



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

熔焊方法及设备

第2版

沈阳工业大学 王宗杰◎主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

熔焊方法及设备



第2版

主编 王宗杰

参编 刘金合 杭争翔 李 桓

杨立军 朱锦洪 王纯祥

主审 殷树言



机械工业出版社

本书为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。

本书分为两部分：第一部分为有关熔焊的基础理论，包括焊接电弧基础理论、焊丝的熔化与熔滴过渡、母材的熔化与焊缝成形以及电弧焊自动控制基础；第二部分为各种熔焊方法，包括埋弧焊、钨极惰性气体保护焊、熔化极氩弧焊、CO₂ 气体保护电弧焊、等离子弧焊、电渣焊、电子束焊、激光焊以及复合焊，分别讲述其工作原理和特点、焊接设备、焊接材料、焊接工艺以及所派生出的新方法。本书注意理论联系实际，突出重点，采用最新的技术标准，并注意反映国内外新的研究成果和发展趋势。

本书可作为高等院校焊接技术与工程专业和材料成形及控制工程专业的主干课教材，亦可供从事焊接工艺及设备等技术领域工作的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

熔焊方法及设备/王宗杰主编. —2 版. —北京: 机械工业出版社, 2016. 6

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

ISBN 978-7-111-53370-2

I. ①熔… II. ①王… III. ①熔焊 - 焊接工艺 - 高等学校 - 教材②熔焊 - 焊接设备 - 高等学校 - 教材
IV. ①TG442

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 064906 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: 冯春生 责任编辑: 冯春生 程足芬

责任校对: 肖琳 封面设计: 张静

责任印制: 乔宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2016 年 8 月第 2 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 24 印张 · 590 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-53370-2

定价: 49.80 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

服务咨询热线: 010-88379833

读者购书热线: 010-88379649

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网: www.cmpbook.com

机工官博: weibo.com/cmp1952

教育服务网: www.cmpedu.com

金书网: www.golden-book.com

第2版前言

《熔焊方法及设备》是为满足高等院校焊接技术与工程专业和材料成形及控制工程专业的专业主干课之一——“熔焊方法及设备”课的教学需要而编写的教材。第1版自2007年出版以来,在国内几十所院校使用,受到了欢迎和好评,于2012年被教育部评为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。

本书是在第1版的基础上经过修订的教材。随着时间的推移,焊接技术不断有新的发展,部分国家和行业技术标准也有一些变动。在这种情况下,及时对原教材进行修订,有利于教学内容跟上科学技术发展的步伐,有利于教材在培养高质量的人才上发挥出其应有的作用。

第2版继续保持了第1版教材具有的系统性、先进性和实践性的特点,并在此基础上,根据焊接技术的发展,在内容上进行了必要的调整、补充和完善。例如,在有关熔焊方法的内容里,增加了“复合焊”一章,用以介绍近些年来焊接方法发展具有突破性的成果;在有关焊接自动控制和各种焊接设备的内容里,对先进的数字化控制给予了更多的关注;同时,根据近年来国家和行业技术标准变动的情况,对教材中所涉及的标准进行了更新。

《熔焊方法及设备》(第2版)仍然保持了第1版的内容结构,即全书分为以下两部分:

第一部分为有关熔焊的基础理论,包括焊接电弧、焊丝的熔化与熔滴过渡、母材的熔化与焊缝成形、电弧焊自动控制等基础理论。

第二部分为各种熔焊方法,包括埋弧焊、钨极惰性气体保护焊、熔化极氩弧焊、 CO_2 气体保护电弧焊、等离子弧焊、电渣焊、电子束焊、激光焊以及复合焊等。对每一种熔焊方法,都讲述了其工作原理和特点、焊接设备、焊接材料、焊接工艺以及所派生出的新方法。同时,为了增强其工程实践性,对每一种熔焊方法都列举了其工程应用实例。

本书由沈阳工业大学王宗杰教授任主编,北京工业大学殷树言教授担任主审。编写人员的分工为:绪论、第1章、第4章、第5章、第12章由沈阳工业大学王宗杰教授编写,并负责全书统稿;第2章由天津大学李桓教授编写;第3章、第7章、第9章由沈阳工业大学杭争翔教授编写;第6章由河南科技大学朱锦洪教授编写;第8章由天津大学杨立军教授编写;第10章由重庆科技学院王纯祥讲师编写;第11章由西北工业大学刘金合教授编写。

本书在编写过程中得到了许多同志的帮助和支持,主审殷树言教授对书稿进行了很认真的审阅,在此一并表示感谢,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

第1版前言

《熔焊方法及设备》是“普通高等教育‘十一五’重点规划教材”之一。它是为满足高等院校材料成形及控制工程专业（或焊接方向），以及其他与焊接有关专业的教学需要而编写的。

熔焊方法是焊接成形工艺的重要组成部分，也是现代制造业中应用最多的一类焊接方法。它的应用遍及机械制造、石油化工、船舶、桥梁、压力容器、建筑、动力工程、交通车辆、航空航天等各个工业部门，已成为现代制造业中不可缺少的成形加工方法之一。因此，“熔焊方法及设备”课无论是在原来的焊接专业，还是在现在的材料成形及控制工程专业（或焊接方向）的教学中都是一门专业主干课，它在构筑学生专业理论基础和培养学生焊接工程实践能力方面起着重要作用。

本书系统地讲述了有关熔焊的一些基础理论和焊接方法。其中，有关熔焊的基础理论有：焊接电弧基础理论、焊丝的熔化与熔滴过渡、母材的熔化与焊缝成形、电弧焊自动控制基础等。熔焊方法有：埋弧焊、钨极惰性气体保护焊、熔化极氩弧焊、 CO_2 气体保护电弧焊、等离子弧焊、电渣焊、真空电子束焊、激光焊等。对每一种熔焊方法，都讲述了其工作原理和特点、焊接设备、焊接材料、焊接工艺以及所派生出的其他方法。同时，为了增强其工程实践性，对每一种熔焊方法还列举了其工程应用实例。本教材注意理论联系实际，突出重点，采用最新的技术标准，并注意反映国内外新的研究成果和发展趋势。

本书由沈阳工业大学王宗杰教授任主编，北京工业大学殷树言教授任主审。编写人员分工：绪论、第1章、第4章、第5章由沈阳工业大学王宗杰教授编写，并负责全书统稿；第2章由天津大学李桓教授编写；第3章、第7章由沈阳工业大学杭争翔副教授编写；第6章由河南科技大学朱锦洪副教授编写；第8章由天津大学杨立军副教授编写；第9章由沈阳工业大学常云龙副教授编写；第10章由西北工业大学刘金合教授和重庆科技学院王纯祥讲师合编；第11章由西北工业大学刘金合教授编写。

在编写的过程中，得到了许多同志的帮助和支持，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

目 录

第2版前言

第1版前言

绪论	1
0.1 焊接方法的发展及分类	1
0.2 熔焊方法的物理本质及其特点	3
0.3 课程性质、任务及内容	5
第1章 焊接电弧	7
1.1 焊接电弧的物理基础	7
1.1.1 电弧的物理本质	7
1.1.2 电弧中带电粒子的产生	8
1.1.3 电弧中带电粒子的消失	14
1.2 焊接电弧的产生过程	15
1.2.1 接触式引弧	15
1.2.2 非接触式引弧	16
1.3 焊接电弧的构造及其导电机构	17
1.3.1 焊接电弧的构造	17
1.3.2 焊接电弧的导电机构	18
1.3.3 最小电压原理	21
1.4 焊接电弧的电特性	22
1.4.1 焊接电弧的静特性	22
1.4.2 焊接电弧的动特性	24
1.5 焊接电弧的产热及温度分布	27
1.5.1 焊接电弧的产热机构	27
1.5.2 焊接电弧的温度分布	29
1.6 焊接电弧力及其影响因素	30
1.6.1 焊接电弧力	30
1.6.2 焊接电弧力的影响因素	33
1.7 焊接电弧的稳定性及其影响	

因素	35
1.7.1 焊接电弧的稳定性	35
1.7.2 焊接电弧稳定性的影响因素	35
复习思考题	37
第2章 焊丝的熔化和熔滴过渡	38
2.1 焊丝的加热与熔化	38
2.1.1 焊丝的熔化热源	38
2.1.2 影响焊丝熔化速度的因素	39
2.2 熔滴上的作用力	42
2.2.1 重力	42
2.2.2 表面张力	42
2.2.3 电弧力	43
2.2.4 爆破力	43
2.2.5 电弧气体吹力	43
2.3 熔滴过渡主要形式及其特点	44
2.3.1 短路过渡	45
2.3.2 滴状过渡	49
2.3.3 喷射过渡	49
2.3.4 渣壁过渡	52
2.4 熔滴过渡的新理论与新技术	53
2.4.1 双脉冲射滴过渡焊接技术	53
2.4.2 双丝 GMAW 熔滴过渡焊接技术	54
2.4.3 冷金属过渡气体保护电弧焊技术	55
2.5 熔滴过渡的损失及飞溅	56
2.5.1 熔敷效率、熔敷系数和损失率	56
2.5.2 熔滴过渡的飞溅	56

复习思考题	59	的类型和实现方法	78
第3章 母材的熔化和焊缝成形	60	4.1.3 电弧焊程序自动控制的 基本环节及其实现方法	79
3.1 焊缝形成过程及焊缝形状 尺寸	60	4.2 电弧焊的自动调节系统	85
3.1.1 焊缝形成过程	60	4.2.1 自动调节的必要性及 原理	85
3.1.2 焊缝形状尺寸	61	4.2.2 电弧自身调节系统	86
3.2 熔池形状与焊接电弧热的 关系	62	4.2.3 电弧电压反馈调节系统	92
3.2.1 焊接电弧的有效热功率 及热效率	62	4.3 弧焊机器人概述	97
3.2.2 焊接温度场	63	4.3.1 发展概况	97
3.2.3 焊件比热流与焊接参数的 关系	65	4.3.2 弧焊机器人在生产中的 作用及特点	98
3.2.4 熔池尺寸与比热流分布的 关系	67	4.3.3 示教再现型弧焊机器人	99
3.3 熔池受到的力及其对焊缝成形 的影响	67	4.3.4 智能型弧焊机器人	101
3.3.1 熔池金属的重力	67	复习思考题	104
3.3.2 表面张力	67	第5章 埋弧焊	105
3.3.3 焊接电弧力	68	5.1 埋弧焊原理、特点及应用	105
3.3.4 熔滴冲击力	68	5.1.1 埋弧焊的工作原理	105
3.4 焊接参数和工艺因素对焊缝 成形的影响	69	5.1.2 埋弧焊的特点	105
3.4.1 焊接参数对焊缝成形的 影响	69	5.1.3 埋弧焊的应用	106
3.4.2 焊接电流种类和极性、电极 尺寸对焊缝成形的影响	70	5.2 埋弧焊的冶金特点	107
3.4.3 其他工艺因素对焊缝成形 的影响	71	5.2.1 冶金特点	107
3.5 焊缝成形缺欠及其防止	72	5.2.2 低碳钢埋弧焊的主要化学 冶金反应	107
3.5.1 未熔合和未焊透	73	5.3 埋弧焊用焊接材料	111
3.5.2 焊缝形状不良	74	5.3.1 焊剂	111
复习思考题	75	5.3.2 焊丝	113
第4章 电弧焊自动控制基础	76	5.3.3 焊剂与焊丝的匹配	114
4.1 电弧焊的程序自动控制	76	5.4 埋弧焊设备	116
4.1.1 电弧焊程序自动控制的 对象和基本要求	76	5.4.1 埋弧焊设备的分类与 组成	116
4.1.2 电弧焊程序自动控制转换		5.4.2 机械系统	118
		5.4.3 焊接电源	120
		5.4.4 控制系统	120
		5.4.5 MZ—1000 型埋弧焊机	121
		5.4.6 MZ—1—1000 型埋弧焊机	123
		5.5 埋弧焊工艺	129
		5.5.1 埋弧焊工艺的内容	129

5.5.2 焊前准备	129	6.5.1 热丝 TIG 焊	170
5.5.3 对接接头埋弧焊工艺	130	6.5.2 活性焊剂氩弧焊 (A-TIG 焊)	171
5.5.4 T 形接头和搭接接头埋 弧焊工艺	136	6.5.3 钨极脉冲氩弧焊	173
5.5.5 20G 钢蒸汽锅炉上锅筒 埋弧焊工艺实例	137	复习思考题	176
5.6 埋弧焊的其他方法	138	第 7 章 熔化极氩弧焊 (MIG、MAG)	177
5.6.1 多丝埋弧焊	138	7.1 熔化极氩弧焊原理、特点及 应用	177
5.6.2 窄间隙埋弧焊	139	7.1.1 熔化极氩弧焊的工作 原理	177
5.6.3 埋弧堆焊	140	7.1.2 熔化极氩弧焊的特点	177
复习思考题	141	7.1.3 熔化极氩弧焊的应用	178
第 6 章 钨极惰性气体保护 焊 (TIG)	142	7.2 熔化极氩弧焊的熔滴过渡	178
6.1 TIG 焊原理、特点及应用	142	7.2.1 焊接时的极性选择	178
6.1.1 TIG 焊的工作原理	142	7.2.2 射滴过渡	179
6.1.2 TIG 焊的特点	143	7.2.3 射流过渡	180
6.1.3 TIG 焊的应用	144	7.2.4 亚射流过渡	180
6.2 TIG 焊设备	144	7.3 熔化极氩弧焊的自动调节 系统	181
6.2.1 TIG 焊设备的组成	144	7.3.1 电弧自身调节系统	181
6.2.2 焊接电源	145	7.3.2 电弧固有的自调节 系统	181
6.2.3 引弧装置和稳弧装置	150	7.4 熔化极氩弧焊设备	183
6.2.4 焊枪	152	7.4.1 熔化极氩弧焊设备的 组成	183
6.2.5 供气系统与水冷系统	154	7.4.2 焊接电源	183
6.2.6 程序控制系统	155	7.4.3 送丝系统	184
6.2.7 WSJ—500 型手工交流 TIG 焊机	156	7.4.4 焊枪和导丝管	185
6.3 TIG 焊用焊接材料	159	7.4.5 供气系统和水冷系统	187
6.3.1 保护气体	159	7.4.6 控制系统	188
6.3.2 钨极	160	7.4.7 熔化极氩弧焊焊机的型号 及技术参数	189
6.3.3 焊丝	162	7.4.8 NB—400 型半自动熔化 极氩弧焊机	189
6.4 TIG 焊工艺	162	7.5 熔化极氩弧焊用焊接材料	192
6.4.1 接头及坡口形式	162	7.5.1 保护气体	192
6.4.2 焊件和焊丝的焊前清理	162	7.5.2 焊丝	194
6.4.3 焊接参数的选择	164		
6.4.4 1035 (原 L4) 工业纯铝 卧式储罐手工 TIG 焊工 艺实例	169		
6.5 TIG 焊的其他方法	170		

7.6 熔化极氩弧焊工艺	198	逆变式 CO ₂ 焊机	224
7.6.1 焊前准备	198	8.5 CO ₂ 气体保护电弧焊用焊接	
7.6.2 焊接参数	198	材料	228
7.6.3 熔化极氩弧焊常用的焊接		8.5.1 CO ₂ 气体	228
工艺	199	8.5.2 焊丝	229
7.6.4 6351-T4 铝合金管熔化		8.6 飞溅问题与控制措施	231
极氩弧焊工艺实例	203	8.7 CO ₂ 气体保护电弧焊工艺	232
7.7 熔化极氩弧焊的其他		8.7.1 焊前准备	232
方法	203	8.7.2 焊接参数的选择	233
7.7.1 脉冲熔化极氩弧焊	203	8.7.3 鳍片管的半自动 CO ₂ 气体	
7.7.2 双丝熔化极氩弧焊	207	保护电弧焊工艺实例	239
7.7.3 TIME 焊	209	8.8 CO ₂ 气体保护电弧焊的其他	
复习思考题	210	方法	240
第8章 CO₂ 气体保护电弧焊	211	8.8.1 药芯焊丝 CO ₂ 气体保护	
8.1 CO ₂ 气体保护电弧焊原理、		电弧焊	240
特点及应用	211	8.8.2 波形控制 CO ₂ 气体保护	
8.1.1 CO ₂ 气体保护电弧焊的		电弧焊和 STT 控制法	242
工作原理	211	复习思考题	244
8.1.2 CO ₂ 气体保护电弧焊的		第9章 等离子弧焊接与喷涂	245
特点	212	9.1 等离子弧特性及其发生器	245
8.1.3 CO ₂ 气体保护电弧焊的		9.1.1 等离子弧的特性	245
应用	213	9.1.2 等离子弧发生器	249
8.2 CO ₂ 气体保护电弧焊熔滴过渡		9.1.3 双弧现象及其防止	255
的特点	213	9.2 等离子弧焊接	257
8.3 CO ₂ 气体保护电弧焊的冶金		9.2.1 等离子弧焊接原理、	
特点	214	特点及应用	257
8.3.1 合金元素氧化问题	214	9.2.2 等离子弧焊接设备	259
8.3.2 脱氧与合金化问题	215	9.2.3 等离子弧焊接工艺	266
8.3.3 气孔问题	216	9.2.4 不锈钢管纵缝等离子	
8.4 CO ₂ 气体保护电弧焊设备	218	弧焊接工艺实例	271
8.4.1 CO ₂ 气体保护电弧焊设备		9.2.5 等离子弧焊接的其他	
的组成	218	方法	272
8.4.2 焊接电源	219	9.3 等离子弧喷涂	275
8.4.3 控制系统	220	9.3.1 等离子弧喷涂原理、特点	
8.4.4 送丝系统	221	及应用	275
8.4.5 焊枪与软管	222	9.3.2 等离子弧喷涂设备	276
8.4.6 供气系统	223	9.3.3 常用的等离子弧喷涂	
8.4.7 NBC7—250 (IGBT) 型		材料	279

9.3.4 等离子弧喷涂工艺	280	10.6.3 管极电渣焊	307
9.3.5 内燃机活塞面 Al_2O_3 陶瓷 涂层的等离子弧喷涂工艺 实例	283	10.6.4 电渣压力焊	308
复习思考题	284	10.7 电渣焊常见的缺欠及其 防止	309
第10章 电渣焊	285	复习思考题	312
10.1 电渣焊的原理、特点及 应用	285	第11章 高能束流焊	313
10.1.1 电渣焊的工作原理	285	11.1 高能束流焊的物理基础	313
10.1.2 电渣焊的特点	286	11.1.1 热源功率密度与热过程 行为	313
10.1.3 电渣焊的类型及其 应用	286	11.1.2 获得高能束流的基本 原理	314
10.2 电渣焊热过程和结晶组织 的特点	287	11.1.3 高能束流焊形成深宽比 大焊缝的机制	319
10.2.1 电渣焊热源及热过程 的特点	287	11.2 电子束焊	322
10.2.2 电渣焊结晶组织的 特点	288	11.2.1 电子束焊的原理、特点 及应用	322
10.3 电渣焊用焊接材料	289	11.2.2 真空电子束焊接设备	324
10.3.1 焊剂	289	11.2.3 电子束焊接工艺	328
10.3.2 电极材料	290	11.3 激光焊	331
10.4 丝极电渣焊设备	291	11.3.1 激光焊的原理、特点、 类型及应用	331
10.4.1 丝极电渣焊设备的 组成	291	11.3.2 激光的产生	336
10.4.2 焊接电源	292	11.3.3 激光焊接设备	341
10.4.3 机头	292	11.3.4 激光焊接工艺	348
10.4.4 焊缝强制成形装置	293	复习思考题	351
10.4.5 控制系统	294	第12章 复合焊	352
10.4.6 HS—1000 型电渣焊机	295	12.1 概述	352
10.5 丝极电渣焊工艺	298	12.1.1 复合焊的概念及特征	352
10.5.1 电渣焊接头设计	298	12.1.2 复合焊的优势	353
10.5.2 焊接参数的选择	299	12.1.3 复合焊的种类	354
10.5.3 焊接操作工艺	302	12.2 等离子弧-GMA 复合焊	354
10.5.4 电站锅炉筒体纵缝丝极 电渣焊工艺实例	303	12.2.1 等离子弧-MIG 同轴复 合焊	354
10.6 其他电渣焊简介	305	12.2.2 等离子弧-MIG/MAG 旁 轴复合焊	355
10.6.1 板极电渣焊	305	12.2.3 等离子弧-GMA 复合焊的 应用	357
10.6.2 熔嘴电渣焊	305	12.3 激光-电弧复合焊	358

12.3.1	激光-TIG 复合焊	359	12.4.1	TIG-MIG 复合焊的原理 和特点	365
12.3.2	激光 -MIG/MAG 复 合焊	360	12.4.2	TIG-MIG 复合焊的 应用	367
12.3.3	激光-等离子弧复 合焊	362	复习思考题	369	
12.3.4	激光-电弧复合焊的 应用	363	参考文献	370	
12.4	TIG-MIG 复合焊	365			

绪 论

0.1 焊接方法的发展及分类

1. 焊接方法的发展

焊接作为一种实现材料永久性连接的方法，被广泛地应用于机械制造、石油化工、石油及天然气管道、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工业中不可缺少的加工工艺方法。而且，随着国民经济的发展，其应用领域还将不断地被拓宽。

焊接方法发展的历史可以追溯到几千年之前。据考证，在所有的焊接方法中，钎焊和锻焊是人类最早使用的方法。早在 5000 年前，古埃及就已经知道用银铜钎料钎焊管子，在 4000 年前，就知道用金钎料连接护符盒。我国在公元前 5 世纪的战国时期就已经知道使用锡铅合金作为钎料焊接铜器，从河南省辉县琉璃阁战国墓中出土的文物证实，其殉葬铜器的本体、耳、足都是利用钎焊连接的。在明代科学家宋应星所著的《天工开物》一书中，对钎焊和锻焊技术做了详细的叙述。

从 19 世纪 80 年代开始，随着近代工业的兴起，焊接技术进入了飞快发展时期。新的焊接方法伴随着新的焊接热源的出现竞相问世。19 世纪初，人们发现了碳弧，于是于 1885 年出现了碳弧焊，这被看成是电弧作为焊接热源应用的开始；1886 年，人们将电阻热应用于焊接，于是出现了电阻焊；1892 年发现了金属极电弧，随之出现了金属极电弧焊；1895 年，人们发现利用乙炔气体与氧气进行化学反应所产生的化学热可以作为焊接热源，因而于 1901 年出现了氧乙炔气焊；20 世纪 30 年代前后，人们相继发明了薄皮焊条和厚皮焊条，将其用作金属极电弧焊中的电极，于是出现了薄皮焊条电弧焊和厚皮焊条电弧焊；1935 年人们发明了埋弧焊，与此同时，电阻焊开始大量被使用，这使得焊接技术的应用范围迅速扩大，在许多方面开始取代铆接，成为机械制造工业中一种基础加工工艺。从 20 世纪 40 年代初开始，惰性气体保护电弧焊开始在生产中大量应用；进入 50 年代以后，现代工业和科学技术迅猛发展，焊接方法得到更快的发展，1951 年出现了用熔渣电阻热作为焊接热源的电渣焊；1953 年出现了二氧化碳气体保护焊；1956 年出现了分别以超声波和电子束作为焊接热源的超声波焊和电子束焊；1957 年出现了以摩擦热作为热源的摩擦焊和以等离子弧作为热源的等离子弧焊接和切割；1965 年和 1970 年又相继出现了以激光束作为热源的脉冲激光焊和连续激光焊。从 20 世纪 80 年代以后，人们又开始对更新的焊接热源如太阳能、微波等进行积极的探索。历史上每一种新热源的出现，都伴随着新的焊接方法的问世，焊接技术发展到今天，可以说几乎运用了一切可以利用的热源，包括火焰、电弧、化学热、电阻热、超声波、摩擦热、电子束、激光、微波等。但是，至今人们对新型焊接热源的研究与开发仍未停止。

近些年来, 焊接方法正朝着高效化、自动化、智能化的方向发展。在诸多的高效化焊接方法中, 复合焊是一项具有突破性的重要成果。它将两种不同的基本焊接方法有机地复合 (Hybrid) 在一起, 从而形成了一种新型的焊接方法, 如等离子弧-GMA 复合焊、激光-电弧复合焊、TIG-MIG 复合焊、超声波-TIG 复合焊等。复合焊既能发挥两种方法各自的优点, 又能弥补各自的不足, 还能产生 $1+1>2$ 的能量协同效应, 因此具有独特的优势和良好的应用前景。图 0-1 所示为激光-脉冲 MIG 复合焊的焊机机头。

焊接方法另一项重要发展是伴随着计算机技术的引入, 焊接自动化控制由原来的模拟控制向数字化控制发展。以单片机、数字信号处理器 (DSP)、可编程控制器 (PLC) 等为控制核心的各种焊接方法的数字化焊机已经问世, 许多已投入工业应用。

焊接工艺装备自动化、智能化的水平也在不断提高。计算机技术、传感技术、自适应技术以及信息技术相继引入焊接领域, 使焊接生产自动化、智能化的程度日新月异。其中一项重要标志是焊接机器人的应用。它突破了传统的焊接刚性自动化的方式, 开拓了一种柔性自动化的新方式, 因此它是焊接自动化、智能化具有革命性的进步。图 0-2 所示为正在工作的弧焊机器人。

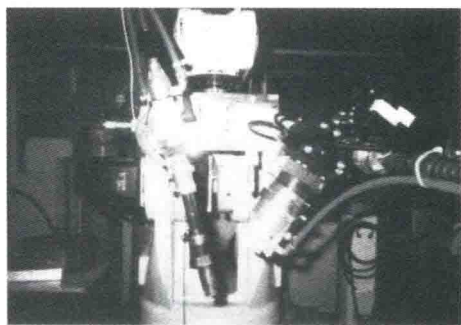


图 0-1 激光-脉冲 MIG 电弧复合焊的焊机机头

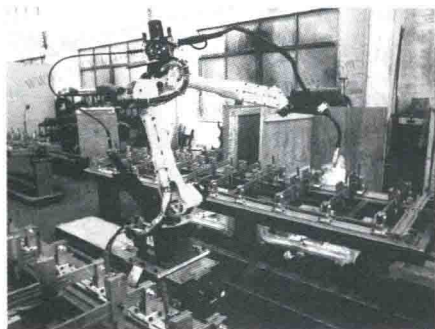


图 0-2 正在工作的弧焊机器人

2. 焊接方法的分类

焊接方法发展到今天, 不仅有基本焊接方法, 而且有复合焊接方法。基本焊接方法的数量已不下几十种。那么如何对基本焊接方法进行分类呢? 我们可以从不同的角度对其进行分类。例如, 按照电极焊接时是否熔化, 可以分为熔化极焊和非熔化极焊; 按照自动化程度可分为手工焊、半自动焊、自动焊等; 另外, 还有族系法、一元坐标法、二元坐标法等分类方法。其中, 最常用的是族系法, 它是按照焊接工艺特征来进行分类, 即按照焊接过程中母材是否熔化以及对母材是否施加压力进行分类。按照这种分类方法, 可以把基本焊接方法分为熔焊、压焊和钎焊三大类, 在每一大类方法中又分成若干小类如图 0-3 所示。

(1) 熔焊 熔焊是在不施加压力的情况下, 将待焊处的母材加热熔化以形成焊缝的焊接方法。焊接时母材熔化而不施加压力是其基本特征。根据焊接热源的不同, 熔焊方法又可分为: 以电弧作为主要热源的电弧焊, 包括焊条电弧焊、埋弧焊、钨极惰性气体保护焊、熔化极氩弧焊、 CO_2 气体保护电弧焊、等离子弧焊等; 以化学热作为热源的气焊; 以熔渣电阻热作为热源的电渣焊; 以高能束作为热源的电子束焊和激光焊等。

(2) 压焊 压焊是焊接过程中必须对焊件施加压力 (加热或不加热) 才能完成焊接的方

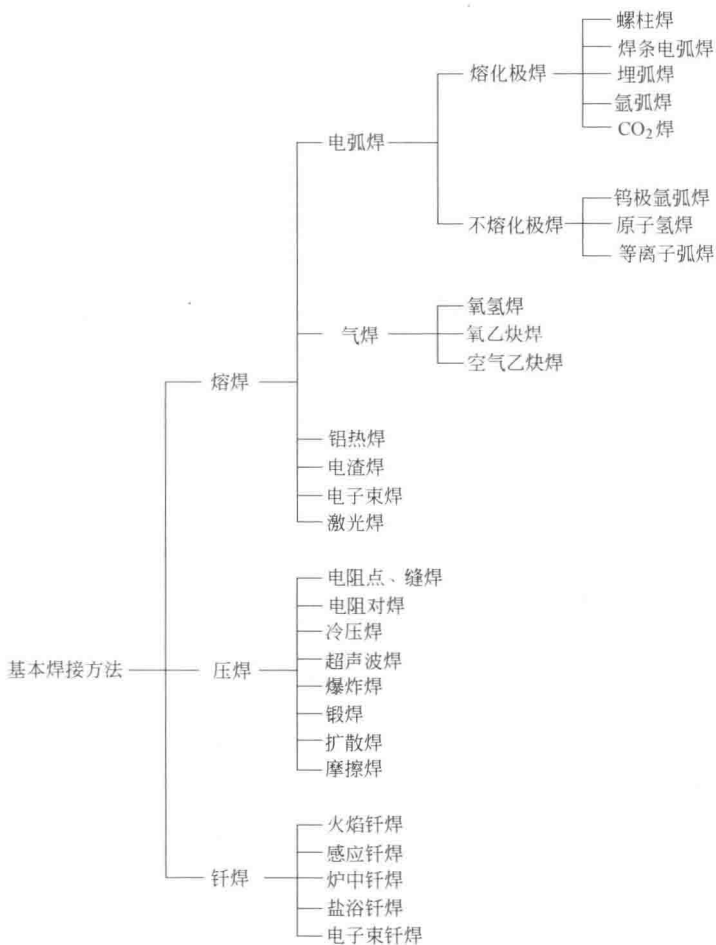


图 0-3 基本焊接方法的分类

法。焊接时施加压力是其基本特征。这类方法有两种形式：一种是将被焊材料与电极接触的部分加热至塑性状态或局部熔化状态，然后施加一定的压力，使其形成牢固的焊接接头，如电阻焊、摩擦焊、气压焊、扩散焊、锻焊等；第二种是不加热，仅在被焊材料的接触面上施加足够大的压力，使接触面产生塑性变形而形成牢固的焊接接头，如冷压焊、爆炸焊、超声波焊等。

(3) 钎焊 钎焊是焊接时采用比母材熔点低的钎料，将钎料和待焊处的母材加热到高于钎料熔点，但低于母材熔点的温度，利用液态钎料润湿母材，填充接头间隙，并与母材相互扩散而实现连接的方法。其特征是焊接时母材不发生熔化，仅钎料发生熔化。根据使用钎料的熔点，钎焊方法又可分为硬钎焊和软钎焊，其中硬钎焊使用的钎料熔点高于 450°C ，软钎焊使用的钎料熔点低于 450°C 。另外，根据钎焊的热源和保护条件的不同也可分为火焰钎焊、感应钎焊、炉中钎焊、盐浴钎焊等若干种。

0.2 熔焊方法的物理本质及其特点

1. 熔焊方法的物理本质

要了解熔焊方法的物理本质，首先需要了解焊接的物理本质。在国家标准 GB/T 3375—

1994《焊接术语》中给焊接下的定义是：“焊接是通过加热或加压，或两者并用，并且用或不用填充材料，使工件达到结合的一种加工方法。”

那么，在焊接过程中为什么需要加热或加压，或者两种并用呢？这是由焊接的物理本质决定的。

研究表明，固体材料之所以能够保持固定的形状是由于其内部原子之间的距离足够小，使原子之间能形成牢固的结合力。要想将材料分成两块，必须施加足够大的外力破坏这些原子间的结合才能达到。同样道理，要想将两块固体材料连接在一起，必须使这两块固体的连接表面上的原子接近到足够小的距离，使其产生足够的结合力才行。

图 0-4 是一个双原子模型，两个原子之间既存在引力，也存在斥力，其结合力取决于两原子之间引力和斥力共同作用的结果。当两原子之间的距离为 r_A 时，结合力最大；当两原子之间的距离大于或小于 r_A 时，结合力都显著减小。对于大多数金属来说， $r_A = 0.3 \sim 0.5\text{nm}$ 。这就告诉我们，要把两个分离的构件焊接在一起，从物理本质上讲，就是要采取措施，使这两个构件连接表面上的原子相互接近到 r_A ，这样就能使两个分离体的原子间产生足够大的结合力，从而达到永久性连接的目的。但是，对于实际焊件，不采取一定措施要做到这一点是非常困难的，这是因为：一是连接表面的表面粗糙度比较大，即使经过精密磨削加工，其表面粗糙度仍有几到几十微米，从微观上看仍是凹凸不平的；二是连接表面常常带有氧化膜、油污和水分等，阻碍连接表面紧密地接触，因此，要想实现焊接，必须采取有效的措施才行。

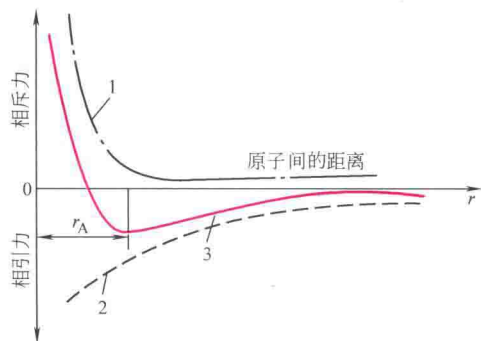


图 0-4 原子之间的相互作用力与距离的关系

1—斥力 2—引力 3—合力

那么可以采取哪些措施呢？实践表明，可以采取以下几种措施：

1) 利用热源加热被焊母材的连接处，使之发生熔化，利用液相之间的相溶及液、固两相原子的紧密接触来实现原子间的结合。

2) 对被焊母材的连接表面施加压力，在清除连接面上的氧化膜和污物的同时，克服两个连接表面上的不平度，或产生局部塑性变形，从而使两个连接表面的原子相互紧密接触，并产生足够大的结合力。如果在加力的同时加热，则使得上述过程更容易进行。

3) 对填充材料进行加热使之熔化，利用液态填充材料对固态母材润湿，使液、固两相的原子紧密接触，充分扩散，从而产生足够大的结合力。

以上三项措施正是熔焊方法、压焊方法和钎焊方法能够实现永久性连接的基本原理。因此，熔焊方法的物理本质可以概括为：在不施加外力的情况下，利用外加热源使母材被连接处（以及填充材料）发生熔化，使液相与液相之间、液相与固相之间的原子或分子紧密地接触和充分地扩散，使原子间距接近到 r_A ，并通过冷却凝固将这种冶金结合保持下来的焊接方法。

2. 熔焊方法的特点

与压焊和钎焊方法相比，熔焊方法具有以下特点：

(1) **焊接时母材局部在不承受外加压力的情况下被加热熔化** 这一特点使熔焊方法既区别于压焊方法,也区别于钎焊方法。压焊时,一般母材不发生熔化,虽然有些压焊方法(如电阻点焊、缝焊等)在焊接过程中母材局部也会被加热至熔化,但它同时还承受着外加压力的作用。而钎焊时,母材则根本不发生熔化,仅钎料发生熔化。

(2) **焊接时须采取更为有效的隔离空气的措施** 由于空气对焊缝金属有害作用,因此各类熔焊方法均须考虑对焊缝金属的保护问题。这是由于熔焊时金属处于熔化状态,而且其温度相对于其他两类方法来说更高,如果将其裸露在空气中,能与空气之间发生非常激烈的化学冶金反应,因此,必须采取更为有效的隔离空气措施才能保证焊缝质量。已采取的保护措施有:①熔渣保护,即利用焊接材料产生的熔渣覆盖在熔池、熔滴表面,使之与空气隔离,例如埋弧焊、电渣焊等;②气体保护,即由外界向焊接区通入气体将空气排开,例如钨极惰性气体保护焊、熔化极氩弧焊、 CO_2 气体保护电弧焊等;③气渣联合保护,即利用焊接材料在焊接时同时产生熔渣和气体来进行保护,例如焊条电弧焊和具有造气成分的药芯焊丝电弧焊等;④真空保护,例如真空电子束焊等。

(3) **两种被焊材料之间须具有必要的冶金相容性** 这就是说,并不是任意两种成分的材料都可以实现熔焊的,只有当两种材料的化学成分在高温液态时能形成互溶液体,并能在随后的冷却凝固过程中形成所需要的冶金结合时才能实现熔焊。一般来说,同种成分的材料由于具有很好的冶金相容性,容易实现熔焊;异种材料之间由于在晶格类型、晶格参数、原子半径及电负性方面存在较大差异,熔焊往往比较困难,有些材料之间甚至不能熔焊,例如铁与镁之间就很难直接进行熔焊。

(4) **焊接时焊接接头经历了更为复杂的冶金过程** 熔焊时,焊缝金属不仅要经历加热熔化过程,而且往往要经历化学冶金过程、凝固结晶过程、固态相变过程等。另外,热影响区也要同时经历复杂的冶金过程,例如由于加热引起的固态相变过程和由于冷却引起的固态相变过程等。而压焊和钎焊相对来说要简单得多,虽然有些压焊方法也有熔化过程,但由于是被固相金属所包裹,通常不会发生像熔焊那样复杂的化学冶金过程。

0.3 课程性质、任务及内容

本课程是焊接技术与工程专业和材料成形及控制工程专业的一门专业主干课,其先修课是大学物理、电工及电子学、弧焊电源、焊接冶金学等。

本课程的任务是使学生掌握有关熔焊方法及设备的基础理论、各种熔焊方法的原理、焊接设备、焊接材料、焊接工艺以及有关的实验技能。学生通过学习,能够根据工程的实际需要,选用适宜的熔焊方法,选用和调试设备,选用焊接材料以及制订焊接工艺,初步具备分析和解决焊接生产实际问题的能力。

本课程的主要内容有:

- 1) 关于焊接电弧、熔滴过渡、焊缝成形以及电弧焊自动控制等方面的基础理论。
- 2) 以电弧作为热源的各种电弧焊方法的基本原理、焊接设备、焊接材料和焊接工艺。焊接方法包括埋弧焊、钨极惰性气体保护焊、熔化极氩弧焊、 CO_2 气体保护电弧焊和等离子弧焊,以及由它们派生出来的一些方法。
- 3) 以熔渣电阻热作为热源的电渣焊的基本原理、焊接设备、焊接材料和焊接工艺,以

及其派生出来的一些方法。

4) 以高能束作为热源的电子束焊和激光焊的基本原理、焊接设备和焊接工艺,以及由它们派生出来的一些方法。

5) 由基本熔焊方法复合而成的复合焊的基本原理、特点及应用。复合焊方法包括等离子弧-GMA 复合焊、激光-电弧复合焊和 TIG-MIG 复合焊等。