



普通高等教育材料成型及控制工程
系列规划教材

现代电弧焊接 方法及设备

吴志生 杨立军 李志勇 主编



化学工业出版社



普通高等教育材料成型及控制工程
系列规划教材

现代电弧焊接 方法及设备

吴志生 杨立军 李志勇 主编
栗卓新 雷玉成 张红霞 赵菲 权旺林 阴旭 参编



化学工业出版社

·北京·

本书是根据教育部材料成型及控制工程专业教学指导委员会和化学工业出版社在北京组织的材料成型与控制工程专业教学研讨会的会议精神编写的。

本书主要讲述各种常用电弧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,并对各种电弧焊接方法的新发展作了概括介绍。全书共分10章:前4章集中介绍电弧焊及其发展中的一些共性的内容,如电弧的物理基础、焊接电弧的特性(即电特性、产热特性及力学特性等)、焊材(焊条、焊丝)的熔化和熔滴过渡、母材熔化和焊缝成形规律等;在第5章至第10章中系统介绍焊条电弧焊、埋弧自动焊、钨极惰性气体保护电弧焊、熔化极气体保护电弧焊、药芯焊丝电弧焊、等离子电弧焊等弧焊方法及设备。本书着重讲述常用电弧焊接方法应用中的基本理论和实践问题。

本书为高等院校焊接专业学生用教材,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

现代电弧焊接方法及设备/吴志生,杨立军,李志勇
主编. —北京:化学工业出版社,2010.8
(普通高等教育材料成型及控制工程系列规划教材)
ISBN 978-7-122-08833-8

I. 现… II. ①吴…②杨…③李… III. 电弧焊-高等学校-教材 IV. TG444

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第111805号

责任编辑:彭喜英

文字编辑:李 玥

责任校对:顾淑云

装帧设计:周 遥

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装:北京市兴顺印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张18¼ 字数485千字 2010年8月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:36.00元

版权所有 违者必究

序

材料成型及控制工程专业是1998年国家教育部进行专业调整时,在原铸造专业、焊接专业、锻压专业及热处理专业基础上新设立的一个专业,其目的是为了改变原来老专业口径过窄、适应性不强的状况。新专业强调“厚基础、宽专业”,以拓宽专业面,加强学科基础,培养出适合经济快速发展需要的人才。

但是由于各院校原有的专业基础、专业定位、培养目标不同,也导致在人才培养模式上存在较大差异。例如,一些研究型大学担负着精英教育的责任,以培养科学研究型和科学研究与工程技术复合型人才为主,学生毕业以后大部分攻读研究生,继续深造,因此大多是以通识教育为主。而大多数教学研究型和教学型大学担负着大众化教育的责任,以培养工程技术型、应用复合型人才为主,学生毕业以后大部分走向工作岗位,因此大多数是进行通识与专业并重的教育。而且目前我国社会和工厂企业的专业人才培养体系没有完全建立起来;从人才市场来看,许多工厂企业仍按照行业特征来招聘人才。如果学生在校期间的专业课学得少,而毕业后又不能接受继续教育,就很难承担用人单位的工作。因此许多学校在拓宽了专业面的同时也设置了专业方向。

针对上述情况,教育部高等学校材料成型及控制工程专业教学指导分委员会于2008年制定了《材料成型及控制工程专业分类指导性培养计划》,共分四个大类。其中第三类为按照材料成型及控制工程专业分专业方向的培养计划,按这种人才培养模式培养学生的学校占被调查学校的大多数。其目标是培养掌握材料成形及控制工程领域的基础理论和专业基础知识,具备解决材料成形及控制工程问题的实践能力和一定的科学研究能力,具有创新精神,能在铸造、焊接、模具或塑性成形领域从事设计、制造、技术开发、科学研究和管理等工作,综合素质高的应用型高级工程技术人才。其突出特色是设置专业方向,强化专业基础,具有较鲜明的行业特色。

由化学工业出版社组织编写和出版的这套“材料成型及控制工程系列规划教材”,针对第三类培养方案,按照焊接、铸造、塑性成形、模具四个方向来组织教材内容和编写方向。教材内容与时俱进,在传统知识的基础上,注重新知识、新理论、新技术、新工艺、新成果的补充。根据教学内容、学时、教学大纲的要求,突出重点、难点,力争在教材中体现工程实践思想。体现建设“立体化”精品教材的宗旨,提倡为主干课程配套电子教案、学习指导、习题解答的指导。

希望本套教材的出版能够为培养理论基础和专业扎实、工程实践能力和创新能力、综合素质高的材料成形及加工的专业性人才提供重要的教学支持。

教育部高等学校材料成型及控制工程专业教学指导分委员会主任

李睿峰

2010年4月

前 言

本教材是根据“教育部材料成型及控制工程专业教学指导分委员会”制定的“材料成型及控制工程（分专业方向）本科培养方案”编写的。

教育部在1998年按照厚基础、宽口径的人才培养模式，将我国高等院校的学科专业由原有的504个合并调整为249个。在调整后的新专业目录中，原来的焊接专业或是成为材料成型及控制工程专业的组成部分，或是成为材料成型及控制工程专业的一个方向，或是成为材料科学与工程专业的组成部分，或是成为机械工程及自动化专业的组成部分。考虑原焊接专业的特殊性，教育部在国家新专业目录外增设了焊接技术与工程专业。

焊接专业或专业方向在高等院校办学中所具有的特殊地位，与其在现代工业和科学技术中的作用以及焊接学科本身特点密切相关。随着现代工业和科学技术的不断发展，重大装备提出了动载、强韧性、高压、高温、低温、耐腐蚀、耐磨损等各种使用要求，需要焊接数千毫米的厚壁到几微米截面直径的各种结构，需要焊接黑色金属材料、有色金属材料及不断涌现的复合材料、半导体材料、陶瓷材料、纳米材料等各种新材料。产品的新要求、新工作环境、新结构及新材料应用，对焊接新方法、新工艺、新设备和新焊接材料的产生形成强大动力。目前，各国焊接结构每年消耗国家钢材产量近半，在我国达到3亿多吨，使焊接技术的应用十分广泛，带动很多产业的快速发展，并对焊接专业毕业生的需求旺盛。

焊接学科是基于多学科交叉融合的产物，其发展有赖于物理学、化学、材料学、力学、钢铁冶金学、机械制造学、电工电子学、计算机控制理论、人工智能等学科的发展，同时，随着这些学科及现代科学技术的发展，又强力促进焊接新材料、新工艺的不断涌现，促进焊接工艺自动化、机器人化和智能化，使焊接技术更新更快地发展。近半个世纪以来，焊接技术在工艺、材料、设备等领域取得了很大成就，已经由过去单纯的手工作业逐步发展为机械化、自动化、机器人化甚至智能化，成为制造业必需的基本制造技术之一。

电弧焊接方法是现代焊接方法中应用最广泛、最重要的一类焊接方法。电弧焊接方法及设备课程是焊接学科中的主干课程之一。根据焊接产业和焊接学科的现状和发展形势，本着既加强电弧焊接方法的理论基础，又注重电弧焊接方法的工程应用，培养适合现代焊接工程需要的工程技术人员的精神，在教指委和化学工业出版社的组织下，在天津大学、北京工业大学、江苏大学、中北大学、太原理工大学和太原科技大学等院校多年从事焊接方法及设备课程教学的教师协作努力下，融合各位专家学者多年的教学经验和科研成果，编写了该教材。

该教材由吴志生教授、杨立军博士和李志勇博士主编。绪论、第2章、第3章、第4章由太原科技大学吴志生教授、赵非博士编写，并负责全书统稿；第1章和第10章由中北大学李志勇博士编写并协助全书统稿；第5章由江苏大学雷玉成教授编写；第6章由天津大学杨立军博士编写并协助全书统稿；第7章由太原理工大学张红霞博士编写；第8章由太原科技大学权旺林副教授、阴旭编写；第9章由北京工业大学栗卓新教授编写。

在编写过程中，得到了许多专家学者和同行的帮助和支持，在此表示衷心的感谢，并向本书中所引用文献的作者深表谢意！

由于作者水平有限，书中难免有疏漏和欠妥之处，敬请广大读者批评指正！

编 者

2010.4

目 录

绪论	1
0.1 电弧焊接方法在现代工业中的广泛应用	1
0.2 电弧焊接方法的发展历史	3
0.3 课程性质及教学内容	5
第1章 电弧物理基础	7
1.1 物质的状态及等离子体基础	7
1.1.1 按温度高低分类	7
1.1.2 按粒子密度分类	8
1.1.3 按等离子体的产生分类	8
1.1.4 按等离子体电离的程度分类	8
1.2 气体粒子的运动及其温度	9
1.2.1 气体粒子动能和温度的关系	9
1.2.2 麦克斯韦速度分布规律	9
1.2.3 平均自由程	10
1.2.4 气体粒子的碰撞	10
1.3 气体的电离	11
1.3.1 气体放电的分类	11
1.3.2 电弧中气体的电离与激励现象	12
1.3.3 电弧中气体的电离种类	14
1.3.4 电弧中带电粒子的复合	16
1.4 电子发射	16
1.4.1 热发射	17
1.4.2 电场发射	18
1.4.3 光发射	18
1.4.4 粒子碰撞发射	18
1.5 电弧中电子的运动和导电	19
1.6 电弧的辐射	20
1.6.1 黑体辐射	20
1.6.2 激发辐射	21
1.6.3 复合辐射	22
1.6.4 韧致辐射	22
参考文献	23
第2章 焊接电弧的特性	24
2.1 焊接电弧的电特性	24
2.1.1 焊接电弧的静特性	24
2.1.2 电流变动的直流电弧的动特性	25
2.2 焊接电弧的产热特性	26
2.2.1 焊接电弧的产热机构	26
2.2.2 电弧的温度分布	27
2.2.3 焊接电弧的热效率及能量密度	28
2.3 焊接电弧的力学特性	29
2.3.1 电弧力及其作用	29
2.3.2 电弧力的影响因素	31
2.4 焊接电弧的种类	33
2.4.1 太空中的焊接电弧	33
2.4.2 深水中的焊接电弧	36
2.4.3 外部磁场中的焊接电弧	38
2.4.4 通过特定机械装置的焊接电弧	40
2.5 不同种类电流的焊接电弧	41
2.5.1 直流电弧	41
2.5.2 交流电弧	41
2.5.3 脉冲电弧	42
参考文献	42
第3章 焊材的熔化与熔滴过渡	43
3.1 焊条的熔化与熔滴过渡	43
3.1.1 焊条的加热及熔化	43
3.1.2 焊条的熔滴过渡	45
3.1.3 焊条电弧焊的飞溅	49
3.2 焊丝的熔化与熔滴过渡	53
3.2.1 焊丝的加热与熔化	53
3.2.2 焊丝的熔滴过渡	54
3.2.3 焊丝熔滴过渡的飞溅	61
参考文献	65
第4章 母材的熔化与焊缝成形	66
4.1 焊接电弧热对母材的作用	66
4.1.1 焊接热源的作用模式	66

4.1.2 集中热源	66	4.3 电弧焊焊缝几何尺寸	89
4.1.3 平面分布热源	66	4.4 影响电弧焊焊缝成形的因素	90
4.1.4 体积分布热源	69	4.4.1 焊接参数对焊缝成形的影响	90
4.1.5 电弧焊热效率和焊件加热区的 热能分布	70	4.4.2 其他工艺因素对焊缝成形的 影响	91
4.1.6 电弧热传递的基本方式	71	4.4.3 焊缝成形缺陷及产生原因	93
4.2 电弧焊接熔池的形态	74	4.5 电弧焊焊缝成形的控制	94
4.2.1 瞬态 TIG 焊熔池流场和热场的 数值分析	75	4.5.1 焊缝成形控制方式	95
4.2.2 MIG/MAG 焊接熔池形态的 数值模拟	84	4.5.2 焊缝成形控制实例	95
		参考文献	96

第 5 章 焊条电弧焊接方法及设备

5.1 焊条电弧焊接方法特点及应用	97	5.6 焊条电弧焊的特殊方法	116
5.2 焊条电弧焊接方法的原理	97	5.6.1 重力焊	116
5.3 焊条电弧焊接方法的设备	98	5.6.2 躺焊	117
5.3.1 弧焊电源	98	5.7 焊条电弧焊焊缝形状缺陷及防止措施	118
5.3.2 常用工具和辅具	100	5.8 焊条电弧焊安全与防护技术	119
5.4 焊条电弧焊接工艺	102	5.9 焊条电弧焊接工程实例	120
5.4.1 焊条电弧焊焊条	102	5.9.1 高炉炉壳的立焊	120
5.4.2 焊条电弧焊接头设计	106	5.9.2 载重汽车中(后)桥轴管(头) 断裂的焊接	121
5.4.3 焊接工艺参数	108	5.9.3 螺栓球网架支座与钢球的焊条 电弧焊接	122
5.5 焊条电弧焊操作技术	111	参考文献	124
5.5.1 基本操作技术	111		
5.5.2 单面焊双面成形操作技术	114		
5.5.3 管道立向下焊接技术	115		

第 6 章 埋弧自动焊接方法及设备

6.1 埋弧自动焊接方法的特点和应用	126	6.5.3 典型埋弧自动焊机	150
6.1.1 埋弧焊的特点	126	6.6 埋弧自动焊接工艺	157
6.1.2 埋弧焊工艺方法的应用	127	6.6.1 埋弧焊工艺的内容	157
6.2 埋弧自动焊接方法的原理	127	6.6.2 焊前准备	157
6.3 熔化极电弧焊接方法的自动调节 系统	128	6.6.3 对接接头埋弧焊工艺	158
6.3.1 自动调节的概念	129	6.6.4 T 形接头和搭接接头埋弧焊 工艺	163
6.3.2 等速送丝熔化极电弧焊自动调节 系统	130	6.7 埋弧自动焊接工程实例	164
6.3.3 变速送丝熔化极电弧焊自动调节 系统	133	6.7.1 15 万千瓦高压加热器壳体纵缝 双面埋弧焊	164
6.4 埋弧自动焊接方法的化学冶金反应	137	6.7.2 600MW 锅炉锅筒纵环缝窄间隙 埋弧焊	165
6.4.1 冶金过程的一般特点	137	6.7.3 300MW 混流式水轮机转轮双 金属上冠不锈钢带极埋弧堆焊	167
6.4.2 埋弧焊焊丝与焊剂的配合	138	6.8 埋弧自动焊接方法的进展	169
6.4.3 低碳钢埋弧焊的主要冶金反应	139	6.8.1 加大焊丝伸出长度焊接法	169
6.5 埋弧自动焊接方法的设备	143	6.8.2 热丝埋弧焊接法	170
6.5.1 埋弧自动焊机的类型	144	6.8.3 多丝埋弧焊接法	170
6.5.2 埋弧自动焊机的组成	144		

6.8.4 加金属粉末埋弧焊接法	172	6.8.6 埋弧堆焊接法	174
6.8.5 窄间隙埋弧焊接法	172	参考文献	174
第7章 钨极惰性气体保护电弧焊接方法及设备	176		
7.1 钨极惰性气体保护电弧焊接方法的 特点及应用	176	7.4.3 填充金属	189
7.1.1 钨极惰性气体保护电弧焊特点 ..	176	7.5 钨极惰性气体保护电弧焊接方法的 焊接工艺	189
7.1.2 钨极惰性气体保护电弧焊的 应用	177	7.5.1 气体保护效果	189
7.2 钨极惰性气体保护电弧焊接原理	177	7.5.2 焊前准备	191
7.3 钨极惰性气体保护电弧焊接方法的 设备	178	7.5.3 操作技术	196
7.3.1 焊接电源	178	7.5.4 钨极惰性气体保护电弧焊安全 技术	196
7.3.2 引弧和稳弧装置	182	7.6 钨极惰性气体保护电弧焊接方法的 进展	197
7.3.3 焊枪	183	7.6.1 脉冲钨极惰性气体保护电弧焊接 方法	197
7.3.4 供气系统与水冷系统	184	7.6.2 热丝 TIG 焊	199
7.3.5 控制系统	184	7.6.3 钨极氩弧点焊	200
7.4 钨极惰性气体保护电弧焊接方法的 焊接材料	185	7.6.4 双电极脉冲氩弧焊	201
7.4.1 保护气体	185	7.6.5 激光-TIG 复合焊	202
7.4.2 电极材料	187	参考文献	202
第8章 熔化极气体保护电弧焊接方法及设备	203		
8.1 熔化极气体保护电弧焊接特点及 应用	203	8.4.3 焊接参数的设定	218
8.2 熔化极气体保护电弧焊接原理	203	8.4.4 接头设计	226
8.2.1 焊接过程	203	8.4.5 焊接设备选择	226
8.2.2 熔滴过渡	204	8.5 熔化极气体保护电弧焊接方法的 进展	226
8.3 熔化极气体保护电弧焊接设备	209	8.5.1 熔化极脉冲氩弧焊	226
8.3.1 送丝系统	209	8.5.2 熔化极气体保护电弧点焊	229
8.3.2 焊枪	212	8.5.3 双丝熔化极气体保护电弧焊	231
8.3.3 供气系统和水冷系统	214	8.5.4 窄间隙熔化极气体保护电弧焊 ..	232
8.3.4 焊接电源	214	8.5.5 气电立焊	233
8.3.5 控制系统	215	8.5.6 TIME 焊	233
8.4 熔化极气体保护电弧焊接工艺	216	8.5.7 CMT 工艺	234
8.4.1 焊丝的选择	216	参考文献	235
8.4.2 保护气体的选择	217		
第9章 药芯焊丝电弧焊接方法及设备	236		
9.1 药芯焊丝电弧焊的特点	236	9.2.3 药芯焊丝的电弧稳定性及飞溅 ..	245
9.1.1 药芯焊丝电弧焊的发展历史	236	9.2.4 药芯焊丝的焊接烟尘	246
9.1.2 药芯焊丝及其制造	238	9.3 药芯焊丝电弧焊的设备	247
9.1.3 药芯焊丝的种类及分类方法	241	9.3.1 焊接设备的组成	247
9.2 药芯焊丝电弧焊的原理	243	9.3.2 焊接电源	247
9.2.1 药芯焊丝电弧焊的基本原理	243	9.3.3 供气系统	248
9.2.2 药芯焊丝电弧焊的熔滴过渡	244	9.3.4 送丝系统	248

9.3.5 焊枪	249	9.4.4 药芯焊丝电弧焊的注意事项	256
9.4 药芯焊丝电弧焊的焊接参数	250	9.5 药芯焊丝电弧焊的焊接质量	257
9.4.1 药芯焊丝电弧焊的主要焊接参数	250	9.5.1 药芯焊丝的选用	257
9.4.2 焊接工艺参数对焊接质量的影响	250	9.5.2 药芯焊丝电弧焊常见缺陷及防止措施	260
9.4.3 药芯焊丝电弧焊的操作	256	参考文献	262
第 10 章 等离子电弧焊接方法及设备	264		
10.1 等离子电弧焊接方法的特点	264	10.4.3 等离子电弧焊的焊接参数	277
10.1.1 等离子电弧的特性	264	10.5 等离子电弧切割工艺特点及应用	279
10.1.2 等离子电弧焊的优点	265	10.5.1 等离子弧切割工作原理	279
10.1.3 等离子电弧焊的缺点	265	10.5.2 等离子弧切割方法分类	280
10.1.4 等离子电弧焊的分类及应用	265	10.5.3 等离子弧切割设备	282
10.2 等离子电弧焊接方法的原理	266	10.5.4 等离子弧切割工艺	283
10.2.1 等离子弧的产生及压缩效应	267	10.6 等离子电弧焊接、切割方法的安全防护技术	285
10.2.2 双弧现象 (double arc) 及防止措施	267	10.7 等离子电弧焊接方法的新进展	286
10.3 等离子电弧焊接的设备及材料	268	10.7.1 变极性等离子弧焊接	286
10.3.1 等离子弧的静特性	268	10.7.2 活性等离子弧焊	286
10.3.2 等离子弧焊设备的组成	269	10.7.3 粉末等离子弧焊堆焊及喷涂	287
10.3.3 等离子弧焊接材料	273	10.7.4 等离子弧-MIG 焊	288
10.4 等离子电弧焊接工艺特点及应用	275	10.7.5 磁控等离子弧堆焊	289
10.4.1 典型等离子电弧焊接方法	275	参考文献	289
10.4.2 等离子电弧焊接头形式和装配要求	277		

绪 论

0.1 电弧焊接方法在现代工业中的广泛应用

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、耐腐耐压的化工设备乃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，焊接是将这些零件连接起来的一种理想加工方法。电弧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。

城市轨道交通具有运量大、效率高、节能、污染少、舒适、安全和准点的突出优点，是其他交通运输工具所不能比拟的，已经成为国际大城市公共交通发展公认的首选模式。目前，国际城市轨道交通有地铁、轻轨、磁悬浮列车等多种类型，构成了城市公共交通的骨架体系。全铝结构铝合金车辆已经广泛用于我国铁路车辆动车组制造业和城市轨道交通设备制造业。在车辆制造过程中，框架结构大量采用型材拼接，接口长而规则（图 0-1），采用氩气保护熔化极电弧焊自动化作业，如图 0-2 所示。

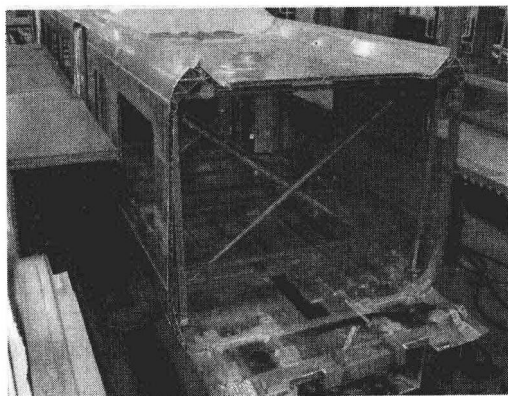


图 0-1 铝合金轻轨车辆焊接结构

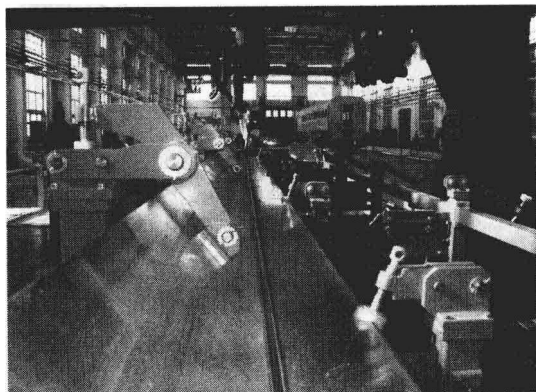


图 0-2 铝合金轻轨车辆自动氩气保护电弧焊接过程

发电厂和远距离输电网的建设是我国现代化发展中最重要基础建设。在水力、火力或核电厂的建设中，焊接是极为重要的手段。其中，核电站是体现一个国家材料研制水平和焊接能力的高技术产品。核电站安全壳为双层结构，钢网架混凝土外壳直径大于 40m，高 60~80m，厚 4m，内壳是焊接钢结构。核电站的核心是由压力容器（堆芯）、热交换器、一回路的管道组成的核岛部分，其中进行 U-235 裂变的是一个高 13m，直径 4m、厚 200mm 的压力容器，其材料为耐高温（大于 500℃）、耐高压（工作压力大于 400atm）的合金钢材，管道和热交换器也满足上述的各项工作条件，这些器件都是焊接产品，制造过程中采用的电弧焊接方法有埋弧自动焊、熔化极气体保护焊和焊条电弧焊等，核电站组成及焊接部件如图 0-3 所示。

炼油、化纤、化肥等各类石油化工厂中的各种压力容器几乎全是焊接结构。锅炉、压力容器制造业是我国重要的基础工业之一，是体现我国工业水平的一个重要标志性产业。高容

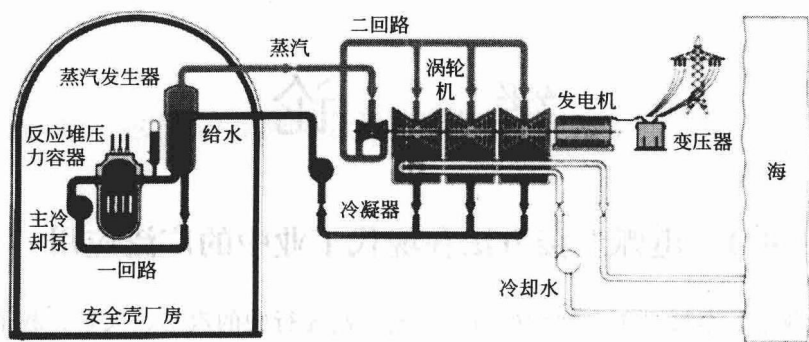


图 0-3 核电站的焊接部件

量、高参数锅炉中出现的耐热、高强材料的焊接技术，按设计工作压力分为低压（0.1～1.6MPa）、中压（1.6～10MPa）、高压（10～100MPa）、超高压（>100MPa）四个承压等级，按容器工作介质的易燃、致毒程度分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类；重型压力容器主要包括核电机组中的核岛压力容器（图 0-4）、大型煤制气成套设备中的煤液（气）化反应器、大型乙烯装置中的加氢反应器、大型火力发电机组中的锅炉汽包等，在这些重型压力容器生产制造中，应用双丝窄间隙埋弧两维或三维曲面的自动化焊接，如图 0-5 所示，焊缝特点为大厚度、深坡口，最大坡口深度达 300mm。

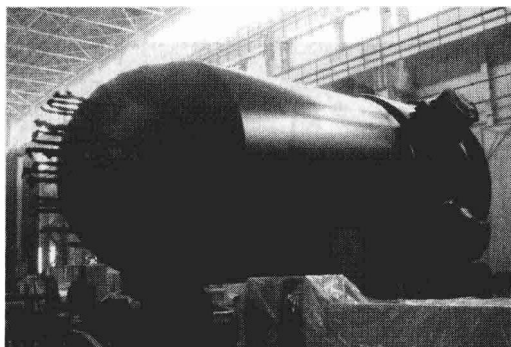


图 0-4 核岛压力容器

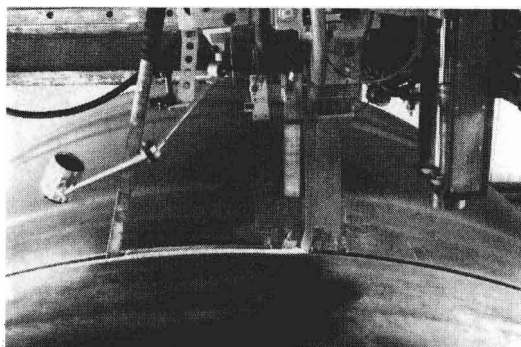


图 0-5 核岛压力容器双丝窄间隙埋弧自动焊过程

随着国际贸易和远洋运输事业的飞速发展，海船已向 30 万吨以上超大型方向发展，我国目前已能建造 20 万吨级以上超大型船舶，上海建造的 6 万吨油船已成批生产并出口国外。在船舶建造过程中，焊接是重要工序之一，焊接工时约占船体建造总工时的 30%～40%，焊缝金属约占船体金属重量的 1.5%。焊接效率则直接影响到造船周期和成本。为满足船体的结构强度要求，焊缝必须达到一定的强度，能承受强风浪的冲击，如果焊接接头存在严重的焊接缺陷，在恶劣的环境下，可能会造成部分结构断裂，甚至造成断船沉没的重大事故。我国的船舶制造业快速壮大，每年的订单和年造船产量跃居世界第二。在船舶焊接建造过程中，采用的电弧焊接方法有焊条电弧焊、埋弧自动焊和二氧化碳气体保护焊等。焊接建造的大型船舶如图 0-6 所示。

三峡水利工程、西气东输工程以及“神舟”号载人飞船等都采用了焊接结构。如西气东输工程，在全长约 4300km 的输气管道上，焊接接头的数量竟达 35 万个以上，整个管道上焊缝的长度至少 1500km，焊接施工中主要采用熔化极气体保护自动焊和焊条电弧焊，西气东输工程焊接现场如图 0-7 所示。



图 0-6 焊接建造的大型船舶

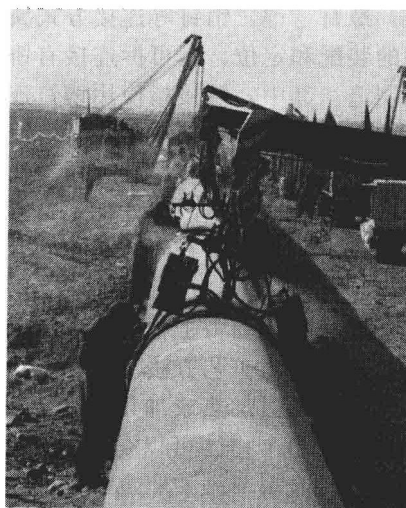


图 0-7 西气东输焊接工程

工程机械是土木工程所用各种机械和设备的总称，主要用于完成物料起重、运输、装卸作业，土石方的采集、破碎作业，混凝土搅拌、成型作业等，主要有铲土运输机械、挖掘机械、压实机械、起重机械、桩工机械、钢筋混凝土机械、路面机械、石料开采加工机械、桥梁机械、隧道机械、装修机械和铁道机械。推土机作为铲土运输机械的一种，其主要焊接结构件有推土机后桥箱、平衡梁、台车方盒，这些工件的焊缝形式既有长达 4m 的直焊缝（台车方盒），也有短小密集、空间位置复杂的焊缝（后桥箱的焊接结构，见图 0-8），其大多数钢板厚度在 10~30mm 之间，属于中厚板，采用熔化极二氧化碳气体保护焊弧焊机器人焊接推土机后桥箱如图 0-9 所示。

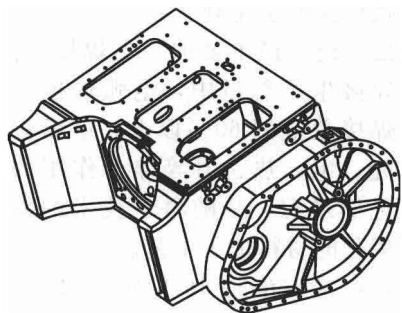


图 0-8 推土机后桥箱的焊接结构

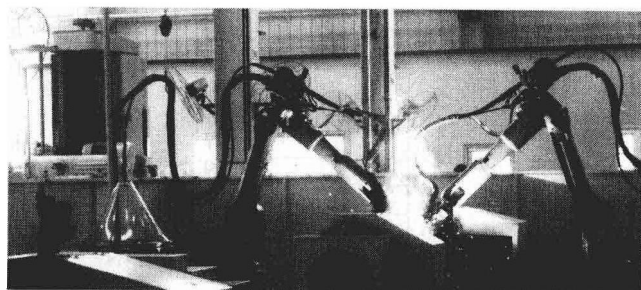


图 0-9 CO₂ 气体保护焊弧焊机器人焊接推土机后桥箱

据统计，半数以上的工业制品采用焊接连接技术制成。在钢铁、汽车、铁路车辆、舰船、航空和航天飞行器、石油化工设备、机床和工程施工机械、电机电器、微电子产品、家电等众多现代工业产品以及桥梁、高层建筑、城市高架或地铁、原子能反应堆及水力或火力发电站、石油或天然气的远距离管道、高能粒子加速器等许多重大工程建设中，电弧焊方法及设备都占据着十分重要的地位。

0.2 电弧焊接方法的发展历程

焊接是连接方法中的一种。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。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制造。其中，铆接指使用铆钉连接两件或两件以上工件的方法，应用较早，但它工序复杂、结构笨重、材料消耗也较大，因此，在现代工业中已逐步被焊接所取代。粘接是使用金属修补剂实现金属与金属和金属与非金属的固体界面相连接的技术，虽然工艺简单，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，对于重要结构的受力件不宜使用，应用范围有限。相比而言，焊接方法不但易于保证焊接结构强度的要求，而且相对来说工艺简单，加工成本低廉，所以焊接技术被广泛应用于机械制造、石油化工、桥梁、船舶、建筑、动力工程、交通车辆、航空航天等各个工业部门，已成为现代机械制造业中不可缺少的加工工艺方法。

焊接是指通过加热或加压或两者并用，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。作为一种材料的永久性连接方法，焊接的起源可追溯到几千年之前，钎焊和锻焊是人类最早使用的方法。早在 5000 年前，古埃及人已经用银铜钎料钎焊管子；在 4000 年前，用金钎料连接护符盒。我国在公元前 5 世纪，已经使用锡铅合金焊接铜器，从河南辉县琉璃阁战国墓出土的文物证实，其殉葬铜器的本体，耳、足用钎焊连接；明代科学家宋应星的《天工开物》对钎焊和锻焊技术作了详细描述。但作为一个技术应

用学科及基本制造技术取得长足进步，却是在 20 世纪 50 年代以后。

目前焊接方法很多，按其焊接过程特点可以将其分为熔焊、压焊和钎焊三大类。每大类又按不同的方法细分为若干小类，如图 0-10 所示。

电弧焊接方法是现代焊接方法之一，是应用最广泛、最重要的一类焊接方法，在世界焊接生产总量中，电弧焊接方法一般占焊接总量的 60% 以上。电弧焊接是一个光、电、热、力等综合作用的复杂物理化学过程，是随科学技术的发展而不断变化的材料加工工艺。

电弧焊接方法是 19 世纪末 20 世纪初现代科学技术发展的产物。1831 年，法拉第发现磁可以感应生成电；1832 年，法国人皮克西发明了手摇式直流发电机；1866 年，德国西门子公司发明了自励式

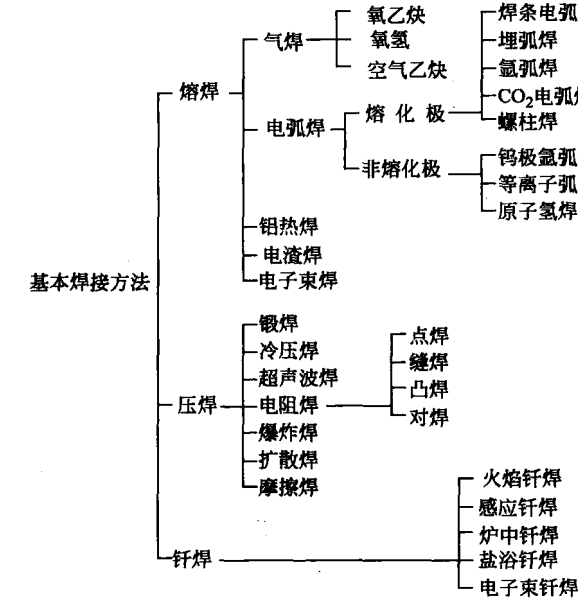


图 0-10 焊接方法分类

直流发电机；1869 年，比利时的格拉姆发明了环形电枢发电机；1882 年，美国的戈登制造了输出功率 447kW、高 3m、重 22t 的两相式巨型发电机；同年，英国的吉布斯研制了变压器；1884 年，英国的霍普金森制成了闭合磁路式变压器；西屋公司引进了吉布斯的变压器，于 1885 年开发出实用变压器。

气体放电现象在 19 世纪末被发现，电弧作为焊接热源开始应用；1881 年，法国人 De Meritens 发明了最早期的碳弧焊机；1885 年，俄罗斯人 Benardos 和 Olszewski 发展了碳弧焊接技术；1889~1890 年，美国人 C. L. Coffin 首次使用光焊丝进行了电弧焊接，并于 1890

年提出了在氧化介质中焊接的概念；1892 年发现了金属极电弧，随之出现了金属极电弧焊；1907 年 10 月，瑞典人 O. Kjellberg 完善了焊条（在用来作为填充金属及导电电极的金属棒外面涂上具有稳弧、保护等功能的药皮）；1909 年，Schonherr 发明了等离子弧（使用一个气体涡流稳流器后产生的电弧）；1926 年，美国 Alexandre 发明 CO_2 气体保护焊原理；1926 年，由美国的 A. O. Smith 公司率先介绍了在电弧焊接用金属电极外使用挤压方式制作起保护作用的固体药皮（即手工电弧焊焊条）的方法；1930 年，前苏联罗比诺夫发明埋弧焊；1935 年，美国 Linde Air Products 公司完善了埋弧焊技术。此后，焊接技术应用范围迅速扩大，在许多方面开始取代铆接并成为机械制造业的基础加工工艺。

20 世纪 40 年代初，惰性气体保护电弧焊开始在生产中大量运用，1941 年，美国人 Meredith 发明了钨极惰性气体保护电弧焊（氩弧焊）；进入 20 世纪 50 年代以后，随着现代工业和科学技术的迅猛发展，电弧焊接方法得到更快发展，1953 年出现了二氧化碳气体保护焊；1954 年自保护药芯焊丝在美国林肯（Lincoln）电气公司投入生产；1957 年，美国、英国和前苏联都在熔化极气体保护焊短路过渡工艺中使用了 CO_2 作为保护气体；1957 年出现了以等离子弧作为热源的等离子弧焊接和切割；1962 年气电立焊的专利权授予了比利时人 Arcos；1964 年，热丝焊接方法和协调控制熔化极气体保护焊接方法的专利权授予了美国人 Manz；1969 年热丝等离子弧喷涂工艺首次由美国的联合碳化物集团麾下的 Linde 公司提出；1970 年晶闸管逆变焊机问世。

20 世纪 80 年代以后，一方面，对现有电弧焊接方法进行完善，使之更为有效、方便、经济实用；另一方面，人们更积极有效地开发新的热源，例如采用两种热源叠加，如等离子弧加激光、电弧加激光（图 0-11）等。

电弧焊接技术是现代焊接技术的重要组成部分，其应用范围几乎涵盖了所有焊接生产领域。随着市场竞争日趋激烈，提高焊接生产率，保证产品质量，实现焊接生产自动化、智能化越来越得到生产企业的重视，而人工智能技术、计算机视觉技术、数字化信息处理技术、机器人技术等现代高新技术的融入，促使电弧焊接技术向着焊接工艺高效化、焊接电源控制数字化、焊接质量控制智能化、焊接生产过程机器人化的方向发展。

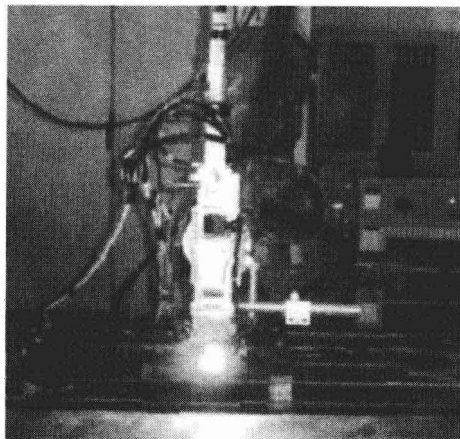


图 0-11 激光-电弧复合焊接

0.3 课程性质及教学内容

该课程是焊接技术与工程专业或材料成型及控制工程、材料科学与工程、机械工程及自动化等专业焊接方向的一门专业主干课程，是理论性和实践性均较强的专业课程，其先修课程为大学物理、电工及电子学、弧焊电源、焊接冶金学等。

该课程的教学目的是使学生掌握有关现代电弧焊接方法及设备的基础理论，各种电弧焊接方法的原理、设备及工艺。通过学习该课程，学生能够根据焊接工程的实际情况，选用适当的电弧焊接方法；能够调试各种电弧焊接设备；为能够制定特定电弧焊接方法的焊接工艺奠定基础，初步具备分析和解决焊接生产实际问题的能力。

该课程的主要内容有两部分，即电弧焊接方法及设备的基础理论和各种电弧焊接方

法的原理、设备及工艺。基础理论部分有电弧物理基础、焊接电弧的特性、焊材的熔化与熔滴过渡、母材的熔化与焊缝成形；电弧焊接方法的原理、设备及工艺部分涉及焊条电弧焊接方法及设备、埋弧自动焊接方法及设备、钨极惰性气体保护电弧焊接方法及设备、熔化极气体保护电弧焊接方法及设备、药芯焊丝电弧焊接方法及设备和等离子电弧焊接方法及设备。

第 1 章 电弧物理基础

电弧是在一定条件下电荷通过两电极间气体的一种导电过程，或者说是一种气体放电现象。借助这种特殊放电现象，产生电弧等离子体，将电能转换为热能、机械能和光能。认识该过程的本质和作用机理，需要从物质的存在状态、等离子体的物理本质、电弧产生的基本物理现象入手，了解气体粒子的运动、电离与放电现象、电子发射、辐射特点等基本规律，深刻理解电弧的形成过程。

1.1 物质的状态及等离子体基础

物质存在状态与一定的结合能相对应。通常把固态称为第一态；当分子平均动能超过分子在晶体中的结合能时，晶体结构破坏而转化成液体（第二态）或直接转化为气体（第三态）；当液体分子平均动能超过范德瓦尔斯键结合能时，第二态转化为第三态；当粒子平均动能大于电离能时，在轨道上运动的束缚态电子能脱离原子或分子而成为自由电子，形成等离子体态。因等离子体与固态、液态、气态截然不同，故为物质第四态。

等离子体（plasma）概念是为了描述真空放电管中辉光放电正柱区而提出的，由朗缪尔（Langmuir）在 1928 年从生物学中引入。等离子体一词现在被广泛地应用，来描述对外呈现电中性的电离气体。当被激发电离气体达到一定的电离度时，气体处于导电状态，这种状态的电离气体就表现出集体行为，即电离气体中每一带电粒子的运动都会影响到其周围带电粒子，同时也受到其他带电粒子的约束。由于电离气体整体行为表现出电中性，也就是电离气体内正负电荷数相等，所以称这种气体状态为等离子体态。焊接中所使用的电弧，从本质上讲是一种等离子体。

根据等离子体的自身特点、产生条件和应用领域可以将等离子体分成不同的种类。

1.1.1 按温度高低分类

自然界中存在的等离子体，温度差别非常大，从外太空高达 10^8K 的等离子体到室温下辉光放电的等离子体。这些等离子体的特性差别很大，等离子体按照温度差别可以分为高温等离子体和低温等离子体。

（1）高温等离子体 高温等离子体是指粒子温度在 $10^6 \sim 10^8\text{K}$ 之间的等离子体，如太阳、核聚变和激光聚变等产生的等离子体均属于高温等离子体。

（2）低温等离子体 低温等离子体是指粒子温度从室温到 $3 \times 10^4\text{K}$ 左右的等离子体。低温等离子体按重粒子温度水平又可分为热等离子体和冷等离子体。

① 热等离子体。低温等离子体中重粒子温度在 $3 \times 10^3 \sim 3 \times 10^4\text{K}$ 间，电子温度接近重粒子温度，达到热力学平衡或局部热力学平衡状态，可以认为具有统一的热力学温度，这类等离子体被称为热等离子体。在材料加工领域广泛应用的电弧等离子体、高频等离子体等均属于热等离子体。

② 冷等离子体。低温等离子体中，存在一类等离子体，其重粒子温度较低，只有室温左右，而电子温度可达上万度，没有通过充分的能量交换达到平衡，远离热力学平衡状态，这类等离子体被称为冷等离子体。如照明上辉光放电产生的等离子体就属于冷等离子体。

1.1.2 按粒子密度分类

- (1) 致密等离子体（或高压等离子体） 当粒子密度 $n > 10^{15} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时，就可称为致密等离子体或高压等离子体。这时粒子间的碰撞起主要作用，例如， $p = 0.1 \text{ atm}$ 以上的电弧均可看作致密等离子体。
- (2) 稀薄等离子体（低压等离子体） 当粒子密度 $n < 10^{12} \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 时，粒子间碰撞基本不起作用，这时称稀薄等离子体或低压等离子体。例如，辉光放电就属于此类型。

1.1.3 按等离子体的产生分类

等离子产生方法不同，提供气体物质电离的能量来源不同。据此，等离子体可分为燃烧等离子体、电弧等离子体、高频等离子体、激波等离子体、激光等离子体、聚变等离子体等。各种等离子体温度、电子密度的参数范围如图 1-1 所示。

根据产生方式也可以分为两大类：自然等离子体和实验室等离子体（即人工产生的等离子体）。自然等离子体广泛存在于宇宙中，宇宙中几乎有 99.9% 以上的物质以等离子体状态存在，如恒星星系、星云，又如地球附近的闪电、极光、电离层、范阿伦（Van Allen）带等。

地球上自然等离子体比较少，其主要原因是地球“寒冷”，温度低。我们知道，热平衡时，气体的电离度 α （表示中性气体原子或分子中有百分之几电离成带电粒子）可由萨哈（Saha）方程确定。

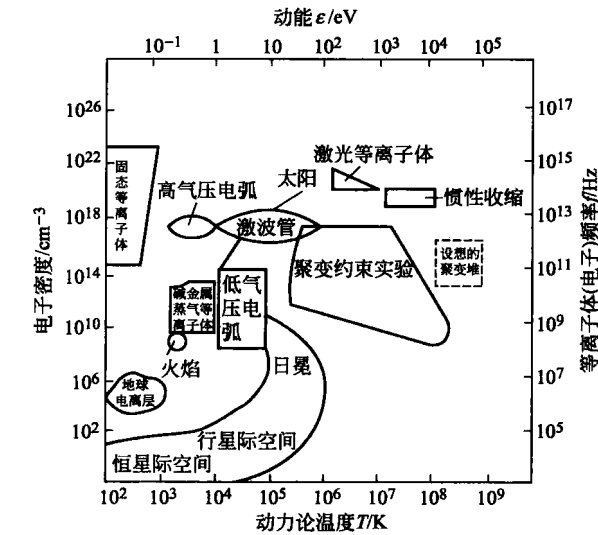


图 1-1 等离子体的电子密度-温度图

空气在室温下，如温度 T 在 300K 左右时，电离度 $\alpha \approx 10^{-122}$ ，可见，室温下电离度是很低的，一般温度下地球上空气电离度都不大。而在天体上，温度高达上百万度，在那里物质都处于等离子体状态。

实验室等离子体诸如日光灯、霓虹灯中放电，高速飞行器尾迹，火箭发动机喷管中燃气，等离子炬中的电弧，气体激光、激波管中的电离气体，受控核聚变时产生的高温等离子体，原子弹或氢弹爆炸时产生的高温等离子体，某些化学反应（燃烧）产生的燃气等离子体，紫外线和 X 射线辐射电离产生的等离子体等，它们都属于人工产生的等离子体。

1.1.4 按等离子体电离的程度分类

按等离子体电离的程度不同可分成三种。完全电离等离子体是指几乎所有分子（或原子）都电离成电子和离子。部分电离等离子体是指部分分子（或原子）电离成电子和离子，其他为中性分子，实际上 1% 的电离度就可使电导率接近完全电离时的电导率。弱电离等离子体是指只有少量分子（或原子）电离。另外，应该指出，不同原子在不同的温度下才能达到相同的电离度，例如铯（Cs）蒸气在 1500K 时电离度已相当大，而氩（Ar）气要达到与铯差不多大小的电离度，则要求约 6000K 的高温。在平衡条件下，温度在 20000K 以上，几乎所有的气体均高度电离。当气体处于非平衡状态时，特别是在低压稀薄气体中放电时，在