



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 连接工艺

天津大学 李 桓 主 编  
天津大学 杨立军 副主编



高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 连接工艺

Lianjie Gongyi

天津大学 李 桓 主 编

天津大学 杨立军 副主编



高等教育出版社·北京  
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

## 内容提要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,是根据《教育部关于“十一五”期间普通高等教育教材建设与改革意见》的精神,参照专业教学基本要求,结合现代材料连接技术的特点和发展趋势,为培养适应21世纪需要的高等制造工程技术人才而编写的。

全书除绪论外共13章。第1~4章介绍电弧焊连接工艺的基本理论,第5~8章介绍埋弧焊、钨极氩弧焊、熔化极氩弧焊和CO<sub>2</sub>气体保护电弧焊常用的焊接工艺,第9~11章介绍钎焊、电阻焊工艺以及包括扩散焊、激光焊等在内的其他焊接工艺,第12章介绍焊接夹具与工装,第13章介绍焊接结构设计及变形控制。

本书可作为普通高等院校材料成形及控制工程专业(含焊接方向)高年级本科生的教材,也可供相关工程技术人员学习、参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

连接工艺/李桓主编. —北京:高等教育出版社, 2010.7

ISBN 978-7-04-029107-0

I. ①连… II. ①李… III. ①焊接工艺-高等学校-教材 IV. ①TG44

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第101853号

策划编辑 庚欣 责任编辑 王素霞 封面设计 张志奇 责任绘图 尹莉  
版式设计 范晓红 责任校对 刘莉 责任印制 尤静

出版发行 高等教育出版社  
社址 北京市西城区德外大街4号  
邮政编码 100120

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司  
印 刷 北京铭成印刷有限公司

开 本 787×1092 1/16  
印 张 24  
字 数 580 000

购书热线 010-58581118  
咨询电话 400-810-0598  
网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.landracom.com>  
<http://www.landracom.com.cn>  
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2010年7月第1版  
印 次 2010年7月第1次印刷  
定 价 34.90元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 29107-00

# 材料成形及控制工程专业系列教材 编委会

主任：李春峰(哈尔滨工业大学)

委员：(按姓氏笔画排序)

王敏(上海交通大学)

李桓(天津大学)

李言祥(清华大学)

张启勋(西北工业大学)

张彦华(北京航空航天大学)

陈立亮(华中科技大学)

崔建忠(东北大学)

潘冶(东南大学)

薛克敏(合肥工业大学)

魏尊杰(哈尔滨工业大学)

瞿金平(华南理工大学)

。

# 序

1998年,教育部进行了高等院校学科专业调整,原铸造、锻压、焊接、热处理四个专业合并为“材料成形及控制工程”专业(有的学校将焊接专业列为目录外专业)。由于各院校原有的专业基础、专业定位、办学历史及办学水平存在较大差异,因此在新专业的培养计划安排上也不尽相同。

在2002年度材料成形及控制工程专业教学指导分委员会工作会议上,委员们认真分析了我国各类院校中的材料成形及控制工程专业的情况,参考了几十所院校的专业现状,经综合分析,归纳出比较典型的三类培养计划,即“机械工程及自动化专业(计划一)”、“材料成形及控制工程专业——分专业方向培养计划(计划二)”、“材料成形及控制工程专业——不分专业方向培养计划(计划三)”。

针对新专业特点,各校在教材建设方面进行了一定的研究和摸索。普通高等教育“十五”国家级规划教材建设期间编写了几本教材,填补了一定的空白。但这些教材还不能完全适应专业发展现状,仍有部分院校只能使用专业目录调整前的老教材,而且要几本教材同时使用。专业教材建设仍需进一步研究和探索。为此,高等教育出版社于2004年12月成立了材料成形及控制工程专业系列教材编委会,研究编写适用于该专业发展的新教材。经编委会深入讨论和研究,第一期产生7个选题,并于2005年6月落实教材编写大纲,进入编写阶段。该系列教材现已列入“十一五”国家级教材规划。新教材不同于专业目录调整前的“小方向”教材,主要针对培养计划二类专业,兼顾培养计划三类专业。在教材编写中,对目前使用的各类教材进行了研究,同时补充了近年出现的新理论、新知识,充分反映了学科的最新进展及作者的教学体会。

本套教材是“十五”国家级规划教材的补充和完善,还可作为不分专业方向授课院校毕业生的后续教育教材。

专业目录调整十年来,作为教学改革重要内容的教材建设取得了很大进展。随着教学改革的不断深入,适合整合后材料成形及控制工程专业的教材体系将进一步完善,精品教材将不断出现。

李春峰

2007年10月

# 前 言

本书是根据教高[2006]9号《教育部关于印发普通高等教育“十一五”国家级教材规划选题的通知》精神,通过申报评选入选“十一五”国家级教材规划的。它是为满足高等院校材料成形及控制工程专业(焊接方向)以及相关专业的教学需要而编写的。

国际钢铁协会最新发布的统计数据显示,2009年全球粗钢产量总计12.2亿吨,同比下滑了8%。2009年中国粗钢产量达到了5.678亿吨,同比增长13.5%,占全球总产量的百分比提高至47%,较2008年提高了9%,创下了单个国家粗钢年产量的新纪录。根据国际上通行的计算方法,中国将有2亿吨左右的粗钢要经过焊接加工,这使中国成为名副其实的焊接大国。在我们迈向焊接强国的道路中,要在继承和发展传统焊接技术的同时,努力开创焊接新技术的应用领域,这一切对焊接工艺提出了更高的要求。编写本书的目的是希望能较为系统地介绍以焊接工艺为主的材料连接工艺,使学生能够对材料连接工艺特别是应用技术有较为全面的了解和学习。

本书系统地讲授有关焊接的一些基础理论,熔焊、压焊和钎焊的原理及主要设备与工艺,焊接夹具与工装的设计方法和选用原则,焊接结构设计与变形控制的方法与原则。这样编排的目的是力图使学生和相关读者建立完整的连接工艺的概念,为灵活选用连接方法和制订工艺奠定基础。

本书由天津大学李桓教授主编并统稿,天津大学奚道岩教授审阅了全书。参加编写工作的有天津大学杨立军副教授(绪论,第6章,第8章),李桓教授(第1章,第2章,第3章,第4章的4.1、4.2节,第5章),天津工业大学李亮玉教授(第4章的4.3节),沈阳工业大学杭争翔副教授(第7章),北京航空航天大学曲文卿副教授(第9章),天津科技大学潘存海教授(第10章),中北大学李志勇副教授(第11章),南昌航空大学陈焕明教授(第12章),太原理工大学王文先教授(第13章)。

在本书的编写过程中得到了许多同志的帮助和支持,奚道岩教授在审稿过程中提出了许多改进建议。梁秀娟、王颖、凌礼恭、朱艳丽、王俊红、娄丽艳等研究生对本书的图表和文字加工做了很多工作,作者在此表示衷心的感谢。全体编写人员同时向本书所引文献的原作者深表谢意。

由于作者水平的原由,谬误、疏漏和欠妥之处在所难免,敬请专家、同行和读者批评指正。

编 者

2010年1月

# 目 录

绪论	1	2.1.2 影响焊丝熔化速度的因素	43
0.1 材料连接工艺概况	1	2.2 熔滴上的作用力	46
0.2 焊接方法的发展	2	2.3 熔滴过渡的主要形式及其特点	48
0.3 焊接的实质与分类	2	2.3.1 短路过渡	49
0.4 焊接领域的标志性成就及展望	5	2.3.2 滴状过渡	53
0.5 本课程的性质和学习方法	15	2.3.3 喷射过渡	54
第1章 焊接电弧	16	2.3.4 渣壁过渡	57
1.1 电弧的导电机理	16	2.4 熔滴过渡的飞溅	57
1.1.1 概述	16	2.4.1 熔敷效率、熔敷系数和 损失系数	57
1.1.2 电弧中带电粒子的产生过程	17	2.4.2 熔滴过渡的飞溅	58
1.1.3 电弧的导电机构	23	复习思考题	60
1.2 焊接电弧的工艺特性	25	第3章 母材熔化和焊缝成形	61
1.2.1 电阻的最小能量消耗特性(最小 电压原理)	25	3.1 焊缝熔池的尺寸与形状	61
1.2.2 电弧的静特性	26	3.1.1 焊缝的形成	61
1.2.3 焊接电弧的动特性	27	3.1.2 焊缝形状、尺寸与焊缝质量的 关系	62
1.2.4 电极斑点的游动性	27	3.2 焊接工艺参数与工艺因素对焊缝 成形的影响	63
1.2.5 电弧的热特性	29	3.2.1 焊接工艺参数的影响	63
1.3 电弧中的力及其影响因素	32	3.2.2 其他工艺因素的影响	63
1.3.1 电弧力及其作用	32	3.3 焊缝成形缺陷及其产生原因	66
1.3.2 电弧力的影响因素	35	复习思考题	69
1.4 交流电弧的特点	37	第4章 电弧焊自动控制基础与机器人 焊接	70
1.4.1 交流电弧的燃烧过程	37	4.1 熔化极自动电弧焊的自动调节系统	70
1.4.2 交流电弧加热的特点	38	4.1.1 自动调节的必要性及方法	70
1.4.3 交流电弧的整流现象	38	4.1.2 电弧自身调节系统——等速送丝 自动调节系统	71
1.5 磁场对电弧的作用	39	4.1.3 电弧电压反馈自动调节系统—— 变速送丝自动调节系统	75
1.5.1 电弧挺度	39	4.2 电弧焊的程序自动控制	80
1.5.2 磁偏吹	39		
复习思考题	41		
第2章 焊丝的熔化和熔滴过渡	42		
2.1 焊丝的加热与熔化	42		
2.1.1 焊丝的熔化热源	42		

4.2.1 程序自动控制的对象和要求	81	6.2.4 焊接程序控制装置	137
4.2.2 程序自动控制的原则和方法	83	6.2.5 WSJ-500 型手工交流 TIG 焊机	137
4.2.3 电弧焊程序控制的基本环节	84	6.3 钨极氩弧焊的焊接材料	141
4.3 机器人焊接	85	6.3.1 氩气	141
4.3.1 工业机器人的定义	85	6.3.2 电极材料及形状尺寸	142
4.3.2 焊接工艺对弧焊机器人的基本要求	85	6.3.3 焊丝	144
4.3.3 焊接机器人的分类和特点	86	6.4 钨极氩弧焊的种类	146
4.3.4 焊接机器人系统的组成	88	6.4.1 直流钨极氩弧焊	146
4.3.5 焊接机器人系统质量控制技术	89	6.4.2 交流钨极氩弧焊	147
4.3.6 焊接质量的控制	90	6.4.3 脉冲钨极氩弧焊	151
复习思考题	93	6.5 钨极氩弧焊工艺	153
<b>第 5 章 埋弧焊</b>	94	6.5.1 接头形式及坡口	153
5.1 埋弧焊的特点及应用	94	6.5.2 工件和填充焊丝的焊前清理	154
5.1.1 埋弧焊过程	94	6.5.3 焊接工艺参数	155
5.1.2 埋弧焊的特点	94	6.6 其他钨极氩弧焊方法	158
5.1.3 埋弧自动焊的分类及应用	95	6.6.1 变极性钨极氩弧焊	158
5.2 埋弧焊焊剂与焊丝的选用	96	6.6.2 多电极钨极氩弧焊	159
5.2.1 埋弧焊焊剂	96	6.6.3 A-TIG 焊	160
5.2.2 埋弧焊焊丝	100	6.6.4 热丝钨极氩弧焊	162
5.2.3 埋弧焊焊丝与焊剂的配合	102	复习思考题	163
5.3 埋弧自动焊机	103	<b>第 7 章 熔化极氩弧焊</b>	164
5.3.1 埋弧自动焊机的类型及用途	103	7.1 熔化极氩弧焊的原理、特点及应用	164
5.3.2 埋弧自动焊机的组成及作用	104	7.1.1 熔化极氩弧焊的原理	164
5.3.3 埋弧自动焊机的工作原理	107	7.1.2 熔化极氩弧焊的特点	164
5.4 埋弧焊工艺	114	7.1.3 熔化极氩弧焊的应用	165
5.4.1 焊前准备	114	7.2 熔化极氩弧焊设备	165
5.4.2 埋弧自动焊工艺	115	7.2.1 熔化极氩弧焊设备组成	165
5.4.3 高效率埋弧自动焊	123	7.2.2 弧焊电源	165
复习思考题	129	7.2.3 送丝系统	166
<b>第 6 章 钨极氩弧焊</b>	130	7.2.4 焊枪和导丝管	167
6.1 概述	130	7.2.5 供气系统与水冷系统	168
6.1.1 钨极氩弧焊的特点	130	7.2.6 控制系统	169
6.1.2 TIG 焊的应用	131	7.2.7 熔化极氩弧焊焊机的型号及技术参数	170
6.2 钨极氩弧焊焊机	132	7.2.8 NB-400 型半自动熔化极氩弧焊机	171
6.2.1 焊机的组成及引弧装置	132	7.3 熔化极氩弧焊的保护气体及焊丝	173
6.2.2 焊枪	135		
6.2.3 供气系统和水冷系统	136		



7.3.1 保护气体 .....	173	8.8.2 波形控制 CO <sub>2</sub> 气体保护电弧焊和 STT 控制法 .....	216
7.3.2 焊丝 .....	175	复习思考题 .....	218
7.4 熔化极氩弧焊接工艺 .....	177	<b>第 9 章 钎焊</b> .....	219
7.4.1 焊前准备 .....	177	9.1 概述 .....	219
7.4.2 焊接参数 .....	177	9.2 钎焊方法及工艺 .....	221
7.4.3 熔化极氩弧焊常用的焊接工艺 ..	178	9.2.1 钎焊方法的分类 .....	221
7.5 脉冲熔化极氩弧焊 .....	182	9.2.2 常用的钎焊方法与设备 .....	222
7.5.1 脉冲熔化极氩弧焊的熔滴 过渡控制 .....	182	9.2.3 真空钎焊与设备 .....	228
7.5.2 脉冲熔化极氩弧焊的参数选择 ..	184	9.2.4 特种钎焊方法与设备 .....	230
7.5.3 脉冲熔化极氩弧焊的工艺特点 ..	185	9.3 钎焊材料 .....	232
复习思考题 .....	186	9.3.1 钎料的分类与编号 .....	232
<b>第 8 章 CO<sub>2</sub> 气体保护电弧焊</b> .....	187	9.3.2 软钎料与软钎剂 .....	234
8.1 CO <sub>2</sub> 气体保护电弧焊的特点和应用 ..	187	9.3.3 硬钎料与硬钎剂 .....	238
8.2 CO <sub>2</sub> 气体保护电弧焊熔滴过渡的 特点 .....	188	复习思考题 .....	246
8.3 CO <sub>2</sub> 气体保护电弧焊的冶金特点 .....	190	<b>第 10 章 电阻焊</b> .....	247
8.3.1 CO <sub>2</sub> 气体的氧化性 .....	190	10.1 概述 .....	247
8.3.2 CO <sub>2</sub> 焊的脱氧措施 .....	191	10.2 点焊连接 .....	248
8.3.3 焊缝金属中的气孔 .....	192	10.2.1 点焊连接原理及工艺 .....	248
8.4 CO <sub>2</sub> 气体保护电弧焊设备 .....	194	10.2.2 点焊连接工艺 .....	253
8.4.1 CO <sub>2</sub> 气体保护电弧焊设备的组成 ..	194	10.2.3 常用金属材料的点焊连接 .....	257
8.4.2 焊接电源 .....	195	10.2.4 点焊连接技术新进展 .....	261
8.4.3 控制系统 .....	196	10.3 凸焊连接 .....	263
8.4.4 送丝系统 .....	196	10.4 缝焊连接 .....	263
8.4.5 焊枪与软管 .....	196	10.5 对焊连接 .....	264
8.4.6 供气系统 .....	197	10.6 电阻焊设备 .....	265
8.4.7 NBC7-250(IGBT)型逆变式 CO <sub>2</sub> 焊机 .....	198	10.6.1 电阻焊设备组成 .....	265
8.5 CO <sub>2</sub> 气体保护电弧焊的焊接材料 .....	202	10.6.2 典型电阻焊机 .....	267
8.5.1 保护气体 .....	202	10.6.3 电阻焊设备主要技术参数 .....	269
8.5.2 焊丝 .....	203	10.6.4 电极材料与结构 .....	271
8.6 飞溅问题与控制 .....	205	10.7 电阻焊连接过程的质量监控 .....	273
8.7 CO <sub>2</sub> 气体保护电弧焊工艺 .....	206	复习思考题 .....	275
8.7.1 焊前准备 .....	206	<b>第 11 章 其他焊接方法</b> .....	276
8.7.2 焊接参数的选择 .....	207	11.1 扩散焊 .....	276
8.8 其他 CO <sub>2</sub> 气体保护电弧焊方法 .....	214	11.1.1 扩散焊的概念 .....	276
8.8.1 药芯焊丝 CO <sub>2</sub> 气体保护电弧焊 ..	214	11.1.2 扩散焊的原理及分类 .....	276
		11.1.3 扩散焊参数的选择 .....	277
		11.1.4 扩散焊的优点及应用 .....	278

11.2 激光焊 .....	279	11.8 电渣焊 .....	314
11.2.1 激光焊的概念 .....	279	11.8.1 电渣焊的工作原理与特点 .....	314
11.2.2 激光焊的原理及分类 .....	279	11.8.2 电渣焊设备 .....	315
11.2.3 激光焊的特点及应用 .....	280	11.8.3 电渣焊的焊接过程及工艺参数 .....	317
11.2.4 激光焊设备的选择及工艺参数 .....	282	复习思考题 .....	320
11.2.5 激光焊的新技术 .....	285	<b>第 12 章 焊接夹具与工装</b> .....	321
11.3 电子束焊 .....	286	12.1 焊接工艺装备的作用及特点 .....	321
11.3.1 电子束焊的概念 .....	286	12.1.1 焊接工装的作用 .....	321
11.3.2 电子束焊的原理及分类 .....	286	12.1.2 焊接工装的分类 .....	322
11.3.3 电子束焊的特点及应用 .....	287	12.1.3 焊接工装的特点 .....	322
11.3.4 电子束焊的工艺参数及工艺方法 .....	289	12.2 工件的定位与夹紧 .....	323
11.3.5 电子束焊设备 .....	291	12.2.1 工件的定位原理 .....	323
11.4 等离子弧焊 .....	293	12.2.2 定位方法及定位器 .....	324
11.4.1 等离子弧的特性、分类与应用 .....	293	12.2.3 常用的夹紧机构 .....	327
11.4.2 等离子弧焊设备 .....	296	12.3 典型焊接工艺装备 .....	333
11.4.3 等离子弧焊焊接方法与焊接工艺 .....	298	12.3.1 装配定位焊夹具 .....	333
11.4.4 等离子弧切割 .....	301	12.3.2 焊接变位机械 .....	335
11.5 铝热焊 .....	302	12.3.3 弧焊机器人焊接工装 .....	337
11.5.1 铝热焊的基本原理及应用 .....	302	复习思考题 .....	340
11.5.2 铝热焊使用的材料 .....	303	<b>第 13 章 焊接结构设计及变形控制</b> .....	341
11.5.3 钢轨铝热焊的典型工艺 .....	305	13.1 焊接结构设计 .....	341
11.6 摩擦焊 .....	306	13.1.1 焊接结构设计的一般原则 .....	341
11.6.1 摩擦焊的原理、分类及特点 .....	306	13.1.2 焊接结构设计的合理性分析 .....	344
11.6.2 摩擦焊的焊接过程 .....	308	13.1.3 焊接结构设计中应注意的问题 .....	351
11.6.3 搅拌摩擦焊 .....	309	13.2 焊接应力与变形 .....	353
11.7 爆炸焊 .....	312	13.2.1 焊接变形控制 .....	353
11.7.1 爆炸焊的分类 .....	312	13.2.2 焊接残余变形 .....	360
11.7.2 爆炸焊的应用 .....	313	复习思考题 .....	371
		<b>参考文献</b> .....	372

# 绪 论

## 0.1 材料连接工艺概况

材料连接工艺是制造工艺的重要组成部分，一般包括焊接工艺、机械连接工艺和胶接工艺。

材料连接工艺是随着人类利用材料的历史的发展而不断发展的。在进入工业文明以前，人类就开始运用连接工艺，如机械连接工艺、胶接工艺及焊接工艺中的锻焊、钎焊等。在所有的连接工艺中，焊接是应用最广、最重要的金属材料的永久连接工艺，它是采用外加能量的方法使分离的材料永久地连接在一起，所以有时候也把焊接叫做熔接。焊接是金属连接最重要的方法，因为它的优点非常突出，它连接的部件和材料能够实现高性能，在一般的情况下，它可以达到和连接母材等强度、等刚度、等塑性、等韧性。也就是说，用焊接方法连接起来的部件或材料，能和材料原来的性能完全一样，特别是它的动载性能好，所以在一些运动载体上焊接的运用特别普遍。焊接具有非常高的可靠性，因为它将连接件永久地连接在一起，所以连接件具有很长的寿命并且在此期间可安全地工作。人类社会进入 20 世纪后，焊接技术得到了迅猛的发展，在所有大工业的产业，如航空航天、造船、车辆、通信、家用电器、大型电站、冶金、微电子和武器装备等领域，焊接都是最主要的连接工艺。焊接已不再是一种单纯意义上的加工工艺，它已发展成为集多种学科于一体的一门工程工艺科学，并显现出极高的技术含量和附加值。例如在船体建造中，焊接工时占船体建造总工时的 30%~40%，焊接成本占船体建造总成本的 30%~50%，因此提高焊接技术水平带来的经济效益是显而易见的。

新型材料、新构件和新器件对连接工艺提出了新的要求，不断促进传统连接工艺的改进与创新。例如，新型或特种材料及异种材料构件的连接，复杂产品、构件和器件的精密连接，焊接过程的自动化与智能控制，水下及太空等特殊工作条件下的焊接，复杂焊接产品的质量可靠性检测与寿命评估，传统连接工艺的改进及新型焊接工艺方法的开发，绿色连接工艺和再利用修复工艺等。

机械连接从根本上讲是机械设计的问题，制造过程相对简单。焊接工艺可以得到牢固、轻便、密封性好的接头，在制造业中具有不可替代的作用。焊接过程由于其工艺的复杂性及对劳动强度、质量等的要求，具有很大的研究和发展空间，这也是本书的重点内容。

焊接技术的发展趋势是“发展高效、自动化、智能型、节能、环保型的焊接，并适应 21 世纪新型工程材料发展趋势的焊接工艺、设备和耗材”。目前新材料、电子技术、计算机技术及机器人技术的发展已渗透到焊接技术的各个领域，为焊接技术的发展提供了发展机遇，同时焊接工艺也在许多技术领域占有越来越重要的地位。以新技术应用多而使用条件严格的飞机

及航空发动机的研制和生产为例,焊接已逐渐替代许多机械连接方法,成为主导工艺方法之一。焊接工艺的应用与发展不仅减轻了飞机及航空发动机的质量,而且还为它们结构设计新构思提供了工艺支持,促进其性能的提高。国外航空发动机结构中广泛采用了各种焊接工艺,焊接结构件在喷气发动机零部件总数中所占比例已超过 50%,焊接的工作量已占发动机制造总工时的 10% 左右。我国在此方面还与世界先进水平有较大差距。

## 0.2 焊接方法的发展

国家标准 GB/T 3375—1994《焊接术语》给焊接的定义为“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方法”。可以认为焊接是指通过适当的手段使分离的物体产生原子(分子)间结合而连接成一体的连接方法。其主要的加工材料是金属,本书也主要讨论金属的焊接方法。

早在几千年之前,人类就开始使用钎焊和锻焊方法。目前,工业技术中的焊接技术大都起源于 19 世纪的科学技术,其在 20 世纪得到了迅速发展。

19 世纪初发现了碳弧,1885 年出现了碳弧焊,这被看成电弧作为焊接热源应用的开始。1892 年发现了金属极电弧,电弧焊开始真正应用于工业生产。20 世纪初,相继发明了薄药皮焊条和厚药皮焊条,并将其用做金属极电弧焊的电极。1935 年发明了埋弧焊,电弧焊开始向自动化方向发展。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。1953 年出现了 CO<sub>2</sub> 气体保护焊,随后在 1957 年出现了等离子弧焊接与切割。至此,现代工业应用的基本电弧焊方法都已出现,电弧焊继续向自动化、智能化和高效化方向发展。

在电弧焊发展的同时,利用其他热源或能源的焊接方法也在不断发展。1886 年出现了电阻焊;1901 年出现了氧-乙炔气焊;20 世纪 30 年代开始大量使用电阻焊;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;20 世纪 60 年代初,激光器被发明,1965 年和 1970 年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。

每一种新热源的出现,都可能伴随着新的焊接方法的问世。焊接工艺发展到今天,几乎运用了一切可以利用的热源,包括火焰、电弧、电阻热、超声波、摩擦热、电子束、激光、微波和太阳能等。对焊接热源及其他能源的研究与开发仍在继续,近年来采用两种热源叠加(电弧+激光)的焊接工艺以及摩擦热加上机械搅拌作用的搅拌摩擦焊工艺得到成功的应用。

随着现代工业生产需要和科学技术的蓬勃发展,焊接工艺将向高效化、智能化方向发展,能够完成高温、低温、水下及核辐射等严酷条件下的焊接。

## 0.3 焊接的实质与分类

金属原子是依靠金属键结合在一起的。由图 0-1 可以看出,两个原子间结合力的大小是

引力与斥力共同作用的结果。当原子间的距离为  $r_A$  时，结合力最大。对于大多数金属， $r_A \approx 0.3 \sim 0.5 \text{nm}$ 。当原子间的距离大于或小于  $r_A$  时，结合力都显著降低。从理论上讲，当两个被连接的固体材料表面的距离接近  $r_A$  时，就可以在接触表面上进行扩散、再结晶等物理、化学过程，从而形成键合，实现材料原子之间的连接。然而，事实上即使是经过精细加工的表面，其表面粗糙度值仍有几微米到几十微米，在微观上是凹凸不平的，不平度约为  $r_A$  的  $10^4$  倍，另外在材料表面上还常常有氧化膜、油污和水分等吸附层，这些都会阻碍材料表面的紧密接触。

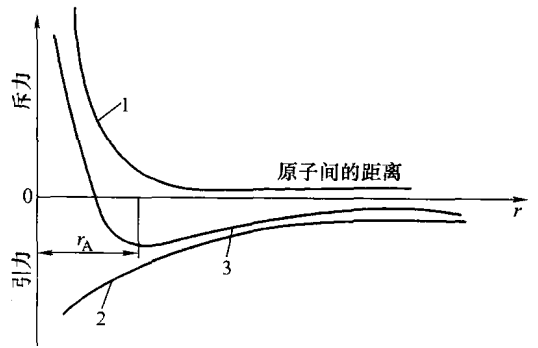


图 0-1 原子之间的作用力与距离的关系  
1—斥力；2—引力；3—合力

焊接过程的实质就是采用物理、化学方法克服被连接物体(金属)表面的凹凸不平、表面氧化物及其他表面杂质，使被连接物体(金属)之间的距离能接近到原子晶格距离并形成结合力。在工程上已获得广泛应用的焊接方法有很多，尽管实现焊接的方法和手段不同，但它们所达到的效果是相同的，即实现原子间的冶金结合。

由于焊接方法种类繁多，且新的方法仍在不断涌现，因此对焊接方法进行分类的方法也有很多。有的根据焊接方法的热源和保护方法来分类，有的根据工艺特征来分类，由此出现了一元坐标法、二元坐标法、族系法等分类方法。其中，最常见的是族系法，即按照焊接工艺特征来进行分类。按照这种分类方法，可以把焊接方法分为熔焊、压焊和钎焊三大类，在每一大类中又分成若干小类，如图 0-2 所示。

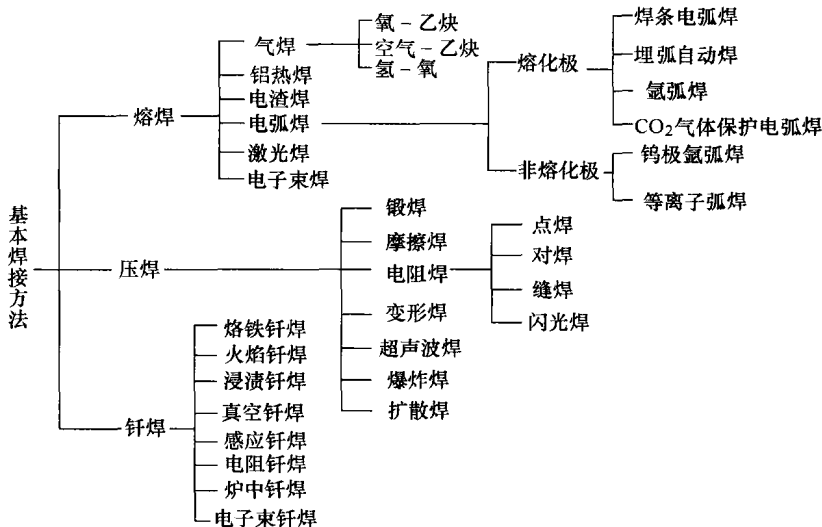


图 0-2 焊接方法分类

### 1. 熔焊

熔焊也称熔化焊，是将被焊件在待焊处局部加热熔化，使连接处的界面熔合，然后冷却结

晶形成焊缝的焊接方法。熔焊方法需要一个或多个能量密度足够高的热源加热金属材料使之熔化。根据焊接热源的不同,熔焊方法又可细分为以化学热作为热源的气焊、铝热焊;以熔渣电阻热作为热源的电渣焊;以电弧作为主要热源的电弧焊,包括焊条电弧焊、埋弧焊、熔化极氩弧焊、CO<sub>2</sub>气体保护电弧焊、钨极氩弧焊、等离子弧焊等;以高能束作为热源的电子束焊和激光焊等。

熔焊时,被焊材料局部是在不承受外加压力的情况下被加热熔化的,需要在焊接区采取有效的隔离空气的措施,焊接接头要经历复杂的冶金过程,两种被焊材料之间必须具有必要的冶金相容性。

近年来,激光+电弧的双热源焊接工艺是熔焊方法中较新的技术。

## 2. 压焊

压焊也称压力焊,是在焊接过程中必须对焊件施加压力(加热或不加热)以完成焊接的连接方法。其中,施加压力的大小同材料的种类、焊接温度、焊接环境和介质等因素有关,而压力的性质可以是静压力、冲击压力或爆炸力。

多数压焊过程中,焊接区金属仍处于固相状态,依赖在压力(不加热或加热)作用下产生的塑性变形、再结晶和扩散等作用形成接头,强调压力对形成连接接头的主导作用。但是,加热可促进焊接过程的进行,更易于实现焊接。在少数压力焊(电阻点焊、电阻缝焊等)过程中,焊接区金属已经熔化并同时被施加压力。压力焊的过程为加热—熔化—冶金反应—凝固—固态相变—形成接头,类似于熔化焊的一般过程。但是,通过对焊接区施加一定的压力可以提高焊接接头的质量。

压焊种类繁多,包括锻焊、摩擦焊、电阻焊、变形焊、超声波焊和爆炸焊等。

近年来,新的压焊方法主要有搅拌摩擦焊、激光辅助搅拌摩擦焊和激光-高频焊等复合焊接工艺。

## 3. 钎焊

钎焊是利用熔点比被焊材料熔点低的金属或合金作钎料,经过加热使钎料熔化而母材不熔化,液态钎料通过毛细作用填充接头接触面的间隙,润湿被焊材料表面,通过液相与固相之间的相互扩散而实现连接。钎焊的热源可以是化学反应热,也可以是间接热能。根据所使用钎料熔点的高低,钎焊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℃,软钎焊使用的钎料熔点低于450℃。根据钎焊的热源和保护条件的不同,钎焊可分为火焰钎焊、浸渍钎焊、感应钎焊、炉钎焊、电阻钎焊等。

钎焊加热温度较低,母材不熔化,但焊前必须采取一定的措施清除被焊工件表面的油污、灰尘及氧化膜等。这是使工件润湿性好、确保接头质量的重要措施。

钎焊时由于加热温度比较低,故对工件材料的性能影响较小,焊件的应力及变形也较小,但钎焊接头的强度一般比较低,耐热能力较差。

目前,由于使用含铅钎料钎焊的电子产品大量废弃后,其中的铅会污染地下水及环境,因此无铅钎料钎焊是钎焊工艺发展的一个重要方向。

## 0.4 焊接领域的标志性成就及展望

### 1. “新埔洋”号超大型原油船(VLCC)

2009年6月19日,我国拥有完全自主知识产权的“新埔洋”号超大型原油船(VLCC)(图0-3)在新落成的广州南沙龙穴造船基地出坞,此举标志着我国超大型船舶设计与制造迈上了新台阶,同时也标志着我国三大新兴造船基地之一的广州南沙龙穴造船基地生产能力全面形成。“新埔洋”号总载质量为30.8万吨,满载总排水量为35多万吨,甲板长333 m、宽60 m,比3个标准足球场还大,甲板面上设有直升机停降平台,甲板面至船底型深为29.8 m,服务航速可达15.7节。



图0-3 “新埔洋”号超大型原油船(VLCC)

### 2. 西陵长江大桥

1996年8月建成通车的西陵长江大桥(图0-4)位于三峡大坝中轴线下游4.5 km处,是长江上第一座全焊接钢箱梁悬索桥。该桥按重载水电工程车辆设计,首次实现了一跨过长江。该



图0-4 西陵长江大桥

桥的建成解决了三峡坝区两岸交通运输问题，对三峡工程大江截流及后续工程的按期进行起到了保障作用。

### 3. 京沪高速铁路南京大胜关长江大桥

2009年9月28日，京沪高速铁路南京大胜关长江大桥(图0-5)顺利实现合龙贯通。大桥钢梁总质量达8.2万吨，相当于武汉长江大桥用钢量的4倍。

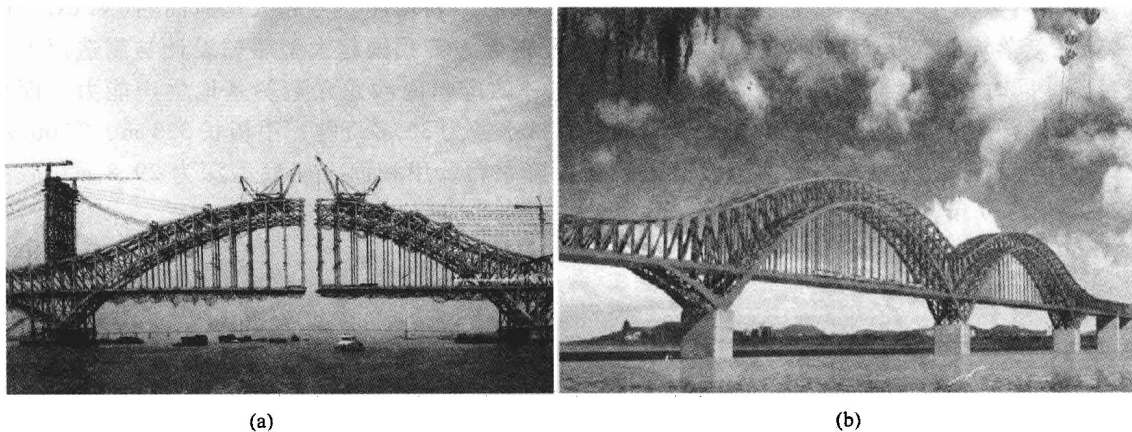


图0-5 京沪高速铁路南京大胜关长江大桥

### 4. 港珠澳大桥

2009年12月15日，世界最长跨海大桥——港珠澳大桥(图0-6)正式开建。港珠澳大桥跨越珠江口伶仃洋海域，是连接香港、珠海及澳门的大型跨海通道。大桥主体工程采用两桥一隧的桥隧组合方式。港珠澳大桥全长为49.968 km，主体工程“海中桥隧”长35.578 km，大桥全长约29.6 km，海底隧道长约6 km。港珠澳大桥是中国建设史上里程最长、投资最多、施工难度最大的跨海桥梁项目，也是世界上最长的跨海大桥。

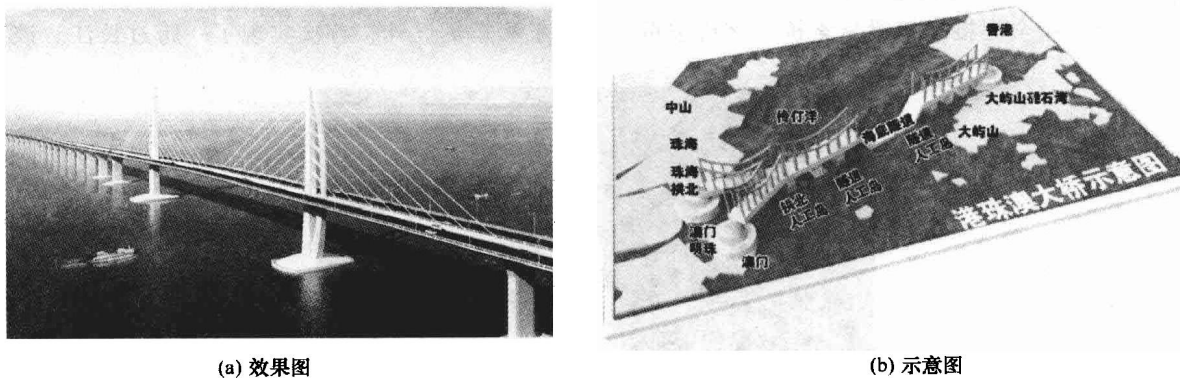


图0-6 港珠澳大桥

### 5. 上海崇明长江隧桥

2009年10月31日，世界上规模最大的隧桥结合工程——上海崇明长江隧桥正式建成通车。我国第三大岛崇明岛从此与上海市区“陆路”相接，结束了崇明岛没有通往大陆的路上



通道的历史，驱车从上海浦东抵达崇明岛仅需 20 多分钟。上海崇明长江隧桥南起上海浦东五号沟，经长兴岛，北止于崇明陈家镇，全长约 25.5 km。其中，长江隧道长约 8.9 km，连接上海浦东和长兴岛；长江大桥(图 0-7)长约 10.3 km，连接长兴岛和崇明岛。长江大桥为双索面分离式钢箱梁斜拉桥，主桥塔高为 212 m，主跨全长为 730 m，宽 51 m，为中国同类型桥的第三大桥，世界同类型桥的第五大桥。



图 0-7 上海崇明长江大桥

#### 6. 杭州湾跨海大桥

2007 年 6 月 26 日，经过 43 个月工程建设的杭州湾跨海大桥(图 0-8)全桥贯通，该桥全长 36 km，是当时世界上已建或在建的最长的跨海大桥，缩短宁波至上海间的陆路距离

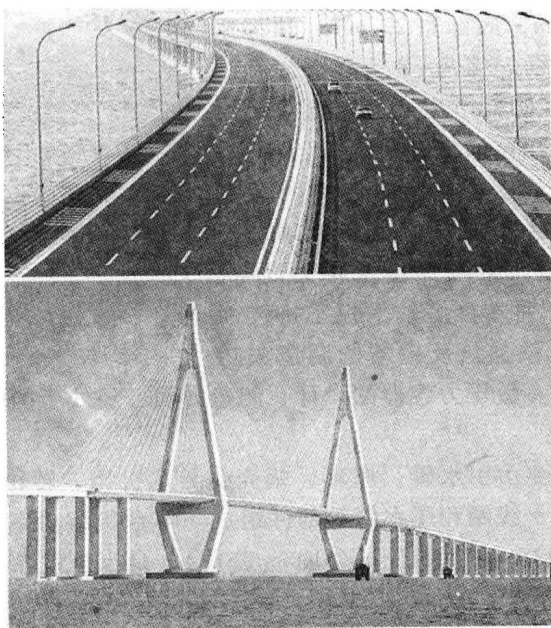


图 0-8 杭州湾跨海大桥