

继续工程教育焊接教材

金属结构的电弧焊

天 津 大 学 编著
中国石油化工总公司第四建设公司

机械工业出版社

继续工程教育焊接教材

金属结构的电弧焊

天津大学 编著
中国石油化工总公司第四建设公司



机械工业出版社

(京)新登字054号

本套教材是应继续工程教育之需,为从事锅炉、压力容器、钢结构制造与安装、石油化工建设施工与检修等与焊接有关的非焊接专业中级工程技术人员编写的。本套教材共四册。本册主要内容:系统地论述了焊接电弧的产生以及焊丝熔化、熔滴过渡和焊缝形成等一系列基本规律和能量转换机制,作为本册的理论基础;通过大量生产实例,阐述了手工电弧焊、埋弧焊、钨极氩弧焊、熔化极氩弧焊、CO₂气体保护焊、等离子弧焊等焊接方法的工艺与设备;还对与金属结构焊接密切相关的气割与等离子弧切割作了介绍。每章末附有复习题。

本书适于具有大专以上文化水平的技术人员作为焊接继续工程教育之用,还可用作焊接大专函授班的教材,也适于从事焊接工作的工程师和高等院校焊接专业的学生参考。

- 本书由奚道岩主编,编撰人有奚道岩(绪论、第一、二章、第九章第二节)、孙维善(第三章、第九章第一节)、韩国明(第四、六、八章)、吴仁育(第五、七章)。由李俊岳教授主审。

金属结构的电弧焊

天津大学 编著
中国石油化工总公司第四建设公司

责任编辑:何月秋 金晓玲 责任校对:刘志文
封面设计:姚毅 版式设计:王颖
责任印制:卢子祥

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)

北京交通印务实业公司印刷

(原人民交通出版社印刷厂)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092¹/₁₆·印张22³/₄·字数552千字
1993年11月北京第1版·1993年11月北京第1次印刷
印数 0001—3150·定价:19.00元

ISBN 7-111-03771-5/TG·827

继续工程教育焊接教材编委会

主 任：秦伯雄

副主任：吴凯人

编 委：（以姓氏笔划为序）

王立君 杜则裕 刘志久

金晓玲 徐心志 贾安东

高可畏 奚道岩

●继续工程教育焊接教材●

●工程焊接冶金学

杜则裕 主编

●金属结构的电弧焊

奚道岩 主编

●焊接结构与生产

贾安东 主编

●焊接质量管理与检验

王立君 主编

前 言

随着科学技术的不断发展,焊接已形成一门独立学科,在现代化工业生产中有着广泛的应用。在中国石油化工总公司工程建设部的大力支持下,天津大学与中国石油化工总公司第四建设公司合作为非焊接专业毕业而从事锅炉、压力容器或钢结构制造与安装、石油化工建设施工与检修等与焊接有关的中级工程技术人员编写了这套焊接培训教材,以满足开展继续工程教育的需要。通过培训使学员在短期内掌握焊接学科的基本内容,重点培养学员分析和解决常见焊接生产问题的能力。

天津大学焊接教研室曾与中国石油化工总公司第四建设公司教育培训中心联合举办过多期继续工程教育焊接培训班,在教学过程中多次组织学员座谈,听取了学员的意见,收集了实践中的经验和实例,在原有讲稿的基础上编写了这套教材,其中有些章节是由实际从事焊接生产的同志亲自撰写的。各书取材少而精,具有针对性,讲求实用性,并列举了较多金属结构的焊接实例及焊接失效实例分析。

本套教材适于具有大专以上文化水平的技术人员作为焊接继续工程教育之用,讲授前应针对学员的实际情况补充必要的《金属学及热处理》知识。

在本套教材编写过程中,张清桂、田景峰、王长聚、平桂香、张方中、郁东健、杨桂华和陈英等同志提出了许多宝贵意见,在此表示感谢。本套教材在编写过程中参考了全国高等院校焊接专业的有关教材及其它文献资料,在此对原作者表示谢忱。

这套教材还可用作焊接大专函授班的教材,也适合于工程技术人员自学,以及从事焊接工作的工程师和高等院校焊接专业的学生参考。

由于编撰者水平有限,缺点错误在所难免,敬请各界读者予以批评指正。

继续工程教育焊接教材
编委会

1992年5月

目 录

前言	
绪论	1
一、熔焊过程实质	1
二、电弧焊方法发展概况	1
三、基本焊接方法及电弧焊方法的分类	2
四、课程内容及要求	2
第一章 焊接电弧	4
第一节 电弧的物理基础	4
一、气体放电的基本概念	4
二、电弧中带电粒子的产生	5
第二节 焊接电弧的引燃过程	21
一、接触	21
二、拉开	22
三、燃弧	22
第三节 电弧各区域及其导电机构	22
一、阴极区及其导电机构	22
二、弧柱区及其导电机构	24
三、阳极区及其导电机构	25
四、电极斑点的跳动现象	26
第四节 焊接电弧的热和力	27
一、电弧的热功率和温度分布	27
二、电弧力及影响因素	32
第五节 电弧的静特性与动特性	37
一、焊接电弧的静特性	37
二、焊接电弧的动特性	39
第六节 焊接电弧的稳定性	41
一、焊接电源的影响	41
二、焊条药皮的影响	41
三、气流的影响	41
四、焊接处的清洁程度	41
五、焊接电弧的磁偏吹及控制	41
复习题	44
参考文献	44
第二章 熔滴过渡及焊缝的形成	45
第一节 焊丝熔化及熔滴过渡	45
一、焊丝的加热及熔化	45
二、熔滴的形成及过渡	49
第二节 焊接熔池及焊缝成形	71
一、焊接熔池	71
二、焊缝成形	76
复习题	89
参考文献	90
第三章 手工电弧焊	91
第一节 焊接接头的形式及焊缝形式	91
一、焊接接头形式	91
二、焊缝形式	93
第二节 手工电弧焊焊条	95
一、焊条的分类、型号及牌号	95
二、焊条的选用	99
三、焊条需用量的估算	102
四、焊条的现场质量管理	107
第三节 手工电弧焊工艺要领	109
一、焊接工艺参数的选择	109
二、基本操作技能	111
三、各种焊缝位置的焊接	113
四、几种焊缝的焊接	115
五、手工单面焊双面成形	116
六、圆形容器的焊接	116
第四节 手弧焊电源	119
一、对手弧焊电源的要求	119
二、手弧焊电源的结构、原理及特点	122
三、手弧焊电源的选用	130
复习题	130
参考文献	131
第四章 埋弧焊	132
第一节 埋弧焊的特点和应用	132
一、埋弧焊过程	132
二、埋弧焊的特点	133
三、埋弧焊的应用	134
第二节 埋弧焊用焊丝和焊剂	135
一、焊丝	135
二、焊剂	135
三、焊丝与焊剂的选配	137

第三节 埋弧焊机	139
一、埋弧焊机的结构和分类	139
二、焊接过程中电弧的自动调节	140
三、等速送丝式埋弧焊机	143
四、变速送丝式埋弧焊机	148
第四节 埋弧焊工艺	156
一、焊前准备	156
二、操作要领	157
三、焊接实例分析	165
第五节 高效率埋弧焊	167
一、多丝埋弧焊	167
二、金属粉末埋弧焊	169
三、带极埋弧堆焊	171
四、窄间隙埋弧焊	172
复习题	175
参考文献	175
第五章 钨极氩弧焊	176
第一节 钨极氩弧焊概述	176
第二节 焊枪、电极及氩气	178
一、焊枪	178
二、电极	180
三、氩气	182
第三节 钨极氩弧焊的种类	183
一、直流钨极氩弧焊	183
二、交流钨极氩弧焊	185
三、脉冲钨极氩弧焊	188
第四节 钨极氩弧焊工艺	191
一、接头形式及坡口	191
二、焊接工艺参数	191
三、操作要领	192
四、焊接实例分析	193
第五节 特种钨极氩弧焊	199
一、高频脉冲钨极氩弧焊	199
二、预热焊丝钨极氩弧焊	200
三、多电极钨极氩弧焊	201
四、氩弧点焊	201
第六节 钨极氩弧焊焊机	202
一、焊机的组成及引弧装置	202
二、NSA-500-1型手工交流钨极氩弧焊机	204
三、SW-300型交、直流钨极氩弧焊机	205
复习题	209

参考文献	210
第六章 熔化极氩弧焊	211
第一节 熔化极氩弧焊概述	211
一、熔化极氩弧焊的特点	211
二、熔化极氩弧焊的应用	211
第二节 熔化极氩弧焊工艺	212
一、铝的熔化极氩弧焊	212
二、不锈钢的熔化极氩弧焊	217
三、低碳钢和低合金结构钢的熔化极氩弧焊	219
第三节 熔化极脉冲氩弧焊	221
一、原理及熔滴过渡的特点	222
二、冶金及工艺特点	223
三、工艺参数的选择	224
四、熔化极脉冲氩弧焊的应用	225
第四节 窄间隙熔化极氩弧焊	227
一、低热输入窄间隙熔化极氩弧焊	228
二、高热输入窄间隙熔化极氩弧焊	228
三、焊接工艺参数的选择	229
四、应用及特点	230
第五节 混合气体的应用	231
一、Ar + He	231
二、Ar + N ₂	232
三、Ar + O ₂	232
四、Ar + CO ₂	234
五、Ar + CO ₂ + O ₂	234
第六节 熔化极氩弧焊设备	324
一、熔化极氩弧焊电源	235
二、程序自动控制	235
三、送丝系统	236
四、焊枪	238
复习题	239
参考文献	239
第七章 二氧化碳(CO₂)气体保护焊	240
第一节 CO ₂ 焊的特点、应用及分类	240
一、特点	240
二、应用	241
三、分类	241
第二节 CO ₂ 焊的冶金特点	242
一、元素的氧化	242
二、脱氧措施	243
三、气孔问题及对策	245

第三节 CO ₂ 气体及焊丝	245	一、工艺特点及应用	278
一、CO ₂ 气体	245	二、焊枪	278
二、焊丝	247	三、焊接方法及工艺参数的选择	282
第四节 CO ₂ 气体保护焊工艺	259	四、双弧现象及防止措施	288
一、接头形式及坡口	259	五、焊接实例分析	290
二、焊前准备	259	第三节 粉末等离子弧堆焊和喷涂	292
三、熔滴过渡形式及工艺参数的选择	251	一、粉末等离子弧堆焊	292
四、减少金属飞溅的措施	253	二、粉末等离子弧喷涂	293
五、焊接实例分析	256	复习题	294
第五节 CO ₂ 气体保护焊设备	261	参考文献	295
一、供气系统	261	第九章 金属材料的热切割	296
二、电源系统	262	第一节 气割	296
三、CO ₂ 焊机	263	一、气割原理	296
四、CO ₂ 焊机控制方式的发展	269	二、气割用气体	297
第六节 CO ₂ 焊的其它形式	271	三、气割辅具	298
一、药芯焊丝CO ₂ 焊	271	四、手工气割工艺	303
二、双层气流保护脉冲焊	272	五、自动和半自动气割机	307
复习题	273	第二节 等离子弧切割	311
参考文献	273	一、切割原理及特点	311
第八章 等离子弧焊接	274	二、切割方法分类	312
第一节 等离子弧的形成及特性	274	三、氮气等离子弧切割	313
一、弧的形成	274	四、空气等离子弧切割	317
二、弧的能源特性	274	复习题	324
三、弧的基本形式	276	参考文献	324
四、弧的静特性及对电源外特性的要求	277	附录A 焊缝坡口的形式与尺寸	325
第二节 等离子弧焊接工艺	278	附录B 焊接材料	338
		附录C 常用电焊机型号技术数据	350

绪 论

电弧焊是指利用电弧作为热源的焊接方法，简称弧焊。它是熔焊中最重要的、应用最广泛的焊接方法。

一、熔焊过程实质

焊接是通过加热或加压，或两者并用，并且用或不用填充材料，使工件达到原子结合的一种加工方法。

熔焊是焊接过程中，将焊件接头加热至熔化状态，不加压力完成焊接的方法。

金属等固体材料之所以能保持固定形状的整体，是因为其内部原子之间的距离（晶格）十分小，原子间形成了牢固的结合力。若要把两个分离的金属构件靠原子结合力的作用连接成一个整体，则需要克服两个困难：

①待连接表面不平。即使进行最精密的机械加工，其表面不平度也只能达到 μm （微米）级，仍远远大于原子间结合所要求的数量级 $10^{-4}\mu\text{m}$ 。

②表面存在的氧化膜和其它污染物阻碍金属表面原子之间接近到晶格距离并形成结合力。焊接过程就是克服这两个困难的过程。而熔焊（包括电弧焊）过程，从物理实质上来看就是在不加压的情况下，将工件待连接处的金属加热熔化，靠液态金属的流动使原子互相靠近、熔合，冷却结晶而连接成牢固的整体。

二、电弧焊方法发展概况

电弧作为一种气体导电的物理现象，早在19世纪初已被发现，并预料到可以利用它熔化金属，但当时的工业水平还不能提供足够功率的电源来产生大能量的电弧，因此，利用电弧作为金属熔焊的热源，还只不过是理想。直到19世纪末期电力生产得到发展以后人们才有条件研究电弧的实际应用。据报道1885年俄国人发明了碳极电弧，起初主要用作强光源，可以把它看作是电弧实际应用的创始。

19世纪末期至20世纪初期，随着化学工业和电力工业的发展，氧气和电石生产得到一定的发展，氧-乙炔火焰焊接的应用在工业生产中开创了新的局面。在这期间，虽然研究出铝热剂铸焊、电阻焊、碳极电弧焊和金属极电弧焊等方法，使焊接热源和焊接技术取得了重大的突破，但由于当时的电弧焊设备比较简陋，电力工业还不很发达，因此电弧焊在金属结构生产中的应用还很少，而氧-乙炔气体火焰焊接却由于设备简单、价格便宜而迅速发展，广泛应用于工业生产中。

20世纪20年代研制出构造简单、使用方便、成本低廉的交流电弧焊机；30年代起，又相继推出了薄涂料焊条和厚涂料焊条，尤其是厚涂料优质焊条的出现，使手工电弧焊技术进入成熟阶段，它熔深大、效率高、质量好、操作方便等突出优点是气焊方法无法比拟的，于是手工电弧焊在工业生产中被广泛应用，特别在车辆、船舶、锅炉、起重设备和桥梁等金属结构的制造中很快成为主要的焊接方法。钨极氩弧焊和熔化极氩弧焊也是在30年代先后研究成功的，成为焊接有色金属和不锈钢等材料的有效方法。这一时期，工业产品和生产技术的发展速度较快，迫切要求焊接过程向机械化、自动化方面发展，而且当时的机械制造、电力拖动

与自动控制技术也已为实现这一目标提供了技术和物质基础。于是便在30年代中期研究成功了变速送丝式埋弧焊机,以及与之相匹配的颗粒状焊剂和光焊丝,从而实现了焊接过程自动化,显著地提高了焊接效率和焊接质量。等速送丝式埋弧焊机的出现大大简化了埋弧焊设备,为工业生产中大量应用埋弧焊创造了更为有利的条件。

20世纪40年代起,焊接科学技术的发展又迈进到一个新的历史阶段,特别是进入50年代之后,新的焊接方法以前所未有的发展速度相继研究成功,如用电弧作热源的 CO_2 焊(1953年)和等离子弧焊(1957年);属于其它热源的电渣焊(1951年)、超声波焊(1956年)、电子束焊(1956年)、摩擦焊(1957年)、爆炸焊(1963年)、脉冲激光焊(1965年)和连续激光焊(1970年)等〔2〕。到目前为止,基本的焊接方法已多达20余种。此外还有多种派生出来的焊接方法,例如活性气体保护电弧焊、各种形式的脉冲电弧焊、窄间隙焊、全位置焊等。

上述各种焊接方法针对不同的材料、不同的结构加以选用,在工业生产中它们发挥着各自的作用。这些焊接方法与金属切削加工、热切割加工、压力加工、铸造、热处理等其它加工方法一起构成的金属加工技术是现代一切机械类工业,其中包括车辆、船舶、航空、航天、原子能、采矿、化工机械、桥梁、电子以及轻工等几乎所有工业部门的基本加工手段,而其中各种电弧焊方法在焊接生产中所占比例最大,应用最为广泛。据统计,一些工业发达的国家,电弧焊在焊接生产总量中所占比例大都在60%以上。

三、基本焊接方法及电弧焊方法的分类

按照焊缝金属结合的性质,基本的焊接方法通常分为三大类,即熔化焊接、固相焊接及钎焊。而每一大类又可按焊接热源及其它明显特点分为若干种,下面按类别列出的基本焊接方法近30种〔1〕。

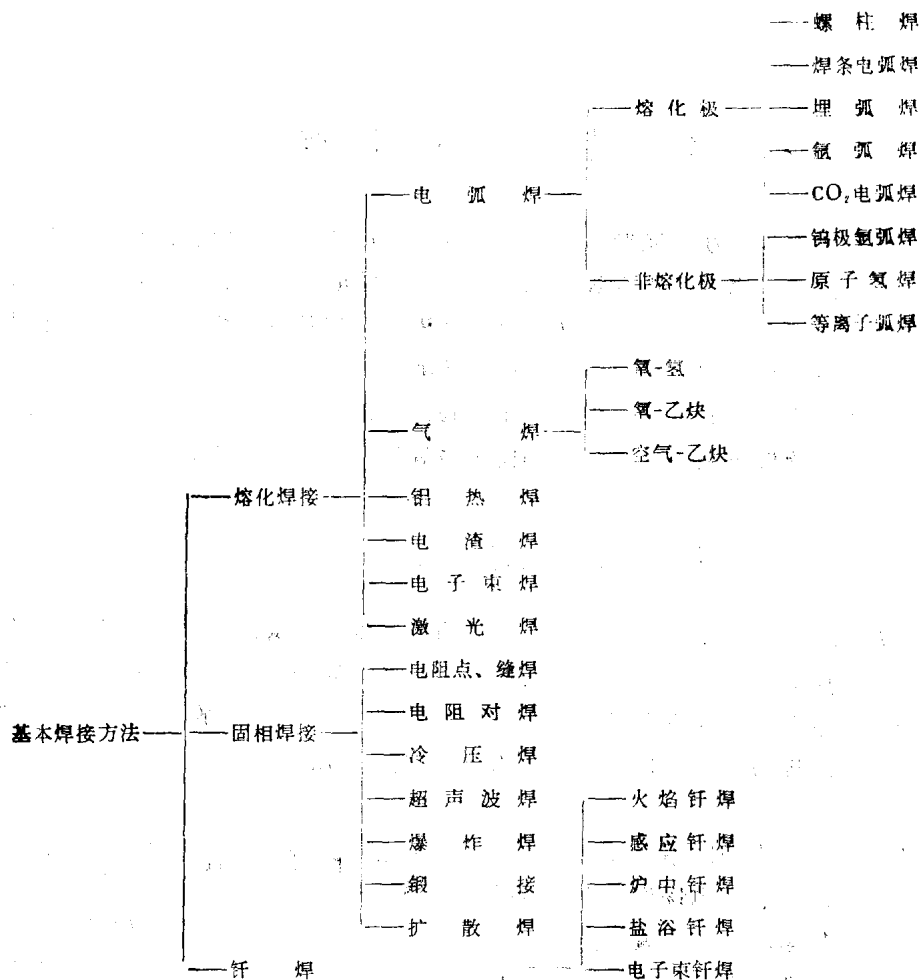
按照采用的电极,电弧焊分为熔化极和非熔化极二类,其中熔化极电弧焊是利用金属焊丝(或焊条)作电极同时熔化填充焊缝的电弧焊方法,它包括手工电弧焊、埋弧焊、熔化极氩弧焊、 CO_2 电弧焊等方法;非熔化极电弧焊是利用不熔化电极(如钨棒、碳棒)进行焊接的电弧焊方法,它包括钨极氩弧焊、等离子弧焊等方法。

四、课程内容及要求

学习本课程的原则是:按照学习的规律,在学习、掌握电弧焊基本理论的基础上,进一步学习各种基本的电弧焊方法,掌握它们各自的工作原理和焊接特点,要理论与实践相结合,通过实验与专题研究来深化所学的知识。期望通过本课程和相关课程的学习,能够较熟练地从事电弧焊技术工作。

本教材共分九章,第一、二两章是电弧焊的基本理论和基本规律;第三章至第八章是基本的电弧焊方法;第九章是金属材料最常用的热切割方法。

学习第一章焊接电弧,要求在了解电弧物理过程的基础上,掌握电弧各区域的导电机理、能量变换规律以及它们对焊接过程的影响。第二章熔滴过渡及焊缝的形成,是对焊缝形成全过程的论述和分析,电弧能量对于金属熔化及液态金属运动状态的影响贯穿始终。熟悉并掌握焊丝熔化、熔滴过渡、母材熔化和熔池形成等一系列过程中的条件、状态、规律等知识,将为深入研究各种电弧焊方法打下良好的基础。手工电弧焊是电弧焊的基本方法,应用广泛,在工业生产中占有相当的地位,是不可缺少的焊接方法;埋弧焊、 CO_2 焊、钨极氩弧焊、熔化极氩弧焊等也都是常用的基本的电弧焊方法,等离子弧焊接也越来越多地被



基本焊接方法及分类

采用。因此，学习并掌握这些焊接方法的工作原理、焊接特点、工艺要领以及焊接工艺参数的合理选择等，对于焊接技术工作者来讲是十分必要的。

鉴于板材切割质量对焊接有直接影响，本书最后一章介绍当前最常用的两种热切割方法，即氧-乙炔火焰切割法和等离子弧切割法。合理的热切割工艺有助于获得良好的焊接效果。

本书在焊接方法各章中几乎都列举了一些焊接实例，作为理论联系工程实际的初步引导，如果有条件，尚可进行焊接工程实例分析或现场考查。

电弧焊工艺试验，可根据教学条件自行安排。

第一章 焊接电弧

电弧既是各种电弧焊方法的能源,又是碳弧气刨、电弧喷涂、电弧冶炼,以及等离子弧切割、等离子弧喷涂、等离子弧堆焊等金属加工方法的能源。为了科学地应用和发展电弧焊技术,首先应当了解焊接电弧中能量转换的物理过程实质和基本规律。本章作为电弧焊的基础理论,将结合电弧形成过程,讨论电弧带电粒子的产生和气体导电的机理、电弧的构造和性能、电弧热和电弧力两种能量的产生以及能量转换的规律等。目的在于了解电弧过程实质,建立焊接电弧的物理概念,并以此作为技术指导思想,把握电弧焊进程。

第一节 电弧的物理基础

焊接电弧发出强烈的光和热,但却不是一般的物质燃烧现象。实质上,焊接电弧是在焊接电源供给一定电压的两个电极之间或者电极与工件之间的一种气体放电现象,亦即电荷通过两电极间的气体空间的一种导电现象(图1-1)。借助于这种气体放电,电能转变为热能、机械能和光能。焊接时主要是利用电弧的热能和机械能。

一、气体放电的基本概念

各种物质不论其形态为固态、液态或气态,是否呈导电性皆取决于它在电场作用下是否拥有可以定向移动的带电粒子。金属体内部拥有大量的自由电子,只要在金属导体的两端加上电压,自由电子便在电场力的作用下定向移动而形成电流,这种导电现象叫做电子导电,显然,其带电粒子是自由电子。金属导电时,金属本身不发生化学变化,电源可以是直流或交流。液态金属的导电机构与固态金属相同,都是电子导电。通常所说的液体导电,是指电

解质的水溶液或电解质本身熔融成液体时的导电,在此两种液态时电解质都要发生电离,其分子电离成正离子和负离子。在没有电场存在时,这些离子只做无规则的热运动,从宏观上看没有电荷(离子)的定向移动,不显示出电流;但当在电解质的液体里插入与直流电源相接的两个电极时,于是液体中出现电场,电解质的正负离子除了做热运动外,还要在电场力的作用下做定向移动,正离子向阴极移动,负离子向阳极移动,形成电流,这种导电现象叫做离子导电。显然,这跟金属中的电子导电是不同的。另外一个重要的不同点,是在电解质导电过程中,同时发生电解现象,即正负离子分别在阴极板上和阳极板上发生还原及氧化,这表明,电解质液体的导电过程要发生化学变化。

在通常情况下气体是不导电的(或导电性很微弱),这是因为常态下的气体几乎完全由中性的分子或原子组成,不拥有带电的粒子(或拥有的带电粒子很少),因此它是不导电的。

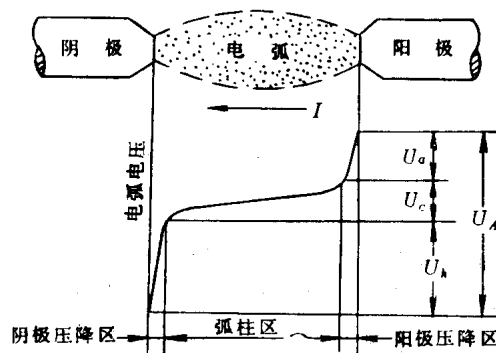


图1-1 电弧及各区域的电压分布

若要气体导电，则必须先有一个产生带电粒子的过程，然后才能呈现导电性。

图1-2[2]是气体放电的全伏安特性曲线及放电类型。

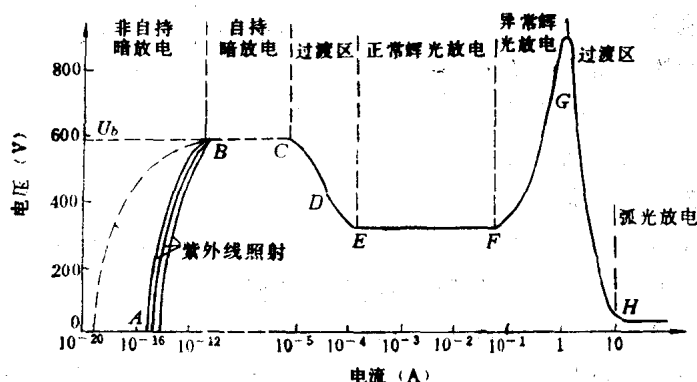


图1-2 气体放电的全伏安特性曲线及放电类型

气体放电时，在不同的条件下和不同的电流区间，其导电机制和放电形态有显著不同。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自行产生，而需要外加措施（加热、光激励等）来造成带电粒子，促使气体放电，一旦外加的激励源取消，则气体不再发生电离，放电现象也就停止，这种气体导电现象叫做被激放电，也叫做非自持放电。当电流大于一定数值时，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（通常称为“点燃”），在放电过程中阴极不断地发射出足够的电子，气体电离度较大，放电过程本身能够产生维持导电所需要的带电粒子。因此，一旦放电开始，取消外加诱发措施，放电过程仍能继续下去，这种放电过程叫做自激放电，也叫做自持放电。按照电流数值和放电特性的不同，自激放电又可分为暗放电、辉光放电和电弧放电三种基本形式，其中电弧放电的电压最低、电流最大、温度最高、发光最强。因此，电弧在工业以及其它一些领域中作为热源或光源被广泛应用。

二、电弧中带电粒子的产生

电弧中带电粒子主要是由气体介质中的中性粒子的电离及从阴极发射电子这两个物理过程所产生，同时伴随着发生其它一些物理变化，如：电离、激发、扩散、复合、负离子化等。

1. 激发和电离

在一定条件下气体的中性粒子（原子或分子）分离为正离子和电子的现象叫做电离。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，对外呈中性。就原子而论，原子核带有电量为 Ze 的正电荷，核外的每个电子带有电量为 e 的负电荷。 Z 个电子围绕着核转动。 Z 是核内的质子数，也是核外的电子数。原子的结构模型图例如图1-3所示。电子一方面受核的正电荷的吸引，有靠近核的向心趋向，另一方面由于转动而有离开核的离心趋向，这两者对立的统一，就使电子按一定规律分布在圆定的椭圆轨道上绕核运动。电子绕核转动就有一定的动能，电子被核吸引就有一定的位能，这两者之和就是原子的内能。光谱分析表明，原子的内能不能连续地变化，它只是一系列不连续的量，因此原子只能处于一系列不连续的能量状态中。这种不连续的能量状态用能级图

$E_2, E_3, \dots, E_n$ 表示, 其中 E_1 的能量值最小, 按顺序依次增大。各种原子具有各不相同的能级数和能量值。

原子的不同能量状态对应于核外电子的不同运行轨道。由于原子的能量状态是不连续的, 因此电子的可能轨道也是不连续的, 电子只可能在与原子能级相对应的轨道上运行, 而不能在任意半径的轨道上运行。电子运行轨道半径越大 (即离核越远), 则能级越高, 而轨道半径越小则能级越低。

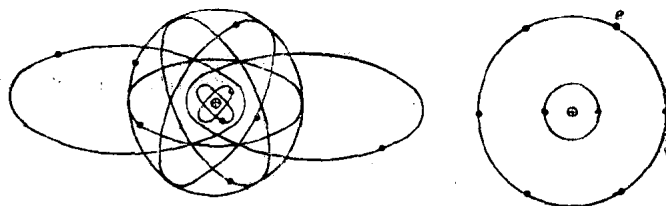


图1-3 原子结构模型示例

(氧原子模型图)

在正常状态下, 原子处于最低能级, 这时电子在离核最近的轨道上运动, 这种状态叫做基态。当原子吸收一定的外界能量 (可以是热能、光能、电能、机械能、化学能等各种形式的能量) 时, 原子便可从基态跃迁到较高的能级, 这时电子也跃迁到离核较远的轨道上运行, 这一状况叫做激发。原子从基态向激发态跃迁时, 其内能也在增大。

处于激发态的原子是不稳定的, 只能停留很短的时间, 根据激发能级的不同可为 $10^{-2} \sim 10^{-8}$ s, 通常约为 10^{-8} s。在这短暂的时间内, 原子将自动地从能级较高的激发态向能级较低的激发态或基态跃迁, 以达到新的稳定。这种在没有外界作用, 而仅仅由于原子内部能量的自发调整所发生的由高能级向低能级的跃迁, 称为自发跃迁。自发跃迁时向外界释放能量, 其方式有两种: 一种以热能形式放出, 传递给其它原子或分子; 另一种以光的形式辐射出来, 成为原子的发光现象。辐射出的光子频率 γ 取决于两个相关能级的能量差, 例如, 原子从能级 E_2 向能级 E_1 跃迁所辐射出来的光子的频率为: $\gamma = (E_2 - E_1)/h$, h ——普朗克常数 ($6.62 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$)。

自发跃迁完全是随机发生的, 各个原子都是各自独立地进行自发辐射, 因而辐射出来的光子的频率、波长、方向等也各不相同。可以认为, 弧光的多色性大概与此有一定的关系。

原子无论受激发时吸收能量或自发跃迁时释放能量, 其能量值都不是任意的, 而是等于原子发生跃迁的两个能级间的能量差。

使原子产生激发所需要的最低外界能量称为最低激发能, 简称激发能, 常用 W 作为代表符号, 以电子伏特 (eV) 作为能量单位。一个电子伏特就是一个电子通过电位差为 1 伏特的电场时, 电子所获得的能量, 亦即电场所做的功, 其数值等于 $1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$, 即: $1 \text{ eV} = 1 \text{ 基本电荷} \times 1 \text{ 伏} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C} \times 1 \text{ V} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$ 。这个数值的数量级较小, 为了便于表达和计算, 往往将激发能 W 的大小用数值相等的激发电压 U (单位为 V) 来代表, 二者仅数值相等而物理含义不同 (U 的物理含义可参照下文中的电离电压进行推理)。

不仅原子可以受激发进行能级跃迁, 其它微观粒子 (分子等) 也具有这类性质。常用气体粒子的最低激发电压值如表 1-1 所示。

处于激发态的原子 (或分子), 其电子虽然跃迁到高能级的较外层的轨道运转而有离去的趋势, 但它仍不能摆脱原子核的约束而分离出去。尽管如此, 处于激发态的气体粒子还是要比处于基态的气体粒子的电离概率大。

当中性气体粒子从外界获得的能量达到某一数值而使其外层轨道上的电子分离出去, 即中性粒子 (原子或分子) 分离成为电子和正离子, 这种现象称为电离。电离所需要的最低外

加能量称为电离能，通常以符号 W_i 表示，单位是电子伏特(eV)。

中性气体粒子失去第一个电子时所需的电离能称为第一电离能；要使中性气体粒子失去第二个电子则需要更大的能量，称为第二电离能，生成的离子是二价正离子；以此类推，还会有第三电离能和三价正离子等。普通焊接电弧的焊接电流较小时只存在一次电离，而只有在大电流或压缩电弧中，且弧温高达几万度时才可能出现二次、三次电离，并且一次电离仍居主要地位。通常所称的电离能，若无特别注明，即是第一电离能。电离能也称电离功。

为了表达方便，原子的电离式可写成



以双原子气体为例，分子的电离式可写成



式中 A ——气体原子；

A_2 ——双原子气体分子；

A^+ 、 A_2^+ ——正离子；

e ——电子；

W_i ——电离能(eV)， $1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\text{J}$ 。

W_i 的数值大小还可理解为，电子从原子中分离出去所需的能量相当于电子通过电位差为 U_i 的电场时，从电场得到的能量。显然该能量是 U_i 倍的电子伏特，数学表达式应为

$$W_i = eU_i \quad (1-3)$$

式中 U_i ——电离电压(V)。。

式(1-3)表明了 W_i 与 U_i 在数值上相等，所以往往用 U_i 直接代表 W_i 值的大小来表明不同原子(或分子)电离的难易程度。

从获得数据方式看， U_i 是测量值，而 W_i 是计算值。显然直接用 U_i 表示更为方便。

常用气体粒子的电离电压值如表1-2(1)所示。

表1-1 常用气体粒子的最低激发电压

元 素	激发电压 (V)	元 素	激发电压 (V)	元 素	激发电压 (V)
H	10.2	K	1.6	CO	6.2
He	19.8	Fe	1.43	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		

气体粒子电离电压的大小标志着在电弧气氛中产生带电粒子的难易程度。在相同的外加能量条件下，电离电压低的气体介质提供带电粒子较容易，是引弧和稳弧的有利条件之一。当电弧空间同时存在几种不同的气态物质时，电离电压低的气体粒子将先被电离，如果这种低电离电压的气体供应充分，则电弧空间的带电粒子将主要依靠这种气体的电离来提供，所需要的外加能量也主要取决于这种气体的电离电压。

电弧介质往往不是单一的元素，而是由多种气态物质组成的，即使是气体纯度较高的氩

表1-2 常用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, 97)	O ₂	12.2
O	13.5(35, 55, 77)	Cl ₂	13
F	17.4(35, 63, 87, 114)	CO	14.1
Na	5.1(47, 50, 72)	NO	9.5
Cl	13(22.5, 40, 47, 63)	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, 58)	Cu	7.68
Fe	7.9(16, 30)		

注：括号内的数字依次为二次，三次，……电离电压。

弧焊，其电弧气氛中也含有一定量的由于蒸发而产生的金属原子，当焊接电流较大时，电弧空间将充满金属蒸气。某些电弧焊方法，其电弧空间的金属蒸气可能含有多种成分。由表1-2可知，金属元素的电离电压普遍低于气体元素的电离电压，其中尤以Cs、K、Na、Ca、Al、Ti等金属元素的这一特点最为明显。因此，在焊条药皮或焊剂中以化合物的形式加入某些这类元素，有利于电弧中导电粒子的产生，并起到稳弧作用。显然，焊接过程中产生的金属蒸气也起到类似的作用。

由表1-2还可以看出，气体分子和大多数化合物的电离电压比它们各自原子的电离电压高。这是因为电弧中的气体分子在电离时，大多需要消耗一定的外界能量而首先分解成原子，然后电离。另一种情况是气体分子的直接电离，当电子从分子中被分离出来时，也要克服两种约束，即原子对电子的约束和分子对电子的约束，所以气体分子或化合物需要的电离电压比原子态的电离电压高一些。但是也有少数情况与此相反，有些气体原子结合成化合物分子时会使电子所受的约束减弱，故分子的电离电压反而比原子的电离电压低，例如NO、NO₂等就属于这类情况。

2. 气体粒子传递能量的方式

气体系统内部交换能量或者与外部交换能量，都需要气体粒子作为实体去携带和传递能量。在电弧条件下，如果不考虑气体的化学反应，则气体粒子（分子、原子、电子、离子等）传递能量的方式主要是碰撞和光辐射。

(1) 碰撞传递 气体粒子碰撞时可能出现两种情况：弹性碰撞和非弹性碰撞。弹性碰撞时粒子之间只能发生动能的传递和再分配，碰撞后两个粒子的动能之和仍保持不变。碰撞的结果只使粒子的运动速度或方向发生变化，而粒子的内能和结构不变，不产生电离或激发。弹性碰撞只是当气体粒子拥有的动能较小时产生。

当气体粒子拥有较大动能时，则会产生非弹性碰撞。碰撞时将部分或全部动能转变成粒