

金属材料焊接基础

孟庆森 王文先 吴志生 主编

JINSHU CAILIAO HANJIE JICHU



化学工业出版社

材料科学与工程出版中心

金属材料焊接基础

孟庆森 王文先 吴志生 主编



化学工业出版社

材料科学与工程出版中心

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

金属材料焊接基础/孟庆森, 王文先, 吴志生主编.

北京: 化学工业出版社, 2005.12

ISBN 7-5025-8105-7

I. 金… II. ①孟…②王…③吴… III. 金属材料-焊接-基本知识 IV. TG457.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 155115 号

金属材料焊接基础

孟庆森 王文先 吴志生 主编

责任编辑: 丁尚林 陶艳玲

责任校对: 顾淑云 周梦华

封面设计: 潘 峰

*

化学工业出版社
材料科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市前程装订厂装订

开本 850mm×1168mm 1/32 印张 18 1/4 字数 489 千字

2006 年 3 月第 1 版 2006 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-8105-7

定 价: 38.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

为适应新世纪全球科学技术的高速发展,近年来我国材料加工及机械制造业领域的科学研究方向和专业已经越来越多地与基础科学相结合,逐渐形成多学科综合交叉和先进技术综合应用的新兴学科,由此带动了许多相关新兴产业的发展。材料的焊接(joining and welding)理论和技术是材料科学和工程学科的一个分支,是材料加工和机械制造业的基础环节之一,涉及到物理学、化学、材料学及冶金学、机械学、电子学、力学、计算数学、控制理论等广泛的学科领域;与金属材料、无机非金属材料、高分子材料及复合材料等各种工程材料的加工相关。

近年来,材料焊接技术的发展为我国制造业水平的提高及国民经济的发展作出了贡献,同时也引起许多科技工作者及工程技术人员的学习和了解有关材料焊接的基本原理及概要,尤其是为满足在校大学生和在职培训的技术人员在有限的教学时间内掌握焊接工程的基础知识和系统了解常用工程材料焊接加工的基本技术的需求,我们在多年专业教学和焊接工程师培训实践及焊接工程科学研究工作的基础上编写了这本著作。本书在编写过程中参考了近年来的高等院校教材和欧美国家职业培训的焊接技术专著的编写结构和体系,力求写成一部综合性和系统性强,具有简要性和实用性特点的作品。内容涵盖了有关材料焊接的常用焊接方法及设备,常用工程材料的焊接性及工艺,焊接结构的设计及质量安全检测等基本概念与技术,同时注重编入了有关新材料焊接及焊接新技术和国际焊接工程标准 ISO 9956 有关焊接工艺评定及质量管理的主要内容。其中部分内容是作者近年来在专业教学和科学研究中积累的经验 and 获得的成果。

本书共分三篇十五章。第一至第九章为焊接方法及设备篇，介绍了焊接电弧物理及焊接电源的基础知识，焊丝及母材的熔化特性及焊缝成形，常用弧焊电源的类型及其使用特性，弧焊脉冲电源和逆变电源的新技术，各种实用焊接方法及工程材料的焊接工艺要点；第十章至第十三章为金属材料的焊接篇，介绍了金属物理冶金的基础知识及常用焊接性试验方法，较详细地介绍了工程常用金属材料的焊接性及工艺要点；第十四章和第十五章为焊接结构与质量检验篇，介绍了焊接力学的基础知识及焊接接头，结构的力学特性和设计计算的基本方法，简要介绍了有关断裂力学的基本概念及焊接结构的安全性评定方法，焊接产品质量检验的基本概念、分类及常用检验技术。为便于读者查阅资料，各章尽量附上常用的英文关键词及专业术语。太原理工大学孟庆森教授编写绪论、第一章和第九章；王文先教授编写第十四章和第十五章，陈少平讲师编写第六章和整理附录资料；太原重型机械学院吴志生教授、刘翠荣教授和权旺林副教授编写第二、第三、第四、第五章，刘杰教授编写第七、第八、第十、第十一、第十二和第十三章。全书由孟庆森统稿，并由西安交通大学博士生导师薛锦教授主审。

书中部分章节所涉及的新技术成果是在国家自然科学基金项目(50375105)和山西省基础科学研究项目(20031051)的资助下完成的。权旺林和陈少平老师协助完成全文图表绘制及资料整理工作，哈尔滨焊接技术培训中心同事提供了国际焊接标准的部分资料。

本书是各位参编者在多年的教学经验和科学研究成果的基础上编写的，部分内容属于科学技术发展前沿初步发展和尚待深入探讨的技术问题。由于作者水平所限，编写过程难免存在不足之处，恳请读者批评指正。

编 者

2006 年 2 月于太原

目 录

绪论	1
----------	---

第一篇 焊接方法及设备

第一章 电弧焊基础知识	8
第一节 焊接电弧物理基础	8
一、焊接电弧的基础知识	8
二、焊接电弧的构成及其导电特性	14
三、焊接电弧的产热机构及电弧力	16
第二节 对弧焊电源的要求与选择	20
第三节 焊丝的熔化及熔滴过渡	24
一、焊丝加热与熔化的能量	24
二、焊丝的熔化速度及熔化系数	25
三、熔滴过渡形式	27
四、焊丝（条）的熔敷系数和飞溅	32
第四节 母材熔化和焊缝成形	33
一、熔池和焊缝的形状尺寸	33
二、焊接条件对焊缝成形的影响	35
参考文献	37
第二章 常用弧焊电源	38
第一节 交流弧焊电源	38
一、弧焊变压器	38
二、矩形波形弧焊电源	44
第二节 直流弧焊电源	46
一、直流弧焊电源的种类	46
二、硅弧焊整流器	47

三、晶闸管式弧焊整流器	51
四、晶体管式弧焊整流器	59
第三节 脉冲弧焊电源	60
一、脉冲弧焊电源概述	60
二、晶闸管式脉冲弧焊电源	62
三、晶体管式脉冲弧焊电源	64
四、磁放大器式脉冲弧焊电源	64
五、脉冲等离子弧焊机及控制电路	64
第四节 逆变式弧焊电源	71
一、弧焊逆变器的基本原理	71
二、国外典型逆变弧焊电源主电路剖析	73
三、大功率逆变电源 PWM 控制技术	79
四、弧焊逆变电源的发展趋势	81
第五节 弧焊电源的选择	84
一、弧焊电源的选择原则	84
二、弧焊电源的选择方法	84
参考文献	85
第三章 焊条电弧焊	86
第一节 焊条电弧焊概述	86
一、焊条电弧焊工作原理	86
二、焊条电弧焊工艺特点	86
三、焊条电弧焊适用范围	87
第二节 焊接设备及辅助工具	87
一、焊条电弧焊焊机	87
二、焊条电弧焊辅助设备及工具	89
第三节 焊接材料——电焊条	91
一、电焊条 (coated electrode) 的分类	91
二、电焊条选用原则	92
第四节 焊接接头及坡口的形式与设计	93
一、接头的基本形式	93

二、坡口的基本形式	95
第五节 焊接位置及电流种类	96
一、焊接位置的种类	96
二、焊接电流的种类	97
第六节 焊条电弧焊焊接工艺	98
一、焊接工艺参数	98
二、预热、后热及焊后热处理	100
参考文献	101
第四章 埋弧焊	102
第一节 埋弧焊概述	102
一、埋弧焊的基本原理	102
二、埋弧焊的优缺点	104
三、埋弧焊的分类	105
四、埋弧焊的应用	106
第二节 埋弧焊的自动调节系统	107
一、埋弧焊自动调节的必要性	107
二、实现焊接过程自动化的一般要求	109
三、电弧自身调节系统	109
四、电弧电压反馈调节系统	112
五、等速与变速送丝系统性能的比较	115
第三节 埋弧焊的冶金特点	115
一、冶金过程的一般特点	115
二、低碳钢埋弧焊熔池金属与熔渣之间的主要冶金反应	116
第四节 埋弧焊焊机	119
一、埋弧焊焊机的组成	119
二、埋弧焊焊机分类	121
第五节 焊丝和焊剂	122
一、焊丝	122
二、焊剂	123
第六节 埋弧焊焊接工艺与技术	127

一、埋弧焊常规工艺	127
二、埋弧焊技术	130
参考文献	132
第五章 气体保护电弧焊	133
第一节 气体保护电弧焊概述	133
一、气体保护电弧焊基本原理及分类	133
二、各种气体保护电弧焊方法的适用范围	134
第二节 钨极氩弧焊	134
一、钨极氩弧焊概述	134
二、钨极氩弧焊 (TIG) 焊机	138
三、钨极氩弧焊焊接材料	142
四、钨极氩弧焊焊接工艺参数	143
五、脉冲 TIG 焊	145
六、钨极氩弧焊生产实例介绍	147
第三节 熔化极气体保护焊	148
一、熔化极气体保护焊概述	148
二、熔化极气体保护焊焊接设备	149
三、熔化极气体保护焊工艺参数	154
四、熔化极氩弧焊	156
五、熔化极氧化性混合气体保护电弧焊	161
六、CO ₂ 气体保护焊	163
七、药芯焊丝气体保护电弧焊	167
八、熔化极脉冲气体保护电弧焊	171
九、金属材料熔化极气体保护电弧焊的焊接工艺特点	173
第四节 等离子弧焊及切割	178
一、等离子弧焊概述	178
二、等离子弧焊的工艺特点与适用范围	180
三、等离子弧焊设备	181
四、等离子弧焊的双弧问题	183
五、等离子弧焊接	184

六、等离子弧切割	187
参考文献	189
第六章 高能密度束焊接	190
第一节 电子束焊接	190
一、电子束焊接的基本原理及特点	190
二、电子束焊接设备简介	192
三、电子束焊接工艺	195
四、常见金属材料的电子束焊接	198
第二节 激光焊接	199
一、概述	199
二、激光焊接原理及工艺特点	200
三、激光焊接设备	202
四、激光焊接工艺	206
第三节 复合束流焊接	207
一、激光-MIG 焊	208
二、激光-TIG 焊	208
三、激光-高频焊	209
四、电子束-等离子弧复合	209
五、双电源等离子-MIG 焊	210
参考文献	210
第七章 电阻焊	212
第一节 电阻焊的基本原理与分类	212
一、电阻焊的基本原理	212
二、电阻焊的分类及电极	217
第二节 电阻焊设备基本技术要求及工艺参数	223
一、电阻焊设备要求的使用条件和主要技术	223
二、电阻焊的主要工艺参数	223
第三节 金属材料的电阻焊	225
一、低碳钢的电阻焊	225
二、不锈钢的电阻焊	226

三、有色金属的电阻焊	226
参考文献	228
第八章 钎焊	229
一、钎焊的原理	229
二、常用钎焊方法	232
三、钎焊工艺	235
四、钎焊材料	235
五、常用材料的钎焊	239
参考文献	244
第九章 扩散焊、超声波焊及摩擦焊	246
第一节 扩散焊	246
一、扩散连接原理及工艺参数	246
二、扩散焊的应用	250
第二节 超声波焊接	253
一、超声波焊接原理	253
二、超声波焊接的种类	254
三、超声波焊接的应用	255
第三节 摩擦焊	256
一、摩擦焊原理及特点	256
二、摩擦焊工艺参数及其应用	259
参考文献	259

第二篇 工程材料的焊接

第十章 金属焊接性基础	262
第一节 焊接性及其评定	262
一、焊接性概念	262
二、焊接性试验	265
三、常用焊接性试验方法	267
第二节 焊接热影响区的组织转变	274
一、焊接热影响区的形成	274

二、不易淬火钢的焊接热影响区组织转变	274
三、易淬火钢的焊接热影响区组织转变	277
第三节 焊接接头的常见缺陷	279
一、裂纹	279
二、气孔	280
三、夹渣	280
四、未熔合和未焊透	281
参考文献	281
第十一章 碳钢及低合金钢的焊接	282
第一节 碳钢的焊接	282
一、碳钢的种类	282
二、低碳钢的焊接	282
三、中碳钢的焊接	283
第二节 合金结构钢的焊接	285
一、合金结构钢的种类	285
二、热轧正火钢的焊接	286
三、低碳调质钢的焊接	294
四、中碳调质钢的焊接	302
五、低温用钢焊接	305
六、耐候钢及耐蚀钢的焊接	306
参考文献	308
第十二章 耐热钢及不锈钢的焊接	310
第一节 珠光体耐热钢焊接	310
一、耐热钢焊接接头性能的基本要求	310
二、珠光体耐热钢的焊接性	310
三、珠光体耐热钢的焊接工艺	314
第二节 不锈钢焊接	319
一、不锈钢的分类	319
二、不锈钢的性能	320
三、铁素体不锈钢的焊接	321

四、马氏体不锈钢的焊接	325
五、奥氏体不锈钢的焊接	326
第三节 珠光体耐热钢与奥氏体不锈钢异种钢的焊接	335
一、异种钢焊接的主要问题	335
二、异种钢焊接的工艺特点	340
第四节 不锈复合钢板的焊接	342
参考文献	345
第十三章 有色金属的焊接	347
第一节 铝及铝合金的焊接	347
一、铝及铝合金的分类及特性	347
二、铝及铝合金的焊接性	348
三、铝及铝合金焊接方法及填充材料的选择	359
四、铝锂合金的焊接	360
第二节 铜及铜合金的焊接	363
一、铜及铜合金的分类	363
二、铜及铜合金的焊接性	364
三、紫铜及黄铜的焊接工艺要点	367
第三节 高温合金的焊接	368
一、高温合金的分类及性能简介	368
二、合金元素对高温合金焊接性的影响	370
三、焊接方法及工艺	372
参考文献	374

第三篇 焊接结构与质量检验

第十四章 工程焊接力学基础	376
第一节 焊接应力与变形	376
一、焊接应力和变形的基本概念	376
二、焊接残余变形	387
三、焊接残余应力	402
第二节 电弧焊接头的力学性能	404

一、焊接接头形式	404
二、焊接接头设计	413
三、电弧焊接头的工作应力分布和工作性能	417
四、焊接接头静载强度计算	427
五、焊接接头的疲劳强度计算	438
第三节 焊接结构脆性断裂和疲劳断裂	438
一、焊接结构的断裂事故和断裂研究意义	438
二、影响焊接结构脆性断裂的因素	439
三、预防焊接结构脆性断裂的措施	442
四、影响焊接结构疲劳强度的因素	446
五、提高焊接接头疲劳强度的措施	451
六、焊接结构的安全性评定方法	457
第四节 焊接结构生产及工艺设计	464
一、工艺实验	464
二、焊接结构装配-焊接工艺	466
三、焊缝施焊方式	470
四、焊接结构的备料工艺	472
五、焊接结构的制造工艺	474
六、容器的制造	478
参考文献	483
第十五章 焊接产品质量检验	485
第一节 焊接产品质量检验过程	485
一、焊接检验的目的和意义	485
二、焊接检验的分类	486
三、焊接检验过程	487
四、无损检测技术概述	488
第二节 射线检测技术	492
一、射线检测的基本原理	492
二、射线探伤设备	494
三、射线照相检测的工艺要点	499

四、焊缝质量的评级	502
五、射线实时图像法探伤	503
六、射线检测中的安全防护	504
第三节 超声波检测技术	505
一、超声波探伤基本原理	505
二、超声波探伤设备	506
三、超声波检测工艺要点	508
四、超声波检测的特点	510
第四节 渗透检测技术	510
一、渗透探伤的工作原理和操作步骤	511
二、渗透探伤的分类	512
三、渗透探伤新技术	513
第五节 磁粉检测技术	515
一、磁粉检测原理	515
二、磁粉检测设备器材	519
三、磁粉检测工艺要点	520
第六节 声发射检测技术	522
一、声发射探伤基础	522
二、声发射探伤设备简介	523
参考文献	524
 附录 金属材料焊接工艺规程及评定	 525
1. 熔化焊的一般原则	
(ISO 9956—1; 1995/Amd. 1; 1998)	525
2. 电弧焊焊接工艺规程	
(ISO 9956—2; 1995/Amd. 1; 1998)	532
3. 钢弧焊的焊接工艺试验	
(ISO 9956—3; 1994/Amd. 1; 1998)	536

绪 论

焊接 (joining and welding process) 是指某特定材料的连接方法, 又包括不同的工艺过程所涉及的冶金、物理、化学、电学及力学原理的内容。常用焊接方法的分类见表 0-1。

焊接是一种新兴而又古老的加工技术, 早在公元 300 年前我国古代已有铜-金、铅-锡焊接的应用。举世瞩目的秦代出土文物铜车马构件上就有锻焊和钎焊的结构。目前的工业生产中应用的焊接技术几乎都是 19 世纪末 20 世纪初的近代科学技术, 特别是冶金学、金属学、力学、电学及电子学等学科迅速发展的产物。1885 年俄罗斯人别那尔道斯发明的碳极电弧可以视为电弧作为焊接热源应用的创始, 1930 年前后出现了药皮焊条电弧焊, 此后相继产生了埋弧焊、气体保护电弧焊等焊接方法。1886 年由美国人发明了电阻焊, 并逐步完善为电阻点焊、缝焊和对焊等方法, 自此电弧焊及电阻焊就逐渐取代了铆接成为现代工业生产中的基本加工方法。

20 世纪现代焊接技术的发展十分迅速, 50 年代出现电渣焊、电子束焊, 60 年代出现等离子弧焊和激光焊, 70 年代出现脉冲焊和窄间隙焊, 80 年代开始水下焊接和太空焊接。据 1999 年统计已拥有的焊接方法, 电弧焊有 18 种, 钎焊有 19 种, 固态焊接有 9 种, 电阻焊有 9 种, 氧乙炔焊接及切割有 13 种, 其他焊接方法近 10 种。近年来世界科学技术的高速发展推动了焊接技术的发展, 相继出现的新的焊接方法, 如搅拌摩擦焊 (friction stirring welding)、静电键合 (field-assisted bonding)、激光和电弧复合加热焊接 (hybrid laser-arc welding process) 等成果反映了时代科学技术特征和焊接技术的不断发展。随着国民经济的高速发展和科学技术的不断进步, 大型工业结构将进一步采用焊接综合技术, “锻-焊结合”、“铸-焊结合”和快速成形等交叉学科新技术日益广泛应用。众

表 0-1 焊接方法分类表

表 0-1 焊接方法分类																				
两材料状态	焊接过程	电 弧 热				电 阻 热				高能束	化学反应热			机械能			间接热能			
		涂料(焊剂)保护		气体保护		熔渣电阻	电 阻				火焰	热剂	炸药	摩擦焊	超声波焊	冷压焊	扩散焊	液体	固体	
							工 频		固 体 电 阻											
液 相	熔化不加压力	手弧焊	埋弧焊	钨极氩弧焊	钨极氩弧焊	等弧焊	熔化极气	电渣焊	接触式	感应式	高频	感应式	电子束	激光束	电焊剂及	电焊剂	电焊剂	电焊剂	电焊剂	
	熔化不加压力	手弧堆焊	埋弧堆焊	钨极氩弧堆焊	钨极氩弧堆焊	等弧堆焊	管状焊丝	电渣焊	接触式	感应式	高频	感应式	电子束焊	激光焊	电焊剂及	电焊剂	电焊剂	电焊剂	电焊剂	
	熔化不加压力	手弧堆焊	埋弧堆焊	钨极氩弧堆焊	钨极氩弧堆焊	等弧堆焊	管状焊丝	电渣焊	接触式	感应式	高频	感应式	电子束焊	激光焊	电焊剂及	电焊剂	电焊剂	电焊剂	电焊剂	
	熔化不加压力	手弧堆焊	埋弧堆焊	钨极氩弧堆焊	钨极氩弧堆焊	等弧堆焊	管状焊丝	电渣焊	接触式	感应式	高频	感应式	电子束焊	激光焊	电焊剂及	电焊剂	电焊剂	电焊剂	电焊剂	
固 相	熔化加压力	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	
	熔化加压力	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	
	熔化加压力	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	
	熔化加压力	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	
固相兼液相	不熔化	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	
	不熔化	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	
	不熔化	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	
	不熔化	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	电 容 储 能	