

传承焊接基础的经典著作
典藏焊接图书的必备书目

焊接科学基础

—— 焊接方法与过程控制基础 ——



中国机械工程学会焊接学会 编

黄石生 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



焊 接 科 学 基 础

——焊接方法与过程控制基础

中国机械工程学会焊接学会 编

主 编 黄石生

副主编 赵熹华 薛家祥 华学明



机 械 工 业 出 版 社

本书是由中国机械工程学会焊接学会组织编写的“焊接科学基础”之一。

全书由 5 篇 28 章组成。在介绍焊接方法及其过程控制基本概念的基础上,介绍了焊接方法的分类及其特点,论述了电弧焊、压焊、钎焊、高能束焊和其他焊接方法的原理、工艺及设备,同时介绍了焊接过程的自动控制技术、检测与伺服系统、信息处理与质量控制、焊接自动化专用设备和机器人,进而对焊接方法与过程控制的正确选择提出了基本要求,并合理地融入了焊接技术的发展现状与趋势。

本书充分体现了经典、成熟、基本、传承的指导思想,基本概念、基本方法、基本理论成熟、可靠,描述准确、清楚,充分反映了焊接方法与过程控制的核心内容。同时,与现代的科研成果、创新技术相结合,反映了先进性和趋势性的研究成果。

本书可供从事焊接技术工作的科研和工程技术人员阅读,也可作为高等院校焊接专业本科生和研究生的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

焊接方法与过程控制基础/黄石生主编;中国机械工程学会焊接学会编. —北京:机械工业出版社,2013.8

(焊接科学基础)

ISBN 978-7-111-46212-5

I. ①焊… II. ①黄…②中… III. ①焊接工艺②焊接-过程控制
IV. ①TG4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 054954 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:何月秋

责任编辑:何月秋 版式设计:霍永明

责任校对:张晓蓉 申春香 封面设计:马精明 责任印制:乔宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2014 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·54.5 印张·2 插页·1546 千字

0001—2000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-46212-5

定价:178.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

策划编辑电话:(010) 88379732

编委会名单

(排名不分先后)

主 任	吴毅雄				
副主任	王麟书	陈丙森	黄石生	杜则裕	陈清阳
顾 问	单 平	陈 强	张彦敏	冯吉才	何 实
	薛振奎	田志凌	李宪政		
委 员	赵熹华	薛家祥	华学明	李亚江	邹增大
	陆 皓	赵海燕	吴志生	张友寿	蔡 艳
	王文先	张彦华	王成文	康 龙	潘春旭
	朱 胜	刘振英	何月秋	吕德齐	
秘 书	黄彩艳				

序

从与人们生活密切相关的日用品、电子产品到摩托车、汽车、轮船、高铁等交通工具，从建筑钢结构到锅炉、石油、化工、天然气领域，从核电站到航空、航天，哪一个领域都离不开焊接；焊接在国民经济中发挥着越来越大的作用。

作为全国性的专业学术组织，中国机械工程学会焊接学会（以下简称焊接学会）对我国焊接事业的发展和传承，尤其是拓展专业知识、传播科学理论、推动技术进步、培养一流人才等方面有责任和义务做出贡献。

目前我国正处在由焊接大国向焊接强国迈进的时代，焊接科学与工程技术随着以数字技术为特征的时代发展而日益显见其宽广的发展和创新空间。焊接基础乃是广大焊接工作者赖以做出贡献的基本。

鉴于高校教学的宽口径改革，大部分高校传统的焊接专业并入材料加工成形及控制专业，过去由国家有关部门承担的焊接教科书编写与出版工作已经停止等现实，焊接学会编辑出版委员会决定组织国内焊接领域相关学科的专家学者编辑出版一套“焊接科学基础”图书，以满足焊接学科进步和行业发展的实际需求。为此我们力求这套图书能够成为代表当前业界较高水平的精品著作，使之成为焊接学会的“看家书”。同时也希望今后经过一代代焊接人的不断补充、不断完善，使之成为我国焊接界的传承经典之作。

历时4年，经过焊接学会编辑出版委员会的努力，在广大焊接专家、学者的积极参与和大力支持下，“焊接科学基础”图书终于面世了。其宽广的知识范围和先进的技术内容，系统地反映了焊接学科和专业的理论基础，也体现了焊接科技的进步与积累；既可以作为高等学校教师和学生的教学书籍，还可成为从事焊接工作的广大科技人员的参考书。相信该套图书的出版必将对我国焊接事业的传承和发展起到重要的推动作用。

该套图书的编写出版得到了国内许多高等院校、科研院所及企事业单位的大力支持和积极参与，来自清华大学、上海交通大学、天津大学、华南理工大学、山东大学、哈尔滨工业大学、北京航空航天大学、吉林大学、北京工业大学、兰州理工大学、太原科技大学、装甲兵工程学院、沈阳工业大学、太原理工大学、中国石油大学、中国铁道科学研究院金属及化学研究所、北京材料及工艺研究所、哈尔滨焊接研究所、太原重工股份有限公司、北京嘉克新兴科技有限公司等单位的近百名教授、专家、学者参与了该套图书的编写和审校工作。在此焊接学会向各参与单位的大力支持和全体编审者的辛勤付出表示衷心的感谢！

焊接学会编辑出版委员会主任吴毅雄教授和主编黄石生教授、陈丙森教授、杜则裕教授、陈清阳教授级高工，以及编委会的各位成员、各位编审者都为该套图书的编纂耗费了大量的心血和精力，为此特表最诚挚的谢意！

犹如长期以来对焊接学会编辑出版工作的支持，从该套图书的策划到出版均得到了

机械工业出版社领导和编辑人员的大力协助，在此对他们的付出表示深深的感谢！

该套图书的内容多、涉及范围广，参与编纂人员的队伍庞大，编写过程中难免出现疏漏，敬请广大读者批评指正，以便我们更好地为焊接界服务！

中国机械工程学会
焊接学会理事长

A large, bold, handwritten signature in black ink, likely belonging to the president of the Chinese Society of Mechanical Engineering Welding Society.

前 言

本书是由中国机械工程学会焊接学会组织编写的“焊接科学基础”之一。本书定位于从事焊接技术工作的科研和工程技术人员，以及高等院校焊接专业师生，给他们提供焊接领域经典的、成熟的、基本的概念、理论和方法，以指导他们运用这些基本知识进行科研、教学和生产。

本书在编写时充分体现了“经典、成熟、基本、传承”的指导思想，基本概念、基本方法、基本理论成熟、可靠，描述准确、清楚，充分反映了焊接方法与过程控制的核心内容。同时，又与现代的科研成果、创新技术相结合，以便在具体的章节中充分体现先进性、趋势性的发展研究成果。

本书在介绍焊接方法与过程控制基本概念的基础上，介绍了焊接方法的分类及其特点，论述了电弧焊、压焊、高能束焊、钎焊和其他焊接方法的原理、工艺及设备，同时介绍了焊接过程的自动控制技术、检测与伺服系统、信息处理与质量控制、焊接自动化专用设备和机器人，进而对焊接方法的选择提出了基本要求，简述了焊接技术的发展。

本书编审人员及其分工如下。

主编：黄石生（负责编写提纲的制订、第1篇的统稿和全书的统稿、定稿）。

副主编：赵熹华（负责第2篇的统稿和全书的审稿），薛家祥（协助第4篇统稿），华学明（协助第5篇统稿）。

前言、焊接方法概述、第1章和第2章编者、第1篇统稿黄石生；审者赵熹华。第3章编者陈毅刚；审者胡盛跃。第4章编者胡盛跃（编写4.1至4.6节和统稿）、周清清（编写4.7节）；审者周业基。第5章编者薛峰（编写5.1至5.6节和统稿）、吴开源（编写5.7节）；审者周业基。第6章编者温立民（编写6.1至6.3节和统稿）、石永华（编写6.4和6.5节）；审者胡盛跃。第7章编者王振民；审者温瑾林。第8章编者石永华（编写8.1节、8.2节和统稿）、蒋晓明（编写8.3和8.4节）；审者李尚周。

第2篇统稿：赵熹华。第1章编者赵熹华；审者冯吉才。第2章编者赵贺、赵熹华；审者冯吉才。第3章、第4章编者冯吉才；审者赵熹华。第5章编者赵贺、冯吉才；审者赵熹华。

第3篇统稿：卫国强。第1章、第4章编者卫国强；审者庄鸿寿。第2章编者石永华；审者卫国强。第3章编者黄延禄；审者卫国强。

第4篇统稿：华学明。第1章编者黄坚；审者李铸国。第2章编者姚瞬；审者唐新华。第3章编者徐国祥；审者姚瞬。第4章编者华学明；审者姚瞬。第5章编者李力；审者楼松年。第6章编者李宏运；审者吴毅雄。

第5篇统稿：薛家祥。第1章至第3章编者薛家祥；审者吴林、张广军。第4章、

第5章编者张广军；审者吴林。

本书在编写过程中得到了焊接学会编辑出版工作委员会和机械工业出版社的指导及有关院校师生、企业工程专家等的大力支持，在此谨致谢意。

鉴于编者水平有限，书中难免会有不足之处，敬请专家、学者和读者批评指正。

编 者

符 号 说 明

符号	名 称	符号	名 称
U_0	空载电压有效值(或平均值)	I_y	电源电流有效值
$U_y(U)$	电源电压有效值(或平均值)	I_m	脉冲电流峰值
U_{yh}	引弧电压	I_j	基本电流
U_f, u_f	电弧电压有效值(或平均值)和瞬时值	I_{fh}	反馈电流
U_A	交流绕组电压有效值	$R_f(R_h)$	电弧电阻
U_c	控制电压平均值	$I_{\omega d}$	稳态短路电流
I_f, i_f	电弧电流有效值(或平均值)和瞬时值电流	I_{sd}	空载至短路瞬时短路电流峰值
Φ	磁通	I'_{sd}	经 0.05s 后的瞬时短路
R	电阻(器)	I_{fd}	负载至短路瞬间短路电流峰值
L	电感(器)、电抗器	RS	分流器
C	电容(器)	S、Q	开关
LB	平衡电抗(器)	SB	按钮
RP	电位器	SC	转换开关
G	发电机	FU	熔断器
MF	风扇电动机	K	继电器
W	电机、变压器绕组	KM	接触器
N	绕组匝数、运算放大器	UR	整流器
WC	控制绕组	H	指示灯
AM	磁放大器	VD	二极管
T	变压器	V	晶体管
TI	脉冲变压器	VS	稳压管
SV	稳压器	VU	单结晶体管
TV	电压互感器	VH	晶闸管
TA	电流互感器,自耦变压器	VC	程控单结晶体管
YV	电磁阀	VF	场效应晶体管(MOSFET)
X	接线座	VT	绝缘栅双极型晶体管(IGBT)
G	给定电路	A	放大器
M	检测器	AT	触发器
I_0	空载电流	DA、DAN	与门、与非门

目 录

序	
前言	
符号说明	
绪论 焊接方法概述	1

0.1 焊接方法分类	1
0.2 焊接方法简介	4
0.3 焊接方法的选择	7
0.4 焊接技术的新发展	10

第1篇 弧焊基础

第1章 焊接电弧及其对弧焊电源的要求	14
1.1 焊接电弧的物理本质、引燃及分类	14
1.1.1 焊接电弧的物理本质	14
1.1.2 焊接电弧的引燃	14
1.1.3 焊接电弧的分类及其应用	14
1.2 直流焊接电弧的结构和电特性	15
1.2.1 焊接电弧的结构及其压降分布	15
1.2.2 焊接电弧的电特性	15
1.2.3 焊接电弧力	16
1.3 交流焊接电弧的特点及其电特性	18
1.4 其他类型焊接电弧	20
1.4.1 脉冲焊接电弧	20
1.4.2 自由焊接电弧	21
1.4.3 压缩焊接电弧	21
1.5 弧焊工艺对弧焊电源外特性的要求	22
1.5.1 “电源-电弧”系统的稳定性	22
1.5.2 对外特性曲线形状的要求	23
1.6 弧焊工艺对弧焊电源调节性能的要求	25
1.6.1 弧焊电源的调节性能	25
1.6.2 弧焊电源的可调焊接参数	26
1.6.3 弧焊电源的负载持续率和额定参数	27
1.7 弧焊工艺对弧焊电源动特性的要求	27
1.7.1 电弧焊熔滴过渡与弧焊电源动特性的概念	27
1.7.2 焊条电弧焊熔滴过渡及其对弧焊电源特性的要求	28
1.7.3 细丝 CO ₂ 焊熔滴过渡及其对弧焊电源特性的要求	29
参考文献	30

第2章 弧焊电源	31
2.1 弧焊电源概述	31
2.1.1 弧焊电源的概念、分类及其特点	31
2.1.2 弧焊电源的基本原理和特点	31
2.1.3 弧焊电源的新发展	32
2.2 弧焊变压器的原理及其特点	32
2.2.1 弧焊变压器的基本原理及分类	32
2.2.2 串联电抗器式弧焊变压器	33
2.2.3 增强漏磁式弧焊变压器	35
2.3 弧焊发电机及硅弧焊整流器	37
2.3.1 内燃驱动式弧焊发电机的基本原理及其分类	37
2.3.2 硅弧焊整流器	39
2.3.3 交直流两用及脉冲式弧焊整流器	41
2.4 晶闸管式弧焊整流器及其特点	41
2.4.1 晶闸管式弧焊整流器的基本原理及特点	42
2.4.2 主电路的基本形式及其工作原理	42
2.4.3 移相触发电路的基本形式及其工作原理	44
2.4.4 外特性及调节性能原理	45
2.4.5 晶闸管式脉冲和矩形波交流弧焊电源	48
2.5 弧焊逆变器	49
2.5.1 弧焊逆变器概论	49
2.5.2 晶闸管式弧焊逆变器	53
2.5.3 晶体管和场效应晶体管式弧焊逆变器	54
2.5.4 IGBT 式弧焊逆变器	56

2.5.5 软开关型弧焊逆变器	60	原理	91
2.6 弧焊电源的数字化控制	62	4.3 埋弧焊材料及其选配	92
2.6.1 数字化控制的概述	62	4.3.1 焊丝	92
2.6.2 数字化控制的关键技术	63	4.3.2 焊剂	93
2.6.3 弧焊电源的单片控制	65	4.3.3 焊丝和焊剂的选配	96
2.6.4 弧焊电源的 DSP 控制	66	4.4 埋弧焊工艺	97
2.6.5 弧焊电源的 ARM 嵌入式控制	66	4.4.1 对接接头埋弧焊工艺	97
2.6.6 弧焊电源的数字化智能控制	67	4.4.2 T 形接头和搭接接头埋弧焊 工艺	99
2.7 弧焊电源的选择和使用	69	4.4.3 焊接参数对焊缝质量的影响	100
2.7.1 弧焊电源的选择	69	4.5 埋弧焊的其他工艺形式	106
2.7.2 弧焊电源的安装和使用	70	4.5.1 埋弧堆焊	106
2.7.3 弧焊电源的节电与安全	70	4.5.2 窄间隙埋弧焊	108
参考文献	71	4.6 埋弧焊的主要焊接缺陷分析	109
第3章 焊条电弧焊方法	72	4.6.1 气孔	109
3.1 焊条电弧焊的原理及熔滴过渡	72	4.6.2 裂纹	110
3.1.1 焊条电弧焊的原理及特点	72	4.6.3 埋弧焊焊接缺陷的产生原因及 防止措施	114
3.1.2 焊条电弧焊的熔滴过渡及其影响 因素	72	4.7 高速埋弧焊新工艺的特点及其设备	115
3.2 焊条电弧焊设备及焊条	74	4.7.1 单丝高速埋弧焊的工艺特点及其 设备	115
3.2.1 焊条电弧焊电源设备选配	74	4.7.2 双丝高速埋弧焊的工艺特点及其 设备	118
3.2.2 焊条的分类、特点及选用	74	4.7.3 三丝高速埋弧焊的工艺特点及其 设备	120
3.3 焊条电弧焊工艺特点及其对焊接参数的 要求	75	4.7.4 四丝高速埋弧焊在管线钢焊接中 的应用	121
3.3.1 焊接工艺特点及要求	75	参考文献	123
3.3.2 接头和坡口要求及设计	75	第5章 熔化极气体保护电弧焊	124
3.3.3 焊接参数的基本要求及其多参数 匹配	77	5.1 熔化极气体保护电弧焊的原理、 特点及应用	124
3.4 焊条电弧焊缺陷及安全与防护	78	5.1.1 熔化极气体保护电弧焊的分类	124
3.4.1 弧焊缺陷的产生及防止	78	5.1.2 熔化极气体保护电弧焊的基本 原理	124
3.4.2 焊条电弧焊的安全及防护技术	79	5.1.3 熔化极气体保护电弧焊的熔滴 过渡及冶金特性	125
3.5 焊条电弧焊的特殊方法	80	5.1.4 熔化极气体保护电弧焊的特点及 应用	133
3.5.1 重力焊和躺焊的特点及操作	80	5.2 熔化极气体保护电弧焊的设备组成及 其原理	134
3.5.2 高效焊条电弧焊方法	80	5.2.1 熔化极气体保护电弧焊设备的 分类与组成	134
参考文献	81	5.2.2 弧焊电源的选配原则	134
第4章 埋弧焊	82	5.2.3 其他辅助设备、配套件的选配	135
4.1 埋弧焊工作原理及其特点与应用	82		
4.1.1 埋弧焊工作原理	82		
4.1.2 埋弧焊的冶金与工艺特点及其 应用	82		
4.2 埋弧焊设备工作原理、分类及特点	84		
4.2.1 埋弧焊设备的分类与组成	84		
4.2.2 弧焊电源的电特性及其选用	85		
4.2.3 电弧调节系统及其工作原理	86		
4.2.4 机械与控制驱动系统及其工作			

5.2.4 熔化极气体保护电弧焊的控制 系统	139	6.2.2 TIG 焊弧焊电源选配原则	175
5.2.5 熔化极气体保护电弧焊设备的 选用原则	140	6.2.3 其他辅助设备、配套件的选配	180
5.2.6 熔化极气体保护电弧焊焊机 简介	140	6.2.4 焊接程序控制装置	185
5.3 熔化极气体保护电弧焊用气体及焊丝 的选配	141	6.2.5 典型的 TIG 焊机简介	185
5.3.1 保护气体的作用与特性	141	6.3 TIG 焊用焊接材料及工艺	187
5.3.2 保护气体的标准及其选用	144	6.3.1 钨极及其选用	187
5.3.3 工厂供气及流量控制方法	145	6.3.2 保护气体及其选用	189
5.3.4 焊丝分类及其性能对焊接工艺 性能的影响	147	6.3.3 焊丝及其选用	191
5.3.5 焊丝的标准及其选用	148	6.3.4 TIG 焊安全技术	191
5.4 熔化极气体保护电弧焊工艺的特点及 应用	149	6.4 TIG 焊其他方法和新技术	192
5.4.1 焊前准备	149	6.4.1 热丝 TIG 焊	192
5.4.2 焊接参数及其设定	150	6.4.2 TIG 点焊	193
5.4.3 常用材料的焊接	153	6.4.3 管-管和管-管板 TIG 焊	194
5.4.4 焊接缺陷的控制	156	6.5 TIG 高速焊技术	196
5.5 特殊熔化极气体保护电弧焊技术	157	6.5.1 活性剂 TIG 焊技术	196
5.5.1 熔化极气体保护焊电弧控制 技术	157	6.5.2 多元保护气(加氩等) TIG 高速 焊技术	198
5.5.2 熔化极脉冲氩弧焊的电弧控制	159	6.5.3 双电极 TIG 焊	198
5.5.3 熔化极气体保护气电立焊	160	6.5.4 TIG-激光复合能源高速焊技术	198
5.5.4 窄间隙熔化极气体保护电弧焊	162	参考文献	200
5.6 药芯焊丝 CO ₂ 气体保护焊的原理、 特点及应用	163	第 7 章 等离子弧焊接、喷涂与切割 基础	201
5.6.1 药芯焊丝的结构与分类	163	7.1 等离子弧的形成、特点及分类	201
5.6.2 药芯焊丝 CO ₂ 焊的原理与特点	164	7.1.1 等离子弧的形成	201
5.6.3 药芯焊丝 CO ₂ 焊设备	164	7.1.2 等离子弧的特点	202
5.6.4 药芯焊丝的标准及其选用	164	7.1.3 等离子弧的分类	202
5.6.5 药芯焊丝 CO ₂ 焊工艺	165	7.1.4 对等离子弧供电特性的要求	203
5.7 高效高速气体保护电弧焊技术	165	7.2 等离子弧焊的原理、工艺及设备	204
5.7.1 高效气体保护电弧焊技术	165	7.2.1 等离子弧焊的原理	204
5.7.2 高速气体保护电弧焊技术	167	7.2.2 等离子弧焊的工艺	205
参考文献	170	7.2.3 等离子弧焊设备	207
第 6 章 钨极惰性气体保护焊	173	7.3 等离子弧喷涂的原理、工艺及设备	210
6.1 TIG 焊原理及特点	173	7.3.1 等离子弧喷涂的原理	210
6.1.1 TIG 焊的工作原理	173	7.3.2 等离子弧喷涂的工艺	211
6.1.2 TIG 焊的特点	173	7.3.3 等离子弧喷涂的设备	213
6.1.3 TIG 焊的应用	174	7.4 等离子弧切割的原理、工艺及设备	214
6.2 TIG 焊设备配置	174	7.4.1 等离子弧切割的原理及特点	215
6.2.1 TIG 焊设备组成	174	7.4.2 等离子弧切割的方法及工艺	215
		7.4.3 等离子弧切割设备	218
		7.5 等离子弧焊新技术	218
		7.5.1 微束等离子弧焊技术	218
		7.5.2 穿孔等离子弧焊技术	219
		7.5.3 脉冲等离子弧焊技术	219
		7.5.4 变极性等离子弧焊技术	219

7.5.5 激光-等离子弧复合焊技术	220	8.2.4 水下切割安全技术	236
参考文献	220	8.3 螺柱焊技术	236
第8章 其他电弧焊与切割基础	222	8.3.1 螺柱焊工艺过程与设备	237
8.1 水下焊接	222	8.3.2 典型材料的螺柱焊焊接性能	242
8.1.1 湿法水下焊接	223	8.3.3 螺柱焊焊接方法的选择	242
8.1.2 高压干法水下焊接	226	8.3.4 螺柱焊焊接质量检验及焊接专用螺柱	243
8.1.3 局部干法水下焊接	229	8.4 碳弧气刨设备及工艺特点	244
8.1.4 水下焊接标准与质量检验	231	8.4.1 碳弧气刨的原理、特点及应用	245
8.1.5 水下焊接安全技术	232	8.4.2 碳弧气刨的设备与材料	245
8.1.6 水下焊接应用实例	233	8.4.3 碳弧气刨工艺及其参数匹配	247
8.2 水下切割	234	8.4.4 自动碳弧气刨特点及其设备	248
8.2.1 水下电弧-氧气切割	234	8.4.5 碳弧水气刨	249
8.2.2 水下等离子弧切割	235	参考文献	250
8.2.3 其他水下切割技术	235		

第2篇 压焊基础

第1章 压焊基础概述	254	2.6.5 车身焊装生产线的工艺仿真与规划技术	333
1.1 压焊的物理本质	254	2.6.6 电阻焊质量控制技术	333
1.2 压焊的分类及发展	254	参考文献	339
参考文献	257	第3章 扩散连接	341
第2章 电阻焊	258	3.1 扩散连接机理	341
2.1 点焊	259	3.1.1 固相扩散连接的基本原理	341
2.1.1 点焊的基本原理	259	3.1.2 液相扩散连接的基本原理	345
2.1.2 点焊的一般工艺	262	3.1.3 超塑性成形扩散连接的基本原理	347
2.1.3 常用材料及新材料的点焊	268	3.2 扩散连接的一般工艺	348
2.2 凸焊	273	3.2.1 扩散连接的工艺特点	348
2.2.1 凸焊的一般工艺	274	3.2.2 扩散连接参数的选择	349
2.2.2 常用金属材料的凸焊	276	3.3 常用材料的扩散连接	355
2.3 缝焊	279	3.3.1 钛合金及钛铝金属间化合物的扩散连接	355
2.3.1 缝焊的一般工艺	279	3.3.2 镍基高温合金的扩散连接	359
2.3.2 常用金属材料的缝焊	284	3.3.3 异种金属材料的扩散连接	361
2.4 对焊	286	3.3.4 陶瓷材料的扩散连接	365
2.4.1 闪光对焊	286	3.3.5 复合材料的扩散连接	371
2.4.2 电阻对焊	295	3.4 扩散连接设备	374
2.5 电阻焊设备	297	3.4.1 扩散连接设备的分类	374
2.5.1 电阻焊设备分类和组成	297	3.4.2 扩散连接设备的组成	374
2.5.2 电阻焊设备的主要技术参数	306	3.4.3 典型扩散连接设备及其工作原理	375
2.5.3 电阻焊设备的电极	311	参考文献	377
2.5.4 点焊机器人	315	第4章 摩擦焊	378
2.6 电阻焊技术的新发展	318	4.1 连续驱动摩擦焊	379
2.6.1 电阻焊接头形成理论研究进展	319		
2.6.2 电阻焊新工艺	323		
2.6.3 电阻焊新设备	329		
2.6.4 新型点焊机器人	332		

4.1.1 连续驱动摩擦焊的基本原理	379	5.1.2 高频焊的一般工艺	418
4.1.2 连续驱动摩擦焊的焊接工艺	382	5.1.3 高频焊设备的选择	422
4.1.3 焊接参数的检测及控制	386	5.1.4 高频焊应用实例	425
4.1.4 典型材料的摩擦焊	387	5.2 超声波焊	429
4.2 搅拌摩擦焊	392	5.2.1 超声波焊基本原理	429
4.2.1 搅拌摩擦焊的焊接过程	393	5.2.2 超声波焊的焊接工艺	430
4.2.2 搅拌摩擦焊工艺	396	5.2.3 超声波焊的焊接接头设计	434
4.2.3 典型材料的搅拌摩擦焊	400	5.2.4 超声波焊的焊接参数选择	435
4.2.4 搅拌摩擦焊新技术	403	5.2.5 常用材料的超声波焊	438
4.3 其他摩擦焊	407	5.2.6 超声波焊焊接设备	443
4.3.1 惯性摩擦焊	407	5.3 爆炸焊	446
4.3.2 线性摩擦焊	408	5.3.1 爆炸焊的基本原理	446
4.3.3 相位摩擦焊	409	5.3.2 爆炸焊工艺	448
4.3.4 径向摩擦焊	409	5.3.3 常用材料及典型工件的爆炸焊	451
4.3.5 摩擦堆焊	410	5.3.4 爆炸焊技术发展	455
4.4 摩擦焊焊接设备及其质量控制	411	5.3.5 爆炸焊的安全与防护	455
4.4.1 传统摩擦焊焊接设备	411	5.4 变形焊	456
4.4.2 搅拌摩擦焊焊接设备	413	5.4.1 变形焊概述	456
参考文献	415	5.4.2 变形焊工艺	458
第5章 其他压焊方法	417	5.4.3 典型材料及构件的焊接	463
5.1 高频焊	417	5.4.4 变形焊设备	464
5.1.1 高频焊的基本原理	417	参考文献	466

第3篇 钎焊基础

第1章 钎焊技术基础	468	第2章 钎焊方法	493
1.1 钎焊的基本原理	468	2.1 火焰钎焊	493
1.2 钎料的润湿与铺展	469	2.1.1 火焰钎焊的基本原理	493
1.2.1 固体金属的表面结构	469	2.1.2 火焰钎焊设备及工艺方法	493
1.2.2 液态钎料对固体母材的润湿	469	2.1.3 火焰钎焊的应用实例	495
1.3 钎料的毛细流动	471	2.1.4 火焰钎焊的操作与防护	496
1.3.1 拉普拉斯方程的推导	471	2.2 炉中钎焊	496
1.3.2 液态钎料的毛细填缝过程	472	2.2.1 空气炉中钎焊	497
1.4 钎料润湿性的影响因素	474	2.2.2 保护气氛炉中钎焊	497
1.4.1 钎料和母材的成分	475	2.2.3 真空炉中钎焊	497
1.4.2 温度的影响	476	2.2.4 炉中钎焊的操作与防护	498
1.4.3 金属表面氧化物的影响	477	2.3 电阻钎焊	499
1.4.4 钎剂的影响	478	2.3.1 电阻钎焊的基本原理	499
1.4.5 母材表面粗糙度的影响	478	2.3.2 电阻钎焊的工艺及特点	500
1.4.6 表面活性物质的影响	480	2.3.3 电阻钎焊应用实例	500
1.5 液态钎料与母材的相互作用	481	2.4 感应钎焊	501
1.5.1 母材向液态钎料的溶解	481	2.4.1 感应钎焊的基本原理	501
1.5.2 钎料组元向母材的扩散	484	2.4.2 感应加热线圈的设计	503
1.5.3 钎焊接头组织的不均匀性	487	2.4.3 感应钎焊的应用实例	503
参考文献	491	2.4.4 感应钎焊的操作与防护	504

2.5 浸渍钎焊	505	3.4.1 软钎剂	531
2.5.1 盐浴浸渍钎焊	505	3.4.2 硬钎剂	532
2.5.2 金属浴浸渍钎焊	506	3.4.3 铝合金用钎剂	533
2.5.3 浸渍钎焊应用实例	507	3.4.4 气体钎剂	535
2.6 其他钎焊方法	507	第4章 无铅钎焊技术	537
2.6.1 电子束钎焊	507	4.1 采用无铅钎焊技术的必要性	537
2.6.2 扩散钎焊	508	4.1.1 无铅钎焊技术的提出	537
2.6.3 超声波钎焊	508	4.1.2 铅的危害及污染途径	537
2.6.4 钎焊新技术	508	4.1.3 无铅钎焊技术面临的挑战	538
参考文献	511	4.2 无铅钎料简介	539
第3章 钎焊材料简介	512	4.2.1 Sn-Pb 系钎料	539
3.1 钎料和钎剂概述	512	4.2.2 Sn-Ag、Sn-Ag-Cu 无铅钎料 合金	540
3.1.1 钎料的分类和性能	513	4.2.3 Sn-Cu、Sn-Cu-Ni 无铅钎料 合金	546
3.1.2 钎剂的分类和性能	514	4.2.4 Sn-Zn、Sn-Zn-Bi 无铅钎料 合金	551
3.2 软钎料	516	4.3 无铅钎焊用钎剂简介	554
3.2.1 锡基和铅基钎料	516	4.3.1 钎剂的组成及分类	555
3.2.2 镉基、锌基和金基钎料	520	4.3.2 电子用钎剂的作用机理	555
3.2.3 低熔点钎料	522	4.4 无铅钎焊方法及设备	556
3.3 硬钎料	522	4.4.1 无铅波峰焊	557
3.3.1 铝基钎料	522	4.4.2 无铅回流焊	559
3.3.2 银钎料	523	参考文献	562
3.3.3 铜基钎料	527		
3.3.4 锰基钎料	528		
3.3.5 镍基钎料	529		
3.4 钎剂	530		

第4篇 高能束及其他焊接方法基础

第1章 激光焊接与切割	566	1.4 激光焊原理及特点	580
1.1 激光的产生原理	566	1.4.1 激光热传导焊原理及特点	581
1.1.1 原子能级结构	566	1.4.2 激光深熔焊原理及特点	581
1.1.2 原子的辐射跃迁与吸收跃迁	566	1.4.3 焊接熔池动力学	581
1.1.3 激励与粒子数反转	567	1.5 激光焊技术与工艺	582
1.1.4 光学谐振腔	567	1.5.1 激光热传导焊	582
1.1.5 激光特性	568	1.5.2 激光深熔焊	583
1.1.6 激光束质量特征描述	569	1.5.3 激光填丝焊	584
1.2 激光焊焊接设备	570	1.5.4 激光-电弧复合焊	586
1.2.1 激光焊焊接设备的组成	570	1.5.5 双光束激光焊	589
1.2.2 激光器	570	1.5.6 激光钎焊	590
1.2.3 光束传输与聚集系统	573	1.6 激光焊应用实例	592
1.2.4 工艺介质传输系统	575	1.6.1 法兰-管端环缝的激光深熔焊	592
1.3 激光焊时激光与材料的相互作用	576	1.6.2 铝合金激光填丝焊	592
1.3.1 金属材料对激光的吸收	577	1.6.3 船用钢板 T 形接头激光-电弧 复合焊	594
1.3.2 汽化和光致等离子体	579	1.6.4 双光束激光焊技术的应用	594
1.3.3 匙孔效应	580		

1.6.5 镀锌钢板的激光钎焊	596	3.1.1 电渣焊原理	643
1.7 激光切割的原理及特点	596	3.1.2 电渣焊工艺特点	643
1.7.1 激光切割的原理及分类	597	3.1.3 电渣焊过程	644
1.7.2 激光切割质量的影响因素	598	3.2 电渣焊工艺	644
1.7.3 连续激光切割的特性及应用	599	3.2.1 电渣焊方法	644
1.7.4 脉冲激光切割的特性及应用	600	3.2.2 电渣焊焊接参数	646
参考文献	601	3.2.3 电渣焊辅助工艺措施	648
第2章 电子束焊	603	3.3 电渣焊材料	649
2.1 电子束焊与深熔效应	603	3.3.1 焊丝	649
2.1.1 电子束焊工作原理	603	3.3.2 焊剂	649
2.1.2 电子束焊工艺特点	603	3.3.3 熔嘴	650
2.1.3 深熔效应	604	3.4 电渣焊设备	650
2.2 电子束焊工艺	607	3.5 电渣焊应用	651
2.2.1 电子束焊焊接参数及其对焊缝 形状的影响	607	3.5.1 箱形建筑钢结构隔板的电渣焊	651
2.2.2 电子束焊焊接参数的匹配	609	3.5.2 重型厂房柱子的管极熔嘴 电渣焊	653
2.2.3 电子束焊的特殊工艺规程	610	3.5.3 高炉炉壳纵缝电渣焊	654
2.2.4 电子束焊的接头设计	611	3.6 带极电渣堆焊	655
2.3 各种材料的电子束焊	613	3.6.1 带极电渣堆焊的特点	655
2.3.1 焊接性的影响因素	613	3.6.2 带极电渣堆焊设备和材料	656
2.3.2 中碳调质钢的焊接	614	3.7 振动调制电渣焊	658
2.3.3 不锈钢的焊接	615	参考文献	658
2.3.4 高温合金的焊接	620	第4章 气焊、气割与高压水射流 切割	660
2.3.5 钛合金的焊接	622	4.1 气焊	660
2.3.6 铝合金的焊接	624	4.1.1 气焊工艺	660
2.3.7 其他金属的焊接	626	4.1.2 气焊材料	664
2.4 电子束焊焊接设备	630	4.2 气割工艺及设备	664
2.4.1 电子束焊机的系统结构	630	4.2.1 气割的基本原理	665
2.4.2 电子束焊机的分类	631	4.2.2 气割工艺	666
2.4.3 电子束扫描控制系统	631	4.2.3 气割的应用	670
2.4.4 电子束焊的焊接过程控制	632	4.2.4 气焊与气割的设备及辅助器具	670
2.5 电子束焊的应用	633	4.3 高压水射流切割的工艺及设备	673
2.5.1 齿轮组合件的焊接	633	4.3.1 高压水射流切割的工作原理	673
2.5.2 汽车后桥壳的焊接	634	4.3.2 高压水射流切割的分类	673
2.5.3 铝合金汽车驾驶舱横梁的焊接	635	4.3.3 高压水射流切割的工艺特点	674
2.5.4 空间飞行器压力容器的焊接	635	4.3.4 高压水射流切割的工艺参数	675
2.5.5 导弹发射架的焊接	635	4.3.5 高压水射流切割的应用范围	678
2.5.6 动力舱段壳体的焊接	636	参考文献	679
2.5.7 薄壁空心铝球的焊接	638	第5章 热剂焊	680
2.5.8 铈钛异种金属直接电子束焊	639	5.1 热剂焊的原理及特点	680
2.5.9 固体火箭发动机壳体的焊接	641	5.1.1 热剂反应及反应产物	680
参考文献	642	5.1.2 钢中的冶金过程	682
第3章 电渣焊	643	5.2 热剂焊材料	684
3.1 电渣焊原理及特点	643		

5.2.1 热剂的组成及配方计算	684	6.3 胶接工艺	698
5.2.2 热剂的生产	686	6.3.1 胶接接头的设计	698
5.3 热剂焊工艺	687	6.3.2 表面处理	701
5.3.1 准备工作和钢轨处理	687	6.3.3 胶接工艺过程和方法	701
5.3.2 夹具和砂模的安装	688	6.3.4 固化工艺参数	702
5.3.3 热剂焊操作过程	689	6.3.5 胶接质量控制	702
5.3.4 焊后处理	689	6.4 胶粘剂和胶接性能测定	704
5.4 热剂焊的其他应用	690	6.4.1 胶粘剂的物理化学性能测定	704
5.4.1 导线的热剂焊特点	690	6.4.2 胶接力学性能检测	704
5.4.2 导线的热剂焊及其接头形式	691	6.4.3 无损检测	705
参考文献	692	6.5 胶接应用	705
第6章 胶接	693	6.5.1 胶接技术在土木工程行业的典型应用	705
6.1 胶接的特点及机理	693	6.5.2 胶接技术在汽车行业的典型应用	706
6.1.1 胶接的特点	693	6.5.3 胶接技术在航空行业的典型应用	706
6.1.2 胶接的机理	693	参考文献	707
6.2 胶粘剂	695		
6.2.1 胶粘剂的分类	695		
6.2.2 胶粘剂的选择	696		

第5篇 焊接过程控制及自动化基础

第1章 焊接过程自动控制技术	710	1.4.7 焊接过程的其他控制方法	749
1.1 焊接过程自动控制系统概述	710	参考文献	749
1.2 焊接过程控制的微处理器应用	710	第2章 焊接过程信号检测与故障诊断	750
1.2.1 单片机的应用原理及特点	711	2.1 焊接过程的传感器技术	750
1.2.2 DSP 数字信号处理器的应用原理及特点	714	2.1.1 焊接传感器的分类	750
1.2.3 ARM 嵌入式系统的应用原理及特点	721	2.1.2 位置传感器	750
1.2.4 PLC 可编程序逻辑控制器的应用原理及特点	724	2.1.3 霍尔式传感器	752
1.2.5 PC 计算机的应用原理及特点	726	2.1.4 电磁式传感器	753
1.2.6 其他数字处理器控制技术	728	2.1.5 光电式传感器	754
1.3 焊接过程控制系统的可靠性与电磁兼容技术	730	2.1.6 光学传感器	755
1.3.1 电磁兼容问题	730	2.1.7 电弧传感器	755
1.3.2 噪声的来源及其耦合方式	730	2.1.8 红外热像传感器	756
1.3.3 抗干扰方法及其设计	731	2.1.9 超声波传感器	756
1.4 焊接过程自动控制方法	733	2.1.10 其他传感器	757
1.4.1 焊接工艺的程序控制	733	2.2 焊接过程的信号检测	758
1.4.2 焊接质量控制原理	733	2.2.1 焊接过程的电参数检测	758
1.4.3 焊接过程的 PID 控制原理	737	2.2.2 焊接过程的视觉检测及信号处理	761
1.4.4 焊接过程的模糊控制原理	740	2.2.3 焊接过程的质量信号检测	762
1.4.5 焊接过程的人工神经网络控制	746	2.4 焊接过程故障诊断技术	764
1.4.6 焊接过程的专家控制原理	747	2.4.1 弧焊设备与焊接过程的故障诊断	764
		2.4.2 焊接过程的远程故障诊断	766