

高等学校教材

电弧焊及电渣焊

(第2版)

上海交通大学 姜焕中 主编

机械工业出版社

高等学校教材

电弧焊及电渣焊

(第2版)

上海交通大学 姜焕中 主编



机械工业出版社

(京)新登字054号

本书分三个部分：第一部分论述电弧焊理论基础，包括电弧物理、焊丝熔滴过渡、焊缝成形；第二部分介绍了埋弧焊、钨极氩弧焊、熔化极氩弧焊、CO₂电弧焊、等离子弧焊及电渣焊的基本原理、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；第三部分讲述电弧焊的自动控制技术，包括参数的恒值控制、程序自动控制、跟踪控制及适应控制等。

本书为高等工业学校焊接专业教材，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。

电弧焊及电渣焊

(第2版)

上海交通大学 姜焕中 主编

责任编辑：董连仁 版式设计：罗文莉

责任校对：李广孚 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)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

三河宏达印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本787×1092¹/₁₆·印张20¹/₂·插页1·字数505千字

1980年12月北京第1版

1988年11月北京第2版·1994年10月北京第13次印刷

印数 64 161—68 760·定价12.10元

ISBN 7-111-00269-5/TG·33(课)

前 言

《电弧焊及电渣焊》是在1981年出版的高等学校试用教材《焊接方法及设备》基础上，根据1984年1月高等学校焊接专业教材分编审委员会制订的新教学计划和教学大纲编写的。

本教材是焊接专业主要教材之一，是一门实践性相当强的课程。它主要讨论焊接电弧物理、焊丝熔滴过渡、埋弧焊、气体保护电弧焊、等离子弧焊、电渣焊等机械化自动化电弧焊方法和设备。为了便于深入讲授电弧焊及其发展中的一些共同性的基本理论和实践问题，本书将首先讨论电弧的热源和力源特征，焊丝的熔化和熔滴过渡，母材熔化和焊缝成形。然后再分别阐述埋弧焊、钨极氩弧焊、熔化极氩弧焊、CO₂电弧焊、等离子弧焊的基本原理、特点和应用等方面的基本知识，并给出这些方法和设备的整体概念，最后讨论电弧焊的自动控制技术及电渣焊。这样的编排方法将有助于读者灵活地掌握电弧焊方法和设备的基本原理，并运用这些基本原理进一步推进机械化自动化电弧焊方法的发展。

为加强学生阅读电气线路图和分析能力，本教材选择合乎教学要求的线路编在附录中，供学生自学用。

本书为高等工业学校焊接专业教材，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。

本书由上海交通大学姜焕中同志主编，西安交通大学邱凤翔同志主审。参加编写的有哈尔滨工业大学张九海（第一、二章）；西安交通大学潘瑞麟（第三、十章）；上海交通大学姜焕中（第四、五章）；朱连生（第六、七章）；何德孚（第八、九章）等。

本书编写过程中得到了哈尔滨工业大学、西安交通大学、上海交通大学、上海电焊机厂的支持，许多兄弟院校焊接教研室的同志，曾为本书编写工作提供了很好的意见和宝贵的资料。在编审过程中，曾邀请清华大学、北京航空学院、北京工业大学、华中工学院、天津大学、哈尔滨工业大学、西安交通大学、上海交通大学有关教师共同协审，在此向他们一并致谢。

由于编者的专业知识有限，书中一定还会在内容上有欠妥之处，欢迎读者提出宝贵意见。

KAG 01/04

目 录

绪论	1	形成	70
一、焊接方法的发展及其在现代工业中的作用	1	一、焊缝形状尺寸及其与焊缝质量的关系	70
二、焊接的本质及其分类	2	二、焊缝与熔池的关系及焊缝形成	71
三、课程内容和教学方法	3	§ 3-2 电弧热与熔池形状的关系	71
第一章 焊接电弧	5	一、电弧的热输入 q 与点热源计算	71
§ 1-1 电弧的物理基础	5	二、工件上的比热流的分布	75
一、气体放电的基本概念	5	§ 3-3 熔池受到的力和力对熔池尺寸的影响	78
二、电弧中带电粒子的产生过程	6	一、力对热源作用位置及熔池形状的影响	78
三、电弧各区域的导电机构	19	二、力对熔池金属的流动及熔池形状的影响	79
四、最小电压原理	25	三、微量元素对熔池形状的影响	80
五、电弧的静特性	26	§ 3-4 焊接参数和工艺因素对焊缝尺寸的影响	81
§ 1-2 焊接电弧的产热及温度分布	27	一、电流、电压、焊速等的影响	81
一、焊接电弧的产热机构	27	二、电流的种类和极性以及电极尺寸等的影响	82
二、焊接电弧的热效率及能量密度	29	三、其他工艺因素对焊缝尺寸的影响	84
三、电弧的温度分布	29	§ 3-5 焊缝成形缺陷及缺陷形成的原因	85
§ 1-3 电弧力及影响因素	31	一、未焊透	85
一、焊接电弧作用力	31	二、未熔合	85
二、电弧力的影响因素	35	三、烧穿	85
§ 1-4 交流电弧的特点	37	四、咬边	86
一、交流电弧的燃烧过程	37	五、焊瘤	86
二、交流电弧加热及电弧力作用的特点	38	§ 3-6 焊缝成形的控制	86
§ 1-5 磁场对电弧的作用	38	一、平面内直缝的焊接	86
一、电弧自身磁场的作用	38	二、曲面焊缝的焊接	87
二、外加磁场对电弧的作用	41	第四章 埋弧焊	89
第二章 焊丝的加热、熔化及熔滴过渡	44	§ 4-1 埋弧焊的特点和应用	89
§ 2-1 焊丝的加热与熔化	44	一、埋弧焊的特点	89
一、焊丝的加热与熔化特性	44	二、埋弧焊的应用	90
二、影响焊丝熔化速度的因素	45	§ 4-2 埋弧焊的冶金特点	91
§ 2-2 熔滴过渡和飞溅	47	一、埋弧焊用的焊剂和焊丝及其配合	91
一、熔滴上的作用力	47	二、埋弧焊的冶金特点	95
二、熔滴过渡主要形式及其特点	50	§ 4-3 埋弧焊的自动调节系统	99
三、熔敷系数和飞溅	60		
四、熔滴过渡的控制	64		
第三章 母材熔化和焊缝成形	70		
§ 3-1 焊缝和熔池的形状尺寸及焊缝			

一、埋弧焊的自动调节.....99	四、NSA5-25型钨极手工脉冲氩弧焊机...169
二、等速送丝调节系统106	五、其它钨极氩弧焊方法170
三、电弧电压反馈调节系统110	第六章 熔化极氩弧焊172
§ 4-4 埋弧自动焊机.....116	§ 6-1 熔化极氩弧焊的特点和应用.....172
一、埋弧焊机分类与结构116	一、熔化极氩弧焊的特点172
二、MZ-1000型自动埋弧焊机120	二、熔化极氩弧焊的应用172
三、MZ-1-1000型自动埋弧焊机126	§ 6-2 亚射流过渡和电弧固有的调节作用.....174
§ 4-5 埋弧焊工艺和常见缺陷及其防止措施.....128	一、亚射流过渡的特点174
一、埋弧焊工艺128	二、亚射流电弧固有的自调节作用175
二、埋弧焊常见缺陷及其防止措施133	§ 6-3 熔化极脉冲氩弧焊.....176
§ 4-6 高效埋弧焊及埋弧堆焊.....133	一、工艺特点176
一、单面焊双面成形133	二、脉冲参数选择177
二、窄间隙埋弧焊137	§ 6-4 窄间隙焊接.....179
三、多丝多弧埋弧焊138	一、低热输入窄间隙焊接179
四、埋弧堆焊140	二、高热输入窄间隙焊接180
第五章 钨极氩弧焊143	§ 6-5 混合气体选择及应用.....183
§ 5-1 钨极氩弧焊的特点和应用.....143	一、Ar + He.....183
一、钨极氩弧焊的特点143	二、Ar + H ₂183
二、钨极氩弧焊的应用143	三、Ar + N ₂183
§ 5-2 氩气保护效果及焊枪结构.....143	四、Ar + O ₂184
一、氩气143	五、Ar + CO ₂185
二、焊枪结构及气体保护效果144	六、Ar + CO ₂ + O ₂185
三、工艺因素对气体保护效果的影响146	七、CO ₂ + O ₂185
§ 5-3 钨极材料及钨极形状尺寸.....146	§ 6-6 气体保护半自动焊机的送丝系统.....187
一、钨极材料146	一、送丝方式188
二、钨极的直径和形状对焊接电弧的影响147	二、影响送丝稳定性的因素188
§ 5-4 电流的种类和极性.....149	第七章 CO ₂ 气体保护电弧焊.....193
一、电流种类和极性的选择149	§ 7-1 CO ₂ 电弧焊的特点和应用193
二、方波氩弧焊的特性154	§ 7-2 CO ₂ 电弧焊的冶金特性.....194
§ 5-5 交流钨极氩弧焊机.....155	一、合金元素的氧化194
一、钨极氩弧焊机的一般结构155	二、脱氧措施及焊缝金属的合金化195
二、NSA-500-1型交流手工钨极氩弧焊机156	三、气孔问题196
§ 5-6 钨极氩弧焊规范参数.....163	§ 7-3 CO ₂ 气体及焊丝198
一、钨极氩弧焊规范参数选择163	一、CO ₂ 气体198
二、钨极氩弧焊的操作技术164	二、焊丝200
§ 5-7 钨极脉冲氩弧焊.....165	§ 7-4 CO ₂ 电弧焊规范参数选择202
一、钨极脉冲氩弧焊的工艺特点165	一、短路过渡焊接202
二、钨极脉冲氩弧焊规范参数选择166	二、细颗粒过渡焊接205
三、钨极脉冲氩弧焊电源169	§ 7-5 减少金属飞溅的措施.....207
	一、正确选择工艺参数207
	二、颗粒过渡焊接时在CO ₂ 中加入Ar气 ...207

三、短路过渡焊接时限制金属液桥爆断能量	208	§ 9-3 电弧焊的自动跟踪控制	267
四、采用低飞溅率焊丝	209	一、自动跟踪控制系统的结构	267
§ 7-6 CO ₂ 电弧焊设备	209	二、电弧跟踪偏差的检测传感方法	268
一、对电源特性的要求	209	三、执行机构和驱动电路	277
二、供气系统	210	§ 9-4 电弧焊过程参数的适应控制	279
三、CO ₂ 焊机控制电路举例	211	一、电弧过程的适应控制	279
§ 7-7 特种CO ₂ 电弧焊	213	二、垂直自动焊熔池液面高度控制系统	281
一、药芯焊丝CO ₂ 电弧焊	213	三、熔深适应控制	282
二、CO ₂ 电弧点焊	215	§ 9-5 弧焊机器人简介	285
第八章 等离子弧焊接	217	一、示教再现型弧焊机器人	285
§ 8-1 等离子弧的特性及等离子弧发生器	217	二、智能型弧焊机器人	286
一、等离子弧的形成及应用特点	217	第十章 电渣焊	287
二、等离子弧发生器	220	§ 10-1 电渣焊的特点及应用	287
三、双弧现象及其防止	225	一、电渣焊的基本原理	287
§ 8-2 等离子弧焊接	227	二、电渣焊的热源和焊缝结晶特点	287
一、焊接方法及参数选择	227	三、电渣焊的焊接材料和冶金特点	290
二、等离子弧焊接设备	234	四、电渣焊的应用	292
§ 8-3 等离子弧切割、喷镀和堆焊	235	§ 10-2 丝极电渣焊	293
一、等离子弧切割	235	一、丝极电渣焊的工艺流程	293
二、等离子弧堆焊	240	二、丝极电渣焊的规范参数及其对熔池尺寸的影响	295
三、等离子弧喷镀	241	三、环缝电渣焊的工艺特点	299
四、隧道型等离子弧喷射	242	四、电渣焊电源和焊机头	299
第九章 电弧焊自动控制技术	243	五、电渣焊接头的常见缺陷和改善质量的途径	300
§ 9-1 电弧焊接过程参数的恒值控制	243	§ 10-3 板极、熔嘴和管极电渣焊简介	301
一、转速自动调节方法	243	一、板极电渣焊	301
二、动态特性的改善	247	二、熔嘴电渣焊	302
三、电弧焊机的典型拖动电路	248	三、管极电渣焊	304
§ 9-2 电弧焊的程序自动控制	252	附录	306
一、程序自动控制的对象和要求	252	一、MZ1-1000埋弧焊机	306
二、程序自动控制的原则和方法	255	二、NZC-1000型CO ₂ 自动焊机	310
三、电弧焊程序控制的基本环节	256	参考文献	320

绪 论

一、焊接方法的发展及其在现代工业中的作用

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，目前工业生产中广泛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迅速发展以后所带来的现代工业的产物（图0-1）。这些焊接方法与金属切削加工、压力加工、铸造、热处理等其他金属加工方法一起构成的金属加工技术是现代一切机器制造工业，其中包括汽车、船舶、飞机、航天、原子能、石油化工、电子等工业部门的基本生产工艺。可以毫不夸张地说，没有现代焊接方法的发展，就不会有现代工业和科学技术的今天。一个国家的焊接技术发展水平往往也是一个国家工业和科学技术现代化发展的一个标志。

图0-1表明，到1970年为止，约有21种基本焊接方法，现代焊接方法的发展是以电弧焊和压力焊为起点的。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

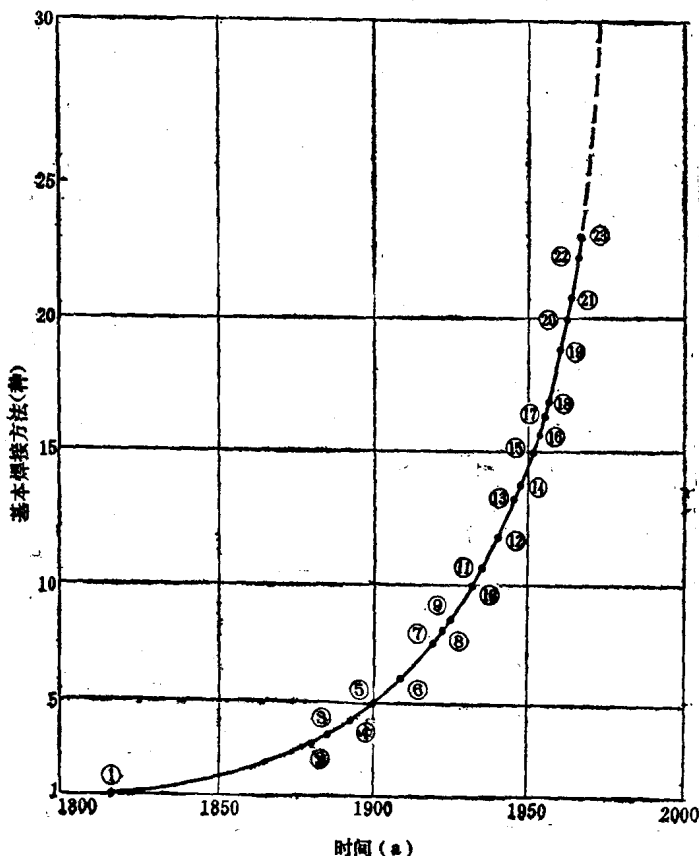


图0-1 焊接方法发展简史

- 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)

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(Бенардос)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。到目前为止,已经发展为20多种基本焊接方法,如包括各种派生方法,那就更多。由此可见,从电弧焊和电阻焊的大量应用算起,至现代焊接方法还只有半个世纪多一点的历史。我们知道,近50年来正是现代工业和科学技术,特别是航天、原子能、电子、石油化工、海洋开发等部门迅猛发展的时代。一方面,这些工业和科学技术的发展不断提出了各种使用要求(动载、强韧性、高压、高温、低温、耐蚀耐磨等)、各种结构形式(壁厚或截面直径从几微米至数千毫米)及各种黑色和有色金属材料的焊接问题。例如,造船和海洋开发工业的发展要求解决大面积拼板大型立体框架结构自动焊及各种低合金高强度钢的焊接问题;石油化学工业的发展要求解决各种耐高、低温及耐各种腐蚀性介质的压力容器焊接;航空及空间工业中则要求解决大量铝、钛等轻合金结构的焊接;重型机械工业中的发展要求解决大截面构件的拼接;电子及精密仪表制造工业则要求解决大量微型精密焊件的焊接。另一方面,现代工业和科学技术的大量新成就又为焊接方法的发展提供了宽广的技术基础,焊接方法就是在现代工业和科学技术推动下相辅相成地蓬勃发展起来的。80年代还进行了太空焊接试验。可以预料,随着工业和科学技术的不断发展,焊接也必定有新的跃进。

二、焊接的本质及其分类

金属等固体所以能保持固定的形状是因为其内部原子之间距(晶格)十分小,原子之间形成了牢固的结合力。除非施加足够的外力破坏这些原子间结合力,否则,一块固体金属是不会变形或分离成两块。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($0.3 \sim 0.5 \text{ nm}$)。在一般情况下,当我们把两个金属构件放在一起时,由于(1)表面的粗糙度,即使是精密磨削加工的金属表面粗糙度仍有几到几十微米($1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m} \gg 1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$);(2)表面存在的氧化膜和其他污染物阻碍着实际金属表面原子之间接近到晶格距离并形成结合力。因此,焊接过程的本质就是通过适当的物理化学过程克服这两个困难,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。目前找到的基本途径,便形成了焊接的基本分类。

(一) 熔化焊接

使被连接的构件表面局部加热熔化成液体,然后冷却结晶成一体的方法称为熔化焊接。为了实现熔化焊接,关键是要有一个能量集中、温度足够高的加热热源。按照热源形式不同,熔化焊接基本方法分为:气焊(以氧乙炔或其他可燃气体燃烧火焰为热源);铝热焊(以铝热剂放热反应热为热源);电弧焊(以气体导电时产生的热为热源);电阻点、缝焊(以焊件本身通电时的电阻热为热源);电渣焊(以熔渣导电时的电阻热为热源);电子束焊(以高速运动的电子束流为热源);激光焊(以单色光子束流为热源)等若干种。

其次,为了防止局部熔化的高温焊缝金属因跟空气接触而造成成分、性能的不良,熔化

焊接过程一般都必须采取有效的隔离空气的保护措施,其基本形式是:真空、气相和渣相保护三种。因此,保护形式常常是区分熔化焊接方法的另一个特征。例如,熔化焊接方法中最重要的电弧焊方法就可按保护方法不同分为埋弧焊、气保护焊等很多种。此外,电弧焊方法还按电极特征分为熔化电极和非熔化电极两大类。

(二) 压力焊接

利用摩擦、扩散和加压等物理作用克服两个连接表面的不平度,除去(挤走)氧化膜及其他污染物,使两个连接表面上的原子相互接近到晶格距离,从而在固态条件下实现的连接统称为固相焊接。固相焊接时通常都必须加压,因此通常这类加压的焊接方法称为压力焊接。为了使固相焊接容易实现,固相焊接大都在加压同时伴随加热措施,但加热温度通常都远低于焊件的熔点。因此固相焊接一般都无需保护措施(扩散焊等除外)。

按照加热方法不同,压力焊接的基本方法有:冷压焊(不采取加热措施的压焊)、摩擦焊、超声波焊、爆炸焊、锻焊、扩散焊、电阻对焊、闪光对焊等若干种。

应该注意的是,通常所指的电阻焊都可称为压力焊(焊接过程中都要加压),即属于固相焊接。但有些电阻焊(点焊、缝焊)接头形成过程伴随有熔化结晶过程,但是在加压条件进行的,仍属压力焊。

(三) 钎焊

利用某些熔点低于被连接构件材料熔点的熔化金属(钎料)作连接的媒介物在连接界面上的流散浸润作用,然后冷却结晶形成结合面的方法称为钎焊。显然钎焊过程也必须采取加热(以使钎料熔化,但母材不熔化)和保护措施(以使熔化的钎料不跟空气接触)。按照热源和保护条件不同,钎焊方法分为:火焰钎焊(以氧乙炔燃烧火焰为热源);真空或充气感应钎焊(以高频感应电流的电阻热为热源);电阻炉钎焊(以电阻炉辐射热为热源);盐浴钎焊(以高温盐浴为热源)等若干种。

图0-2列出了基本焊接方法及其分类。至于金属热切割、表面堆焊、喷镀、镀膜、有机粘结等均是跟焊接方法相近的金属加工方法,通常也属于焊接专业的技术范围。

三、课程内容和教学方法

根据焊接工程专业教育计划,本课程主要讲述内容为:

(1) 各类基本焊接方法的焊接过程本质,能量转换过程,焊缝形成条件,合理应用范围等。

(2) 各类基本焊接过程质量控制参数,控制方法以及机械化自动化途径。

(3) 各类基本焊接设备的结构原理。

图0-2列出的焊接方法中,目前应用最为普遍的是:电弧焊、压力焊、电渣焊和各种钎焊。关于压力焊和钎焊,将在其他课程中逐一讨论。电子束、激光、摩擦焊、超声波焊、扩散焊等方法原理比较特殊,并都颇有发展前途,我们也将其他课程中加以论述。还有一些焊接方法,其中包括气焊、铝热焊等某些工业部门中都有一定的应用价值,但考虑到这些方法原理一般都比较简单,只要掌握了上述主要焊接方法后是可以自行理解的,本教材中就不一一详叙了。对于热切割、堆焊、喷镀等相近加工方法,本书将尽可能在必要的地方简述它们的一些特点。

电弧焊是现代焊接方法中应用最为广泛,因而也是最为重要的一类焊接方法。根据一些工业发达国家最近的统计,电弧焊在各国焊接生产劳动总量中所占比例一般都在60%以上。

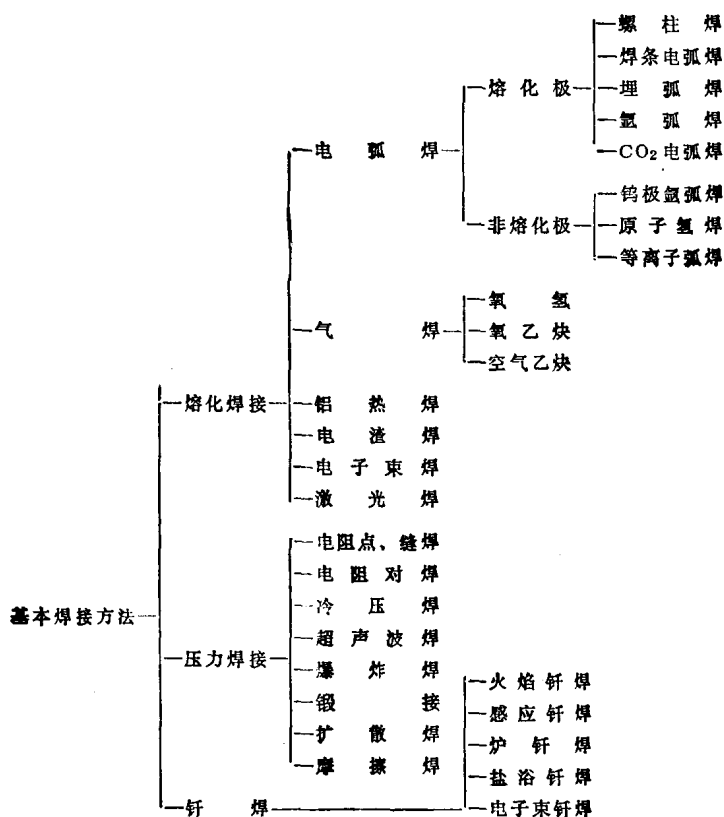


图0-2 基本焊接方法及分类

电弧焊有许多派生方法，除图0-2列出的，还可以由不同电源、控制形式等派生许多新方法。例如低频或高频脉冲电弧，磁控电弧，串列或并列多弧，串联电弧，及矩形波交流电弧焊等等，使电弧焊方法的适用范围，机械化自动化程度以及焊接质量日益得到提高。但是直到目前为止，手工操作的焊条电弧焊仍是电弧焊生产的主要方法，这说明电弧焊接方法的自动化还远远跟不上时代的要求。鉴于“熔焊电源”和“焊接冶金与金属焊接性”两门课程已详细讨论手弧焊方法及设备，本书将主要讨论机械化自动化的电弧焊方法。为了便于深入讲授机械化自动化电弧焊及其发展中的一些共性基本理论和实践问题。首先论述作为焊接热源的电弧的能源特征及其控制，焊丝熔化和熔滴过渡过程的控制，母材熔化和焊缝成形的控制。再分章阐述埋弧焊、钨极氩弧焊、熔化极氩弧焊、CO₂电弧焊、等离子弧焊等五种基本自动电弧焊方法及设备的某些特殊问题，并给出这些电弧焊方法和设备的完整概念。然后研究电弧焊中的自动控制技术及电渣焊。本课程是焊接专业主要专业课之一，又是一门实践性相当强的课程，应该与其他课程和其他教学环节（如实习、课程作业和毕业设计等）配合，在增强学生的实践知识和动手能力等方面起到应有的作用。

本课程是以物理学、电工及电子学、机械零件等基础课和基础技术课为基础的专业课程。本课程的教学宜以熔焊电源，专业生产实习为前导，在学习本课程前学生应对手工电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。在本课程教学过程中，应十分注重与实践环节的配合。

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占据着主要地位, 一个重要的原因, 就是电弧能有效而简便地把电能转换成焊接过程所需要的热和机械能。为了认识和发展电弧焊方法, 首先必须清楚电弧是怎样实现这种能量转换和焊接中怎样利用这种能量的。这一章将从电弧的物理本质——导电机理入手, 分析电弧的产热和产力机构, 交流电弧的特点及磁场对电弧的作用等。

§ 1-1 电弧的物理基础

电弧并不是一般的燃烧现象。实质上, 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), 或者说是一种气体放电现象。借助这种特殊的气体放电过程, 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连接金属的目的。要理解电弧现象, 必需先了解气体放电现象的一般规律。

一、气体放电的基本概念

不论固体、液体还是气体, 能否呈现导电性, 都取决于在电场作用下是否拥有可自由移动的带电粒子。金属本身拥有大量自由电子, 所以在金属导体两端只要加上电压, 自由电子便产生定向运动, 形成电流。但是正常状态下的气体不含带电粒子, 是由中性分子或原子组成的。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, 必须先有一个产生带电粒子的过程, 然后才能呈现导电性能。金属中自由电子可以移动, 而金属中离子则不能自由移动, 但是气体中所有组成粒子, 皆可自由移动, 所以气体的导电过程和规律与金属有明显的不同。

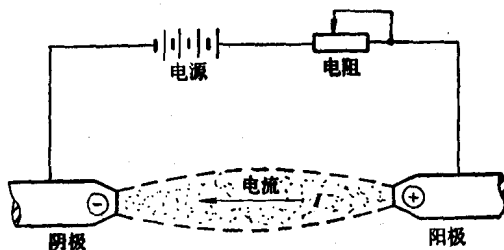


图1-1 电弧示意图

当金属导电时, 导电部分的电流与电压之间的关系是遵循欧姆定律 $I = \frac{1}{R} U$ (图1-2 b), 而气体导电时, 其导电部分电流与电压的关系不遵循欧姆定律, 呈现出一个很复杂的关系 (图1-2 a)。这是因为金属导电时, 在整个导电区间其导电机构基本不发生变化; 而气体导电时, 在不同条件下和不同的电流区间, 其导电机构显著不同。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本身产生, 而需要外加措施来造成带电粒子 (加热、施加一定能量的光子等)。这种气体导电现象称为非自持放电。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, 这种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《点燃》), 一旦放电开始, 取消外加诱发措施, 放电过程仍可以继续下去, 放电过程自身能够产生维持放电所需要的带电粒子。这种放电过

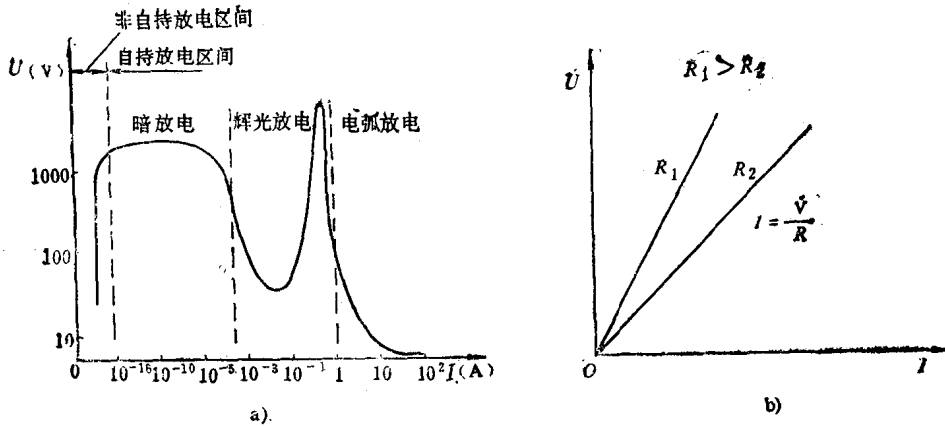


图1-2 气体放电与金属导电的伏安特性

a) 气体放电 b) 金属导电

程称为自持放电。在自持放电区间，放电机构也因电流数值的不同而不同，其特性也有显著的差异，又可分为：暗放电、辉光放电和电弧放电等三种基本型式。电弧是几种自持放电型式电压最低、电流最大、温度最高、发光最强的一种气体放电现象。因此，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过程

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气体空间的电离和电极的电子发射两个物理过程所产生的，同时伴随着一些其他过程，如：解离、激励、扩散、复合、负离子的产生等。

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。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。自由状态气体原子的第一电离电压在3.9V（Cs）至24.5V（He）之间，第二电离电压在十几伏到几百伏之间。一次电离电压低的粒子，二次电离电压不一定低，这由粒子的原子结构决定。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)
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	13.2(2.5, 40, 47, 68)	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。

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。当电子从气体分子中被分离出来时，一般情况下需要克服两层约束（原子对电子的约束和分子对电子的约束），所以需要的电离电压比原子状态时的电离电压要高一些，如H（原子）为13.5V，而H₂（分子）为15.4V。然而，也有些气体原子结合为分子时反而使电子与原子的联系减弱，故分子的电离电压反而比原子的电离电压低，如NO分子的电离电压为9.5V，而N原子和O原子的电离电压分别为14.5和13.5V。

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。

前面已提到常态下的中性气体粒子内部的原子核与电子构成一个稳定系统，当受外来能量作用失去电子而产生电离是这个稳定系统被破坏的一种可能结果。但也存在另一种可能的结果，即当中性粒子受外来能量作用其能量还不足以使电子完全脱离气体原子或分子，但可

能使电子从较低的能级转移到较高的能级时，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，某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，所以粒子对外界呈中性。因为粒子的激励状态是一种非稳定状态，它处于激励状态的时间是很短暂的，根据激励能级的不同可为 $10^{-2} \sim 10^{-8} \text{ s}$ ，一般原子激励状态的时间为 10^{-8} s 。较高能级的激励粒子继续接受外来能量可以使其电离，或者将自己的能量以辐射能的形式释放出来，表现为电弧的辐射光，而粒子恢复到原来的稳定状态。能级低的激励粒子，可能与其他粒子碰撞将能量传递给其他粒子而恢复其稳定状态。接受其能量的其他粒子则可能解离、激励或电离。因此粒子的激励过程虽然不是直接产生带电粒子的过程，但也是与电离过程和电弧特性有密切关系的物理现象。

任何中性粒子在接受外界一定数值能量的条件下，会产生电离与激励。外加能量可以通过不同方式施于中性粒子，但使之电离与激励所必需给予它的最低能量数值，并不因施加能量方式不同而改变，即电离和激励电压都是固定数值。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能量途径：一种是碰撞；另一种是光辐射。

(1) 碰撞传递 气体粒子在空间总是处于不规则的运动状态，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，而且可能互相频繁地碰撞，粒子在相互碰撞时将进行能量的转移，粒子以这种形式传递能量称为碰撞传递。

气体粒子的相互碰撞可能有两种情况：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，碰撞后两个粒子的动能之和基本不变，粒子的内部结构不发生任何变化，这种碰撞的结果只使粒子的运动速度变化。因此弹性碰撞只能引起粒子温度的变化，不能产生电离与激励过程，是在气体粒子拥有的动能较低时产生的。当气体粒子拥有较大动能时，则产生非弹性碰撞，使被碰撞的气体粒子的内部结构发生变化，在碰撞时部分或全部动能转换为内能，如果此内能大于激励电压则粒子被激励，如果此能量大于电离电压，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。只有非弹性碰撞才产生电离过程，为气体空间制造带电粒子。

电弧空间的气体中不只含有中性气体粒子，而且也含有电子和正离子，这些粒子也都以某一速度运动，中性气体粒子同样也受到它们的碰撞而接受它们传递的能量。相互碰撞的两物体的能量传递情况与它们的质量有密切的关系。电子的质量远远小于气体原子、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，它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，使其激励与电离。当中性粒子之间进行碰撞时，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，因此在电弧中通过碰撞传递使气体粒子电离的过程中，电子的作用是所有粒子中最主要的。

由上面的讨论可以看到，要通过粒子间碰撞，增加中性粒子的内能使之达到电离，关键是提高粒子的动能，尤其是提高电子的动能。电弧中的高温和电场的存在都是提高粒子动能的有利条件。高温可以提高所有粒子（中性粒子、电子、离子）的动能，而电场强度是提高带电粒子（电子、离子）动能的条件。实际电弧过程中，通过粒子间的碰撞将能量传给中性粒子并使之电离，是电弧本身制造带电粒子维持其导电的最主要途径。

(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：

$$h\gamma \geq W_i = eU_i \quad (1-14)$$

式中 W_i ——激励能；

e ——电子电荷量；

U_i ——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：

$$h\gamma \geq W_i = eU_i \quad (1-28)$$

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。当光子能量超过气体粒子的电离能时，则其多余部分将转换为电离生成的电子的动能，即：

$$h\gamma = eU_i + \frac{1}{2}mv^2$$

式中 m ——电子的质量；

v ——被电离出来的电子运动速度。

电弧本身发出多种频率的光辐射，因此电弧本身就具有向气体粒子提供辐射能量的条件。中性粒子接受弧光辐射就可能产生激励与电离，制造带电粒子维持电弧的导电。但是在一般焊接电弧中，通过光辐射传递方式来制造带电粒子与碰撞传递相比，则是次要的。

2. 电离种类 电弧中气体粒子的电离因外加能量种类的不同而分为三类。

(1) 热电离 气体粒子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，气体的温度高低意味着气体粒子（包括中性粒子、电子和离子）总体动能的大小，亦即气体粒子平均运动速度的快慢。

气体粒子的平均运动速度与温度在数值上的关系如下：

$$\bar{C} = 1.87 \times 10^{-8} \sqrt{\frac{T}{m}} \quad (1-33)$$

式中 $\bar{C}$ ——气体粒子的平均运动速度， $[\bar{C}]$ 为 cm/s ；

T ——气体的热力学温度， $[T]$ 为 K ；

m ——粒子的质量， $[m]$ 为 g 。

由上式可见, 气体温度越高, 气体粒子的运动速度也越高, 即动能也越大。在一定温度下, 气体粒子的质量越小其运动速度越高。由于气体粒子的热运动是无规则的运动, 粒子之间将发生频繁的碰撞, 若粒子的运动速度足够高 (即动能足够大), 粒子之间可能发生非弹性碰撞, 引起气体粒子的激励或电离。因此热电离实质上是由于粒子之间的碰撞而产生的一种电离过程。

电弧中不仅含有常态的中性气体粒子, 而且也含有电子、正离子和激励状态的中性粒子等多种粒子。这些粒子都有相互碰撞的机会, 而发生电离可能性最大的是电子对激励状态的中性粒子或对常态中性粒子的碰撞, 因为电子在与中性粒子进行非弹性碰撞时, 几乎全部能量都传给中性粒子。

气体中各个粒子在同一温度下的热运动, 其运动速度是不一样的, 有高于或低于平均运动速度的。气体粒子运动速度是按麦克斯威尔 (Maxwell) 曲线分布的, 如图 1-3 所示。气体中所有粒子 (包括电子的运动速度分布) 都遵循这个规律。因此, 在某一温度下粒子所具有动能并不都相同, 只是拥有大于电离电压能量的那部分粒子才可能引起中性粒子的电离。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电离度, 一般以 x 表示, 则:

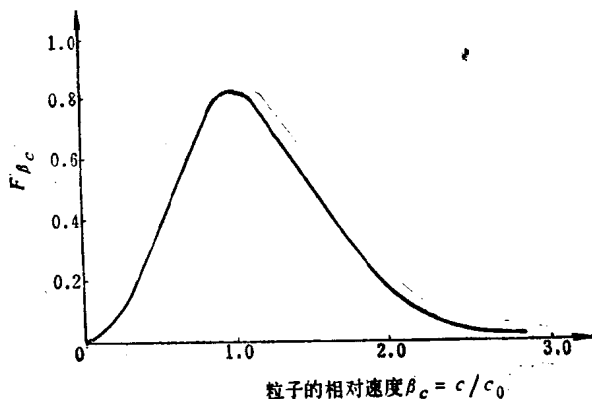


图1-3 气体粒子运动的麦克斯威尔曲线分布

C —气体粒子的实际速度, C_0 —气体粒子中绝大多数粒子速度,
 $C_0 = 0.89 \bar{C}$, $\bar{C}$ —平均速度, F_{β_c} —某一速度粒子数与总数比

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

根据印度科学家萨哈 (Saha) 的推导, 假设气体中各粒子处于热平衡状态, 则热电离与气体温度、气体压力、气体电离电压等因素存在以下数值方程关系:

$$\frac{x^2}{1-x^2} P = 3.16 \times 10^{-7} T^{2.5} \exp\left(-\frac{eU_i}{kT}\right) \quad (1-4)$$

式中 P ——气体压力, $[P]$ 为 Pa;

T ——气体热力学温度, $[T]$ 为 K;

e ——电子的电量, $[e]$ 为 C;

k ——玻耳兹曼常数, $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$;

U_i ——气体的电离电压, $[U_i]$ 为 V。

由这个关系式所决定的电离度 x 与温度 T 的曲线关系如图 1-4 所示。

由萨哈公式及图 1-4 可以看出热电离时的电离度随温度的升高, 压力的减少, 电离电压的减小而增加。

萨哈公式是单一气体热电离度的表达式, 如果某气体中混有其他成分时, 各种气体电离程度不一样, 此时电子密度与电离前中性粒子密度的比率称为实效电离度。混合气体的电离