

普通高等教育机电类规划教材

电 弧 焊

北京航空航天大学 胡特生 主编

机械工业出版社



普通高等教育机电类规划教材

电 弧 焊

主 编 胡特生
副主编 何德孚
参 编 赵 菁 张志正 经士农
主 审 艾雍宜



机械工业出版社

本书分三个部分：第一部分为电弧焊的基础理论，讨论了焊接电弧的特性、焊丝熔滴过渡、焊缝成形以及电弧焊方法的自动控制基础；第二部分叙述了自动埋弧焊、CO₂气体保护电弧焊、熔化极氩弧焊、钨极氩弧焊、等离子弧焊接以及电渣焊等方法的基本原理、工艺特点和应用等方面的基本知识，并给出这些工艺方法和设备的整体概念；第三部分介绍了电弧焊的自动控制技术，包括电弧焊过程及参数的程序控制、跟踪控制及适应控制、弧焊机器人等。

本书为高等工业学校焊接专业统编教材，也可供金属材料工程、热加工以及机械、造船等工程专业的师生和工程技术人员参考。

电 弧 焊

北京航空航天大学 胡特生 主编

*

责任编辑：董连仁 版式设计：王 颖

封面设计：方 芬 责任校对：姚培新

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20.25·字数496千字

1993年10月第1版第1次印刷

印数 0 001—3 000 定价：21.00元

*

ISBN 7-111-05004-5/TG·1043 (课)

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

ISBN 7-111-05004-5



9 787111 050049 >

前 言

本书为高等院校焊接专业主干课程的统编教材，是根据高等工业学校焊接专业教学指导委员会1991年10月济南会议上制定的《电弧焊》课程教学大纲编写的。

《电弧焊》是一门实践性相当强的课程。为了便于深入阐述电弧焊方法及其发展中一些共同性的基本理论和实践问题，本书在前四章中首先讨论了电弧焊热源——焊接电弧的物理本质、热源和力源特征，焊丝熔化和熔滴过渡，母材熔化和焊缝成形，电弧焊接过程自动控制基础等基本内容。而后分别阐述了当前机械制造工业中广泛应用的电弧焊——埋弧焊、CO₂气体保护焊、熔化极氩弧焊、钨极氩弧焊、等离子弧焊及切割等方法的 basic 原理，工艺特点和有关设备方面的基本知识和内容。最后介绍了电弧焊接过程自动控制技术的应用和发展情况。电渣焊也是当前工业生产中常用的一种熔焊方法，虽然它不是以电弧为热源，但其焊接过程与规范参数等同电弧焊有许多相似之处，故仍编入本教材中。

为了加强和提高学生阅读和分析电气线路的能力，本教材选择了当前工业生产中仍在广泛应用且适合于教学要求的部分焊机线路，编入附录中，供学生自学及参考用。

本书参编人员：北京航空航天大学赵菁（第三、七章）；上海工程技术大学张志正（第九章）；南京河海大学经士农（第十一章）；上海交通大学何德孚（第四、五、八章）；北京航空航天大学胡特生（绪论、第一、二、六、十章）。

本教材由北京航空航天大学胡特生任主编、上海交通大学何德孚任副主编，重庆大学艾雍宜教授主审。清华大学陈武柱教授、西北工业大学王震激教授等对有关篇章进行了审阅。

在编写过程中得到了许多高等院校焊接教研室的热情支持，并提出了宝贵的建议；上海电焊机厂徐松英、蔡敏琦、李开斌，上海华东电焊机厂沈礼文、黄从达等高级工程师为本书提供了最新资料并审阅了有关章节；上海交通大学唐新华讲师协助完成了第八章中CAA程序及分析绪论，在此一并表示衷心地感谢。

由于编者水平有限，书中一定会有错误和不足之处，敬请读者提出批评指教。

编者 1994年10月

目 录

前言	
绪论	1
一、焊接方法的发展及其在现代工业中的应用	1
二、焊接方法的本质及其分类	2
三、课程内容和教学方法	3
参考文献	5
第一章 焊接电弧	6
第一节 电弧的导电机理	6
一、电弧放电的特点	6
二、电弧中带电粒子的产生	7
三、电弧各区域的导电机构	19
四、电弧的最小能量消耗特性——最小电压原理	25
第二节 焊接电弧的负载特性——电弧静特性和动特性	26
一、焊接电弧的静特性	26
二、焊接电弧的动特性	27
第三节 焊接电弧的产热情况及温度分布	29
一、焊接电弧的产热机构	29
二、焊接电弧的热效率及能量密度	31
三、电弧的温度分布	32
第四节 电弧中的力及其影响因素	33
一、焊接电弧中的作用力	34
二、影响电弧中作用力的因素	37
第五节 交流电弧的特点	39
一、交流电弧的燃烧过程	39
二、交流电弧加热及电弧力作用的特点	40
第六节 磁场对电弧的作用	41
一、电弧自身磁场的作用	41
二、外加磁场对电弧的作用	44
复习思考题	46
参考文献	46
第二章 焊丝的熔化及熔滴过渡	47
第一节 焊丝的加热与熔化	47
一、焊丝的加热与熔化特性	47
二、焊丝的熔化速度、熔化系数及其影响因素	48
第二节 熔滴过渡和飞溅	51
一、熔滴上的作用力	51
二、熔滴过渡的主要形式及特点	54
三、焊丝(条)的熔敷系数和飞溅	63
四、熔滴过渡的控制	66
复习思考题	70
参考文献	71
第三章 母材熔化和焊缝成形	72
第一节 焊缝和熔池的形状及尺寸	72
一、焊缝形状尺寸及其影响	72
二、熔池的形状和焊缝的形成	73
第二节 电弧与熔池形状的关系	73
一、电弧热输入对熔池形状尺寸的影响	73
二、力对熔池形状尺寸的影响	77
第三节 焊接工艺参数和工艺因素对焊缝成形的影响	78
一、电流、电压、焊速的影响	79
二、电流种类、极性及电极直径的影响	80
三、保护气体及熔滴过渡形式的影响	81
四、其它工艺因素的影响	81
第四节 焊缝成形的控制	83
一、平面内直缝的焊接	83
二、环缝的焊接	84
三、引弧、收弧与成形控制	84
复习思考题	88
参考文献	88
第四章 电弧焊自动控制基础	89
第一节 熔化极自动电弧焊的自动调节系统	85
一、自动调节的必要性及基本要求	89
二、熔化极等速送丝电弧自身调节	

系统.....	91	二、脱氧措施及焊缝金属的合金化.....	154
三、电弧电压反馈变速送丝调节系统.....	95	三、气孔问题.....	155
四、焊接电流反馈变速送丝调节系统.....	99	第三节 CO ₂ 气体保护电弧焊接材料.....	157
第二节 恒速调节系统.....	100	一、CO ₂ 气体.....	157
一、自动电弧焊机的驱动调速系统及要求.....	100	二、焊丝.....	159
二、晶闸管整流驱动电路.....	100	第四节 CO ₂ 气体保护电弧焊设备.....	161
三、晶体管驱动电路.....	105	一、对电源特性的要求.....	161
第三节 电弧焊的程序自动控制.....	107	二、供气系统.....	162
一、程序自动控制的对象和要求.....	108	三、气体保护效果及焊枪结构.....	162
二、程序自动控制类型和实现方法.....	109	四、熔化极气体保护电弧焊的送丝系统.....	166
三、电弧焊程序控制电路的基本环节.....	119	五、NEW-K型CO ₂ 气体保护电弧焊自动焊机.....	171
复习思考题.....	120	第五节 CO ₂ 气体保护电弧焊的工艺参数与飞溅控制.....	178
参考文献.....	121	一、短路过渡形式的焊接特点.....	178
第五章 自动埋弧焊.....	121	二、短路过渡焊接工艺参数及其对过程稳定性的影响.....	178
第一节 自动埋弧焊的特点和应用.....	121	三、细颗粒过渡的焊接时工艺参数.....	181
一、自动埋弧焊的特点.....	123	四、减少金属飞溅的措施.....	182
二、自动埋弧焊的应用.....	123	第六节 特种CO ₂ 气体保护电弧焊.....	184
三、自动埋弧焊焊接材料——焊丝、焊剂及选配.....	123	一、药芯焊丝CO ₂ 焊.....	184
四、自动埋弧焊的冶金特点.....	128	二、CO ₂ 电弧点焊.....	186
第二节 自动埋弧焊机.....	132	三、CO ₂ 电弧螺柱焊.....	187
一、分类及结构特征.....	132	复习思考题.....	189
二、MZ-1000型自动埋弧焊机.....	136	参考文献.....	189
第三节 自动埋弧焊实施方法、工艺参数及发展.....	140	第七章 熔化极氩弧焊.....	190
一、单丝自动埋弧焊.....	140	第一节 熔化极氩弧焊的特点和应用.....	190
二、双丝及多丝自动埋弧焊.....	144	一、熔化极氩弧焊的特点.....	190
三、单面焊双面一次成形自动埋弧焊.....	147	二、熔化极氩弧焊的应用.....	190
四、窄间隙自动埋弧焊.....	149	第二节 射流过渡氩弧焊.....	191
复习思考题.....	150	一、焊缝起皱现象.....	192
参考文献.....	150	二、粗丝大电流MIG焊.....	192
第六章 CO ₂ 气体保护电弧焊.....	152	第三节 铝合金亚射流过渡氩弧焊.....	193
第一节 CO ₂ 气体保护电弧焊特点及应用.....	152	一、亚射流过渡的特点.....	193
第二节 CO ₂ 气体保护电弧焊的冶金特点.....	153	二、亚射流过渡电弧固有的自调节作用.....	193
一、合金元素的氧化.....	153	三、铝合金亚射流过渡的焊接特点.....	194
		四、亚射流过渡电弧焊接时的参数控制.....	194
		第四节 脉冲喷射过渡氩弧焊.....	195
		一、工艺特点.....	195

二、脉冲参数的选择.....	196	二、空气等离子弧切割.....	251
第五节 窄间隙焊接.....	197	三、其它等离子弧切割.....	254
一、细焊丝窄间隙焊接.....	197	四、提高切割质量的途径.....	256
二、粗焊丝窄间隙焊接.....	199	第四节 等离子弧堆焊和喷涂.....	257
第六节 混合气体的应用.....	200	一、等离子弧堆焊.....	257
一、Ar+He.....	200	二、等离子弧喷涂.....	258
二、Ar+O ₂	200	复习思考题.....	259
三、Ar+CO ₂	201	参考文献.....	260
四、Ar+CO ₂ +O ₂	201	第十章 电渣焊.....	261
五、Ar+N ₂	201	第一节 电渣焊的特点及应用.....	261
六、Ar+H ₂	201	一、电渣焊的方法原理及其基本过程.....	261
复习思考题.....	203	二、电渣焊热源和焊缝结晶特点.....	262
参考文献.....	203	三、电渣焊的焊接材料和冶金特点.....	264
第八章 钨极氩弧焊.....	204	四、电渣焊的应用范围.....	266
第一节 钨极氩弧焊方法的特点.....	204	第二节 丝极电渣焊.....	267
一、方法原理及应用.....	204	一、丝极电渣焊工艺过程.....	267
二、电极和焊枪.....	204	二、工艺参数及其对熔池尺寸的影响.....	269
三、电流种类和极性.....	207	三、环缝丝极电渣焊的工艺特点.....	273
第二节 钨极氩弧焊机.....	213	四、电渣焊电源和焊接接头.....	273
一、钨极氩弧焊机的结构组成.....	213	五、丝极电渣焊接头的常见缺陷	
二、WS系列钨极氩弧焊机.....	213	和改善质量的途径.....	274
第三节 钨极氩弧焊工艺及参数选择.....	221	第三节 其它电渣焊方法.....	275
一、焊前准备.....	221	一、板极电渣焊.....	275
二、钨极氩弧焊工艺参数.....	222	二、熔嘴电渣焊.....	277
第四节 其它钨极氩弧焊方法.....	224	三、管极电渣焊.....	278
一、脉冲钨极氩弧焊.....	224	四、带极电渣堆焊(浇熔深堆焊法).....	280
二、热丝钨极氩弧焊.....	230	复习思考题.....	282
三、多阴极串列钨极氩弧焊.....	231	参考文献.....	282
复习思考题.....	231	第十一章 电弧焊自动控制技术.....	283
参考文献.....	232	第一节 电弧焊过程参数的程序自动	
第九章 等离子弧焊接与切割.....	233	控制.....	283
第一节 等离子弧的特性及等离子弧		一、全位置焊管方法的程控参数区	
发生器.....	233	段划分及转换方式.....	283
一、等离子弧的形成.....	233	二、简易程序控制方式.....	284
二、等离子弧的特性.....	233	三、可编程控制器.....	286
三、等离子弧发生器.....	235	第二节 电弧焊的自动跟踪控制.....	289
四、双弧现象及防止方法.....	241	一、概述.....	289
第二节 等离子弧焊接.....	243	二、电弧跟踪偏差的检测传感方法.....	290
一、焊接方法及工艺参数的选择.....	243	三、执行机构和驱动电路.....	297
二、等离子弧焊接设备特点.....	248	第三节 电弧焊过程参数的适应控制.....	299
第三节 等离子弧切割.....	250	一、电弧过程的适应控制.....	299
一、基本原理和工艺参数的选择.....	250	二、垂直自动焊熔池液面高度自动	

VI

控制.....	300
三、焊缝熔深适应控制.....	300
第四节 弧焊机器人.....	302
一、概述.....	302
二、示教再现型弧焊机器人.....	303
三、智能型弧焊机器人.....	303
复习思考题.....	305

参考文献.....	305
附录.....	307
一、NSA-400-1型交流钨极氩弧 焊机.....	307
二、MZ-1-1000型自动埋弧焊机.....	311
三、MZ-1250型自动埋弧焊机.....	317

绪 论

一、焊接方法的发展及其在现代工业中的应用

焊接是指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(分子)间结合力而连接成一体的连接方法。被连接的两个物体(构件、零件)可以是各种同类或不同类的金属、非金属(石墨、陶瓷、玻璃、塑料等),也可以是一种金属与一种非金属。金属连接在现代工业中应用广泛,具有很重要的实际意义,因此狭义的讲,焊接通常就是指金属的焊接。本书主要讨论的也是金属的焊接方法。

早期的焊接,是把两块熟铁(钢)加热到红热状态以后用锻打的方法连接在一起的锻接,用火烙铁加热低熔点铅锡合金的软钎焊,已经有几百年甚至更长的应用历史。但是,目前工业生产中大量应用的焊接方法几乎都是19世纪末,20世纪初的现代科学技术,特别是电子工业技术的迅速发展所带来的成果。如图0-1中所示,到1970年为止,约有21种基本焊接方法问世。现代焊接方法的发展是以电弧焊和压焊为起点的。到目前为止,在发展了近50余种各类焊接方法中,电弧焊及其派生方法仍占大多数,可见以电弧为热源的各种焊接方法及工艺具有十分强大的活力。

电弧作为一种气体导电的物理现象是在19世纪初被发现的,但只是到19世纪末电力生产得到发展以后人们才有条件来研究它的实际应用。1885年俄国人别那尔道斯(Бернардос)发明碳极电弧可以看作是电弧作为工业热源应用的创始。而电弧焊真正应用于工业,则是在1892年发现金属极电弧后,特别是1930年前后出现了薄皮和厚皮焊条以后才逐渐开始的。电阻焊是1886年由美国人发明的,它的大规模工业应用也几乎跟电弧焊同时代。1930年以前,焊接在机器制造工业中的作用还是很微不足道的,当时造船、锅炉、飞机等制造工业基本上还是用铆接方法。这种铆接方法不仅生产效率极低,而且连接质量也不能满足船体、飞机等产品的发展要求。因此,从1930年以后,电弧焊和电阻焊就逐渐取代铆接,成为机器制造工业中的一种基本加工工艺。

大家知道,机械制造工业是国民经济的基础工业,它决定着—个国家的工业生产能力和

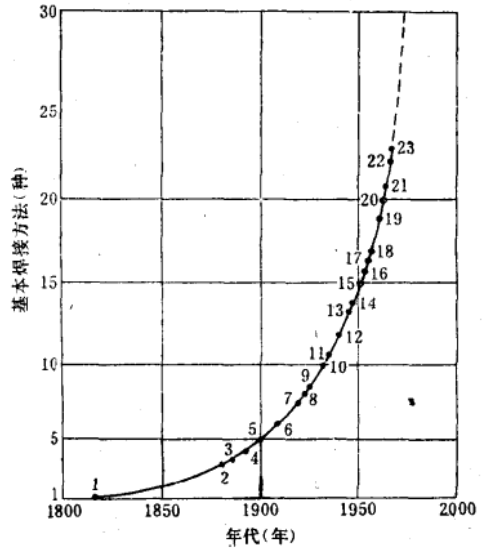


图0-1 焊接方法发展简史

- 1-电弧 2-碳极电弧(1885) 3-电阻焊(1886)
- 4-金属极电弧焊(1892) 5-氧乙炔焊(1901) 6-薄皮焊条焊接
- 7-GMA 8-高频焊接 9-GTA(1930)
- 10-厚皮焊条焊接 11-埋弧焊(1935)
- 12-铁粉焊条 13-冷压焊(1948) 14-低氢焊条
- 15-电渣焊(1951) 16-CO₂电弧焊(1953) 17-超声波焊(1956)
- 18-电子束焊(1956) 19-摩擦焊(1957)
- 20-等离子弧焊(1957) 21-爆炸焊(1963)
- 22-脉冲激光焊(1965) 23-连续激光焊(1970)

水平，而焊接技术则是机械制造业中的关键技术之一。例如对于各种压力容器、核反应堆器件、宇航运载工具等产品，离开了焊接技术简直就无法制造。据资料统计，工业发达国家每年钢铁总产量的40%左右是经过焊接技术加工才成为工业产品。因此，焊接技术同金属切削加工、压力加工、铸造、热处理等其它金属加工工艺方法一起，构成了现代工业部门的基础生产工艺。可以毫不夸大地说，没有现代焊接工艺技术的发展，就不会有现代工业和科学技术的今天。

当代的新技术浪潮引起了世界各国的重视。组成这次新技术浪潮的微电子技术、计算机、新材料、新能源、光导通讯、激光、生物工程、海洋开发、航天技术、机器人等，将使社会生产力出现新的飞跃，将使现有的生产方式、生活方式和社会结构发生重大变化。然而，上述十大领域的发展并不是孤立的，需要各方面技术的协同配合。如果没有能够满足在各种环境下具有各种性能的材料研制出来，就很难进行上述十大领域的开发；与此同时，没有相应的焊接技术把这些材料连接成所需要的结构，就很难想象会有上述各领域的顺利发展。所以在新技术浪潮中，焊接工作者也将肩负着重大的历史使命。

二、焊接方法的本质及其分类

焊接是两种相同或不同的材质，通过加热或加压或二者并用，来达到原子之间结合而形成永久性连接的工艺过程。由此可知，焊接与其它连接方式不同，不仅在宏观上建立了永久性的接头，而且在微观上也建立了组织之间的内在联系。因此，要把两个分离的金属构件连接在一起，从物理本质上来看，就是要使这两个构件的连接表面上的原子彼此接近到金属晶格距离(0.3~0.5nm)。但是，即使经过精加工的金属表面，实际也有凹凸不平之处，同时还常常带有氧化膜、水、油污等吸附层，这些都会阻碍金属表面紧密接触。因此焊接过程的实质就是通过适当的物理化学过程来克服这些困难，使两个分离表面的金属原子之间接近到晶格距离并形成结合力。在焊接过程中，通常是从两方面采取措施来实现的。

1. 对被焊金属施加压力 目的是破坏金属表面的氧化膜，使连接处发生局部塑性变形，增加有效接触面积，从而达到紧密接触。

2. 对被焊金属加热 使连接处达到塑性或熔化状态，使接触面的氧

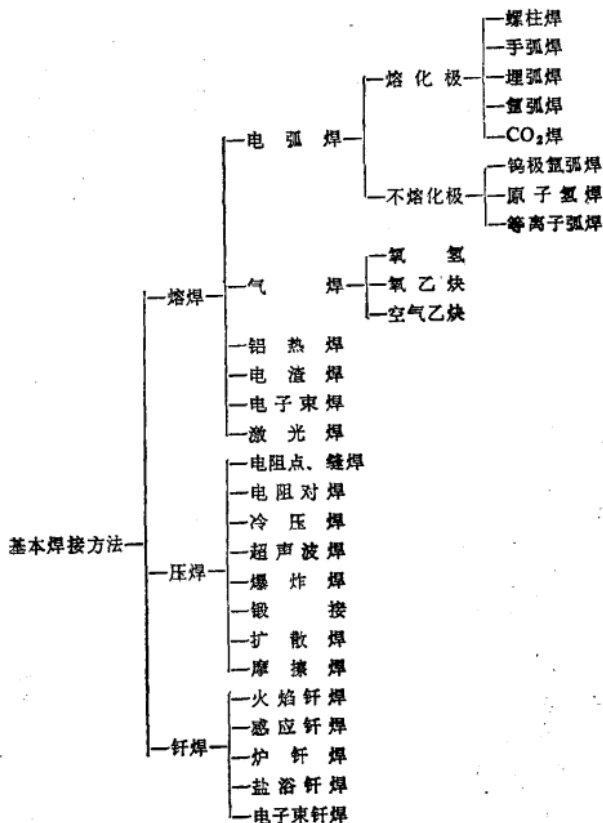


图0-2 基本焊接方法及分类(族系法)①

① 摘自《电弧焊及电渣焊》第2版，姜焕中主编，北京：机械工业出版社，1988。

化膜迅速破坏,降低金属变形的阻力,增加原子的振动能,促进扩散、再结晶、化学反应和结晶过程的发展。

由于实现上述措施的途径不同,便形成了各种类型的焊接方法,但实质上都是在连接处使母材和焊缝金属形成共同的晶粒。只有填充钎料熔化,而母材不熔化的连接方法叫作钎焊。钎焊时虽然也能形成不可拆卸的接头,但在连接处一般不形成共同的晶粒,只是在钎料与母材之间相互扩散,实现连接,可见钎焊和焊接在微观上有原则的区别。

目前国内外著作中对焊接的分类方法甚多,例如有目前各种著作中常见的族系法(图0-2)、一元坐标法、二元坐标法等。其中以二元坐标法(表0-1)优点居多,比较科学。读者从中不仅可以看出某种焊接方法的主要工艺特征,还可以了解该方法在焊接过程中和产生结合时的本质特征,例如,固相结合、液相结合等。

二元坐标法是以焊接热源为一类(元),在横坐标上分层列出其主次特征(类似于族系法);同时又以焊接时物理冶金过程特征为另一类(元),在纵坐标上分层列出其主次特征。

在纵坐标中,主要是以两材料发生结合时的物理状态为焊接过程的特征。前已谈到,焊接的本质是两个金属表面通过原子之间的结合而成为一个整体,因此原子之间是在什么条件下互相结合,不仅可反映焊接过程的最终本质,而且还可用来预测和判断焊接接头的微观组织和结合的质量,以及可能发生的缺陷和对母材产生的影响等。其次,在纵坐标中以焊接过程中材料是否熔化、是否加压力或其它特征作为第二特征(详见表0-1)。

在横坐标中,对于热源类型宜按其强度大小,依次分为高能束、电弧热、电阻热、化学反应热、机械能、间接热能等六大类。但考虑一般习惯,在表中仍按常用的次序列出。每一大类又按其各自特征划分为若干细类。如在电阻热大类中,先分为熔渣电阻热及固体电阻热两类;固体电阻热又分为工频和高频,接触式和感应式等分支。

三、课程内容和教学方法

本课程是焊接专业教学中的一门主干课。它的任务是使学生掌握电弧焊方法的基础理论、基本知识和实验技能,达到根据焊接结构件的特点能正确选用各类电弧焊方法和设备,并初步具备分析和解决焊接生产中问题的能力。

本课程主要讲述内容有

- (1) 焊接电弧、熔滴过渡、焊缝成形、焊接质量参数的自动调节等基本理论。
- (2) 工业生产中常用电弧焊方法的过程本质、焊接工艺参数、应用特点及范围。
- (3) 几种典型弧焊机的结构和电气原理。
- (4) 有关焊接过程自动化技术的基本概念和知识。

电渣焊也是工业生产中常用的一种熔焊方法,虽然它不是以电弧为热源,但却是在熔融状态下使工件连接在一起的,其焊接过程与工艺参数等与电弧焊有许多相似之处,故仍保留在本课程中。直到目前为止,手工操作的焊条电弧焊,简称手弧焊,仍是电弧焊生产的主要方法,这说明电弧焊方法的自动化程度还远远跟不上时代的要求。鉴于《焊接概论》、《弧焊电源》等教材均作了介绍,这里作以省略。为了便于叙述和深入分析,本书在前四章中首先讨论了电弧焊方法及其发展中的一些共同性的基本理论和实践问题。例如,作为焊接热源电弧的结构及能量和力学特性;焊丝熔化和熔滴过渡过程特点及控制;母材熔化和焊缝成形的控制,焊接质量参数控制的基本概念等。而后再分章叙述几种主要弧焊方法的工作原理、工艺过程、工艺参数及设备器具等,以及对某些特殊问题的讨论与分析。最后介绍电弧焊中

的自动控制技术及电渣焊方法工艺。

本教材是一门实践性相当强的专业课程，应该与其他课程和教学环节（如实习、课程作业和毕业设计等）相配合，在增强学生的实践知识和动手能力等方面起一定的先导作用。本课程是以物理学、电工及电子学、机械零件等基础课和技术基础课为基础的专业课程。本课程的教学宜以“焊接概论”、“弧焊电源”课，专业生产实习为前导，学习本课程前学生应对手弧焊方法及设备有充分认识，并对各种自动电弧焊方法有一定的感性知识。在教学过程中应十分注重与实践环节相互配合。

参 考 文 献

- 1 姜焕中主编。电弧焊及电渣焊。北京：机械工业出版社，1988
- 2 中国机械工程学会焊接学会编。焊接手册。第1卷。北京：机械工业出版社，1992
- 3 Houldcraft P. T. Welding process technology. Lodon, Cambridge University Press, 1977
- 4 中国机械工程学会焊接学会编。焊接学会三十周年纪念文集。中国焊接，1992

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，电弧焊所以能在焊接领域中仍然占有十分重要的地位，一个主要的原因，就是电弧能够有效而简便地把电能转换成焊接过程所需要的热能和机械能。本章首先从电弧的物理本质——导电机理入手，分析电弧的产热和产力机构，然后分别讨论焊接电弧在应用中几个主要的工艺性能。

第一节 电弧的导电机理

电弧是在一定条件下电荷通过两电极间气体空间的一种导电过程（图1-1），也是气体放电的一种重要形式。借助于这种气体放电形式将电能转换为热能、机械能和光能，焊接时主要是利用其热能和机械能来达到金属连接的目的。

一、电弧放电的特点

正常状态下的气体是由中性分子或原子组成的，不含有带电粒子，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，必须有一个产生带电粒子的过程，这就是气体的放电过程。

实验表明，气体放电在形式上和性质上是各种各样的，并与气体的种类和压力、电极材料和几何形状、两极间距离以及施加在两极间电压高低等因素有关。因此，其导电部分的电流与电压之间呈现出一个很复杂的关系曲线，如图1-2中所示。图1-2中所示曲线，是从测量一系列同类型但电极尺寸不同的放电管中得出的气体放电伏安特性曲线。气体放电形式按是

是否需要外界电离源（如X射线、宇宙射线、阴极的加热等）来维持放电，可分为非自持放电和自持放电两大类。在非自持放电中，起始的带电粒子是由外界电离源所引起的，呈暗放电状态，当外界电离源取消后，放电就立刻停止，这种取决于外界因素的气体导电现象称之为非自持放电。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，即使取消了外界电离源，放电过程仍可继续维持下去，这种过程称为自持放电。在自

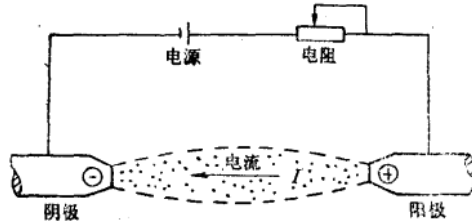


图1-1 电弧示意图

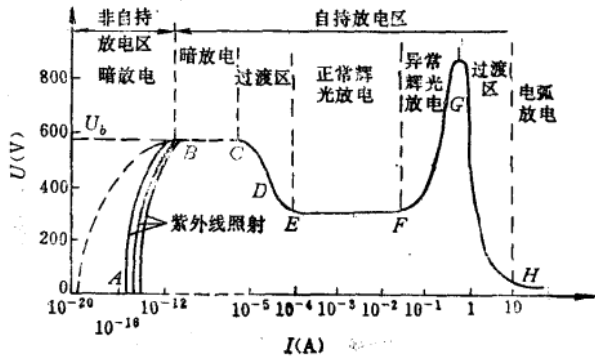


图1-2 气体放电的伏安特性曲线

持放电区间，其放电特征也因电参数值的不同而存在有明显的差异，大体上又可分为自持暗放电、辉光放电和电弧放电等三种基本形式。

电弧是气体自持放电的一种基本形式。在各种气体放电形式中，电弧放电的特点是电流密度大和阴极电压降低。如辉光放电的电流密度是几十微安，而电弧则有几百至几万安培每平方厘米；辉光放电的阴极电压降约为200~300V，电弧的阴极电压降仅约为10V。常压下电弧在相当低的电压下（约几十伏）就可以燃炽，而复燃辉光放电在低气压时需要几百伏电压，在高气压时则需几万伏电压。此外，电弧放电还具有产生高温（5000~30000K）、发光度强等特点。由于上述原因，电弧在工业中作为热源和光源被广泛应用。

二、电弧中带电粒子的产生

电弧是由两个电极和它们之间的气体空间组成。电弧中的带电粒子主要依靠两电极之间的气体电离和电极发射电子两个物理过程所产生的，同时伴随着一些其它过程，如：解离、激励、扩散、复合、负离子的产生等。

（一）气体的电离

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（eV）为单位，若以伏表示则为电离电压。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（eV）就是一个电子通过一伏电位差空间所取得的能量，其数值等于 $1.6 \times 10^{-19} \text{J}$ 。在电子学中，为计算方便起见，常把用电子伏为单位的能量转换为数值上相等的电压来处理，单位为伏。因此在实用中常直接用电离电压（单位为伏）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正离子，这种电离称为二次电离，依此类推。在普通焊接电弧中，当焊接电流较小时只存在一次电离，而在大电流或压缩焊接电弧中，电弧的热力学温度达到几万K时可能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。不仅原子状态的气体粒子可以被电离，分子状态的气体也可以直接被电离。电弧气氛中可能遇到的气体电离电压列于表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)	元素	电离电压 (V)
H	13.5	Ar	15.7(26, 31)	H ₂	15.4
He	24.5(54.2)	K	4.3(32, 47)	C ₂	12
Li	5.4(75.3, 122)	Ca	6.1(12, 51, 67)	N ₂	15.5
C	11.3(24.4, 48, 65.4)	Ni	7.6(18)	O ₂	12.2
N	14.5(29.5, 47, 73, 97)	Cr	7.7(20, 30)	Cl ₂	13
O	13.5(35, 55, 77)	Mo	7.4	CO	14.1
F	17.4(35, 63, 87, 114)	Cs	3.9(33, 35, 51, 58)	NO	9.5
Na	5.1(47, 50, 72)	Fe	7.9(16, 30)	OH	13.8
Cl	13(22.5, 40, 47, 68)	W	8.0	H ₂ O	12.6

(续)

元素	电离电压 (V)	元素	电离电压 (V)	元素	电离电压 (V)
CO ₂	13.7	Al	5.96	Ti	6.81
NO ₂	11	Mg	7.61	Cu	7.68

注：括号内的数字依次为二次，三次，……电离电压。

气体电离电压的高低说明电子脱离原子或分子所需要外加能量的大小，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，从这个角度看是有利电弧的稳定。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电离电压不同的几种气体时，在外加能量的作用下，电离电压较低的气体粒子将先被电离，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取决于这种气体的电离电压。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电弧焊接时，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来提供，电弧气氛的电离电压也将由铁蒸气的电离电压来决定。相比之下，为提供电弧导电所需要的带电粒子而要求的外加能量可以较低。

当中性粒子接受外来能量的作用还不足以使电子完全脱离气体原子或分子时，但可能使电子从较低的能级转移到较高的能级，则中性粒子内部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）。激励电压数值低于该元素电离电压的数值，一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，所以粒子对外界仍呈中性，但处于激励状态的粒子是一种非稳定状态，它存在的时间十分短暂，根据激励能级的不同可为 $10^{-2} \sim 10^{-8}$ s。处于较高能级的激励粒子可继续接受外来能量使其电离；或将自己的能量以辐射能的形式释放出来，而使粒子恢复到原来的稳定状态。处于能级低的激励粒子，可能与其它粒子碰撞将能量传递出去而恢复其稳定状态。接受其能量的其它粒子则可能被解离、激励或电离。因此气体粒子的激励虽然不能直接产生带电粒子，但与电离过程和电弧特性有着密切关系。

2. 能量传递方式 中性气体粒子只有在接受外界能量的条件下，才会产生电离或激励。外界能量可以通过不同的方式施加于中性粒子，但使之电离或激励所必需的能量，即电离或

激励电压却都是固定数值，并不因施加能量方式不同而改变。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传递方式：一种是碰撞传递；另一种是光辐射传递。

(1) 碰撞传递 气体粒子在空间中是呈不规则的运动状态，只有在热力学温度为0K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，并且相互频繁地碰撞，同时进行能量的转移。粒子之间以相互碰撞传递能量的形式称为碰撞传递。

气体粒子间相互碰撞时可能有两种情况：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，碰撞后的两粒子动能之和基本不变，粒子内部结构不发生任何变化。因此弹性碰撞的结果只使粒子的运动速度发生变化，并引起气体温度的变化，不能产生气体的电离或激励过程，这种情况是在气体粒子拥有动能较低时产生的。当气体粒子拥有较高动能时，则产生非弹性碰撞，在碰撞时部分或全部动能转换为内能，使被碰撞的气体粒子内部结构发生变化。如果此内能大于激励电压，则粒子被激励；如果大于电离电压，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。总之，气体粒子间只有非弹性碰撞才能产生电离过程，形成带电粒子。

电弧空间中含有中性气体粒子、电子和正离子等，它们都以某一速度运动，中性气体粒子同样也与它们相互碰撞并接受它们的能量。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。由于电子的质量远小于气体原子、离子或分子，因此当具有足够动能的电子与中性粒子进行非弹性碰撞时，电子的动能几乎可以全部传给中性粒子，转换为中性粒子的内能，使其激励或电离。当中性粒子之间相互碰撞时，由于它们的质量相近，则只能将部分能量传递给被碰撞的粒子，最多不超过原动能的一半。因此，在电弧通过碰撞传递能量使得气体粒子电离的过程中，电子与气体粒子的碰撞作用是最为有效的。

由上可知，要通过粒子间相互碰撞，增加中性粒子的内能使之产生电离，关键是提高粒子的动能，尤其是提高电子的动能。高温可以提高所有粒子（中性粒子、电子、离子）的动能，而增加电场强度却是提高带电粒子（电子、离子）动能的方法。在电弧燃烧过程中，通过粒子间碰撞传递能量使气体粒子电离，是电弧本身产生带电粒子维持其导电的最主要方式。

(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，也就是说中性气体粒子可以接受外界以光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子作用产生激励的条件是

$$h\gamma \geq W_0 = eU_0 \quad (1-1)$$

式中 W_0 ——激励能；

e ——电子电荷量；

U_0 ——气体粒子的激励电压。

而气体粒子接受光子产生电离的条件是

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

式中 W_i ——电离能；

U_i ——电离电压。

以光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。当光子能量超过气