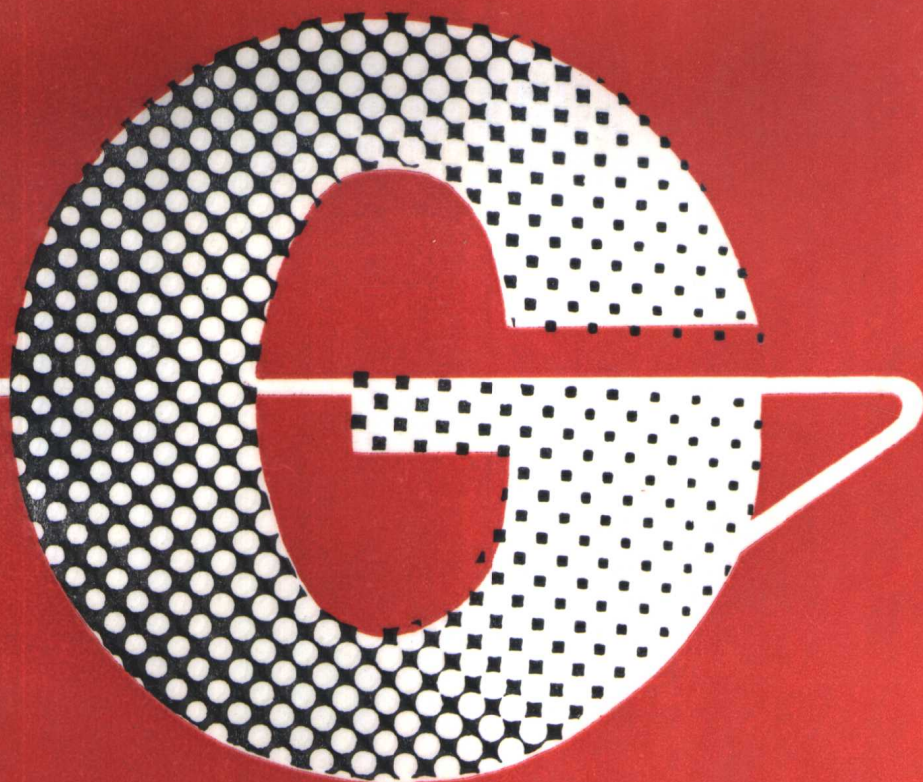


普通高等专科学校教育机电类规划教材

电 弧 焊



哈尔滨工业大学威海分校 周玉生 主编
沈阳工业高等专科学校 张文明

机械工业出版社

(京)新登字054号

本书是根据高等专科教育培养目标及1991年10月全国高等专科学校焊接专业教学研讨会制定的教学大纲编写的高等专科学校焊接专业规划教材。

本书共分八章。第一章主要论述焊接电弧的物理基础及工艺特性、焊丝熔化及熔滴过渡、焊缝成形的基本规律；第二~七章，全面而系统地介绍了各种常用电弧焊方法的特点和应用及其对设备的要求，并给出了大量较实用的焊接规范参数以供选用；第八章介绍了一些较实用的自动控制技术，包括参数的恒值控制、程序自动控制及跟踪控制等。

本书除作为高等专科学校焊接专业教材外，也可供金属材料、热加工、机械制造、造船等专业的师生和工程技术人员参考。

电 弧 焊

哈尔滨工业大学威海分校 周玉生 主编
沈阳工业高等专科学校 张文明

*
责任编辑：董连仁 版式设计：冉晓华
封面设计：刘 代 责任校对：肖新民
责任印制：王国光

*
机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码：100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*
开本787×1092¹/₁₆·印张18·字数435千字
1994年5月北京第1版·1994年5月北京第1次印刷
印数 0 001—3 600·定价：8.90元

*
ISBN 7-111-04001-5/TG·874(课)

前 言

本书是根据高等专科教育培养目标及1991年10月全国高等专科学校焊接专业教学研讨会制订的教学计划和教学大纲编写的高等专科学校焊接专业规范化教材。

电弧焊是各类焊接方法中应用最广泛，因而也是最重要的一类方法。作为焊接工程技术人员，首先应该全面掌握电弧焊方法。

本教材是高等专科学校焊接专业主要教材之一。本书共分八章，第一章主要讨论焊接电弧的物理基础及工艺特性、焊丝熔化及熔滴过渡、焊缝成形的基本规律；第二~七章全面系统地介绍了各种常用电弧焊方法和对设备的要求及典型设备的结构、原理。其中包括手工电弧焊、埋弧自动焊、钨极氩弧焊、熔化极氩弧焊、CO₂气体保护电弧焊、等离子弧焊等。为适应焊接自动化的需要，第八章介绍了较实用的电弧焊自动控制技术，包括参数的恒值控制、程序自动控制、跟踪控制等。

根据高等专科学校的培养目标，本书对理论的阐述力求简单明了，以各种电弧焊方法的应用和对设备的要求为重点，并给出大量较实用的焊接参数以供选用。

本教材由哈尔滨工业大学威海分校周玉生主编，沈阳工业高等专科学校张文明任副主编，沈阳汽车工业学院刘中青担任主审。参加编写的还有：承德石油高等专科学校武华，鞍山职工工学院王久长，哈尔滨机电专科学校刘立君。

在编写过程中，本书参考了高等学校本科同类教材及教学参考书。曾邀请哈尔滨工业大学邵德春、哈尔滨机电专科学校刘振祥、沈阳工业高等专科学校宇永福和吴晓清、辽阳石油化工专科学校张德生、承德石油高等专科学校张连生、泰安煤矿机械厂兰钧、威海船厂李军等同志参加审阅。哈尔滨工业大学杨士勤教授审阅了本书的部分章节，并给予指导；哈尔滨工业大学威海分校胡丕民和潍坊巨力机械总厂李俊美等同志，对本书的编写提供了宝贵的意见，在此向他们一并表示谢意。

由于编者水平所限，本书一定存在不当之处，诚请读者提出宝贵意见。

编 者
1992, 12

目 录

前言

绪论 1

一、电弧焊发展简史及其在现代工业中的作用 1

二、电弧焊方法的分类 2

三、课程内容和教学方法 3

第一章 电弧焊基础 4

第一节 电弧的物理基础 4

一、概述 4

二、电弧中带电粒子的产生过程 5

三、电弧的导电机构 11

第二节 焊接电弧的工艺特性 12

一、电弧的最小能量消耗特性（最小电压原理） 12

二、电弧的静特性 13

三、电极斑点的游动性 14

四、电弧的强特性 17

五、电弧的力学特性 20

六、电弧挺度及磁偏吹 25

七、交流电弧的特点 28

第三节 焊丝的熔化及熔滴过渡 29

一、焊丝的熔化热源 29

二、影响焊丝熔化速度的因素 30

三、熔滴上的作用力 32

四、熔滴过渡主要形式及其特点 33

第四节 母材熔化和焊缝成形 39

一、母材熔化和焊缝成形 39

二、焊缝形状尺寸与焊缝质量的关系 40

三、焊接规范和工艺因素对焊缝成形
的影响 41

四、焊缝成形缺陷及产生原因 44

第二章 手工电弧焊 48

第一节 手工电弧焊的特点及应用 48

一、手工电弧焊的基本原理 48

二、手工电弧焊的特点 49

三、手工电弧焊的应用 49

第二节 手工电弧焊工艺 49

一、焊缝形式 49

二、焊前准备 50

三、规范参数的选择 55

四、手工电弧焊焊接技术 59

五、高效率重力焊接法 70

第三节 手工电弧焊设备 71

一、手工电弧焊设备的结构及要求 71

二、焊接电源的特点及应用 71

第三章 埋弧自动焊 73

第一节 埋弧焊的特点和应用 73

一、埋弧焊过程 73

二、埋弧焊的特点 73

三、埋弧自动焊的分类及应用 75

第二节 埋弧焊的自动调节系统 76

一、埋弧焊自动调节的概念 76

二、等速送丝埋弧自动焊调节系统 77

三、变速送丝埋弧自动焊调节系统 81

第三节 埋弧自动焊设备 86

一、埋弧自动焊机的类型及用途 86

二、埋弧自动焊机的组成及作用 86

三、埋弧自动焊机的工作原理 94

第四节 埋弧自动焊工艺 104

一、焊前准备 104

二、焊接工艺参数的选择 104

三、埋弧自动焊工艺 120

四、生产率高的埋弧自动焊 127

第四章 钨极氩弧焊 132

第一节 钨极氩弧焊的特点及应用 132

一、钨极氩弧焊的特点 132

二、钨极氩弧焊的应用 132

第二节 焊枪及电极 133

一、焊枪 133

二、电极 133

第三节 电流的种类和极性 136

一、直流钨极氩弧焊 136

二、交流钨极氩弧焊 137

第四节 钨极氩弧焊机 147

一、钨极氩弧焊机的结构及对电源的要求	141	一、CO ₂ 气体	189
二、交流钨极氩弧焊机	141	二、焊丝	190
第五节 钨极氩弧焊工艺	145	第三节 CO ₂ 气体保护电弧焊工艺	192
一、气体保护效果	145	一、焊前准备	192
二、焊前清理	146	二、焊接规范参数选择	195
三、规范参数的选择	147	第四节 CO ₂ 气体保护电弧焊设备	202
四、手工钨极氩弧焊的操作技术	150	一、CO ₂ 焊焊接电源	202
第六节 钨极脉冲氩弧焊	151	二、供气系统	202
一、钨极脉冲氩弧焊的特点	151	三、NBC1-300型CO ₂ 气体保护半自动焊机	204
二、影响钨极脉冲氩弧焊缝质量的因素	153	四、国产CO ₂ 气体保护电弧焊机型号及技术数据	207
三、焊接规范参数的选择	155	第五节 特种CO ₂ 气体保护电弧焊	212
第五章 熔化极氩弧焊	157	一、药芯焊丝CO ₂ 气体保护电弧焊	212
第一节 熔化极氩弧焊的特点和应用	157	二、CO ₂ 电弧点焊	215
一、熔化极氩弧焊的基本原理	157	第七章 等离子弧焊接与切割	218
二、熔化极氩弧焊的特点	157	第一节 等离子弧及等离子弧发生器	218
三、熔化极氩弧焊的应用	158	一、等离子弧	218
第二节 熔化极氩弧焊设备	158	二、等离子弧特性及应用	219
一、焊枪	158	三、等离子弧发生器	221
二、半自动焊机送丝系统	158	四、双弧现象及其防止	226
三、焊接电源	164	第二节 等离子弧焊接	228
四、控制系统	164	一、大电流等离子弧焊接	228
五、国产熔化极氩弧焊机型号及技术数据	165	二、中等电流等离子弧焊接	231
第三节 熔化极氩弧焊工艺	168	三、小电流等离子弧焊接	231
一、亚射流过渡的特点	168	四、脉冲等离子弧焊接	234
二、规范参数的选择	170	五、熔化极等离子弧焊接	234
三、窄间隙焊接	177	第三节 等离子弧焊接设备	235
第四节 熔化极脉冲氩弧焊	180	一、概述	235
一、脉冲射流过渡	180	二、典型焊机简介	238
二、工艺特点	180	第四节 等离子弧堆焊和喷涂	241
三、应用范围	181	一、等离子弧堆焊	241
四、脉冲参数的选择	182	二、等离子弧喷涂	245
第六章 CO ₂ 气体保护电弧焊	184	第五节 等离子弧切割	248
第一节 CO ₂ 气体保护电弧焊的特点和应用	184	一、等离子弧切割的原理及其特点	248
一、CO ₂ 气体保护电弧焊的工艺特点与分类	184	二、等离子弧切割规范参数的选择	248
二、CO ₂ 气体保护电弧焊的冶金特性	185	三、等离子弧切割设备	250
第二节 CO ₂ 气体保护电弧焊用的焊接材料	189	四、等离子弧切割方法的扩展	252
		第八章 电弧焊自动控制技术	255
		第一节 焊接参数的恒值控制	255
		一、影响转速变化的原因	255
		二、转速自动调节	256

第二节 程序自动控制262

- 一、程序自动控制的对象和要求262
- 二、程序自动控制的基本转换功能和实现方法263
- 三、程序自动控制的基本环节264

第三节 自动跟踪控制272

- 一、自动跟踪控制系统的结构272
- 二、跟踪系统中传感器的特点及工作原理273
- 三、焊缝自动跟踪的随动机构277

参考文献278

绪 论

一、电弧焊发展简史及其在现代工业中的作用

焊接就是通过适当的物理化学过程使两个分离的固态物体产生原子（或分子）间结合而形成永久性连接。作为金属加工的主要方法之一，焊接越来越为世人所瞩目，因而得到了广泛应用和飞速发展。据不完全统计，全世界年产量45%的钢和大量的非铁合金，都是通过焊接而付诸使用的。特别是科学技术发展到今天，几乎所有部门（如汽车、锅炉、船舰、桥梁、冶金、能源、机械制造、石油化工、电子、航天航空等）都离不开焊接技术。因此可以这样说，没有现代焊接技术的发展，就不会有现代工业和科学技术的今天，焊接技术的发展水平是衡量一个国家科学技术先进程度的重要标志。

目前已有20余种焊接方法应用于工业生产，其中应用最广泛的是电弧焊。

电弧焊是以电弧为能源对被焊金属进行熔化焊的焊接方法。早在1801年，俄国人彼得洛夫教授首先发现电弧，并指出可利用电弧来熔化金属。但由于当时电力工业不够发达，不能提供维持电弧稳定燃烧的足够功率的电源，而且焊接冶金也未能解决焊缝质量问题，因而电弧焊并未得到应用。

电弧焊真正用于工业生产是在1892年发现金属极电弧后，特别是1930年出现了药皮焊条以后才逐渐开始的。由此可见，电弧焊的发展是以焊条电弧焊为起点的。

最早的电弧焊是以光金属棒作电极和填充金属，电弧在空气中处于无保护状态下燃烧，电弧稳定性和焊缝质量都很差。药皮焊条的应用，使得电弧处于药皮熔化所产生的保护气氛中，这不仅大大改善了电弧稳定性，而且使熔池处在电弧气氛及药皮所形成熔渣保护下，使焊缝的质量明显提高。

随着熔炼技术及电子技术的发展，40年代出现了埋弧自动焊。埋弧自动焊的焊丝兼有电极和填充金属的作用，电弧及熔池都处于焊剂形成的熔渣保护下，无明弧。另外，焊剂、焊丝的送进及焊接小车（或工件）的行走完全自动化，故而称埋弧自动焊。

埋弧自动焊的出现大大提高了焊接生产率，为长直焊缝及大型环焊缝的焊接提供了有效的自动化手段，同时也大大减轻了焊接操作者的劳动强度，改善了操作环境。

由于焊条药皮及埋弧焊焊剂的成分中含有金属及非金属氧化物，故难以用来焊接铝、镁、钛等活泼金属及其合金。

在第二次世界大战中，由于航空工业的迅猛发展，出现大量由铝合金、不锈钢等金属材料制成的飞机和航空发动机的焊接零部件，而且焊接接头要求质量高，采用已有的焊接方法已不能适应和保证优质的焊接接头。为适应战争的需要，出现了钨极氩弧焊。

钨极氩弧焊是以钨棒作电极，焊接时电极不熔化，电弧和熔池都处于氩气保护之中，电弧稳定性好，焊缝质量高，特别适于非铁合金、不锈钢、镍基合金以及活性金属材料（如钛、钼等）的焊接。但是这种焊接方法受钨极许用电流的限制，焊接电流不能过大，而且向焊缝中添加焊丝又不太方便，故不适于焊接厚件，焊接生产率也不高。

为了克服钨极氩弧焊存在的问题，人们在发展钨极氩弧焊的同时又进行了新的探索，很

快研制出熔化极氩弧焊，这是40年代末期最新的电弧焊方法。

熔化极氩弧焊具有氩气保护的特点，而且焊丝兼有电极和填充金属的作用，焊接时可选用较大的电流密度，所以焊接生产率高；当焊接不同厚度的焊件时，可选用相应的熔滴过渡形式。另外，该法也便于实现半自动或自动焊。

因为氩气较稀缺和昂贵，用于焊接碳钢、低合金结构钢和普通焊接构件时，便显得焊接成本太高。于是人们开始寻求以廉价易得的气体来代替氩气，用于焊接碳钢、低合金结构钢和普通焊接构件，以降低焊接成本，扩大气体保护焊的应用范围。通过不断的实践，于50年代初期，CO₂气体保护焊终于获得了应用和推广。CO₂气体保护焊具有高效、节能、成本低、工件变形小等优点，现已成为焊接碳钢、低合金结构钢的最常用焊接方法。

前述各种电弧焊方法均属自由电弧，电弧能量不够集中，电弧温度不够高，因而不适于高温难熔金属的焊接。所以人们不得不探索更新的焊接方法以满足新的要求。在探索中人们发现，在不改变电弧功率的前提下，如果强制电弧缩小截面，便可大大提高电弧的能量密度，因而电弧温度也能明显提高。于是，继钨极氩弧焊出现不久，大约在50年代末期便出现了等离子弧焊。等离子弧焊不但具有钨极氩弧焊的优点，而且还具有自己的特点，即电弧能量密度大、电弧温度高、焊接热影响区窄、焊件变形小等。

随着现代工业和科学技术的迅猛发展，对焊接技术和焊接质量不断提出新要求，希望研制出能满足各种金属材料、各种结构形式、各种使用性能（如高压、高温、低温、耐腐蚀、耐磨、强韧性等）的焊接方法，同时还要求更好地实现焊接过程自动化，提高焊接生产率和降低焊接成本。从60年代开始，在工业生产中不断涌现出新的电弧焊方法，如微束等离子弧焊、钨极脉冲氩弧焊、熔化极脉冲氩弧焊、混合气体保护电弧焊、等离子弧熔化极气体保护焊、脉冲等离子弧焊、药芯焊丝CO₂气体保护焊、高效埋弧焊、保护气体电弧点焊等等。同时在电弧焊设备的更新，提高工作稳定性与可靠性，以及改善自动控制技术等方面也取得了许多新成就。

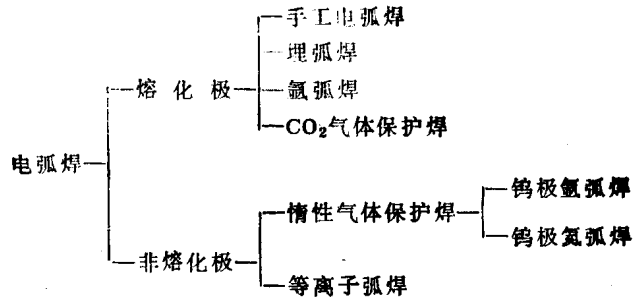
计算机的应用为电弧焊的发展开辟了崭新的途径，现在弧焊机器人已成功地用于工业生产。可以预见，随着现代工业和科学技术的发展，电弧焊方法也必将获得新的发展。

二、电弧焊方法的分类

电弧焊方法通常可采用下述方式分类：

- 1) 按采用的电极，可分为熔化极电弧焊和非熔化极电弧焊。
- 2) 按保护方式，可分为渣保护、气保护、渣气联合保护电弧焊和氢原子焊。埋弧自动焊属于渣保护电弧焊。气体保护焊又分为惰性气体保护焊、CO₂气体保护焊以及混合气体保护焊。手工电弧焊属于渣气联合保护电弧焊。氢原子焊是以氢气作保护气体，在具有一定夹角的两根钨极末端之间引燃电弧的焊接方法，目前在生产中已很少采用。
- 3) 按操作方式，可分为手工电弧焊、半自动电弧焊和自动电弧焊。手工电弧焊一般是指手工焊条电弧焊，另外还有手工钨极氩弧焊；半自动电弧焊主要用于熔化极电弧焊，在焊接过程中，自动输送焊丝，而焊枪的移动则靠手工操作，如常见的半自动CO₂气体保护电弧焊等；自动焊可用于熔化极和非熔化极，在焊接过程中焊枪或工件的移动以及焊丝的送进完全是自动进行。各类电弧焊方法均可采用自动焊，即使是手工焊条电弧焊也可进行自动焊（如焊条重力焊）。

下列所示为常见电弧焊方法及其分类。



三、课程内容和教学方法

电弧焊方法是焊接专业主要专业课之一，其主要内容：

- 1) 电弧焊基础，包括电弧物理基础、工艺特性、熔滴过渡及焊缝形成的基本规律等。
- 2) 各种电弧焊方法的特点与应用。
- 3) 各种电弧焊工艺。
- 4) 常用典型焊接设备的结构和电路原理。

根据高等专科学校的培养目标，本教材对电弧焊基础理论的阐述力求简单明了；对于各种电弧焊方法的介绍则尽量详尽，并推荐出大量由实践中来的规范参数以供选用；对于电弧焊设备的阐述，在明确各种电弧焊方法对电源要求的基础上，重点介绍几套典型设备；对于电弧焊自动控制技术，本教材只介绍有实用价值的参数恒值控制、程序自动控制及自动跟踪控制等基本技术。

电弧焊方法的应用最为广泛，学生学完本课程后应达到下列基本要求：

- 1) 掌握电弧焊的基础理论，包括电弧的各种特性及其影响因素，熔滴过渡及焊缝形成的基本规律等。
- 2) 能根据具体生产条件正确选用焊接方法，合理确定焊接工艺规范参数。
- 3) 能解决焊接生产中常见的缺陷，正确使用焊接设备并能排除常见故障。

本课程是以电工学及电子学、机械设计、弧焊电源等技术基础课为基础的专业课。在学习本课程前，学生应对电弧焊方法及设备有一定的感性认识，在教学过程中应注意与实践环节的结合。

第一章 电弧焊基础

电弧焊是各类焊接方法中应用最为广泛,因而也是最重要的一类方法。它以电弧为能源,可有效地把电能转换成焊接过程所需要的热能和机械能。因此,电弧的这种能量转换和利用就成为电弧焊的基础。本章讨论的主要内容:电弧的物理基础、电弧的工艺特性、电弧的加热、焊丝的熔化、金属的熔滴过渡和焊缝成形的规律等。

第一节 电弧的物理基础

一、概述

电弧是气体导电(也称气体放电)的一种形式,图1-1为电弧示意图。气体导电不同于金属导电,不遵循欧姆定律,呈现出一个很复杂的关系,见图1-2。在不同条件下和不同电流区间,导电机构明显不同。在电流较小的区间,气体导电所需要的带电粒子不能通过导电过程本身产生,必须依靠外加措施(加热、光照射等)来产生带电粒子,否则导电过程就不能维持,这种气体放电现象称为非自持放电。当电流大于一定数值时,气体放电本身就可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产生带电粒子,一旦放电开始,即使取消外加措施,放电仍能继续下去,这种放电过程称为自持放电。在自持放电区间,其放电特征也因电流数值的不同而明显不同,据此又可分为暗放电、辉光放电和电弧放电三种基本形式。与其它气体放电形式相比,电弧放电是电压最低、电流最大、温度最高、发光最强的一种气体放电现象。借助这种放电过程,将电能转换为热能、机械能和光能。焊接主要是利用其热能和机械能来加热熔化金属,并形成焊缝。

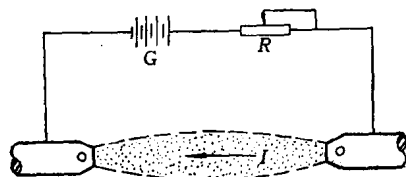


图1-1 电弧示意图

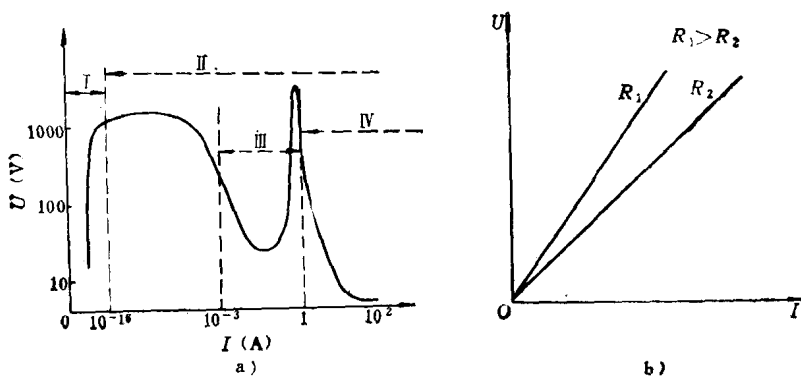


图1-2 气体导电与金属导电的伏安特性

a) 气体导电 b) 金属导电

I—非自持放电区间 II—自持放电区间 III—辉光放电 IV—电弧放电

正常状态的气体是由中性的分子或原子组成，不含带电粒子，因而不是导电的。要使正常状态的气体导电，必须有一个产生带电粒子的过程。

二、电弧中带电粒子的产生过程

电弧是由两个金属电极和它们之间的导电气体组成的，见图1-1。电弧中的带电粒子主要由气体的电离和电极的电子发射两个物理过程产生，同时伴随着激励、解离、扩散、复合、负离子的产生等过程。

1. 电离与激励

在一定条件下，中性气体粒子（分子或原子）失去一个或若干个电子而成为正离子的现象称为电离。

要使中性气体粒子电离，必须对其施加能量。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（eV）为单位。一个电子伏（eV）能量等于在电位差为1V的两点间移动一个电子所做的功，其数值为 $1.6 \times 10^{-19} \text{J}$ 。为了计算方便，常把用电子伏为单位的能量转换为数值上相等的电压来表示，叫做电离电压。使中性气体粒子失去一个电子的电离称为一次电离，依此类推有二次电离、三次电离、四次电离。焊接过程中主要是一次电离。要使中性气体粒子失去第二个电子则需更大的电离电压，这个电离电压称为第二电离电压。不同的气体元素的电离电压是不同的，其数值的大小反映气体电离的难易程度，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

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

注：括号内的数字依次为二次、三次、四次电离电压。

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。

激励时由于电子并未脱离原子的束缚，所以受激粒子仍呈中性。受激粒子是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^{-8}s 。处于激励状态的粒子有自发地恢复

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
H _a	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		

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。

由表1-1及表1-2可见，在一般情况下分子状态气体的电离或激励与原子状态的气体相比，需要克服两层约束，因而需要更大的外加能量。然而，对某些少量气体原子，当其结合为分子时反而使电子与原子的联系减弱，故分子状态的电离或激励反而比原子状态时需要的外加能量小。

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，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

焊接电弧中气体粒子的电离，因外加能量种类的不同存在以下几种电离方式：

(1) 热电离 气体粒子因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知，气体粒子（包括中性粒子、电子、离子）的平均运动速度与温度的数值关系为：

$$\bar{v} = 1.87 \times 10^{-8} \sqrt{T/m}$$

式中 \bar{v} ——气体粒子的平均运动速度(cm/s)；

T ——气体的热力学温度(K)；

m ——粒子的质量(g)。

由上式可见，气体的温度越高，气体粒子的运动速度就越快，因而动能 $mv^2/2$ 也就越大。一定温度下，气体粒子的质量越小，其运动速度就越大，动能也就越大。

在高温下，具有很大动能、高速运动的气体粒子的热运动是无规则的散乱运动，粒子间将发生频繁而激烈的碰撞，在碰撞过程中产生能量传递。被碰撞的粒子所接受的能量达到激励能者便产生激励，达到电离能者便产生电离。因而，热电离实质上是由于粒子间的碰撞而产生的一种碰撞电离过程。

在碰撞过程中，由于电子的质量远远小于气体原子、离子或分子，速度大，因此当其与

中性粒子碰撞时，几乎可以将其全部动能传递给中性粒子，转化为中性粒子的内能（这种碰撞称为非弹性碰撞或破坏性碰撞），使中性粒子激励或电离。当中性粒子或离子间碰撞时，由于它们的质量较大，速度较低，只能发生部分能量的传递，不足以产生电离（这种碰撞称为弹性碰撞或非破坏性碰撞），也不激励，只能引起粒子温度的变化。因此，电弧中通过碰撞传递能量使气体粒子电离的过程中，电子的作用是主要的。

气体中，单位体积内被电离的粒子数与气体电离前粒子总数的比率称为电离度。一般用 x 表示，即

$$x = \text{电离后的电子或离子密度} / \text{电离前的中性粒子密度}$$

热电离时，电离度与温度、气体压力及气体的电离电压有关。温度升高，气体压力降低或者电离电压降低，都将使电离度增大。图1-3为热电离的电离度 x 与温度 T 的关系。

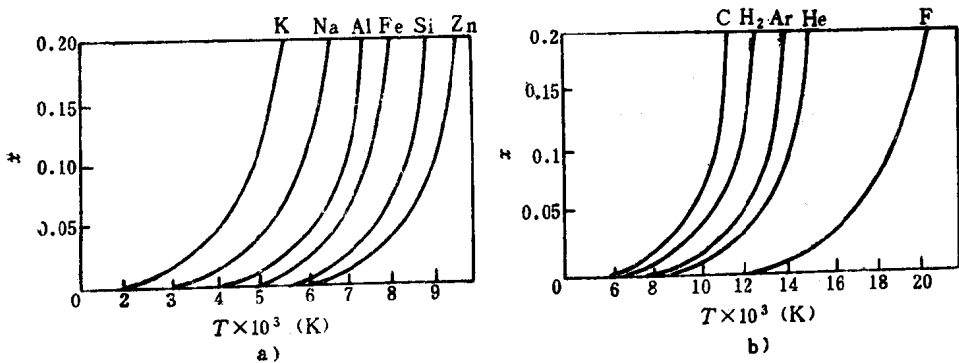


图1-3 热电离的电离度 x 与温度 T 的关系

a) 金属蒸气 b) 气体元素

当电弧的气体介质为混合气体时，其中电离电压最低的气体粒子的电离度最大，为电弧提供带电粒子起主要作用。例如，若电弧气氛中含有 Ca、Fe、O₂、N₂，在 5000K 气压为 $101 \times 10^3 \text{ Pa}$ 时，电离度之比是：

$$x_{\text{Ca}} : x_{\text{Fe}} : x_{\text{O}_2} : x_{\text{N}_2} = 1 : 1.74 \times 10^{-2} : 3.24 \times 10^{-6} : 6.63 \times 10^{-11}$$

这说明，若电弧气氛中含有一定量的 Ca 蒸气，则电弧的导电主要是由 Ca 蒸气的电离来提供带电粒子。因而，为了提高电弧的稳定性，只要在电弧气氛中加入少量的低电离电压的物质，即可取得明显的效果。

焊接电弧中，弧柱温度一般为 5000~50000K。在这样高的温度下，弧柱中气体粒子的热电离作用很强，所以热电离是弧柱部分产生带电粒子的最主要途径。

电弧中的多原子气体，一般在热电离之前，气体分子首先要吸收外加能量分解为原子，这种现象称为热解离。气体分子产生热解离所需要的最低外加能量称为解离能。表1-3为电弧气氛中几种可能遇到的气体分子的解离能。

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)
H ₂ → H + H	4.4	NO → N + O	6.1
N ₂ → N + N	9.1	CO → C + O	10.0
O ₂ → O + O	5.1	CO ₂ → CO + O	5.5
H ₂ O → OH + H	4.7		

因为解离能皆低于电离能，所以多原子气体的热电离过程一般是，气体分子受热作用先热解离，然后继续受热作用产生电离。热解离属于吸热反应，因此在相同条件下，多原子气体（如 CO_2 ）的电离对电弧的冷却作用比单原子气体（如 Ar ）大。这种冷却作用迫使电弧收缩，电弧电压及电弧温度比单原子气体中的电弧电压和电弧温度高。解离能越大的气体，这种现象越明显。

(2) 电场作用下的电离 在电场作用下，气体中的带电粒子将被加速，电能转换为带电粒子的动能。带电粒子的动能增加到一定数值时，即可能与中性粒子产生非弹性碰撞而使之电离，这种电离称之为电场作用下的电离。因此，电场作用下的电离，实质上也就是带电粒子与中性气体粒子相互碰撞而产生的电离。与热作用而引起的电离相似，电子起着主要作用。离子虽然也被电场加速，但是因其质量较大，速度远远低于电子的速度，所以离子碰撞所引起的电离在电弧中占次要地位。

在普通焊接电弧中，由于弧柱部分的电场强度较弱（约为 10 V/cm ），电子所获得的动能较小（比热作用所获得的动能小得多），所以在弧柱中是热电离为主，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，电场强度可达很高的数值（约为 $10^6 \sim 10^7\text{ V/cm}$ ），在这两个区域会产生显著的电场作用下的电离。

热电离、电场作用下的电离都属于碰撞电离。在碰撞电离中，所产生的带电粒子在热或电场作用下也参与粒子之间的碰撞，又会产生新的带电粒子，使带电粒子快速增加，这种碰撞电离具有链锁反应的性质。但是带电粒子的增加不是无限的，因为电弧导电过程中，除了电离外，还同时存在着带电粒子的消失过程，当二者处于动平衡状态时，电弧才趋于稳定燃烧。

(3) 光电离 中性气体粒子受到光辐射的作用而产生的电离称为光电离。并非所有的光辐射皆可产生光电离，只有辐射光的光量子能量 $h\gamma$ （ h ——普朗克常数， γ ——光辐射频率）大于或等于气体粒子的电离能时，才能产生光电离。

焊接电弧中的光辐射只能对 K 、 Ca 、 Na 、 Al 等金属蒸气可能直接引起光电离，而对焊接电弧气氛中的其它气体则不能直接引起光电离，除非它是处于激动状态时，才可能引起光电离。因此，光电离也是焊接电弧中产生带电粒子的次要途径。

3. 金属电极的电子发射

固体或液体金属中的自由电子在外加能量作用下，由金属表面逸出现象称为电子发射。在焊接电弧中，这种发射现象在阳极和阴极表面均可能发生，只不过是从阳极发射出来的电子受电场作用的排斥，不可能参与导电过程，只有从阴极表面发射出的电子在电场作用下参加导电过程。因此，这里只讨论阴极表面的电子发射。

使一个电子由金属表面逸出所需要的最低外加能量称为逸出功，以 $(W_0 = eU_0)$ 表示，单位是电子伏。因为电子的电量是一个常数，故金属的逸出功也可用逸出电压 U_0 来表示。逸出功的大小与金属材料种类、温度及表面状态等有关。表1-4、表1-5列出了某些金属材料的逸出功。

表1-4 几种金属及其氧化物的逸出功

金属种类		Fe	Al	Cu	K	Ca	Mg
逸出功 (eV)	纯金属	4.48	4.25	4.36	2.08	2.12	3.78
	金属氧化物	3.92	3.90	3.85	0.46	1.80	3.30

表1-5 钨及其合金的逸出功

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

电弧焊过程中，阴极表面若敷以某些有利于降低逸出功的微量元素，则有利于改善电弧的引弧性能和电弧的稳定性。如果金属表面存在氧化物或渗入 Cs、Ba、Tn、Zr 等元素时，则逸出功的数值要减小。

根据外加能量形式的不同，金属的电子发射可分为以下几种：

(1) 热发射 在热的作用下，金属内部的自由电子的动能增加，当其动能达到或超过逸出功时便摆脱束缚飞出金属表面，产生热发射。金属表面的温度越高，热发射现象越强烈。焊接中，当使用高沸点的金属钨或碳作阴极时（其沸点分别为 5950 K 和 4200 K），在大电流条件下，可被加热到很高的温度（3500 K 以上），有利于热发射。这种阴极称为热阴极。当使用钢、铜、铝、镁等低熔点材料作阴极或使用高沸点材料钨、碳作阴极而使用电流较小时，不可能加热到很高的温度，因而不能通过热发射提供足够的电子，必须通过其它方式来补充发射电子才能满足电弧导电的需要。这种阴极称为冷阴极。

热发射时，逸出的电子从金属表面带走相当于逸出功的热量，因而对阴极表面将产生冷却作用。

(2) 电场发射 当金属表面空间存在一定强度的正电场时，金属内的自由电子受此电场静电库仑力的作用，若此力达到一定程度，可使电子逸出金属表面，这种电子发射现象称为电场发射。

阴极表面空间正电场的静电库仑力，可使电子在较低的温度下逸出金属表面。所以阴极表面空间正电场的存在，相当于降低了电极材料的逸出功。因而电子从阴极表面逸出不象热发射那样对阴极有较强的冷却作用。

对于冷阴极，不可能加热到很高的温度，主要是靠电场发射来满足电弧导电的需要，这时阴极区的电场强度一般为 $10^5 \sim 10^7 \text{ V/cm}$ 才具备产生电场发射的条件。

实际上，电弧焊时纯粹的电场发射是不存在的，只不过是冷阴极时是以电场发射为主，热发射为辅而已。

(3) 光发射 金属表面接受光辐射时，金属内的自由电子能量增加到一定程度而逸出金属表面的现象，称为光发射。

与光电离相似，并非所有的光都能使金属产生光发射。只有辐射光的光量子能量大于或等于阴极材料的逸出功时，才能产生光发射。由于焊接电弧的辐射光波长范围较大，包括可见光与紫外线，所以有可能引起阴极产生光发射。但是，因每一波长的光量较弱，所以光发射在阴极发射中仅占次要地位。

(4) 粒子碰撞发射 高速运动的粒子（主要是正离子）碰撞金属表面时，将能量传递给金属内部的自由电子，使其能量增加而逸出金属表面的现象称为粒子碰撞发射。

正离子撞击阴极表面时，将其动能传递给阴极，可能引起粒子碰撞发射，发射出来的电子将被撞击的正离子自己中和而成为中性粒子，并释放出电离能。所以，只有其动能和中和所释放的电离能满足下列条件：

$$W_0 + W_i \geq 2W_0$$

式中 W_+ ——正离子的动能；

W_i ——正离子与电子中和时释放出的电离能；

W_w ——逸出功。

才能使阴极发射出另一个电子进入电弧空间参与电弧导电。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，这种电子发射形式是焊接电弧阴极区提供导电所需要带电粒子的主要途径。

实际上，在焊接时上述的几种电子发射常常是同时存在，是相互促进相互补充的。只是在不同的条件下，它们所起的作用不同。

4. 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，二者是处于动平衡状态。带电粒子在电弧空间的消失主要有扩散、复合两种形式和产生负离子。

(1) 带电粒子的扩散 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。这就要求电弧在一定的条件下有一定的电场强度 E ，来保证在单位长度上有足够的产热量 (IE) 与上述及其它损失相平衡。

(2) 带电粒子的复合 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。

这种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灭，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。

(3) 负离子的产生 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。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。减少的这部分能量称为中性粒子的电子亲和能，是以热或辐射光的形式释放出来。显然，负离子的形成是放热反应。在电弧的周边温度较低，因而温度较低的中性粒子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。

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、H₂O、Li 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，故不能有效地担负转送电荷的任务。

三、电弧的导电机构

1. 电弧的区域组成

在两个电极之间产生电弧放电时，沿电弧长度方向的电压分布如图1-4所示。

由图1-4可见，沿电弧长度方向的电场强度分布并不均匀。按电场强度分布的特点可将电弧分为三个区域：阴极附近的区域为阴极区，其电压 U_K 称为阴极电压降；中间部分为弧柱区，其电压 U_H 称为弧柱电压降；阳极附近的区域为阳极区，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皆很小，约为 $10^{-2} \sim 10^{-6} \text{cm}$ 。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，因而各区域的导电机构也是不同的。

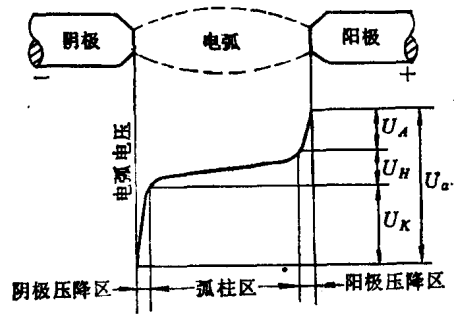


图1-4 电弧各区域的电压分布

2. 弧柱区的导电机构

弧柱的温度较高，由于气体种类、电流大小和电弧受压缩程度的不同，其温度范围约为 $5000 \sim 50000 \text{K}$ 。在这样高的温度下，弧柱中气体的电离主要是热电离。

因为弧柱中负离子的数量极少，可忽略不计，则弧柱电流是由运动方向相反的电子流和正离子流所组成。通过弧柱的电子流和正离子流分别由阴极区和阳极区予以提供，弧柱中因扩散和复合而消失的带电粒子是由弧柱自身的热电离来补偿。

由于弧柱中电子和正离子所受的电场力是相同的，而电子的质量比正离子的质量小得多，所以电子的运动速度比正离子的运动速度要大得多。因此弧柱中的电流主要是电子流（约占99.9%），正离子流所占比例很小（约占0.1%）。

弧柱中虽然电子流和离子流有很大差别，但是在每瞬间每单位体积中正、负带电粒子数是相等的，从而使弧柱从整体上呈中性，电子流和正离子流通过弧柱不受空间电荷电场的排斥作用，阻力小，这就使得电弧放电具有低电压、大电流的特点。

3. 阴极区的导电机构

阴极区的任务是向弧柱区提供所需要的电子流，同时接受由弧柱送来的正离子流。

由于阴极材料种类及工作条件（电流大小、气体介质等因素）不同，阴极区的导电机构也不同。

(1) 热发射型阴极区导电机构 采用钨、碳等高沸点材料作阴极且使用电流较大时，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，弧柱截面直到阴极表面不发生很大变化，阴极区的电流密度与弧柱区也相近，阴极区电压降很小。热发射电子从阴极表面带走的热量可以从两个途径得到补充：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中和电子，释放出的电离能也使阴极加热；电流流过阴极时产生的电阻热 $I^2 R$ （ I ——阴极电流， R ——阴极电阻值）使阴极加热。因此通过上述能量补充，可使阴极维持较高的温度，保证持续的热发射，这种导电机构