



全国高职高专教育“十一五”规划教材

焊接技术及自动化专业

焊接方法与设备

陈淑惠 主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS



焊接技术及自动化专业系列教材

焊接结构生产

邓洪军

焊接实训

杨兵兵

 焊接方法与设备

陈淑惠

焊接生产管理

吴金杰

ISBN 978-7-04-025568-3



9 787040 255683 >

定价23.90元

全国高职高专教育“十一五”规划教材

焊接技术及自动化专业

焊接方法与设备

陈淑惠 主编

高等教育出版社

内容提要

本书主要讲述各种常用焊接方法的焊接过程本质、质量控制以及相应焊接设备的构成等。全书分为八章：第一章集中介绍电弧焊基础知识；第二章至第七章系统介绍焊条电弧焊、埋弧焊、熔化极气体保护焊、钨极惰性气体保护焊、等离子弧焊接与切割及电阻焊的原理、特点与设备；第八章对钎焊、高能密度焊、电渣焊、摩擦焊、扩散焊、超声波焊及爆炸焊等作了简要介绍。本书给出了部分生产实例；在第二章至第五章后给出了工单，供实践过程中参考；在每章末附有测试题，供复习之用。

本书可作为高等职业院校、高等专科院校、成人高校、民办高校及本科院校举办的二级职业技术学院焊接及相关专业的教学用书，也适用于五年制高职、中职相关专业，亦可作为社会从业人员的业务参考书及培训用书。

图书在版编目(CIP)数据

焊接方法与设备/陈淑惠主编. —北京:高等教育出版社, 2009.3

ISBN 978-7-04-025568-3

I. 焊… II. 陈… III. 焊接 - 基本知识
IV. TG4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 018126 号

策划编辑 徐 进 责任编辑 薛立华 封面设计 于 涛
责任绘图 尹 莉 版式设计 张 岚 责任校对 姜国萍
责任印制 韩 刚

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京外文印刷厂

开 本 787×1092 1/16
印 张 18.5
字 数 450 000

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landracore.com>
<http://www.landracore.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2009 年 3 月第 1 版
印 次 2009 年 3 月第 1 次印刷
定 价 23.90 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 25568-00

前 言

本书是为满足高等职业院校焊接技术及自动化专业或材料成型与控制技术专业(焊接方向),以及其他相关专业的教学需要而编写的。

本书主要讲述各种焊接方法的焊接过程本质、相应的焊接设备的构成、焊接质量及其控制措施,并对焊接方法及设备的新发展作了概括介绍。全书分为八章:第一章集中介绍作为焊接热源的电弧的物理本质、热源和力源特性、焊丝的熔化及熔滴过渡、母材熔化及焊缝成形规律等;第二章至第六章系统介绍在实际生产中广泛应用的焊条电弧焊、埋弧焊、熔化极气体保护焊、钨极惰性气体保护焊、等离子弧焊接与切割的原理、特点与设备;最后两章为拓宽专业知识,其中第七章主要讲述电阻焊的特点、原理及应用,第八章则对钎焊、高能密度焊、电渣焊、摩擦焊、扩散焊、超声波焊以及爆炸焊等焊接方法作了简要介绍。

全书以目前广泛应用的电弧焊方法为主要内容,紧密结合生产实际,着重讲述常用焊接方法的基本理论和实践问题,并力图反映近年发展起来的高效、节能、低成本和绿色焊接等新的工艺方法。本书在取材上力求突出实用性,注重从理论与实践结合的角度阐明焊接技术理论,对主要焊接方法的叙述都是从实践开始,首先使读者建立起感性的认识,再引导读者进行理论学习,所以建议每学习一种新的焊接方法时,第一次课都应尽可能到实训场所进行理论实践一体化教学。

本书由陈淑惠主编,其中第一章、第二章、第六章由高章虎编写;第七章、第八章由杨新华编写;第二章至第五章后面的工单由杨兵兵编写;陈淑惠编写其余部分并对全书进行统稿。

在编写过程中参考了部分同类教材、教学参考书、专业工具书以及焊接相关网站的信息,在此向有关编者致谢。

由于编者知识水平有限,本书难免会有疏漏和欠妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2009年1月

目 录

绪论	1	第二节 熔化极气体保护焊的分类、特点及应用	144
测试题	6	第三节 二氧化碳气体保护焊 (CO ₂ 焊)	146
第一章 电弧焊基础知识	7	第四节 熔化极惰性气体保护电弧焊 (MIG 焊)	164
第一节 焊接电弧	7	第五节 熔化极活性气体保护电弧焊 (MAG 焊)	172
第二节 焊丝熔化与熔滴过渡	23	熔化极气体保护焊实训	178
第三节 母材熔化与焊缝成形	29	测试题	185
测试题	35	第五章 钨极惰性气体保护焊	187
第二章 焊条电弧焊	37	第一节 TIG 焊设备	187
第一节 认识焊条电弧焊	37	第二节 TIG 焊的特点及应用	193
第二节 焊条电弧焊的设备及工具	41	第三节 电流的种类和极性	194
第三节 焊条电弧焊的原理及特点	47	第四节 TIG 焊工艺	199
第四节 焊条	49	第五节 TIG 焊的其他方法	210
第五节 焊条电弧焊工艺	55	钨极惰性气体保护焊实训	217
第六节 焊条电弧焊操作技术	59	测试题	225
焊条电弧焊实训	65	第六章 等离子弧焊接与切割	227
测试题	78	第一节 等离子弧的形成及其特性	227
第三章 埋弧焊	81	第二节 等离子弧焊接与切割设备	230
第一节 埋弧焊设备	81	第三节 等离子弧焊	235
第二节 埋弧焊的特点及应用	89	第四节 等离子弧切割	240
第三节 埋弧焊的自动调节原理	92	测试题	243
第四节 埋弧焊的焊接材料与冶金过程	99	第七章 电阻焊	245
第五节 埋弧焊工艺	104	第一节 电阻焊的分类及特点	245
第六节 高效率埋弧焊	119	第二节 电阻焊的基本原理	247
埋弧焊实训	126	第三节 电阻焊设备	251
测试题	131		
第四章 熔化极气体保护焊	133		
第一节 熔化极气体保护焊设备	133		

第四节 电阻焊工艺方法及应用	254	第四节 摩擦焊	274
测试题	262	第五节 扩散焊	281
第八章 其他焊接方法与设备	264	第六节 超声波焊	282
第一节 钎焊	264	第七节 爆炸焊	285
第二节 高能密度焊	267	测试题	287
第三节 电渣焊	271	参考文献	289

绪 论

学习目标	鉴定标准	教学建议
1. 熟悉焊接的概念,了解焊接方法的分类; 2. 了解焊接的发展及焊接在我国制造业中的地位和成就; 3. 了解本书的内容和学习方法	应知:焊接的概念,三大类焊接方法	尽可能上网搜索相关图片及视频资料,采用多媒体教学,激发学生的学习兴趣

一、焊接的概念及焊接方法的分类

在金属结构和机器的制造中,经常需要将两个或两个以上的零件按一定的形式和位置连接起来,通常可以根据这些连接的特点,将其分为两大类:一类是可拆连接,如螺栓连接、键连接等,见图0-1;另一类是不可拆连接,如铆接、焊接等,见图0-2。

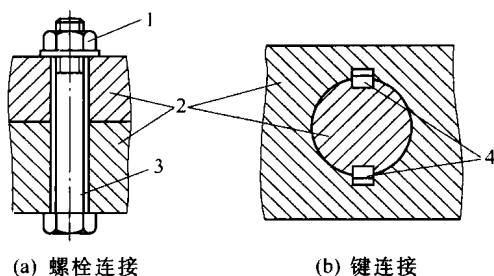


图0-1 可拆连接

1—螺母;2—零件;3—螺栓;4—键

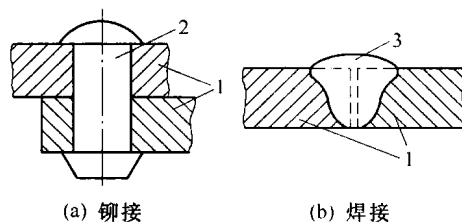


图0-2 不可拆连接

1—零件;2—铆钉;3—焊缝

焊接是指通过加热或加压,或两者并用,并且用或不用填充材料,使两个分离的物体达到原子间结合的一种加工方法。被结合的两个物体可以是各种同类或不同类的金属、非金属(石墨、陶瓷、塑料等),也可以是一种金属与一种非金属。但是,目前工业中应用最普遍的还是金属之间的结合,因此本书主要讨论金属的焊接方法。

要使两个金属零件连接在一起,就必须使分离的金属表面达到原子间的距离($10^{-4} \mu\text{m}$ 数量级),只有这样才能使原子间产生足够大的结合力,形成牢固的接头。这对液体来说是很容易的,而对固体来说则比较困难,需要外部给予很大的能量。为此,金属焊接时必须采用加热、加压或两者并用的方法。焊接能量可来自电能、化学能、机械能、光能、超声波能等。

按照焊接过程中金属所处的状态不同,可以将焊接方法分为熔焊、压焊和钎焊三大类,每大类又可按不同的方法细分为若干个小类,如图 0-3 所示。

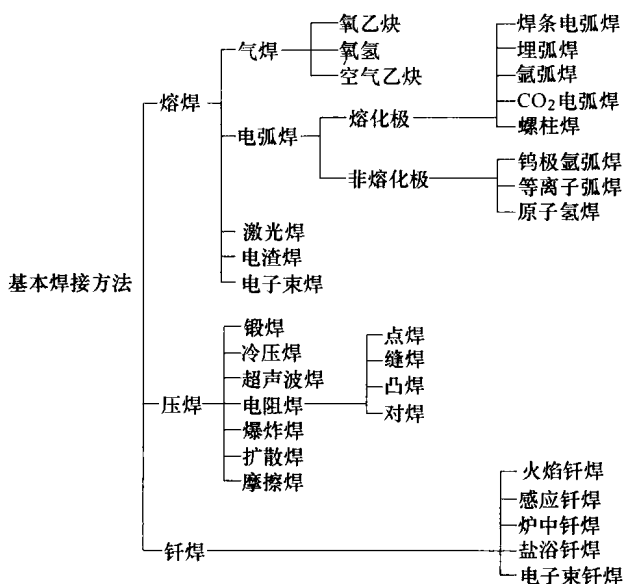


图 0-3 焊接方法的分类图示

熔焊是在焊接过程中,将焊件接头加热至熔化状态,不加压力完成焊接的方法。由于在加热的条件下,增强了金属原子的动能,促进原子间的扩散,当被焊金属加热至熔化状态形成液态熔池时,原子之间可以充分扩散和紧密接触,因此冷却凝固后即可形成牢固的焊接接头。常见的气焊、电弧焊、激光焊、电渣焊、电子束焊等都属于熔焊的方法。

压焊是在焊接过程中对焊件施加压力(加热或不加热)完成焊接的方法。这类焊接有两种形式:一是将被焊金属接触部分加热至塑性状态或局部熔化状态,然后加一定的压力,使金属原子间相互结合而形成牢固的焊接接头,如锻焊、电阻焊和摩擦焊等;二是不进行加热,仅在被焊金属的接触面上施加足够大的压力,借助于压力所引起的塑性变形,使原子间相互接近直至获得牢固的压挤接头,如爆炸焊、冷压焊等均属此类方法。

钎焊是采用比母材熔点低的金属材料作钎料,将焊件和钎料加热到高于钎料熔点、低于母材熔点的温度,利用液态钎料润湿母材,填充接头间隙并与母材相互扩散实现连接焊件的焊接方法。钎焊是一种古老的金属连接工艺,但其金属结合的机理与熔焊和压焊不同,并且具有一定的特殊性能,所以在现代焊接技术中仍占有很重要的地位,目前已形成了一个独立的体系。常见的钎焊方法有烙铁钎焊、火焰钎焊等。

二、焊接发展概况

焊接是一种古老而又年轻的加工方法,远在我国古代就有使用锻焊和钎焊的实例。据记载,春秋战国时期,我们的祖先已经懂得以黄泥做助熔剂,用加热锻打的方法把两块金属连接在一

起。到公元 7 世纪唐代时,已应用锡钎焊和银钎焊进行焊接,这比欧洲国家要早 10 个世纪。然而,目前工业生产中广泛应用的焊接方法却是 19 世纪末和 20 世纪初现代科学技术发展的产物。特别是冶金学、金属学以及电工学的发展,奠定了焊接工艺及设备的理论基础,而冶金工业、电力工业和电子工业的进步,则为焊接技术的长远发展提供了有利的物质和技术条件。1885 年发现了气体放电的电弧,1930 年发明了涂药焊条电弧焊方法,并在此基础上发明了埋弧焊、钨极氩弧焊、熔化极氩弧焊以及二氧化碳气体保护焊等自动或半自动的焊接方法。电阻焊则是 1886 年发明的,此后逐渐完善为电阻点焊、缝焊和对焊方法,它几乎与电弧焊同时推向工业应用,逐步取代铆接,成为工业中广泛应用的两种主要焊接方法。到目前为止,又相继发明了电子束焊、激光焊等 20 余种基本方法和成百种派生方法。

随着工业生产的发展,对焊接技术提出了多种多样的要求。如:在焊接产品的使用方面提出了动载、强韧、高压、高温、低温和耐蚀等项要求;在焊接产品结构形式上提出了焊接厚壁零件到精密零件的要求;在焊接材料的选择上提出了焊接各种黑色金属和有色金属的要求。具体地说,在造船和海洋开发中要求解决大面积拼板以及大型立体框架结构的自动焊及各种低合金高强度钢的焊接问题;在石油化学工业的发展中,要求解决耐高温、低温以及耐各种腐蚀性介质的压力容器制造问题;在航空工业及空间开发中,要求解决大量铝、钛等轻合金结构的制造问题;在重型机械工业中,要求解决大截面构件的焊接问题;在电子及精密仪表工业中,则要求解决微型精密零件的焊接问题。总之,一方面由于工业生产的发展对焊接技术提出了高的要求,另一方面由于科学技术的发展又为焊接技术的进步开拓了新的途径。

三、焊接在我国制造业中的战略地位和成就

1. 焊接在我国制造业中的战略地位

由于焊接结构具有重量轻、成本低、质量稳定、生产周期短、效率高、市场反应速度快等优点,焊接结构的应用日益增多。据不完全统计,目前全世界年产量 45% 的钢和大量的有色金属,都是通过焊接加工形成产品的。与世界工业发达国家一样,我国焊接加工的钢材总量也比其他加工方法多。

我国自实行改革开放政策 30 多年来,国民经济有了巨大的发展。钢产量从 1979 年的 3 178 万吨提高到 2007 年的近 4.9 亿吨,且连续 10 年成为世界上最大的钢铁生产和消费国,已超过了排名世界第二至四位的日本、美国和俄罗斯钢产量的总和,成为当之无愧的世界第一钢铁大国,这为大量采用钢结构提供了物质基础。近几年来,我国在大型焊接钢结构的开发与应用方面创造了新中国成立以来的最高水平,有的已成为世界第一。

2. 我国焊接制造的主要成就

例 1:长江三峡水利工程

三峡水电站的水轮机转轮,直径 10.7 m,高 5.4 m,重达 440 t,为世界最大、最重的不锈钢焊接转轮,转轮分别由上冠、下环和 13 个或 15 个叶片焊接而成,每个转轮需要消耗 12 t 焊丝;三峡水电站的发电机定子座,直径 22 m,高 6 m,重 832 t,是我国焊接的最大钢结构机座;三峡水电站的蜗壳,进水口直径 12.4 m,总重量 750 t,为世界最大、最重的焊接蜗壳。

例 2:西气东输工程

从新疆维吾尔自治区塔里木盆地的轮南到上海的输气管线,全长约 4 212 km,采用 X70 钢,

直径 1 016 mm(40 英寸)的焊接螺旋管和焊接直缝管,这是我国铺设的第一条高强度钢的长距离管线。

例 3:桥梁和高层建筑

跨越长江的芜湖长江大桥,全长 10 km,主跨 312 m,是我国目前跨度最大的公路/铁路两用桥,采用 50 mm 厚的 14MnNbq 钢整体焊接箱型主梁;2003 年建成通车的上海卢浦大桥,为当时世界跨度最大的全焊钢结构拱桥,全长 3 900 m,跨度 550 m,用 3.4 万吨厚度为 30 ~ 100 mm 的细晶粒钢焊接而成;上海的金茂大厦是我国目前最高的摩天大楼,采用焊接钢结构框架,共有 88 层,高 420 m;北京国家大剧院,其椭圆形穹顶长轴 212.2 m,短轴 143.64 m,高 46.28 m,焊接钢结构的总重量达 6 475 t,为世界最大的穹顶;国家体育场——鸟巢 4.2 万吨的钢铁身躯上没有一处螺栓螺母,通体采用专为鸟巢冶炼的厚度为 10 ~ 110 mm 的 Q460E 钢焊接而成,鸟巢的屋顶距离地面近 70 m,焊缝全长达 30×10^4 m。

例 4:造船业

我国造船业的总吨位从 1985 年的 50 万吨,提高到 2005 年的 1 200 万吨,占世界造船总量的 18%,成为世界第三造船大国。

我国建造的最大载重量之一的 30 万吨超大型原油船,长 333 m,宽 58 m;还建造了最大的半冷半压液化气船,总长 154.98 m,宽 23.10 m,载重量 17 900 t,其中 3 个液态货罐采用了厚度为 30 ~ 35 mm 的 13MnNi63 低温钢焊接而成,工作温度为 $-48\text{ }^{\circ}\text{C}$,总容积 $16\,500\text{ m}^3$ 。

例 5:压力容器

建成了总重量达千吨级、壁厚 280 mm 的大型热壁加氢反应器。焊接制造了 600 MW 热电站锅炉,其汽包长 30 m,壁厚 203 mm,重 250 t。

例 6:航空航天业

建成了国内最大的空间环境模拟装置,它是一个大型不锈钢整体焊接结构,主舱是一个直径 18 m、高 22 m 的真空容器,辅舱直径为 12 m,我国发射的“神舟”号载人飞船都曾在这个模拟舱中进行过试验;国产 J-11 飞机上的全焊钛合金重要承力结构件的总重量达到飞机机体重量的 15%;“神舟”号载人飞船和长征系列运载火箭的燃料箱都是全焊铝合金结构。

上述的一些大型结构例子都是我国近年来焊接的最大、最重、最长、最高、最厚、最新的具有代表性的重要产品。它们的成功制造表明我国焊接技术水平有了明显的提高,焊接在国民经济建设和社会发展中发挥着无可替代的重要作用。

我国的制造企业已经在采用诸如电子束焊、激光焊、激光钎焊和激光切割、激光与电弧复合热源焊、单丝或双丝窄间隙埋弧焊、四丝高速埋弧焊、双丝脉冲气体保护焊、等离子弧焊、精细等离子弧切割、数控切割系统、机器人焊接系统、焊接柔性生产线,变极性焊接电源和全数字化焊接电源等,甚至目前在国际上比较热门的搅拌摩擦焊技术,也已应用到生产上,并已有所创新。焊接技术发展到现在,几乎所有部门(如机械制造、石油化工、交通能源、冶金、电子、航空航天等)都离不开焊接技术。因此可以这样说,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之一,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。

四、本课程的内容和学习方法

本课程是高等职业院校焊接技术及自动化专业、材料成型与控制技术专业(焊接方向)以及

与焊接有关的专业教学中的一门主干专业课。在学习本课程之前,应先修完电工与电子技术、机械设计基础、金属学与热处理、熔焊原理及金属材料焊接性等课程,并进行过热加工实习。

本课程的任务是使学生掌握有关焊接方法与设备的基础理论、各种焊接方法的原理、焊接设备、焊接材料、焊接工艺以及有关的基本操作技能。学生通过学习,能够根据工程的实际需要,选用适宜的焊接方法,选用和调试设备,选用焊接材料以及制订焊接工艺,初步具备分析和解决焊接生产实际问题的能力。

1. 本课程的内容

- 1) 常用典型焊接设备的构成、原理特点及基本操作方法。
- 2) 各类基本焊接方法的焊接过程本质、特点以及合理的应用范围。
- 3) 各类基本焊接方法中影响焊接质量的焊接工艺参数及其合理选择和控制。

在图0-3列出的焊接方法中目前应用最为广泛的焊接方法是电弧焊,因此本书讲述的焊接方法与设备将以各类电弧焊方法作为中心内容来讨论。电阻焊是较为重要的焊接方法,本书安排了一章进行讨论。钎焊、电子束焊、激光焊、摩擦焊、电渣焊、扩散焊、爆炸焊等方法的原理比较特殊,并都颇有发展前途或在某些工业部门中有一定的应用价值,但其应用面较窄,因而本书将其合并在一起,专门安排一章加以论述。还有一些焊接方法,例如气焊等在某些工业部门中有一定的应用价值,但考虑到这些方法的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,本书不再一一详述。对于热切割、堆焊、喷涂等相近的加工方法,本书也在必要的地方简述了它们的特点和应用。

2. 学生在学完本课程后应达到的要求

- 1) 了解电弧的物理本质和电弧的工艺特性,了解焊丝和母材的熔化特性,掌握熔滴过渡的主要形式和焊缝形成的基本规律。
- 2) 了解常用电弧焊设备的组成,具有正确使用和维护电弧焊设备的能力。
- 3) 掌握各种常用电弧焊方法的本质、特点及应用范围,熟悉其影响质量的因素和保证质量的措施。
- 4) 了解电阻焊的本质、特点及其应用范围。
- 5) 能正确选择焊接方法和工艺参数,正确分析常见缺陷产生的工艺原因,并能提出解决的方法。
- 6) 了解焊接新方法、新设备的发展情况,具有进一步自学和应用这些新方法、新设备的能力。

概括地说,就是通过对本课程的学习掌握主要焊接方法的原理、焊接质量的控制以及常用设备的使用维护这三个方面的有关知识,以达到正确应用的目的。

3. 对本课程学习方法的建议

“焊接方法与设备”是焊接专业的主要专业课教材之一,也是一门实践性很强的课程,因此学习本课程时应与其他课程和其他教学环节(如实习、课程设计等)配合,特别注意理论联系实际,培养分析问题和解决实际问题的能力,即不但应该注意学好教材本身所介绍的内容,还要注意掌握分析各种焊接方法时的思路,学会分析工艺现象,研究工艺问题,掌握设备的使用维护知识,并且应特别重视操作环节,才会有更好的学习效果。



测 试 题

1. 什么是焊接？实现焊接的适当的物理化学过程指的是什么？
2. 焊接方法与其他连接方法相比其优越性是什么？
3. 焊接方法怎样分类？熔焊、压焊、钎焊各有什么特点？
4. 我国近年来焊接的主要成就有哪些？

第一章 电弧焊基础知识

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。它以电弧为能源,可有效而简便地把弧焊电源输送的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。

第一节 焊接电弧

学习目标	鉴定标准	教学建议
1. 了解电弧的物理本质,知道电弧中带电粒子的产生过程; 2. 掌握电弧的导电特性、静特性、最小能量消耗特性、热特性和力学特性等	应知:1. 电弧的特性; 2. 磁偏吹及其减小的措施	部分内容最好采用多媒体教学

一、焊接电弧的物理基础

1. 电弧及其电场强度分布

电弧是一种气体放电现象,它是带电粒子通过两电极之间气体空间的一种导电过程,如图 1-1 所示。

气体导电不同于金属导电,不遵守欧姆定律,而是呈现出一个很复杂的关系,如图 1-2 所示。

在不同的条件下和不同的电流区间,导电机构明显不同。在电流较小时,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(如加热、光照射等)来产生,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,这种气体放电只有在开始时需要外加措施产生带电粒子,进行诱发(通常称为“点燃”),一旦放电开始,即使取消外加诱发措施,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。与其他气体放电形式相比,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,可以将电能转换成热能、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。

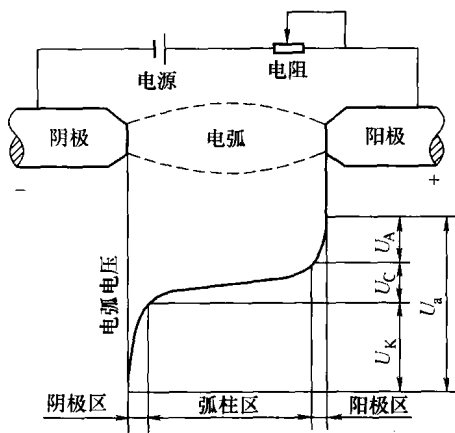


图 1-1 电弧及其电场强度分布示意图

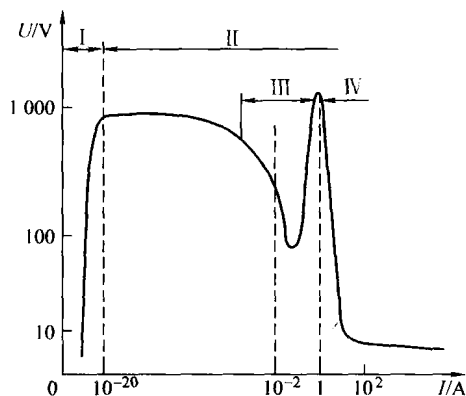


图 1-2 气体导电的伏安特性

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

正常状态的气体由中性的分子或原子组成,不含带电粒子,虽然它们可自由移动,但不能在电场作用下产生定向运动,因而不导电,要使正常状态下的气体导电,必须有一个产生带电粒子的过程。

2. 带电粒子的产生

电弧两极间带电粒子产生的来源有:中性气体粒子的电离、金属电极发射电子、负离子产生等。其中气体电离和阴极发射电子是电弧中产生带电粒子的两个基本物理过程,同时伴随解离、激励、扩散、复合、负离子的产生过程。

(1) 气体的电离

1) 电离与激励。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。气体电离的实质是中性气体粒子(分子或原子)吸收足够的外部能量,使得分子或原子中的电子脱离原子核的束缚而成为自由电子和正离子的过程。使中性气体粒子失去第一个电子所需的最小外加能量称为第一电离能(单位为 eV),失去第二个电子所需的能量称为第二电离能,依此类推。电弧焊中的气体粒子电离现象主要是一次电离。常用电离电位表示气体电离的难易。与气体其他性能(解离性能、热物理性能)综合影响电弧稳定性。几种气体同时存在时,带电粒子主要由低电离电位气体提供。如氮气和氩气的混合气体,氩气的电离电位低,易使电弧稳定。

电离能通常以 eV(电子伏)为单位。1 eV 就是使 1 个电子通过电位差为 1 V 两点间所需作的功,其数值为 1.6×10^{-19} J。常把以 eV 为单位的能量转换为数值上相等的电离电位来表示。电弧气氛中常见气体粒子的电离电位见表 1-1。

表 1-1 常见气体粒子的电离电位

气体粒子	电离电位/V	气体粒子	电离电位/V
H	1.35	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(22.5,40,47,68)	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……电离电位。

使中性粒子中的电子从较低能级转移到较高能级但未完全脱离原子或分子,称为激励。使中性粒子激励所需的最低外加能量称为激励能,若以 V(伏)为单位则称为激励电压。

激励状态是一种不稳定状态,继续接受能量可电离,或以辐射方式或与其他粒子碰撞将能量传递出去而恢复到稳定状态。

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位和激励电压都是固定数值。

2) 电离的种类。电弧中气体粒子的电离因外加能量种类的不同可分为三类:热电离、场致电离和光电离。

① 热电离。气体粒子受热的作用而产生电离的过程称为热电离。它实质上是由于气体粒子的热运动形成频繁而激烈的碰撞产生的一种电离过程。

电弧中带电粒子的多少对电弧的稳定起着重要作用。单位体积内被电离的粒子数与气体电离前粒子总数的比值称为电离度,用 x 表示,即

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

热电离的电离度与温度、气体压力及气体的电离电位有关。随着温度的升高,气体压力的减小及电离电位的降低,电离度随之增加,电弧中带电粒子数增加,电弧的稳定性增强。

② 场致电离。带电粒子从电场中获得能量,通过碰撞而产生电离的过程称为电场作用下的电离,即场致电离。

在普通焊接电弧中,因弧柱的温度一般在 5 000 ~ 30 000 K 的范围内,而电场强度仅为 10 V/cm 左右,所以在弧柱区热电离是产生带电粒子的主要途径,电场作用下的电离则是次要的。在电弧的阴极压降区和阳极压降区,电场强度可达 $10^5 \sim 10^7$ V/cm,远高于弧柱区,会产生显著的场致电离现象。

由上述分析可知,热电离和场致电离本质上都属于碰撞电离。在碰撞过程中,由于电子的质量远小于其他气体粒子,速度高,动能大,因而当其与中性气体粒子碰撞时,几乎可以将其全部动能传递给中性粒子而转化为中性粒子的内能(这种碰撞称为非弹性碰撞),使中性粒子电离或激励。因此,电弧中通过碰撞传递能量使中性气体粒子电离的过程中,电子的作用是主要的。

③ 光电离。中性粒子接受光辐射作用产生的电离。每种气体都有一个产生光电离的临界波长,小于它才能产生光电离。

电弧的光辐射波长在 170 ~ 500 nm(红外线、可见光及紫外线),只有 K、Na、Ca、Al 等蒸气能直接被电离。因此,光电离是电弧中产生带电粒子的一个次要途径。

(2) 阴极电子发射

在电弧焊中,电弧气氛中的带电粒子一方面由气体粒子的电离产生,另一方面则由金属电极的电子发射获得。两者都是电弧产生和维持不可缺少的必要条件。

金属电极表面受到外加能量的作用,使其内部的电子冲破电极表面的束缚而飞到电弧空间的现象称为电子发射。从阴极发射出来的电子在电场作用下参加电弧导电过程,向弧柱提供所需电子流。

电子从阴极表面逸出需要能量,使一个电子从金属表面飞出所需的最低能量称为逸出功(W_w),单位是 eV。因电子电量为常数 e ,故逸出功常用逸出电压 U_w 来表示, $U_w = W_w/e$,单位为 V。逸出功的大小与材料种类、金属表面状态及表面氧化物情况有关,表 1-2 列出了几种金属材料的逸出功。

表 1-2 几种金属材料的逸出功

金属种类		W	Fe	Al	Cu	K	Ca	Mg
逸出功/eV	纯金属	4.54	4.48	4.25	4.36	2.02	2.12	3.78
	表面有氧化物		3.92	3.9	3.85	0.46	1.8	3.31

根据外加能量形式不同,电子发射可分为热发射、场致发射、光发射和粒子碰撞发射四种类型:

1) 热发射。由于金属表面受热作用,使其内部的自由电子热运动加剧,当自由电子的动能大于逸出功时,则飞出金属表面参加电弧的导电过程。电子从金属表面逸出时要带走热量,对金