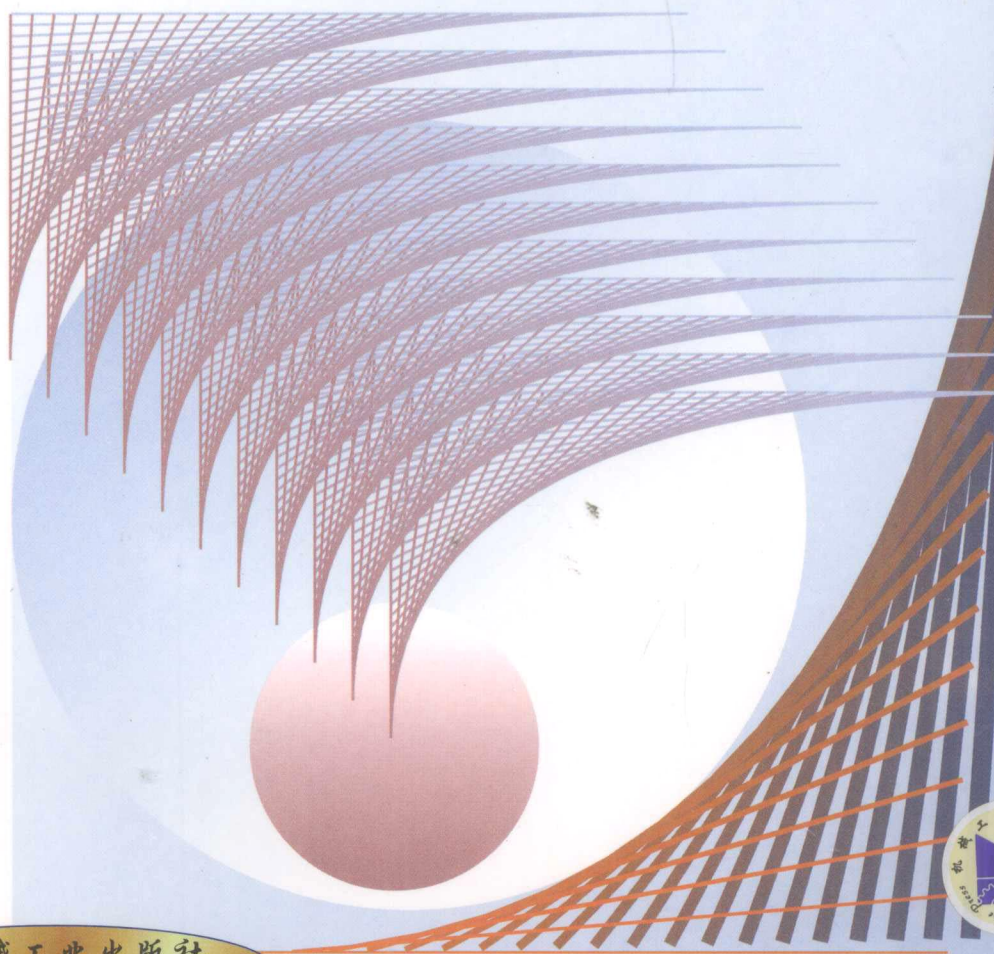


职业技术学院规划教材

焊接方法与设备

雷世明 主编



机械工业出版社
China Machine Press



本书主要讲述各种常用焊接方法的过程本质、质量控制以及相应焊接设备的构成及工作原理。全书共分七章：第一章集中介绍电弧焊的一些共性内容；第二章至第六章系统介绍埋弧焊、熔化极气体保护焊、钨极惰性气体保护焊、等离子弧焊与切割以及电阻焊的基本原理、特点和应用；第七章则对电渣焊、螺柱焊、摩擦焊、高能密度焊、钎焊等作了简要介绍。本书还给出了大量较实用的焊接工艺参数供选用。本书在每章末均附有复习思考题。

本书为职业技术学院焊接专业教材，也可供从事焊接工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

焊接方法与设备/雷世明主编. - 北京: 机械工业出版社, 2000.5 (2008.1重印)
职业技术学院规划教材
ISBN 978-7-111-06643-9

I. 焊… II. 雷… III. ①焊接工艺-中等专业教育-教材
②焊接设备-高等职业教育-教材 IV. TG4

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第70464号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
责任编辑: 崔占军 董连仁 版式设计: 张世琴
责任校对: 孙志筠 封面设计: 姚毅 责任印制: 杨曦
成都新华印务有限责任公司印刷
2008年1月第1版 第8次印刷
184mm×260mm · 14.25印张·342千字
24 001-27 000册
标准书号: ISBN 978-7-111-06643-9
定价: 19.00元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
销售服务热线电话: (010) 68326294
购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643
编辑热线电话: (010) 88379182
封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是根据高等职业技术教育的培养目标,并参照 1996 年 3 月修订并经原机械部教育司审定的焊接专业教学计划和课程教学大纲编写的。

本书主要讲述各种常用焊接方法的过程本质、质量控制以及相应焊接设备的构成和工作原理,并对焊接方法的新发展作了概括介绍。全书共分七章:为便于讨论,先在第一章集中介绍电弧焊及其发展中的一些共性的内容,如电弧的热源及力源特征、焊丝的熔化和熔滴过渡、母材熔化和焊缝成形规律等;在第二章至第五章中系统介绍埋弧焊、钨极惰性气体保护焊、熔化极气体保护焊、等离子弧焊等弧焊方法与设备;最后两章是为了拓宽专业知识,其中第六章主要讲述电阻焊的特点、原理及应用,第七章则对电渣焊、螺柱焊、电子束焊、激光焊、摩擦焊以及钎焊等焊接方法作了简要介绍。

根据本专业的培养目标和学生的年龄、知识特点,本书在取材上注意理论联系实际,叙述上注重深入浅出。全书以目前应用最广泛的电弧焊方法为讨论的主要内容,紧密结合生产实际,着重讲述常用的焊接方法应用中的基本理论和实践问题,并列出大量较实用的焊接条件以供选用。每章末均附有思考题供复习之用。

本书由雷世明主编,西南交通大学屈金山担任主审。本书第一章由叶志平编写;第三章由殷荣幸编写;第四章由陈云祥编写;第五章由李荣雪编写;第六章由邓洪军编写;第七章由王新民编写;雷世明编写其余部分并对全书统稿。

在编写过程中,本书参考了高等学校和大专的同类教材、教学参考书以及部分专业工具书。在此向有关的编者一并致谢。

由于编者知识水平所限,本书一定会有疏漏和欠妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

目 录

前 言	
绪 论	1
一、焊接在现代工业中的地位及发展概 况	1
二、焊接的本质及分类	2
三、本教材的内容和学习方法	3
复习思考题	4
第一章 电弧焊基础知识	5
第一节 焊接电弧	5
一、焊接电弧的物理基础	5
二、焊接电弧的导电特性	8
三、焊接电弧的最小能量消耗特性 (最小电压原理)	9
四、焊接电弧的热特性	9
五、焊接电弧的力学特性	11
六、焊接电弧的稳定性	14
第二节 焊丝的熔化与熔滴过渡	17
一、焊丝的加热和熔化特性	17
二、影响焊丝熔化速度的因素	18
三、熔滴上的作用力	19
四、熔滴过渡的主要形式及特点	20
第三节 母材熔化与焊缝成形	22
一、焊缝形成过程	22
二、焊缝形状与焊缝质量的关系	23
三、焊接工艺参数对焊缝成形的影响	24
四、焊缝成形缺陷及产生原因	26
复习思考题	28
第二章 埋弧焊	29
第一节 埋弧焊的原理及特点	29
一、埋弧焊的工作原理	29
二、埋弧焊的特点	30
三、埋弧焊的应用范围	31
第二节 埋弧焊设备	32
一、埋弧焊机的功能和分类	32
二、埋弧焊机的自动调节原理	32
三、典型埋弧焊机	38
第三节 埋弧焊的焊接材料与冶金 过程	46
一、埋弧焊的焊接材料及选用	46
二、埋弧焊的冶金过程	50
第四节 埋弧焊工艺	53
一、焊前准备	53
二、焊接工艺参数的影响及选择	54
三、埋弧焊技术	58
四、埋弧焊的常见缺陷及防止方法	66
第五节 埋弧焊的其它方法	67
一、辅加填充金属的埋弧焊	67
二、多丝埋弧焊	68
三、带极埋弧焊	69
四、窄间隙埋弧焊	70
复习思考题	71
第三章 熔化极气体保护焊	72
第一节 熔化极气体保护焊的分类及 应用	72
一、熔化极气体保护焊的分类及特点	72
二、熔化极气体保护焊的应用	73
第二节 熔化极气体保护焊设备	73
一、焊接电源	73
二、送丝系统	74
三、焊枪	75
四、供气和水冷系统	77
五、控制系统	77

六、典型焊机电路	78	一、焊接电源	116
第三节 熔化极惰性气体保护焊		二、引弧及稳弧装置	118
(MIG 焊)	82	三、焊枪	121
一、MIG 焊的特点	82	四、供气和水冷系统	124
二、MIG 焊的保护气体和焊丝	82	五、控制系统	125
三、MIG 焊工艺	83	六、典型焊机介绍	125
第四节 熔化极活性混合气体		七、常见故障及排除	127
保护焊 (MAG 焊)	89	第四节 钨极惰性气体保护焊工艺	128
一、MAG 焊的特点	89	一、气体保护效果	128
二、MAG 焊常用活性混合气体及其适用		二、焊前准备	131
范围	90	三、工艺参数的影响及选择	132
三、MAG 焊工艺	91	第五节 钨极惰性气体保护焊的其它	
第五节 二氧化碳气体保护焊		方法	138
(CO ₂ 焊)	92	一、脉冲钨极氩弧焊	138
一、CO ₂ 焊的特点	92	二、钨极氩弧点焊	141
二、CO ₂ 焊用的气体和焊丝	96	三、热丝钨极氩弧焊	142
三、CO ₂ 焊工艺	98	复习思考题	143
第六节 熔化极气体保护焊的其它		第五章 等离子弧焊与切割	144
方法	104	第一节 等离子弧与等离子弧	
一、脉冲熔化极气体保护焊	104	发生器	144
二、窄间隙活性混合气体保护焊	105	一、等离子弧	144
三、药芯焊丝 CO ₂ 气体保护焊	106	二、等离子弧的特性及应用	144
复习思考题	108	三、等离子弧发生器	147
第四章 钨极惰性气体保护焊		四、双弧现象及其影响因素	150
(TIG 焊)	109	第二节 等离子弧焊	151
第一节 钨极惰性气体保护焊的		一、等离子弧焊的基本方法及应用	151
原理及特点	109	二、等离子弧焊设备	152
一、TIG 焊的基本原理	109	三、等离子弧焊工艺	152
二、TIG 焊的分类及特点	109	四、等离子弧堆焊及喷涂简介	156
三、TIG 焊的应用	110	第三节 等离子弧切割	157
第二节 钨极惰性气体保护焊的		一、等离子弧切割原理及特点	157
电流种类和极性	110	二、等离子弧切割设备	158
一、直流 TIG 焊	110	三、等离子弧切割工艺	159
二、交流 TIG 焊	113	四、其它等离子弧切割方法简介	162
第三节 钨极惰性气体保护焊设备	116	复习思考题	163
		第六章 电阻焊	164

第一节 电阻焊的分类及特点	164	第七章 其它焊接方法	196
一、电阻焊的实质	164	第一节 电渣焊	196
二、电阻焊的分类	164	一、电渣焊的原理及特点	196
三、电阻焊的特点	167	二、电渣焊的分类	197
四、电阻焊的应用	168	三、电渣焊工艺	199
第二节 电阻焊的基本原理	168	第二节 螺柱焊	202
一、电阻热的产生及影响产热因素	168	一、螺柱焊的特点及应用	202
二、热平衡及温度分布	170	二、电弧螺柱焊	202
三、焊接循环	171	三、电容储能螺柱焊	203
四、焊接电流的种类和适用范围	172	第三节 高能量密度焊	204
五、金属电阻焊时的焊接性	172	一、电子束焊	204
第三节 点焊、凸焊和缝焊	172	二、激光焊	208
一、点焊	172	第四节 摩擦焊	210
二、凸焊	182	一、摩擦焊的原理及分类	210
三、缝焊	184	二、摩擦焊的特点	211
第四节 电阻对焊与闪光对焊	187	三、摩擦焊工艺	212
一、对焊的特点、接头形式及应用	187	第五节 钎焊	214
二、电阻对焊	187	一、钎焊的原理及优缺点	214
三、闪光对焊	189	二、钎焊的分类	214
四、对焊设备简介	193	三、钎焊工艺	214
五、对焊接头常见缺陷及防止	194	复习思考题	218
复习思考题	195	参考文献	218

绪 论

一、焊接在现代工业中的地位及发展概况

(一) 焊接在现代工业中的地位

在现代工业中，金属是不可缺少的重要材料。高速行驶的汽车、火车、载重万吨至几十万吨的轮船、耐腐蚀的化工设备以至宇宙航行工具等都离不开金属材料。在这些工业产品的制造过程中，需要把各种各样的加工好的零件按设计要求连接起来制成产品，焊接就是将这些零件连接起来的一种加工方法。

在工业生产中采用的连接方法主要有可拆连接和不可拆连接两大类。螺钉、键、销钉等连接方式属于可拆连接，它们通常不用于制造金属结构，而是用于零件的装配和定位工作中。不可拆连接主要有铆接、焊接和粘接等几种方式，它们通常用于金属结构或零件的制造中。其中铆接应用较早，但它工序复杂、结构笨重、材料消耗也较大，因此，现代工业中已逐步被焊接所取代。粘接虽然工艺简单，而且在粘接过程中对被粘材料的组织和性能不产生任何不良影响，但是其接头强度一般较低。相反，焊接方法不但易于保证焊接结构等强度的要求，而且相对来说工艺比较简单，加工成本也比较低廉，所以焊接方法得到了广泛应用和飞速发展。据不完全统计，目前全世界年产量45%的钢和大量有色金属，都是通过焊接加工形成产品的。特别是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，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，它是衡量一个国家科学技术先进程度的重要标志之一。

(二) 焊接方法的发展概况

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作助熔剂，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，已应用锡焊和银焊来焊接了，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焊方法。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，并且仍处于继续发展之中。

随着工业生产的发展，对焊接技术提出了多种多样的要求。如对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；从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；从焊接材料的选择上，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。为适应我国四化建设的需要，相信焊接技术必将得到更迅速的发展，并在工业生产中发挥出更重要的作用。

二、焊接的本质及分类

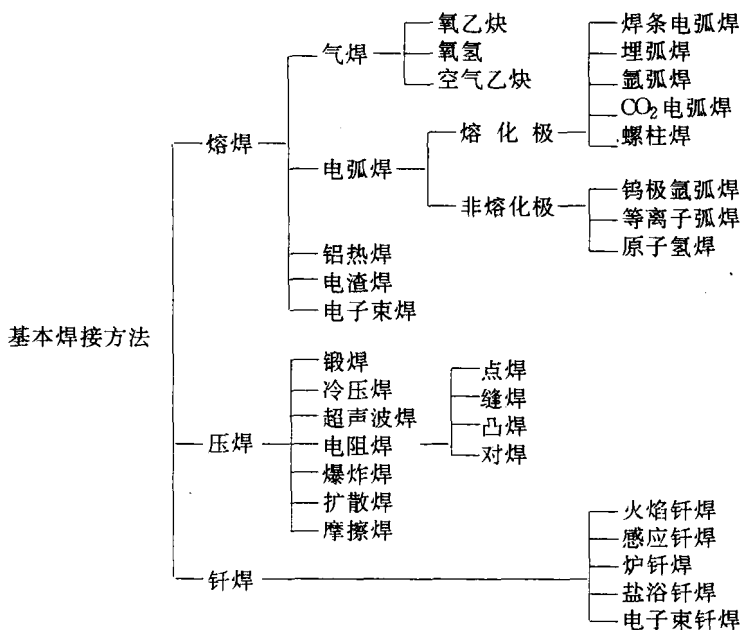
(一) 焊接及其本质

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（工件）产生原子间结合力而连接成一体连接方法。被连接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连接，因此本书主要讨论的也是金属的焊接方法。

金属等固体之所以能保持固定的形状是因为其内部原子间距（晶格距离）十分小，原子之间形成了牢固的结合力。要把两个分离的金属工件连接在一起，从物理本质上来看就是要使这两个工件连接表面上的原子拉近到金属晶格距离（即 $0.3 \sim 0.5\text{nm}$ 或 $3 \sim 5\text{\AA}$ ）。然而，在一般情况下材料表面总是不平整的，即使经过精密磨削加工，其表面平面度仍比晶格距离大得多（约几十微米）；另外，金属表面总难免存在着氧化膜和其它污物，阻碍着两分离工件表面原子间的接近。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，使两个分离工件表面的原子接近到晶格距离而形成结合力。这些物理化学过程，归结起来不外乎是用各种能量加热和用各种方法加压两类。

(二) 焊接方法的分类及特点

目前，在工业生产中应用的焊接方法已达百余种。根据它们的焊接过程特点可将其分为熔焊、压焊和钎焊三大类，每大类又可按不同的方法细分为若干小类，如下所示：



1. 熔焊 将两被焊工件局部加热并熔化,以克服固体间阻碍结合的障碍,然后冷却结晶成为一体接头的方法称为熔焊。实现熔焊的关键是要有一个能量集中、温度足够高的局部热源。若温度不够高,则无法使材料熔化;而能量集中程度不够,则会加大热作用区的范围,徒然增加能量损耗。按所使用热源的不同,熔焊可分为以下一些基本方法:电弧焊(以气体导电时产生的电弧为热源)、气焊(以乙炔或其它可燃气体在氧中燃烧的火焰为热源)、铝热焊(以铝热剂的放热反应为热源)、电渣焊(以熔渣导电时产生的电阻热为热源)、电子束焊(以高速运动的电子流撞击工件表面所产生的热为热源)、激光焊(以激光束照射到工件表面而产生的热为热源)等若干种。

在熔焊时,为了避免熔化金属在高温时与空气相互作用而使性能恶化,在焊接区要实施保护。保护的方法通常有抽真空、通以保护气体和造渣三种。此外,电弧焊方法还以电极是否熔化为特征分为熔化电极电弧焊和非熔化电极电弧焊两大类。

2. 压焊 将被焊工件在固态下通过加压(加热或不加热)措施,克服其连接表面的不平度和氧化物等杂质的影响,使其分子或原子间接近到晶格之间的距离,从而形成不可拆连接接头的一类焊接方法,也称为固相焊接。为了降低加压时材料的变形抗力,增加材料的塑性,压焊时在加压的同时常伴随加热措施。

按所施加焊接能量的不同,压焊的基本方法可分为:电阻焊(包括点焊、缝焊、凸焊、对焊)、摩擦焊、超声波焊、扩散焊、冷压焊、爆炸焊和锻焊等。

3. 钎焊 用某些熔点低于被连接物体材料熔点的金属(即钎料)作为连接的媒介,利用钎料与母材间的扩散将两被焊工件连接在一起的焊接方法称为钎焊。钎焊时,通常要清除焊件表面污物,增加钎料的润湿性,这就需要采用钎剂。钎焊时也必须加热熔化钎料(但工件不熔化)。按热源的不同可分为火焰钎焊(以乙炔在氧中燃烧的火焰为热源)、感应钎焊(以高频感应电流流过工件产生的电阻热为热源)、电阻炉钎焊(以电阻炉辐射热为热源)、盐浴钎焊(以高温盐溶液为热源)和电子束钎焊等。也可按钎料的熔点不同分为硬钎焊(熔点在 450°C 以上)和软钎焊(熔点在 450°C 以下)两类。钎焊时通常要进行保护,如抽真空、通保护气体和使用钎剂等。

三、本教材的内容和学习方法

本教材是根据新修订的中专四年制焊接专业《焊接方法与设备》课程教学大纲编写的,是介绍各种焊接方法及其所用设备的一门专业课教材。

本教材讲述的主要内容为:

- 1) 各类基本焊接方法的过程本质、特点、接头形成条件以及合理的使用范围。
- 2) 各类基本焊接方法中影响焊接质量的工艺参数及其合理选择和控制。
- 3) 常用典型焊接设备的构成、工作原理及操作使用。

概括地说,就是通过本教材的学习应该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,以达到正确选用的目的。

“焊接方法与设备”课程是以物理学、电工及电子学、机械零件和金属学等课程为基础,以弧焊电源、熔焊原理课为前导的专业课程。因此在学习本教材之前,应先修完上述课程,并进行过专业生产实习,积累必要的基础知识。只有将这些知识学以致用,融汇贯通,才能更扎实地学好本教材。

《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

此学习本教材时应与其它课程和其它教学环节（如实习、课程设计等）配合，特别注意理论联系生产实际，培养自己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，并且特别重视实验和操作环节，才会有更好的学习效果。

复习思考题

1. 什么是焊接？与其它连接方法相比其优越性是什么？
2. 焊接过程的物理本质是什么？
3. 焊接方法怎样分类？各有什么特点？
4. 如何才能学好本课程？

第一章 电弧焊基础知识

电弧焊是目前使用的焊接方法中最重要、也是最常用的一类。本章主要介绍电弧焊的一些基础知识,包括电弧的物理基础、焊丝熔化与熔滴过渡的特性、母材熔化与焊缝成型的基本规律等内容。

第一节 焊接电弧

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。两电极间存在一定的电极电位差,如图 1-1 所示。

电弧作为电弧焊的能量来源,能有效而简便地把弧焊电源输送的电能转换成热能和机械能,供焊接使用。电弧作为导体不同于金属导体,金属导电是通过金属内部自由电子的定向移动形成电流;而电弧导电时,电弧气氛中的电子、正离子、负离子都参与导电,过程要复杂得多。那么电弧中的带电粒子是如何产生的?导电过程又有哪些特点呢?

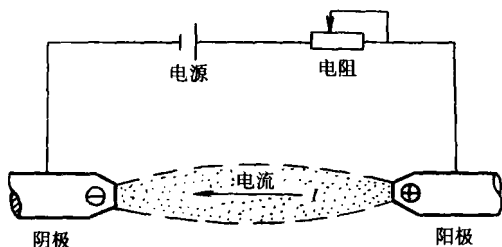


图 1-1 电弧示意图

一、焊接电弧的物理基础

众所周知,正常状态下的气体是不导电的,它是由中性气体分子或原子组成的。要使正常状态下的气体导电,首先必须使其产生带电粒子。电弧焊中,气体电离和阴极发射电子是电弧产生带电粒子的两个基本物理过程,同时也伴随着激励、解离、扩散、复合、负离子产生等过程。

(一) 气体电离

在外加能量作用下,使中性的气体分子或原子分离成电子和正离子的过程称为气体电离。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。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,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。电离能通常以电子伏(eV)为单位。1 电子伏就是指的 1 个电子通过电位差为 1 伏的两点间所需做的功,其数值为 $1.6 \times 10^{-19} \text{J}$ 。为了便于计算,常把以电子伏为单位的能量转换为数值上相等的电离电压来表示。电弧气氛中常见气体粒子的电离电压见表 1-1。

当其它条件(如气体的解离性能、热物理性能等)一定时,气体电离电压的大小反映了带电粒子产生的难易程度。电离电压低,表示带电粒子容易产生,有利于电弧导电;相反,电离电压高表示带电粒子难以产生,电弧导电困难。若电弧空间同时存在电离电压不同的几种气体,当受到外界能量的作用时,电离电压较低的气体粒子将先被电离,这种气体的存在对电弧的引燃和电弧的稳定燃烧起着重要的作用。

表 1-1 常见气体粒子的电离电压

气体粒子	电离电压/V	气体粒子	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, 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。

(二) 电离种类

根据外加能量来源的不同，气体电离种类可分为以下几种：

(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。

由气体分子运动理论可知：气体的温度越高，气体粒子（包括中性粒子、电子和离子）的运动越剧烈，即动能越大。气体粒子在高速的热运动过程中将频繁地发生相互碰撞，碰撞时粒子间发生能量的传递和转换，若粒子的运动速度足够快（即动能足够大），被碰撞粒子所接受的能量达到该粒子的电离能时，则将产生电离。由此可知，热电离实质上是由于粒子受热作用引起相互碰撞而产生的一种电离现象。

电弧中不仅含有中性气体粒子（分子或原子），同时也含有电子、正离子等多种粒子。在温度很高的电弧气氛中，所有粒子之间都存在相互碰撞的可能，但是由于电子的质量远小于气体分子、原子或离子等其它粒子的质量，因此，它的速度极快。当电子与其它中性粒子碰撞时，几乎可将其全部动能传递给被碰撞的中性粒子，转换为中性粒子的内能。

电弧中带电粒子数的多少对电弧的稳定起着重要作用。单位体积内电离的粒子数与气体电离前粒子总数的比值称作电离度，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压有关。随着温度的升高，气体压力的减小及电离电压的降低，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。热电离度 x 与温度 T 的关系如图 1-2 所示。

当电弧的气体介质为混合气体时，电离电压最低的气体粒子的电离度最大，其数量的多少将对提供电弧中的带电粒子起到非常重要的作用。因此，在实际焊接中，往往采取一些措施使电弧气氛中含有一定量的电离电压较低的物质，以得到更多的带电粒子，从而改善电弧的稳定性。

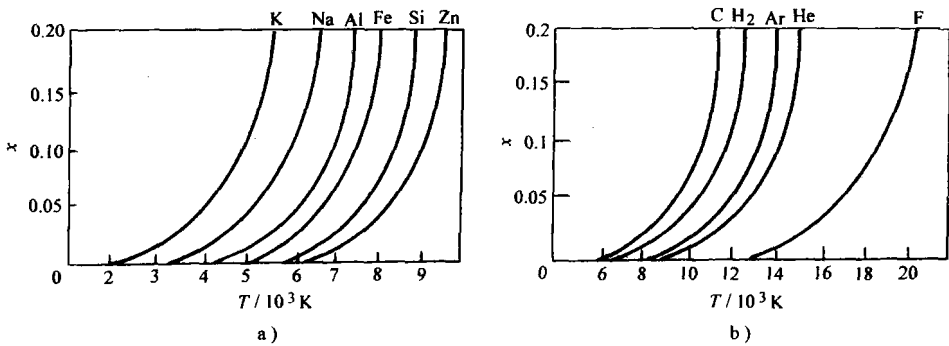


图 1-2 热电离的电离度 x 与温度 T 的关系

a) 金属蒸气 b) 气体元素

(2) 场致电离 在两电极间的电场作用下, 气体中的带电粒子被加速。当带电粒子的动能达到一定数值时, 有可能与中性粒子发生碰撞而使之产生电离, 这种电离称为场致电离。

在普通焊接电弧中, 因弧柱部分的电场强度较弱, 电子由电场作用所获得的动能比之由热作用所获得的动能小得多, 所以在弧柱中热电离是获得带电粒子的主要途径, 通过电场作用获得带电粒子是次要的。而在阴极区和阳极区, 电场强度远高于弧柱区, 会产生显著的电场作用下的电离现象。

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。在电弧气氛中, 通过电离产生的带电粒子在电弧空间不断地运动, 不断地与其它粒子相互碰撞, 并伴随着新的带电粒子的产生。

(3) 光电离 中性气体粒子受到光辐射的作用而产生的电离过程称为光电离。焊接电弧的光辐射只能对 K、Na、Ca、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。因此, 光电离只是电弧中产生带电粒子的一种次要途径。

(三) 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电离产生, 另一方面则由阴极电子发射获得。两者都是电弧产生和维持不可缺少的必要条件。

阴极表面受到一定的外加能量作用时, 阴极表面中的自由电子逸出的过程称为电子发射。电子从阴极表面逸出需要能量, 1 个电子从金属表面逸出所需要的最低外加能量称为逸出功 (W_w), 单位是电子伏。因电子电量为常数 e , 故通常用逸出电压 (U_w) 来表示, $U_w = W_w/e$, 单位为 V。逸出功的大小受电极材料种类及表面状态的影响。表 1-2 列出几种金属材料的逸出功。由表可见, 金属表面存在氧化物时逸出功减小。

表 1-2 几种金属的逸出功

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

根据外加能量形式的不同, 电子发射可分为以下四种类型:

(1) 热发射 阴极表面因受热的作用而产生的电子发射过程称为热发射。

热发射的强弱受材料沸点的影响。当采用高沸点的钨或碳作阴极材料时（其沸点分别约为 6000K 和 5000K，通常称为热阴极），电极可被加热到很高的温度（一般可达 3500K 以上），此时，通过热发射可为电弧提供足够的电子。当采用钢、铜、铝等低沸点材料作阴极时（其沸点分别为 3013K、2868K 和 2770K，通常称为冷阴极），阴极加热温度受材料沸点限制不可能很高，热发射能力较弱，必须依靠其它方式补充发射电子。热发射时，逸出的电子将从电极表面带走相当于逸出功的热量，对阴极表面产生冷却作用。

（2）场致发射 当阴极金属表面空间存在一定强度的正电场时，金属内部的电子将受到电场力的作用。当此力达到一定程度时电子便会逸出金属表面，这种电子发射现象称为场致发射。

电弧焊中采用冷阴极时，热发射能力不足，此时向电弧提供电子的主要方式是场致发射电子。

（3）光发射 当金属表面受到光辐射作用时，金属内的自由电子能量达到一定程度而逸出金属表面的现象称为光发射。光发射在阴极电子发射中居次要地位。

（4）粒子碰撞发射 电弧中高速运动的粒子（主要是正离子）碰撞金属表面时，把能量传递给金属表面的电子，使电子能量增加而逸出金属表面的现象称为粒子碰撞发射。

实际焊接过程中，上述几种电子发射形式常常是同时存在，相互补充。不同的条件下它们起的作用各不相同。

（四）电弧中的其它物理过程

电弧导电是个复杂的过程，电弧中不仅存在气体粒子电离和阴极电子发射现象，同时还存在激励、扩散、复合和负离子的产生等过程。它们对电弧的导电过程也存在一定的影响。

（1）激励 当中性气体粒子受到外加能量的作用，不足以使电子完全脱离原子或分子时，电子从较低的能级跃迁到较高的能级，使中性粒子处于一种不稳定的状态，称为激励。

（2）负离子的产生 在一定条件下，有些中性原子或分子能与电子结合形成负离子，从而使电弧导电能力及电弧稳定性下降。

（3）带电粒子的扩散 电弧中带电粒子，从密度高的地方向密度低的地方移动而趋向均匀的现象称为扩散。

（4）带电粒子的复合 电弧空间的正负带电粒子（正离子、负离子和电子），在一定条件下相遇而结合成中性粒子的过程称为复合。

二、焊接电弧的导电特性

焊接电弧由弧柱区、阴极区和阳极区三个区域组成，它们的导电特性在《弧焊电源》中已有论述，这里再作些简单介绍。

（一）弧柱区的导电特性

在不同的电弧焊方法中，尽管气体种类、电流大小和电弧受压缩程度不同，但有一点是相同的：即弧柱的温度总是较高，约为 5000~50000K，所以弧柱中的气体电离形式主要是热电离。

弧柱中的电流由向阴极运动的正离子流和向阳极运动的电子流组成。由于电子和正离子在同一电场中所受的电场力相同，而电子的质量远比正离子的质量小，因此电子的运动速度比正离子的速度要大得多，弧柱中的电流主要由电子流构成。

虽然弧柱中电子流和正离子流有很大的差别，但在每瞬间每单位体积中正、负带电粒子

的数目是相等的，因而使弧柱从整体上呈现电中性。

（二）阴极区的导电特性

阴极区是指靠近阴极的很小一个区域，在电弧中，它有两方面的作用：一方面向弧柱区提供电弧导电所需的电子流；另一方面接受由弧柱来的正离子流。由于电极材料种类等的不同，阴极区的导电特性也不同。

（三）阳极区的导电特性

阳极区与阴极区类似，在电弧中也起到两方面的作用：一方面接受从弧柱来的电子流；另一方面向弧柱提供正离子流。

（四）电极斑点

电极表面并非绝对平整，尤其当表面存在氧化膜或其它杂质时，其表面状态极不均匀。电弧电流通过电极时将集中在某些局部区域（点），这些区域的电流密度大、温度高，发出光亮的点，称为电极斑点。在阴极和阳极上的斑点分别称为阴极斑点和阳极斑点。

三、焊接电弧的最小能量消耗特性（最小电压原理）

在电弧焊过程中，若电弧稳定燃烧，则电弧的产热与散热处于动平衡状态。当电流和电弧周围条件（如气体介质种类、温度、压力等）一定时，稳定燃烧的电弧将自动选择一个确定的导电断面，使电弧的能量损耗最小，即电弧具有保持最小能量消耗的特性。

在电弧稳定燃烧时，电弧的产热量为 $U_a I = EIL$ （ E 为电弧电场强度， U_a 为电弧电压， I 为电弧电流， L 为电弧长度）与消耗的能量相平衡。当电弧电流和电弧长度为定值时，电场强度的大小即代表了电弧产热量的大小，因此，能量消耗最小时的电场强度最低，即在固定弧长上的电压最小，所以也称为最小电压原理。

电流和电弧周围条件一定时，如果电弧断面面积大于或小于其自动确定的断面，都会引起电场强度 E 增大，使消耗的能量增多，违反电弧的最小能量消耗特性。因为电弧断面增大时，电弧与周围介质的接触面增大，电弧向周围介质散失的热量增加，要求电弧产生更多的能量与之相平衡，即要求 EI 增加。而焊接电流 I 是一定的，只能是电弧电场强度 E 增加；反之，若电弧断面减小，则在 I 一定的情况下，电流密度 j 必然增加，导致 E 增大。所以说，电弧将自动确定一个断面，在这一断面下，使 EI 最小，即消耗的能量最小。

四、焊接电弧的热特性

（一）焊接电弧的产热特性

电弧是一种气体放电现象，在电弧焊中电弧把电能转换成焊接所需的热能和机械能。电弧三个区域的导电特性不同，因而产热特性也有所不同。

1. 弧柱的产热特性 弧柱气氛中的带电粒子有电子、正离子和负离子。由前面所述可知，弧柱中的导电任务绝大部分由电子来承担，所以弧柱中的热量也主要由电子的动能转换而来。电子在外加电场的作用下，宏观上由阴极向阳极移动，而在局部区域电子还不断地与其它粒子（中性粒子或离子）发生碰撞。因电子质量小、速度快、动能大、碰撞过程中电子的动能转换为被碰撞粒子的内能，使粒子温度升高，将电能转化成热能。

单位长度弧柱的电能为 EI ，它的大小决定了弧柱产热量的大小。当电弧处于稳定状态时，弧柱的产热与热损失处于动态平衡。当电弧电流一定时，单位长度弧柱产热量由 E 决定， E 的数值按最小电压原理自行调节。 I 一定， E 升高，则弧柱的产热量增加，弧柱温度升高，工件获得的热量也增加。根据这一特点，在实际焊接中往往采取措施使弧柱强迫冷却，电弧断面

减小， E 增大，从而获得能量更集中、温度更高的电弧。

普通的电弧焊，其弧柱部分的热量只有很少一部分传给填充材料和工件，大部分则通过对流等形式损失掉了。

2. 阴极区的产热特性 阴极区与弧柱区相比，长度短，且直接靠近电极或工件（由接线方法决定），所以阴极区产生的热量对电极或工件的影响更直接。阴极区的带电粒子由电子和正离子组成，其中正离子流所占比例很小，所产热量对阴极区的影响可忽略不计，只须考虑电子流在阴极区的产热作用。

阴极区提供的电子流与总电流 I 相近，这些电子是在阴极压降 U_K 的作用下逸出阴极表面并被加速的，获得总能量为 IU_K 。电子从阴极表面逸出时，带走相当于逸出功的能量，数值为 IU_w ，它对阴极起到冷却作用；电子流由阴极区进入弧柱区，带走与弧柱温度相应的热能 IU_T 。根据上述分析可得阴极区的产热为

$$P_K = I (U_K - U_w - U_T)$$

式中 P_K ——阴极区的产热总能量；

U_K ——阴极区压降；

U_w ——逸出电压；

U_T ——弧柱温度的等效电压。

所产热量主要用于对阴极的加热和阴极区的散热损失。焊接时，这部分能量可被用来加热填充材料或工件。

3. 阳极区的产热特性 阳极区的电流由电子流和正离子流两部分组成，因正离子流所占比例很小，可忽略不计，只考虑电子流的能量转换效应。到达阳极的电子能量由三部分组成：一部分是电子经阳极压降区被 U_A 加速而获得的动能 IU_A ；另一部分为电子从阴极逸出时吸收的逸出功 IU_w ；第三部分是从弧柱区带来的与弧柱温度相应的热能 IU_T 。因此阳极区的总产热量为

$$P_A = I (U_A + U_w + U_T)$$

式中 P_A ——阳极总产热量；

U_A ——阳极区压降。

所产热量主要用于对阳极的加热和散热损失。在焊接过程中可用于加热填充材料或焊件。

(二) 焊接电弧的热效率及能量密度

电弧焊的热能由电能转换而来，因此电弧的热功率可由下式表示：

$$P = IU_a$$

式中 U_a ——电弧电压， $U_a = U_K + U_C + U_A$ 。

所得热量并不能全部有效地用于焊接。其中一部分功率因对流、辐射及传导等损失掉了。用于加热、熔化填充材料及工件的电弧热功率称为有效热功率，表示为

$$P' = \eta P$$

式中， η 为有效热功率系数（热效率系数），它受焊接方法、焊接工艺参数、周围条件等因素的影响。表 1-3 为常用焊接方法的热效率系数。

表 1-3 各种电弧焊方法的热效率系数

焊接方法	η
焊条电弧焊	0.65~0.85
埋弧焊	0.80~0.90
CO ₂ 气体保护焊	0.75~0.90
熔化极氩弧焊	0.70~0.80
钨极氩弧焊	0.65~0.70

当其它条件不变时, η 随着电弧电压 U_a 的升高而降低。因电弧电压升高, 弧长增加, 通过对流、辐射等损失的弧柱热量增加。

单位面积上的有效热功率称为能量密度。能量密度在电弧轴线处最大, 从中心到周围逐渐降低。

(三) 电弧的温度分布

电弧各部分的温度分布受电弧产热特性的影响, 电弧组成的三个区域产热特性不同, 温度分布也有较大区别。

电弧温度的分布特点可从轴向和径向两个方面比较:

(1) 轴向 阴极区和阳极区的温度较低, 弧柱温度较高, 如图 1-3 所示。造成这一结果原因: 电极受材料沸点的限制, 加热温度一般不能超过其沸点; 而弧柱中的气体或金属蒸气不受这一限制, 且气体介质的导热特性也不如金属电极的导热性好, 热量不易散失, 故有较高的温度。阴极、阳极的温度则根据焊接方法的不同有所差别, 见表 1-4。

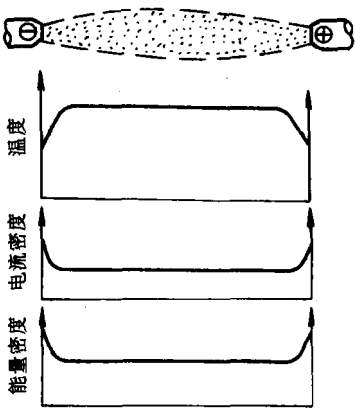


图 1-3 电弧温度、电流密度和能量密度的轴向分布

表 1-4 各种焊接方法的阴极与阳极温度比较

焊接方法	焊条电弧焊①	钨极氩弧焊	熔化极氩弧焊	CO ₂ 气体保护焊	埋弧焊
温度比较	阳极温度>阴极温度		阴极温度>阳极温度		

① 这里指酸性焊条; 若碱性焊条, 结论相反。

(2) 径向 电弧径向温度分布的特点是: 弧柱轴线上温度最高, 沿径向由中心至周围温度逐渐降低, 如图 1-4 所示。

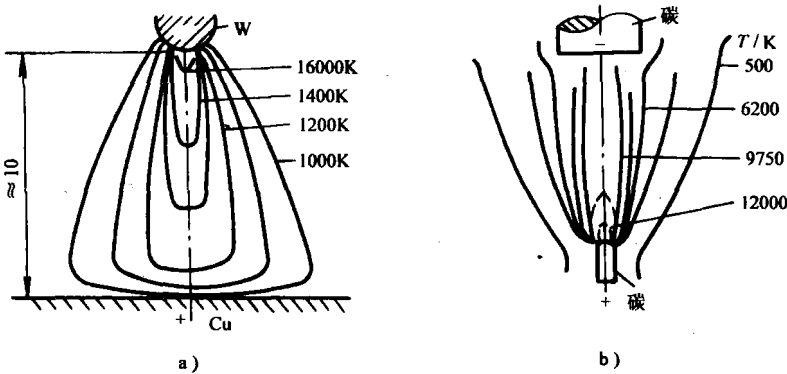


图 1-4 电弧温度分布示意图

a) W-Cu 电极之间电弧等温线 电流 200A, Ar 气电压 14.2V b) 200A 碳弧等温线

五、焊接电弧的力学特性

电弧在电弧焊中的作用之一是把电能转换为机械能, 机械能在电弧焊中以电弧力形式表现出来。电弧力对焊缝的熔深、熔滴过渡、熔池搅拌、焊缝成形及金属飞溅等有影响。电弧力主要包括电磁收缩力、等离子流力、斑点压力、熔滴冲击力及短路爆破力等。

(一) 电弧力类型及作用