的时候，中性原子或分子俘获电子而形成的负离子。负离子质量比电子大得多，所以在电场中运动速度很低，很容易与正离子复合成两个中性原子。显然负离子的产生，对电弧的导电性会起消极作用。

各种元素的原子(或分子)结合电子形成负离子的能力是不同的，一般以元素的“电负性”来表示。表 1-2 列出了常见元素的电

负性数值,该数值是以 Li 为 1 计算求得的。电负性越大的元素,越容易俘获电子成负离子。由表 1-2 中的数据可以看到,氟元素电负性最大,因此有人把氟称作“消电离”元素。

表 1-2 常见元素的电负性^[1]

元素	F	O	Cl	N	Br	C	I	H	B	Si	Ti	Al	Mg	Ca	Li	Ba	Na	K	Cs
电负性	4.0	3.5	3.0	3.0	2.8	2.5	2.4	2.1	2.0	1.8	1.6	1.5	1.2	1.0	1.0	0.9	0.9	0.8	0.7

二、弧柱的导电机理

根据电弧的各部位电-物理性质的不同,人们把电弧分为三个部分,靠近阴极表面的部分称做阴极区,靠近阳极表面的部分称做阳极区,而中间的部分称做弧柱。电弧长度实际上是这三个区长度的总和,但弧柱长度占弧长的主要部分,阴极区和阳极区的长度很小。在实际测量弧长时,往往可以把阴极区和阳极区的长度忽略。图 1-3 是电弧的组成区域和电压的分布示意图,图 1-3 中还画出了三个区域的电压分布曲线。由图 1-3 看出,电弧电压实际上是由三个部分组成的,在阴极区和阳极区都存在着一个很陡的电压降,称为阴极电压降 U_K 和阳极电压降 U_a ,而在弧柱区中的电压降 U_c 下降比较平缓。

弧柱是电弧中温度最高的部分,常用焊条焊接电弧弧柱温度大约为 5400~5900K,气体保护电弧焊时弧柱的温度还会更高,致使弧柱中心部分的电离度可能达到 100%,中性的粒子几乎全

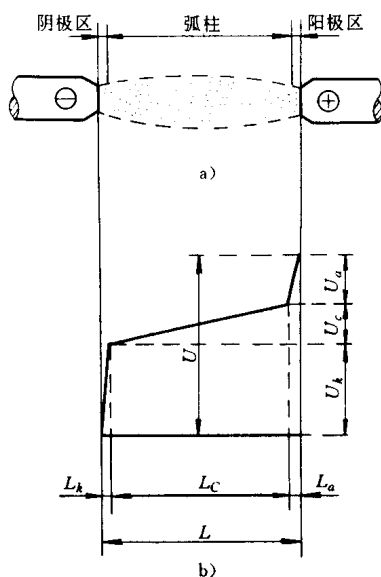


图 1-3 电弧的组成区域和电压的分布示意图^[1]

a)组成区域 b)电压分布

部被电离，这样电弧中心部分甚至可以看作是由正离子和电子组成的“等离子体”。弧柱周围受着冷空气的强烈冷却，因此弧柱的温度是不均匀的，靠近边缘的弧柱温度将比中心部分的温度低得多。因此，从弧柱的总体上看，其电离程度不充分，实际上可以视为是由电子、离子和受激励的中性粒子组成的综合体。在阳极和阴极形成的电场作用下，弧柱中离子和电子作相反方向运动，而形成电流(图 1-4)，这样在弧柱中的电流实际上是由电子流和离子流组成的。

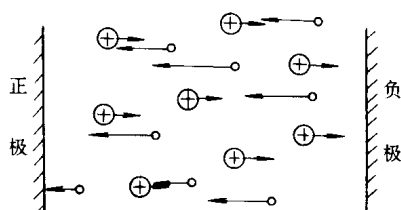


图 1-4 正离子和电子在电场中定向移动示意图^[1]

⊕—正离子 ○—电子 →—运动方向

电子的质量非常小，仅有 $9.03 \times 10^{-28} \text{g}$ ，相当于氢相对原子质量的 $1/1800$ ，所以在电场中，电子的运动速度远远大于正离子的运动速度，这就是说，在弧柱中的电流主要是电子流，有的研究者估算，正离子流只占弧柱总电流的 $1/1000$ 。

综合以上的分析，可以对弧柱的导电机理作以下简单的概括：在一定的条件下，气体粒子被电离成正离子和电子；气体成分和温度决定电离度的大小；在两极间电场的作用下，正离子和电子分别向两极定向移动，形成弧柱的电流；由于电子的质量小，运动速度大，弧柱的电流可以看作是电子流。

三、阴极区和阳极区的导电机理

(一) 阴极区的导电机理

阴极是电弧电子发射源，电弧的电子主要是由阴极提供和补充的，因此在阴极表面发射出电子是阴极区进行的最主要的电-物理过程。除了发射电子这一过程以外，在阴极区还进行着其他复杂的过程：如从弧柱中进入阴极区的正离子到达阴极表面和电子复合，在阴极强电场的作用下，高速运动的电子、正离子和其他粒子之间发生碰撞、电离、复合，并由此产生一系列的热反应和能量的传递等过程。这些过程受电极材料、气体介质和焊条不同