

高 职 高 专 规 划 教 材

焊 接 方 法 与 设 备

国家机械职业教育热加工类专业教学指导委员会 组编

主 编	雷世明	
副主编	任廷春	
参 编	林文光	李 莉
	孙学杰	刘光云
	叶克力	
主 审	吕其兵	



机 械 工 业 出 版 社

本书是根据国家机械职业教育热加工类专业教学指导委员会焊接专业组 2002 年 7 月修订的高职高专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。全书共分十章: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,如电弧的热源及电源特征、焊丝的熔化和熔滴过渡、母材熔化和焊缝成形规律等;在第二章至第七章中系统介绍焊条电弧焊、埋弧焊、CO₂ 气体保护焊、熔化极惰性气体保护焊、钨极惰性气体保护焊、等离子弧焊等弧焊方法与设备;第八章、第九章则主要讲述电阻焊和钎焊的特点、原理及应用;最后一章是为了拓宽专业知识面,对电渣焊、螺柱焊、电子束焊、激光焊、摩擦焊以及高频焊等焊接方法作了简要介绍。本书着重讲述常用焊接方法应用中的基本理论和实践问题,并列出了大量较实用的焊接工艺参数以供选用,每章末均附有复习思考题。

本书为高等职业院校焊接专业规划教材,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,2004.1

高职高专规划教材

ISBN 7-111-13617-9

I. 焊... II. 雷... III. ①焊接工艺—高等学校:技术学校—教材
②焊接设备—高等学校:技术学校—教材 IV. TG4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 115150 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:张祖凤 责任编辑:何月秋 版式设计:张世琴

责任校对:韩 晶 封面设计: 责任印制:

北京中加印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16· 印张· 千字

0 001— 册

定价: 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010) 68993821、88379646

封面防伪标均为盗版

前 言

根据全国机械职业教育专业教学指导委员会关于“深化高等职业技术教育人才的改革，加强高职教材建设”的精神，结合市场需要，于2002年8月我们与机械工业出版社共同邀请了全国十几所开办焊接专业的高职高专院校召开了编写这套教材的启动会，在会上大家就焊接专业的课程体系、教材的编写目的和要求、教材书目，以及编写人员的分工进行了研讨，最终达成共识。

高等职业技术教育是我国高等教育的重要组成部分，是培养适应生产、建设、管理、服务于第一线需要的高等技术应用性专门人才的摇篮。高职学生应具有基础理论知识适度、技术应用能力强、知识面较宽、素质高等特点。我们应以“应用”为主旨和特征构建课程和教学内容体系，突出应用性、实践性的原则重组课程结构、更新教学内容。高职教学内容要突出基础理论知识的应用和实践能力的培养，基础理论教学要以应用为目的，以“必需、够用”为度；专业课教学要加强针对性和实用性。在此共识的基础上，我们组织广西机电职业技术学院、内蒙古工业大学、四川工程职业技术学院、包头职业技术学院、承德石油高等专科学校、沈阳职业技术学院、陕西工业职业技术学院、渤海船舶职业技术学院、湖南张家界航空工业职业技术学院、新疆机电职业技术学院、内蒙古机电职业技术学院等十余所高职院校编写了这套高职高专焊接专业规划教材。此套教材首批包括：《金属学与热处理》、《焊接结构生产》、《焊接方法与设备》、《焊接生产管理与检测》、《金属熔焊原理》、《金属材料焊接》、《焊接技能实训》、《热加工专业英语》。

本套教材根据2001年国家机械职业教育热加工类专业教学指导委员会和2002年4月、8月的高职高专焊接专业规划教材的专题会议精神，于2002年4月成立了教材编写委员会，2003年年初由各教材的主编、主审统稿，并进行初审，同年8月聘请了西南交通大学、内蒙古工业大学、沈阳工业大学、四川工程职业技术学院等院校的专家教授对此套教材进行了全面审核、定稿。

本套教材的编写以突出应用性、实践性的原则重组课程结构，破除原有各种课程的学科化倾向，删除与岗位群职业能力关系不大的内容，增加与职业能力关系有关的新技术、新工艺、新设备、新材料。课程内容紧紧扣住培养学生现场工艺实施的职业能力来阐述，将必需的理论知识点溶于能力培养过程中，注重实践教学，注重操作技能培养。本套教材深度适宜，文字简洁、流畅，深入浅出，非常适合高职学生学习。为与国际接轨，体现教材的先进性，本套教材采用了最新国家标准和国家施行的国际单位制。

本套教材在编写和审稿过程中，得到了各参编参审学校和许多兄弟院校领导及同仁的大力支持与热情帮助，在此一并表示衷心的感谢。

国家机械职业教育热加工类专业教学指导委员会

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

编 者 的 话

本书是根据国家机械职业教育热加工类专业教学指导委员会焊接专业组 2002 年 7 月修订的高职高专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。全书共分十章：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，如电弧的热源及电源特征、焊丝的熔化和熔滴过渡、母材熔化和焊缝成形规律等；在第二章至第七章中系统介绍焊条电弧焊、埋弧焊、CO₂ 气体保护焊、熔化极惰性气体保护焊、钨极惰性气体保护焊、等离子弧焊等弧焊方法与设备；第八章、第九章则主要讲述电阻焊和钎焊的特点、原理及应用；最后一章是为了拓宽专业知识，对电渣焊、螺柱焊、电子束焊、激光焊、摩擦焊以及高频焊等焊接方法作了简要介绍。

根据本专业的培养目标和高职高专学生的年龄、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，并列大量较实用的焊接工艺参数以供选用。每章末均附有复习思考题，供学生复习之用。

本书由雷世明主编，吕其兵主审。本书第二章由李莉编写，第四章由林文光编写，第五章由刘光云编写；第六章由孙学杰编写；第八章、第九章由任廷春编写，第十章由叶克力编写，雷世明编写了绪论、第一章、第三章和第七章，并对全书进行了统稿。

本书在编写和审稿过程中，除参编学校四川工程职业技术学院、西南交通大学、渤海船舶职业技术学院、内蒙古工业大学、兰州培黎石油学校、沈阳机电职业技术学院、广西机电职业技术学院的大力支持外，还得到了陕西工业职业技术学院、内蒙古机电职业技术学院、常州铁路机械学校、北京市机械工业学校、新疆机电职业技术学院、包头职业技术学院的大力支持，有关同志或提出编写建议或与会参加审阅，在此特向他们致谢。在本书的编写过程中，我们参考了一些高等学校的同类教材、教学参考书以及部分专业工具书，谨此一并致谢。

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	
编者的话	
绪论	1
一、焊接及其在现代工业中的地位	1
二、焊接方法分类及发展概况	2
三、本教材的内容和学习方法	3
复习思考题	5
第一章 电弧焊基础知识	6
第一节 焊接电弧	6
一、焊接电弧的物理基础	6
二、焊接电弧的导电特性	11
三、焊接电弧的工艺特性	13
第二节 焊丝的熔化与熔滴过渡	21
一、焊丝的加热和熔化特性	21
二、熔滴上的作用力	23
三、熔滴过渡的主要形式及特点	24
第三节 母材熔化与焊缝成形	27
一、焊缝形成过程	27
二、焊缝形状与焊缝质量的关系	28
三、焊接工艺参数对焊缝成形的影响	29
四、焊缝成形缺陷的产生及防止	31
复习思考题	33
第二章 焊条电弧焊	34
第一节 焊条电弧焊的原理及特点	34
一、焊条电弧焊的基本原理	34
二、焊条电弧焊的特点	34
第二节 焊条电弧焊设备及工具	35
一、对焊条电弧焊设备的要求	35
二、常用焊条电弧焊机简介	36
三、焊条电弧焊所用工具	38
第三节 焊条电弧焊工艺	40
一、焊接接头形式、坡口和焊缝	40
二、焊接工艺参数及选择	43
三、焊条电弧焊的基本操作技术	44
复习思考题	47
第三章 埋弧焊	48
第一节 埋弧焊的原理及特点	48
一、埋弧焊的焊接过程及原理	48
二、埋弧焊的特点	49
三、埋弧焊的分类及应用范围	50
第二节 埋弧焊的自动调节原理	51
一、埋弧焊的自动调节	51
二、熔化极电弧的自身调节系统	53
三、电弧电压反馈自动调节系统	54
四、两种调节系统的比较	57
第三节 埋弧焊设备	57
一、埋弧焊机的功能和分类	57
二、埋弧焊机的结构特点	59
三、典型埋弧焊机	61
四、埋弧焊机的使用维护及常见故障的排除	64
第四节 埋弧焊的焊接材料与冶金过程	66
一、埋弧焊的焊接材料及选用	66
二、埋弧焊的冶金过程	69
第五节 埋弧焊工艺	71
一、埋弧焊工艺的内容和编制	71
二、焊接工艺参数的影响及选择	72
三、埋弧焊技术	74
四、埋弧焊的常见缺陷及防止方法	82
第六节 埋弧焊的其他方法	84
一、附加填充金属的埋弧焊	84
二、多丝埋弧焊	84

VI 目 录

三、带极埋弧焊	85	三、焊接参数的选择	124
四、窄间隙埋弧焊	86	第四节 MIG 焊的其他方法	129
复习思考题	87	一、脉冲 MIG 焊	129
第四章 二氧化碳气体保护电弧焊	88	二、窄间隙 MIG 焊	130
第一节 CO ₂ 焊的特点及应用	88	复习思考题	132
一、CO ₂ 焊的实质	88	第六章 钨极惰性气体保护焊	133
二、CO ₂ 焊的特点	89	第一节 TIG 焊的特点及应用	133
三、CO ₂ 焊的应用	89	一、TIG 焊的原理	133
第二节 CO ₂ 焊设备	89	二、TIG 焊的特点	133
一、CO ₂ 焊设备的组成和作用	89	三、TIG 焊的应用	134
二、典型 CO ₂ 焊设备	95	第二节 TIG 焊的电流种类和	
第三节 CO ₂ 焊的冶金特性和		极性	134
焊接材料	96	一、直流 TIG 焊	134
一、合金元素的氧化与脱氧	96	二、交流 TIG 焊	135
二、CO ₂ 焊的气孔及防止	98	第三节 TIG 焊设备	138
三、CO ₂ 焊的飞溅及防止	99	一、分类及组成	138
四、CO ₂ 焊的气体及焊丝	100	二、典型 TIG 焊设备	143
第四节 CO ₂ 焊工艺	102	第四节 TIG 焊工艺	146
一、短路过渡 CO ₂ 焊工艺	102	一、焊前清理	146
二、细滴过渡 CO ₂ 焊工艺	105	二、焊接工艺参数的影响及选择	147
三、CO ₂ 焊的焊接技术	106	三、TIG 焊操作技术	150
第五节 CO ₂ 焊的其他方法	110	第五节 TIG 焊的其他方法	152
一、药芯焊丝 CO ₂ 焊	110	一、脉冲 TIG 焊	152
二、CO ₂ 点焊	111	二、热丝 TIG 焊	153
三、CO ₂ 气电立焊	112	三、TIG 点焊	154
复习思考题	113	复习思考题	155
第五章 熔化极惰性气体保护		第七章 等离子弧焊接与切割	157
电弧焊	114	第一节 等离子弧的形成及其	
第一节 MIG 焊的特点及应用	114	特性	157
一、MIG 焊的基本原理	114	一、等离子弧的形成	157
二、MIG 焊的特点	114	二、等离子弧的特性	158
三、MIG 焊的应用	115	三、等离子弧的类型及应用	159
第二节 MIG 焊设备	115	四、等离子弧的双弧现象及防止	160
一、组成及要求	115	第二节 等离子弧焊	162
二、典型控制电路	116	一、等离子弧焊的基本方法及应用	162
三、国产 MIG 焊机的型号及技术		二、等离子弧焊设备	163
数据	119	三、等离子弧焊工艺	166
第三节 MIG 焊工艺	121	第三节 等离子弧堆焊与喷涂	170
一、熔滴过渡特点	121	一、等离子弧堆焊	170
二、保护气体	122		

二、等离子弧喷涂	172	三、钎焊的特点	210
第四节 等离子弧切割	173	第二节 钎焊材料	212
一、等离子弧切割原理及特点	173	一、钎料	212
二、等离子弧切割设备	174	二、钎剂	214
三、等离子弧切割工艺	176	第三节 钎焊方法及工艺	216
四、其他等离子弧切割方法	178	一、钎焊方法	216
复习思考题	180	二、钎焊工艺	220
第八章 电阻焊	181	三、常用金属材料的钎焊	222
第一节 电阻焊的实质、分类及特点	181	四、钎焊缺陷及防止	225
一、电阻焊的实质	181	复习思考题	226
二、电阻焊的分类	181	第十章 其他焊接方法	228
三、电阻焊的特点	182	第一节 电渣焊	228
四、电阻焊的应用	182	一、电渣焊的基本原理及分类	228
第二节 电阻焊的基本原理	183	二、电渣焊的材料和设备	231
一、电阻热及影响因素	183	三、电渣焊的特点和应用	233
二、热平衡及温度分布	185	第二节 螺柱焊	234
三、焊接循环	186	一、螺柱焊的特点、应用和分类	234
四、金属电阻焊时的焊接性	186	二、电弧螺柱焊	235
第三节 点焊、凸焊与缝焊	187	三、电容储能螺柱焊	236
一、点焊	187	四、短周期螺柱焊	238
二、凸焊	195	五、螺柱焊方法的选择	238
三、缝焊	197	第三节 高能束焊	239
第四节 对焊	201	一、电子束焊	239
一、对焊的特点和应用	201	二、激光焊	242
二、电阻对焊	201	第四节 摩擦焊	244
三、闪光对焊	203	一、摩擦焊原理和特点	244
四、对焊设备简介	206	二、摩擦焊的分类和应用	245
复习思考题	206	三、典型摩擦焊介绍	246
第九章 钎焊	208	第五节 高频焊	248
第一节 钎焊原理及特点	208	一、高频焊的原理、特点、分类及应用	248
一、钎焊原理	208	二、典型高频焊方法介绍	250
二、钎焊方法的分类	210	复习思考题	254
		参考文献	255

绪 论

一、焊接及其在现代工业中的地位

1. 焊接及其本质

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，使焊件达到结合的一种方法。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焊件连接在一起，从物理本质上来看就是要使这两个焊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他污物，阻碍着两分离焊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，使两个分离焊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。

2. 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飞行器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今天，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。

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。为适应我国现代化建设的需要，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、焊接方法分类及发展概况

1. 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，如图 0-1 所示。

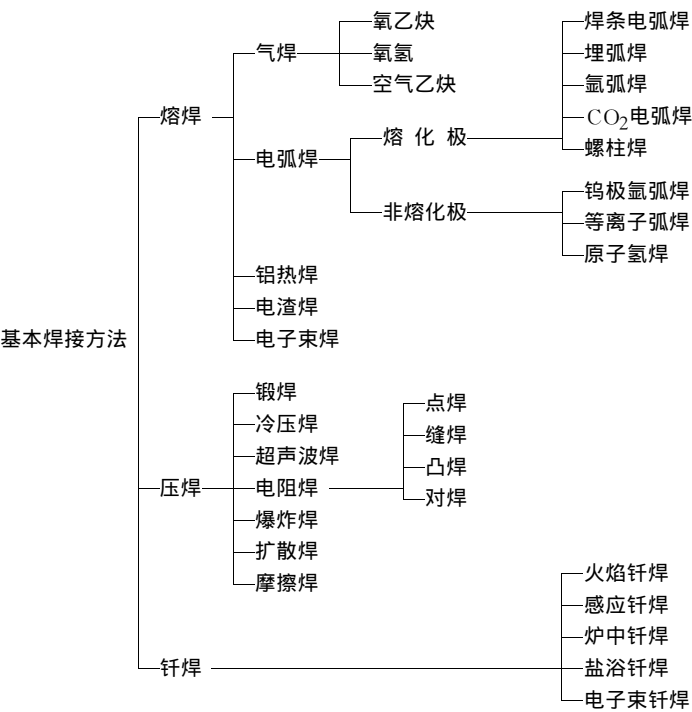


图 0-1 焊接方法的分类图示

(1) 熔焊 将待焊处的母材金属熔化以形成焊缝的焊接方法称为熔焊。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热为热源，以电极是否熔化为

特征分为熔化极电弧焊和非熔化极电弧焊两大类)、气焊(以乙炔或其他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产生的热为热源)、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焊件表面所产生的热为热源)、激光焊(以激光束照射到焊件表面而产生的热为热源)等若干种。

在熔焊时,为了避免焊接区的高温金属与空气相互作用而使性能恶化,在焊接区要实施保护。保护的方法通常有造渣、通以保护气和抽真空三种。因此,保护形式常常是区分熔焊方法的另一个特征。

(2) 压焊 焊接过程中,必须对焊件施加压力(加热或不加热),以完成焊接的方法称为压焊。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 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,低于母材熔化温度,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(但焊件不熔化)。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焊件产生的电阻热为热源)、电阻钎焊(以电阻辐射热为热源)、盐浴钎焊(以高温盐熔液为热源)和电子束钎焊等。也可按钎料的熔点不同分为硬钎焊(熔点 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。

2. 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,已应用锡钎焊和银钎焊来焊接了,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,并且仍处于继续发展之中。

三、本教材的内容和学习方法

《焊接方法与设备》是根据高职高专院校焊接专业培养目标编写的一本介绍各类基本焊接方法的焊接过程本质、工艺特点和所用设备的结构、原理及应用范围的专业课教材。对本教材的内容和学习方法简介如下:

1. 教材的内容与学习要求

(1) 本教材讲述的主要内容

- 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焊接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方法。

图0-1列出的焊接方法中,目前应用最为广泛、因而也是最为重要的一类焊接方法是电弧焊。因此,本教材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;电阻焊和一些钎焊也是较为重要的焊接方法,本教材安排了两章逐一讨论。电子束焊、激光焊、摩擦焊、螺柱焊、电渣焊、高频焊等方法原理比较特殊,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,因而本教材将其合并在一起,专门安排一章加以论述。还有一些焊接方法,例如气焊、铝热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、喷涂等相近的加工方法,本教材也在必要的地方简述了它们的特点和应用。

(2) 学生在学完本教材后,应达到以下要求

- 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成型的基本规律。
- 2) 掌握各种常用电弧焊方法的特点、过程实质和应用范围,熟悉其影响质量的因素和保证质量的措施。
- 3) 深入了解电阻焊、钎焊的特点和过程实质及其应用范围。
- 4) 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。
- 5) 了解常用电弧焊设备的特点、电气原理和应用范围;具有正确选择和合理使用电弧焊设备的能力。
- 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,以达到正确应用的目的。

2. 对本教材学习方法的建议

《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？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. 熔焊时，为什么要实施保护？常用的保护方法主要应用在哪些焊接方法中？
5. 对学习本教材有哪些要求？如何才能学好本教材？

第一章 电弧焊基础知识

电弧焊是应用最为广泛、也是最重要的现代焊接方法之一。本章的主要内容就是介绍与电弧焊有关的基础知识，包括作为焊接能源的电弧物理基础和工艺特性、作为填充材料的焊丝熔化与熔滴过渡以及作为焊件的母材熔化与焊缝成型的基本规律等。其他焊接方法的基础知识将结合本书有关章节进行介绍。

第一节 焊 接 电 弧

电弧是所有电弧焊方法的能源。到目前为止，电弧焊之所以能在焊接方法中占据主要地位，一个重要的原因就是电弧能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，为了认识和发展电弧焊方法，首先就必须弄清楚电弧是怎样实现这种能量转换和焊接中是如何利用这种能源的，这就需要深入了解焊接电弧的物理本质和各种特性。

一、焊接电弧的物理基础

(一) 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。

一般情况下，气体是良好的绝缘体，其分子和原子都处于电中性状态。要使两电极之间的气体导电，必须具备两个条件：①两电极之间有带电粒子；②两电极之间有电场。因此，如能采用一定的物理方法，改变两电极间气体粒子的电中性状态，使之产生带电荷的粒子，这些带电粒子在电场的作用下运动，即形成电流，使两电极之间的气体空间成为导体，从而产生了气体放电。气体放电随电流的强弱而有不同的形式，如暗放电、辉光放电、电弧放电等。与其他气体放电形式相比，电弧放电的主要特点是电流最大、电压最低、温度最高、发光最强。

在两个电极之间产生电弧放电时，沿电弧长度方向的电场强度（电压降）分布如图

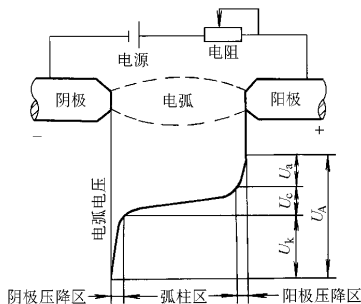


图 1-1 电弧及电场强度分布示意图

1-1 所示。由图中可见，沿电弧长度方向的电场强度分布并不均匀。按电场强度分布的特点可将电弧分为三个区域：阴极附近的区域为阴极区，其电压 U_k 称为阴极电压降；中间部分为弧柱区，其电压 U_c 称为弧柱电压降，阳极附近的区域为阳极区，其电压 U_a 称为阳极电压降。阳极区和阴极区占整个电弧长度的尺寸皆很小，约为 $10^{-2} \sim 10^{-6} \text{cm}$ ，故可近似认为

弧柱长度即为电弧长度。电弧的这种不均匀的电场强度分布，说明电弧各区域的电阻是不同的，即电弧电阻是非线性的。

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。

(二) 电弧中带电粒子的产生

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、负离子形成等。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。

1. 气体的电离

(1) 电离与激励 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 1V 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。

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)	Na	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。

当其他条件（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。当中性气体粒子受外加能量作用而不足以使其电离时，但可能使其内部的电子从原来的能级跃迁到较高的能级，这种现象称为激励。使中性粒子激励所需要的最低外加能量叫做激励能，若以伏为单位来表示，则称为激励

电压。表 1-2 为常见气体粒子的激励电压。

表 1-2 常见气体粒子的激励电压

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	19.3	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		

激励时由于电子未脱离原子的束缚，所以受激粒子仍呈中性。受激粒子是处于不稳定的受激状态，处于激励状态的时间极短，一般为 $10^{-2} \sim 10^{-8} \text{s}$ 。处于激励状态的粒子有自发地恢复到常态的趋势，将自己的能量以辐射光的形式释放出来，表现为电弧的辐射光，或继续受到外加能量的作用而电离。

由此可见，当电弧空间同时存在电离电压(或激励电压)不同的几种气体时，在外加能量的作用下，电离电压(或激励电压)较低的气体粒子将先被电离(或激励)。如果这种气体供应充足，则电弧空间的带电粒子将主要由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较低的电离电压，因而为提供电弧导电所要求的外加能量也较低。焊接时，为提高电弧的稳定性，往往加入一些电离电压较低、易电离的元素作为稳弧剂，也就是基于此种原因。

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压和激励电压都是固定数值。

(2) 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。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做电离度，用 x 表示，即

$x = \text{电离后的中性粒子密度} / \text{电离前的中性粒子密度}$

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

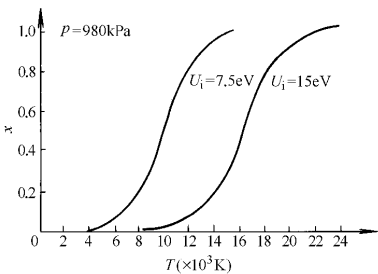


图 1-2 热电离度 x 与温度 T 之间的关系

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 之间的关系如图 1-2 所示。

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，电能将转换为带电粒子的动能。当带电粒子的动能增加到一定数值时，则可能与中性粒子发生非弹性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，因弧柱的温度一般在 $5000 \sim 30000 \text{K}$ 之间，而电场强度仅为 10V/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 $10^5 \sim 10^7 \text{ V/cm}$ ，远高于弧柱区，因而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，速度快，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可能对 K、Na、Ca、Al 等金属蒸气直接引起光电离，而对焊接电弧气氛中的其他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。

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。由于从阴极发射的电子，在电场的加速下碰撞电弧导电空间的中性气体粒子而使之电离，这样就使阴极电子发射充当了维持电弧导电的“原电子之源”。因此，阴极电子发射在电弧导电过程中起着特别重要的作用。

(1) 电子发射与逸出功 阴极中的自由电子受到一定的外加能量作用时，从阴极表面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 (A_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， $U_w = A_w / e$ ，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 1-3 列出几种金属材料的逸出功。由表可见，当金属表面存在氧化物时逸出功都会减小。

表 1-3 几种金属材料的逸出功

金属种类		W	Fe	Al	Cu	K	Ca	Mg
A_w / eV	纯金属	4.54	4.48	4.25	4.36	2.02	2.12	3.73
	表面有氧化物	—	3.92	3.9	3.85	0.46	1.8	3.31

(2) 阴极斑点 阴极表面通常可以观察到发出烁亮的区域，这个区域称为阴极斑点，它是发射电子最集中的区域，即电流最集中流过的区域。阴极斑点的形态与阴极的类型有关。当采用钨或碳作阴极材料时（通常称为热阴极），其斑点固定不动；而当采用钢、铜、铝等材料作阴极时（通常称为冷阴极），其斑点在阴极表面作不规则的游动，甚至可观察到几个斑点同时存在。由于金属氧化物的逸出功比纯金属低，因而氧化物处容易发射电子。氧化物发射电子的同时自身被破坏，因而阴极斑点有清除氧化物的作用。阴极表面某处氧化物被清除后另一处氧化物就成为集中发射电子的所在。于是，斑点游动力图寻找在一定条件下最容易发射电子的氧化物。如果电弧在惰性气体中燃烧，阴极上某处氧化物被清除后不再生成新的氧化物，阴极斑点移向有氧化物的地方，接着又将该处氧化物清除。这样就会在阴极表面的一定区域内将氧化物清除干净，显露出金属本色。这种现象称为“阴极清理”作用或“阴极破碎”作用。

(3) 电子发射的类型 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使其内部的自由电子热运动速度加大，动能增加，

一部分电子动能达到或超出逸出功时产生的电子发射现象称为热发射。

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时（其沸点分别为 5950K 和 4200K），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。

2) 场致发射。当阴极表面空间存在一定强度的正电场时，阴极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阴极表面，这种电子发射现象称为场致发射。

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），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，此时向电弧提供电子的主要方式是场致发射电子。实际上，电弧焊时纯粹的场致发射是不存在的，只不过是采用冷阴极时以场致发射为主，热发射为辅而已。

3) 光发射。当阴极表面受到光辐射作用时，阴极内的自由电子能量达到一定程度而逸出阴极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）碰撞阴极时，把能量传递给阴极表面的电子，使电子能量增加而逸出阴极表面的现象称为粒子碰撞发射。

焊接电弧中，阴极区有大量的正离子聚积，正离子在阴极区电场作用下被加速，获得较大动能，撞击阴极表面可能形成碰撞发射。在一定条件下，这种电子发射形式也是焊接电弧阴极区提供导电所需要带电粒子的主要途径之一。

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

（三）带电粒子的消失

电弧导电过程中，在产生带电粒子的同时，伴随着带电粒子的消失过程。在电弧稳定燃烧时，二者是处于动平衡状态的。带电粒子在电弧空间的消失主要有扩散、复合两种形式和电子结合成负离子等过程。

1. 扩散

电弧空间中如果带电粒子的分布不均匀，则带电粒子将从密度高的地方向密度低的地方迁移而使密度趋于均匀，这种现象称为带电粒子的扩散。

焊接电弧中，弧柱中心部位比周边温度高，带电粒子密度大，因而这种扩散总是从弧柱中心向周边扩散。各种带电粒子中电子的质量最小，运动速度最大，因此电子的扩散速度比离子高，容易扩散到电弧周边上来。当电弧周边上的电子密度增加后将阻碍电子的继续扩散，这时由于正负电荷的吸引作用，又促使正离子向电弧周边扩散。这种扩散的结果，不仅使弧柱中心带电粒子数减少，还将中心的一部分热量带到电弧周边。为保持电弧的稳定燃烧，电弧本身必须再多产生一部分带电粒子和热量来弥补上述损失。

2. 复合

电弧空间的正负带电粒子（正离子、负离子、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。

复合主要是在电弧的周边进行。这是因为弧柱中心温度较高，所有粒子本身的热运动能量都很大，只能产生更多的带电粒子，不可能产生复合。在电弧周边温度较低，带电粒子数较少，弧柱中心的带电粒子会向周边扩散并降低能量，然后复合成中性粒子。电子与正离子