

卓越焊接工程师必备工具书

焊接制造工程基础

卓越工程师教育 —— 焊接工程师系列教程

史耀武◎主编

- ★ 以焊接制造工程为导向
- ★ 以焊接工程师职业需求为目标
- ★ 培养分析和解决焊接制造工程实际问题的能力
- ★ 为您顺利从校园到职场奠定良好的基础
- ★ 助您实现学生到焊接工程师的华丽转身



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

卓越工程师教育——焊接工程师系列教程

焊接制造工程基础

主编 史耀武

参编（按章节顺序排列）

戴为志	李晓延	夏志东	雷永平	栗卓新
朱锦洪	李 辉	张建勋	王炯祥	杨惠勤
宋永伦	宋俊贤	张友权	侯 敏	王智慧



机械工业出版社

本书是机械工业出版社组织编写的卓越工程师教育系列丛书之一。本书以焊接制造工程为导向,以卓越焊接工程师的职业需求为目标。书中收集了大量典型工程案例,全面反映了企业从焊接工程招投标到焊接结构制造工程全过程所需的材料、工艺、装备、信息化及技术管理的资料和方法,推动基于问题和基于项目的学习方法,提高学生的焊接工程概念和意识,培养分析和解决焊接制造工程实际问题的能力,为指导学生迅速适应企业的生产技术管理、技术创新和开发工作提供路径。本书是未来焊接工程师在校学习理论和进入企业工作的桥梁,本书也是企业培养卓越焊接工程师的指导教师及企业焊接工程技术人员必备参考工具书。

图书在版编目(CIP)数据

焊接制造工程基础/史耀武主编. —北京:机械工业出版社, 2016. 3
卓越工程师教育. 焊接工程师系列教程
ISBN 978-7-111-53831-8

I. ①焊… II. ①史… III. ①焊接—教材 IV. ①TG4

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第109010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 王彦青

版式设计:霍永明 责任校对:肖琳 刘怡丹

封面设计:马精明 责任印制:常天培

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2016年9月第1版第1次印刷

184mm×260mm·41印张·1114千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-53831-8

定价:139.00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

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

前 言

按照教育部卓越工程师教育培养计划的要求,培养造就大批创新能力强、适应经济社会发展需要的高质量工程技术人才,为建设创新型国家、实现工业现代化奠定人力资源优势,高校和企业的联合是培养卓越工程师的关键。本书作为学生在校学习理论和进入企业工作的桥梁,旨在使学生能顺利地适应企业的工作,从学校的理论知识学习向解决企业实际工程问题综合能力的过渡,尽快完成学生到工程师的华丽转身。为此,机械工业出版社组织编写了系列“卓越工程师教育——焊接工程师系列教程”丛书。本书是卓越焊接工程师学习和工作必备的工具书,本书以焊接制造工程为导向、以卓越焊接工程师的职业需求为目标,强调理论联系实际。本书除了介绍焊接制造工程的基础知识、工艺规律及所需装备外,书中还收集了大量典型工程案例,推动基于问题和基于项目的学习方法,提高学生的焊接工程概念和意识,培养学生分析和解决焊接制造工程实际问题的能力,为指导学生迅速适应企业的生产技术管理、技术创新和研发工作提供路径,尽早成为合格的卓越工程师。本书同时也是学校担任卓越工程师培养及专业学位研究生指导教师的首选工具书,本书也可作为企业培养卓越工程师指导教师及企业焊接工程技术人员必备的工具书。

全书16章,包括了企业从焊接工程招投标到焊接结构制造工程全过程所需的材料、工艺、装备及技术管理的必备资料和方法,结合大量工程案例,介绍了焊接制造、焊接工艺设计的方法与模式,给出了焊接智能制造与企业信息化的发展途径。

作为卓越工程师培养教育参考书,本书的编写采用企业与大学相结合的方式,聘请了多位理论和实践经验丰富的焊接专家,以便更准确地反映企业对卓越焊接工程师的岗位要求。全书由北京工业大学史耀武主编并统稿。第1章和附录由史耀武编写,第2章由浙江精工钢结构股份有限公司戴为志编写,第3章由北京工业大学李晓延编写,第4章由北京工业大学夏志东编写,第5章由北京工业大学雷永平编写,第6章由北京工业大学栗卓新编写,第7章由河南科技大学朱锦洪编写,第8章由北京工业大学李辉编写,第9章和第11章由西安交通大学张建勋编写,第10章由上海锅炉厂有限公司王炯祥、杨惠勤编写,第12章由北京工业大学宋永伦编写,第13章由北京巴布科克·威尔科克斯有限公司宋俊贤编写,第14章由中国工程建设焊接协会张友权、侯敏编写,第15章由北京工业大学王智慧编写,第16章由中国工程建设焊接协会张友权、浙江精工钢结构股份有限公司戴为志、中国工程建设焊接协会侯敏编写。

由于编写工作量较大,参加编写人员水平有限,书中难免存在缺欠,敬请广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 焊接技术的发展	1
1.2 焊接结构的特点与制造性能	2
1.3 焊接结构的应用	4
1.4 焊接制造的新挑战	9
参考文献	12
第 2 章 焊接工程招投标	13
2.1 工程招标的原则	13
2.1.1 招标的基本原则及基本项目	13
2.1.2 招标人及招标的具体规定	13
2.1.3 投标的具体规定	14
2.1.4 法律责任	15
2.2 投标流程	17
2.2.1 研究招标文件	17
2.2.2 复核工程量	17
2.2.3 编制投标文件	17
2.2.4 提交投标文件	18
2.3 焊接结构工程的投标	18
2.3.1 焊接工程标书	18
2.3.2 焊接工程标书的主要内容	19
2.4 编制投标文件	23
2.5 投标报价与决策	24
2.5.1 投标报价决策依据概况	24
2.5.2 决策的依据参考	24
2.5.3 投标策略	24
2.5.4 具体投标技巧	25
2.5.5 根据“施工组织设计”中的优化 设计和合理化建议正确定价	25
2.6 开标与评标	26
2.6.1 开标	26
2.6.2 评标	26
2.6.3 中标	27

2.7 签订合同	27
2.8 招投标工程案例	27
2.8.1 招标文件案例	27
2.8.2 投标书案例	29
参考文献	34
第 3 章 焊接接头设计	35
3.1 焊接接头概述	35
3.1.1 焊接接头的构成及特点	35
3.1.2 焊接接头的基本形式	35
3.2 焊缝及坡口的设计与表达	36
3.2.1 焊缝的工程标注	36
3.2.2 焊接接头坡口设计	44
3.3 焊接接头的静载强度设计	73
3.3.1 焊接接头静载强度设计原则	73
3.3.2 熔化焊接头的静载强度设计	74
3.3.3 点焊和缝焊接头的静载强度 设计	77
3.4 焊接接头应力疲劳设计	79
3.4.1 焊接构件应力确定方法	79
3.4.2 疲劳分析方法	83
3.4.3 疲劳分析方法的选择	86
3.4.4 焊接接头疲劳设计	87
3.4.5 焊接构件疲劳试验	91
参考文献	98
第 4 章 焊接结构常用金属材料	99
4.1 结构钢	99
4.1.1 碳素结构钢	100
4.1.2 低合金钢	102
4.1.3 超细晶高强钢	115
4.1.4 超高强度钢	116
4.1.5 低合金耐蚀钢	118
4.2 特殊钢	121
4.2.1 耐热钢	121



4.2.2 低温钢	123	6.2 焊丝	181
4.2.3 不锈钢	125	6.2.1 焊丝的分类	181
4.3 有色金属	127	6.2.2 实芯焊丝	181
4.3.1 铝及铝合金	127	6.2.3 药芯焊丝	182
4.3.2 钛及钛合金	131	6.3 焊剂	193
参考文献	134	6.3.1 焊剂的分类	193
第5章 材料焊接性与焊接性试验	135	6.3.2 焊剂的牌号和型号	194
5.1 材料焊接性及影响因素	135	6.3.3 焊剂的主要成分、性能及应用 特点	196
5.1.1 焊接性概念	135	6.4 焊接用气体	205
5.1.2 影响焊接性的因素	136	6.4.1 焊接用气体的基本性质	205
5.2 焊接性试验内容及焊接性评定 方法分类	137	6.4.2 焊接气体的选用	208
5.2.1 焊接性试验内容	137	6.5 钨电极	210
5.2.2 焊接性评定方法分类	139	参考文献	211
5.3 材料焊接性评定方法	140	第7章 焊接方法与设备	212
5.3.1 材料焊接性间接评定方法	140	7.1 焊条电弧焊	212
5.3.2 材料焊接性直接试验方法	144	7.1.1 基本原理与特点	212
5.4 焊接性试验方法简介	148	7.1.2 焊接参数与焊缝成形	213
5.4.1 斜 y 形坡口焊接裂纹试验方法 ..	148	7.1.3 典型设备	216
5.4.2 插销试验方法	150	7.1.4 焊接制造案例	218
5.4.3 对接接头刚性拘束焊接裂纹试验 方法	152	7.2 埋弧焊	220
5.4.4 压板对接 (FISCO) 焊接热裂纹 试验方法	152	7.2.1 基本原理与特点	220
5.4.5 可调拘束裂纹试验方法	153	7.2.2 焊接参数与焊缝成形	222
5.4.6 鱼骨状裂纹试验方法	155	7.2.3 多丝、窄间隙及带极埋弧焊	226
5.4.7 焊接接头拉伸试验方法	155	7.2.4 埋弧焊典型设备	229
5.4.8 焊接接头弯曲试验方法	157	7.2.5 焊接制造案例	233
5.4.9 焊接接头冲击试验方法	159	7.3 非熔化极气体保护焊	237
5.5 焊接性试验报告	160	7.3.1 基本原理与特点	237
5.6 焊接性试验应用案例	161	7.3.2 焊接参数与焊缝成形	238
5.6.1 NK-HITEN 610U2L 钢焊接冷裂纹 敏感性评定	161	7.3.3 高效 TIG 焊技术	243
5.6.2 Al-Mg-Sc 型铝合金 5B70 热裂纹 敏感性评估	163	7.3.4 典型设备	245
参考文献	165	7.3.5 焊接制造案例	249
第6章 焊接材料	166	7.4 熔化极气体保护焊	250
6.1 焊条	166	7.4.1 基本原理与特点	250
6.1.1 焊条的构成	166	7.4.2 焊接参数与焊缝成形	252
6.1.2 焊条的型号与性能	169	7.4.3 高效熔化极气体保护焊	258
		7.4.4 典型设备	262
		7.4.5 焊接制造案例	267
		7.5 激光焊	271
		7.5.1 基本原理与特点	271



7.5.2 焊接参数与焊缝成形	273	9.4 备料加工工艺	340
7.5.3 激光焊设备	278	9.4.1 钢材预处理	340
7.5.4 焊接制造案例	283	9.4.2 钢材矫正	340
7.6 搅拌摩擦焊	285	9.4.3 划线、放样及号料	343
7.6.1 基本原理与特点	285	9.4.4 钢材的下料	343
7.6.2 焊接参数及焊缝成形	287	9.4.5 钢材边缘与坡口加工	346
7.6.3 搅拌摩擦焊设备	290	9.4.6 钢材的弯曲及成形	347
7.6.4 焊接制造案例	293	9.4.7 钢材的制孔	349
参考文献	294	9.4.8 备料加工方法与适用范围	351
第8章 金属热切割	295	9.5 装配与焊接工艺	353
8.1 概述	295	9.5.1 焊接清理	353
8.2 气割	296	9.5.2 装配工艺	355
8.2.1 气割原理与特点	296	9.5.3 装配方法分类	355
8.2.2 气割设备与材料	297	9.5.4 装配中的定位焊	356
8.2.3 气割工艺	300	9.5.5 装配间隙与偏差	356
8.2.4 典型案例	303	9.5.6 焊接结构装配次序的确定	359
8.3 等离子弧切割	304	9.5.7 分部件装配—焊接法	359
8.3.1 等离子弧切割原理及分类	304	9.5.8 装配中应注意的问题	360
8.3.2 等离子弧切割设备、材料与 工艺	304	9.5.9 焊接工艺	361
8.3.3 等离子弧切割应用案例	309	9.6 焊接热处理工艺	363
8.4 激光切割	309	9.6.1 焊前预热	363
8.4.1 激光切割原理与特点	310	9.6.2 后热	364
8.4.2 激光切割设备与工艺	311	9.6.3 焊后热处理	365
8.4.3 激光切割典型案例	314	参考文献	366
参考文献	315	第10章 焊接工艺设计	367
第9章 焊接结构制造工艺流程	316	10.1 概述	367
9.1 焊接制造过程	316	10.1.1 焊接工艺设计的内容	367
9.1.1 工艺过程及其组成	318	10.1.2 焊接工艺设计流程	367
9.1.2 产品设计准备	319	10.1.3 焊接质量管理	368
9.1.3 产品工艺准备	322	10.2 图样的工艺性审查	368
9.1.4 合理组织焊接制造过程	324	10.2.1 产品标准化综合要求	369
9.1.5 焊接制造能力估算	324	10.2.2 质量控制要求	369
9.2 制造类型与特征	330	10.2.3 焊接坡口及工艺方法的选择	370
9.2.1 制造类型概述	330	10.3 焊接工艺方案论证	372
9.2.2 产品特点与制造类型的关系	331	10.3.1 焊接工艺方案的策划	372
9.2.3 改善制造类型的措施	333	10.3.2 焊接工艺评定	377
9.3 制造纲领和工艺文件	333	10.4 焊接工艺	386
9.3.1 制造纲领	333	10.4.1 焊接工艺规程	386
9.3.2 制造工艺文件	334	10.4.2 焊接材料定额的计算	389
		10.4.3 焊后热处理规程的编写方法	391



10.4.4 产品焊接见证件的设置	392	12.7.1 焊接热源及温度场	505
10.4.5 焊接工艺一览表	392	12.7.2 焊接应力与变形的数值模拟	509
参考文献	394	12.7.3 焊接工艺优化	510
第 11 章 焊接制造用机械设备	395	12.7.4 焊接数值模拟技术的发展趋势	513
11.1 焊接车间平面布置	395	12.8 焊接智能制造与信息化的进步	
11.1.1 车间类型与组成	395	思考	514
11.1.2 车间工艺平面布置	396	参考文献	515
11.1.3 车间设备和通道布置	398	第 13 章 焊接制造的质量管理与无损	517
11.1.4 典型焊接车间工艺平面布置	398	检测	517
11.2 焊接制造用主要设备	400	13.1 焊接检验	517
11.2.1 备料加工设备	400	13.1.1 焊接前检验	517
11.2.2 焊接工装夹具	428	13.1.2 焊接过程中检验	519
11.2.3 焊接变位设备	447	13.1.3 焊接后检验	519
11.2.4 焊后工序设备	471	13.2 焊接缺陷	524
参考文献	475	13.2.1 焊接缺陷的定义	524
第 12 章 焊接智能制造与信息化	476	13.2.2 缺欠的分类及代号	524
12.1 概论	476	13.2.3 金属熔化焊焊接缺陷的影响因素	539
12.2 焊接智能化的属性	477	及预防措施	539
12.2.1 焊接智能制造系统的特征	477	13.2.4 焊接缺陷的返修	540
12.2.2 焊接制造信息的属性及内涵	479	13.3 焊接结构	541
12.2.3 焊接智能制造系统的技术	479	13.3.1 焊接结构质量	541
构成	479	13.3.2 焊接结构验收	542
12.3 焊接制造的数字化	480	13.3.3 焊缝验收	543
12.3.1 数字化焊机	480	13.3.4 焊接结构的验收举例	545
12.3.2 数字化焊接装备与生产系统的	483	13.4 焊接过程与 ISO9001 质量管理	546
应用案例	483	体系	546
12.3.3 切割车间的信息化和数字化	486	13.4.1 质量管理	546
12.3.4 发展中的热切割技术	488	13.4.2 质量管理体系	549
12.4 数字化焊接车间	490	13.4.3 质量管理体系对焊接过程的	555
12.4.1 数字化焊接车间的基本组成	490	要求	555
12.4.2 数字化焊接车间的管理	490	13.5 无损检测	556
12.5 数字化焊接工厂的概念	493	13.5.1 射线检测	556
12.6 以机器人焊接为代表的焊接	494	13.5.2 超声波检测	558
智能制造	494	13.5.3 磁粉检测	562
12.6.1 智能化视觉传感技术	495	13.5.4 渗透检测	563
12.6.2 特种用途的焊接机器人	499	13.5.5 涡流检测	566
12.6.3 多机器人焊接的协同作业	502	参考文献	566
12.6.4 智能焊接机器人和 3D 打印	502	第 14 章 焊接从业人员资格认证与	567
技术	502	管理	567
12.7 焊接过程建模与仿真	504	14.1 现阶段我国焊接从业人员	



状况	567	16.1.8 建筑钢结构低温焊接技术	605
14.1.1 焊接从业人员的数量及成分		16.1.9 焊接检验	605
构成	567	16.1.10 国家体育场钢结构焊接工程的	
14.1.2 焊接从业人员的职业进阶	568	合龙技术	606
14.2 我国焊工的执业资格认证		16.2 火电厂超超临界锅炉安装焊接	
体系	568	工程	610
14.2.1 目前我国焊工的持证种类	568	16.2.1 工程概况	610
14.2.2 我国现行焊工技术资格考试及		16.2.2 焊接管理工作	611
认证标准	570	16.2.3 技术难点攻关	612
14.2.3 我国现行法律、法规、规范、		16.3 高炉炉壳焊接工程	613
标准对焊工的资格要求	571	16.3.1 工程概况	613
14.3 焊接从业人员资格管理现状 ..	578	16.3.2 工程特点	614
14.3.1 焊工	578	16.3.3 焊接方案	614
14.3.2 焊接技术人员	578	16.3.4 施工防风与防雨临时措施	616
14.3.3 焊接质量检验人员	579	16.3.5 施工质量及安全保证	616
参考文献	579	16.4 大桥钢箱梁拼装焊接工程	617
第 15 章 焊接安全	580	16.4.1 工程概况	617
15.1 概述	580	16.4.2 工程特点	617
15.2 焊接安全技术	582	16.4.3 焊接工程管理	618
15.2.1 焊接安全用电	582	16.4.4 焊接质量管理与控制	619
15.2.2 焊接和切割用气体及作业安全	583	16.4.5 新技术在钢箱梁焊接中的应用	622
15.2.3 焊接制造的防火与防爆	586	16.5 铺管工程船建造工程	625
15.3 焊接劳动卫生与防护	588	16.5.1 工程概况	625
15.3.1 电焊烟尘和有毒气体	588	16.5.2 工程特点	626
15.3.2 电焊操作的职业防护	591	16.5.3 焊接工程管理	627
参考文献	595	16.5.4 焊接质量管理	628
第 16 章 焊接结构制造工程典型案例 ..	597	16.5.5 焊接新技术应用	632
16.1 国家体育场钢结构焊接工程 ..	597	16.6 LNG 储罐焊接工程	634
16.1.1 工程概况	597	16.6.1 工程概况	634
16.1.2 钢结构用材	597	16.6.2 质量活动	634
16.1.3 焊接工程的指导思想	598	16.6.3 内罐焊接技术	637
16.1.4 现场通用焊接工艺的基本规定	600	参考文献	642
16.1.5 应力与变形控制措施	601	附录	643
16.1.6 施焊环境要求	603	附录 A 焊接常用英语缩略语	643
16.1.7 建筑钢结构厚板焊接技术	603	附录 B 焊接常用单位换算表	646

本章首先介绍了焊接技术的发展历程、焊接结构的特点及其制造性能。我国重大工程 and 高端装备制造业发展的需求，推动了焊接制造技术的快速进步和广泛应用。着重回顾了 in 建筑钢结构、能源工程、汽车、航空航天、造船与海洋工程等大型焊接结构制造方面取得的成就，指出焊接结构制造面临的新挑战。

1.1 焊接技术的发展

焊接是采用物理或化学的方法，使分离的材料产生原子或分子结合，形成具有一定性能要求的整体。焊接与胶接、机械连接等同属材料连接技术。

人类历史上应用最早的焊接技术是钎焊。公元前 4000 年美索布达尼亚人就开始用 Pb 或 Sn 来连接铜，公元前 350 年罗马人开始用 Sn-Pb 合金连接 Pb 制水管或 Cu 制金属工具。我国在春秋中晚期开始采用 Sn 或 Sn-Pb 合金作为钎料。安徽舒城九里墩春秋墓出土的鼓座，上面的龙身就是先铸造成若干段再钎焊成整体，钎焊处仍残留有大块锡钎料；曾侯乙墓出土的铜尊，采用 53Sn-41Pb 的钎料，钟荀铜套的钎料成分为 39Sn-61Pb，已与现今的某些钎料组成接近。著名的秦兵马俑出土的铜车马采用了青铜铸焊技术，焊接质量上乘，认为是 2000 年前的中国焊接技术。1000 年前的唐代，我国已掌握了铁器的锻焊技术，正如《天工开物》所述：“凡铁性逐节粘合，涂黄泥于接口之上，入火挥锤，泥渣成枵而去，取其神气为媒合，胶结之后，非灼红斧斩，永不可断”。

现代意义的焊接技术出现在 19 世纪初的西方国家。1885 年俄罗斯 Benardos 发明碳弧焊，1888 年俄罗斯 Slavianoff 发明金属电极电弧焊，1890 年法国出现了氧乙炔焊，从此焊接技术开始得到迅速发展，成为现代制造技术的重要组成部分。图 1-1 所示为焊接技术的重要发展历程。

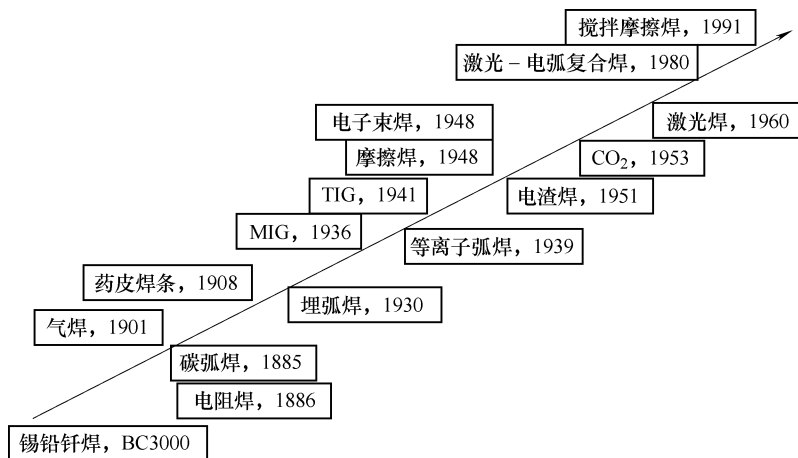


图 1-1 焊接技术的重要发展历程



当今,各种焊接工艺技术近百种,采用了力、热、电、光、声及化学等一切可以利用的能源,实现材料的永久连接。焊接技术的应用涉及能源、交通、化工、航空航天、造船与海洋工程、建筑工程、电气工程、微电子等几乎所有的工业领域。随着冶金及材料科学的发展、计算机及网络技术的广泛应用,焊接制造技术得到了迅猛发展,现代焊接技术已能适应当前制造业的基本需求。

近年来,重大工程和高端装备制造业的发展,推动了以高效电弧焊、激光复合焊、搅拌摩擦焊为代表的先进焊接技术的进步。新材料及新结构的应用也促进了钎焊,胶接等先进连接技术的发展,甚至催生了熔钎焊、点焊胶接、激光胶焊等复合制造技术的应用。

俗称“钢铁裁缝”的焊接离不开切割技术,等离子、火焰数控切割已广泛应用,激光切割备受关注。同时,焊接结构制造也面临能耗高、材料利用率低和资源与环境压力,迫切需要优质高效、节能环保的焊接新技术。

1.2 焊接结构的特点与制造性能

焊接技术应用广,焊接结构的设计和制造方便灵活,不需要大型装备就能实现各种复杂焊接结构的制造,生产效率高,制造周期短。焊接结构的厚度不受限制,在缺乏大型铸锻设备的情况下,采用拼焊的方法可方便地制造重型部件。根据产品的使用要求,焊接能把不同尺寸或不同材料的零部件方便地连接起来,从而使整个结构的壁厚及材料分布更符合不同服役性能的要求,在保证结构承载能力的条件下,减少贵重材料的消耗,减轻结构的质量,降低制造成本。焊接结构的几何形状不受限制,可以方便地采用空心结构、封闭结构或桁架结构。焊接结构的整体性、完整性好,强韧性好,优质焊接接头的强度可以与母材相当。焊接更容易制造水密性与气密性要求高的结构,已广泛用于压力容器、舰船、储罐等结构的制造。对于尺寸很大的金属结构,还可分部件制造、现场拼焊组装,同时简化了焊接工艺,扩大了工作面,缩短了制造时间。

焊接结构的整体性有时也带来问题,如止裂性能差,扩展的裂纹很容易穿过焊缝,甚至导致灾难性的后果。焊接结构及焊接接头容易产生应力集中,除了在焊接接头的焊趾、焊根及焊接缺陷部位产生应力集中外,在结构截面突变的部位也存在应力集中,若焊接接头位于结构截面突变处,应力集中更为严重,应力集中对结构的脆性断裂和疲劳性能有很大影响。焊接接头区域有可能存在裂纹、气孔、夹渣等冶金缺陷,这些缺陷往往是结构发生破坏的起源。焊接的局部快速加热、冷却,导致焊缝金属极度非平衡熔化与凝固结晶,热影响区经受不同峰值加热和冷却速率的热处理过程,使焊接接头的材料成分、显微组织和力学性能不均匀并存在明显的梯度变化。焊接接头又是焊接残余应力较大的部位,焊接残余应力对结构的强度、刚度、尺寸稳定性及腐蚀性能都有影响。因此,必须采取科学的焊接工艺设计,提高焊接接头的服役性能和结构寿命。

焊接结构的服役性能和安全性,是当今焊接结构设计与管理关注的首要问题,特别像核电站、大型客机、石油化工企业等,一旦发生事故,往往造成生命财产的巨大损失。因此焊接结构在使用过程中,不应产生弹性失效、塑性失稳及断裂等突发的致命破坏。图 1-2 是影响焊接结构服役性能的主要因素。由图 1-2 可以看出,从结构设计到选材、加工制造、生产质量管理及服役环境等众多因素都对结构的服役性能产生影响。在焊接结构预期的生命周期内,不但要保持设计要求的结构性能,而且要使用可靠。

图 1-3 为影响焊接结构制造性能的主要因素。在焊接结构制造过程中,除了确保焊接接头的



质量外，不论是个性化的单件、小批量制造，还是大规模投放市场的焊接结构产品，生产率及焊接效率也是影响焊接制造的重要因素。同时，还要兼顾焊接制造的人员及设备条件。近年来发展的3D打印或增材制造技术，采用精密控制的逐层堆焊增材技术，材料逐点累积成形，快速制作全焊缝金属零部件，实现宏微观结构一体化制造，制造零部件的尺寸和几何形状几乎不受限制，零部件近净成形，化学成分比较均匀，适于单件或小批量特种零部件制造，如航空航天复杂结构零件的打印制造。

图1-4为焊接结构的制造、再制造或解体的循环过程。焊接结构在制造过程中，消耗了大量材料及能源。在结构达到使用寿命的时候，通常采用切割或挤压等解体方法，作为金属材料回收再利用。为了节能节材，保护环境，发展循环经济，建设节约型社会，应采用延寿和再制造技术，恢复结构的尺寸和承载能力，使再制造结构的质量达到甚至可能超过新品的性能。另外，在重要焊接结构的设计阶段，就应考虑结构的维修或再制造能力，以免在结构服役末端，再制造难度增大，焊接的可达性差，这对核设施等的水下焊接维修尤为重要。

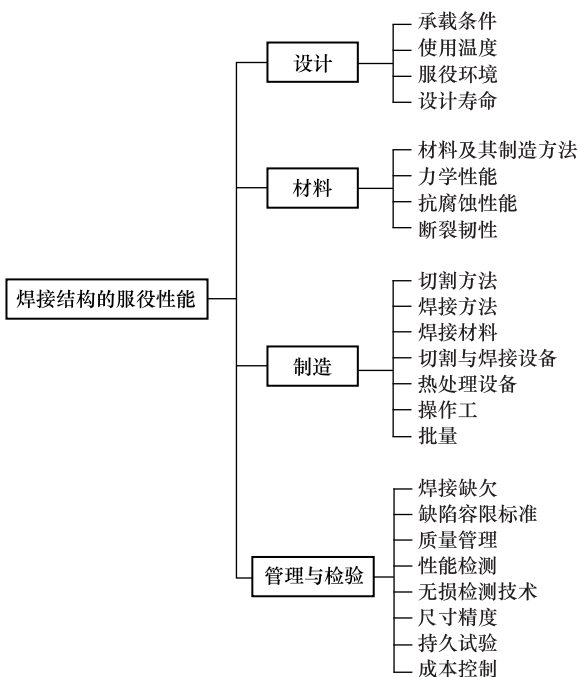


图 1-2 影响焊接结构服役性能的主要因素

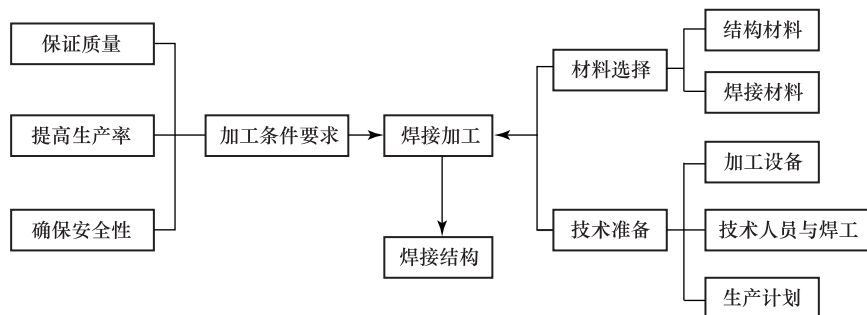


图 1-3 影响焊接结构制造性能的主要因素

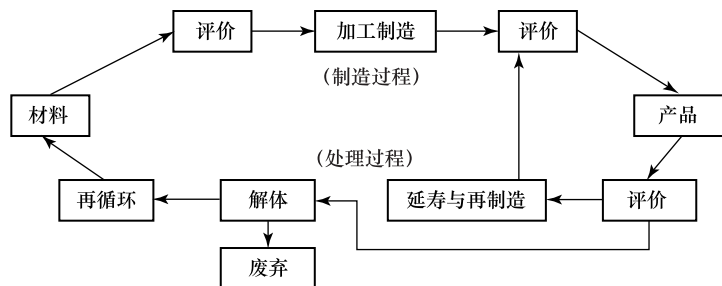


图 1-4 焊接结构的制造、再制造或解体的循环过程



1.3 焊接结构的应用

焊接作为现代制造业的基础技术,已广泛应用于材料加工的各个领域。在《国家中长期科学和技术发展规划纲要》中,重大装备制造处于非常重要的地位,纲要确定的16项重大专项中,如大型先进压水堆及高温气冷堆核电站、大型油气田及煤层气开发、大型飞机、载人航天与探月工程、集成电路制造等均离不开连接技术。在《国务院关于加快振兴装备制造业的若干意见》中提出的16个重大技术装备领域中,如大型清洁高效发电装备、大型乙烯和煤化工成套设备、海洋石油工程装备及液化天然气(LNG)运输船、高速列车、飞机及航空发动机等制造领域与焊接密切相关,焊接技术已渗透到制造业的各个领域,直接影响到产品的质量、生产成本、可靠性与寿命。

2012年起,我国钢产量已超过7亿t,很多钢材需要经过焊接加工制成有用的构件或工程结构。我国在大型焊接结构的开发和应用方面,已取得了举世瞩目的成绩。

1. 建筑钢结构

建筑钢结构包括工业厂房、商用办公楼、民用住宅及其他大型公共设施等。自20世纪80年代以来,我国建筑钢结构得到了迅速发展。

大型建筑钢结构广泛采用H形及箱形截面构件,由厚钢板焊接而成。常用材料为低碳结构钢Q235、低合金高强度结构钢Q345、Q390等。广泛采用高效埋弧焊及气体保护焊。构件尺寸大、焊接工作量大。高层钢结构建筑的焊接梁柱,板厚大都在30mm以上。如深圳发展中心大厦的箱型柱最大壁厚达130mm,焊接工作量达35万延长米;深圳地王大厦的焊接工作量达60万延长米。在制造安装过程中,对装配、焊接应力和变形的控制十分严格。

著名的国家大剧院是我国第一个大型现代化文化建筑。椭球形穹顶长轴跨度212.2m,短轴跨度143.64m,高度46.285m。穹顶采用金属钛板饰面。壳体钢结构总重6750t,网壳面积3.5万m²,没有立柱,全靠148根弧型钢梁承重,主桁架由60mm厚钢板组焊而成。

2008年北京奥运会的国家体育场(鸟巢)是大跨度重型钢结构(见图1-5),设计寿命为100年。建筑顶面呈马鞍形,长轴332.3m,短轴297.3m,高度40.1~68.5m,顶部开口长度185.3m,宽度127.5m。结构复杂,包含大量曲线箱型结构。钢材主要为低碳结构钢Q235,当板厚超过100mm时,采用低合金高强度结构钢Q460E,节点为GS20Mn5V铸钢,设计用钢量4.2万t。现场拼装主要采用CO₂气体保护焊及焊条电弧焊,焊缝长度约61000m,大于40mm板厚的焊缝长度约12000m,消耗焊接材料2000余吨。施工过程中



图1-5 国家体育场

采用分块散装,主体钢结构的安装顺序遵循对称同步、尽早形成安装区域局部稳定的原则,主体钢结构共划分为230个安装单元。节点的焊缝集中,焊接应力大。柱脚结构复杂,内部筋板多数要求全熔透焊接,焊接应力和变形的控制难度大。

由于1995年日本阪神大地震的教训,为了防止钢结构的脆断,新型抗震钢结构十分注意梁柱节点设计,采用韧性良好的焊接材料及衬垫、合理设计焊缝金属与母材的强度匹配、合理的焊接工艺及无损检测制度。高层建筑等重要钢结构大都采用刚性连接,梁翼缘与柱现场焊接,梁腹



板与柱用高强度螺栓连接或角焊缝焊接, 注意熔透、减少焊接缺陷及应力集中。“9·11”纽约世贸中心事件之后, 对高层建筑钢结构又提出了耐火要求, 这些无不对重要钢结构的设计与焊接施工带来影响。

2. 能源工程

燃煤电厂在全球经济发展中起着至关重要的作用, 目前燃煤电厂的发电量, 在全球占 40%, 在国内占近 70%。我国的火电装机容量已突破 9 亿 kW。发电机组正在向大容量、高参数、高效环保的方向发展, 燃煤电厂将主要采用超超临界机组。超超临界机组的发电效率可达 48%, 发电效率比亚临界机组高 10%, 比超临界机组高 6% ~ 8%。锅炉热效率的提高, 还能降低 SO_2 、 NO_x 和 CO_2 的排放。

电站锅炉的关键部件由水冷壁、过热器、再热器、联箱及主蒸汽管道构成, 除了要求常温力学性能外, 特别关注材料的高温蠕变强度及持久强度。由于燃煤及高温蒸汽的作用, 钢材还要有良好的抗蒸汽氧化和烟气腐蚀等性能。建设超超临界机组的主要困难是材料。近 20 年来, 抗蠕变性能优良的铬的质量分数为 9% ~ 12% 的铁素体钢的开发是锅炉材料方面取得的重要进展。新型铁素体钢不仅有优良的蠕变强度, 还有良好的成形加工和焊接性能。随着锅炉蒸汽温度的进一步提高, 材料的抗蒸汽氧化性能和抗烟气腐蚀性能要求愈显突出, 进而促进了新型奥氏体钢和镍基合金的开发与应用。

目前主流的焊接工艺是 GTAW 打底、SMAW 过渡、SAW 填充焊缝。热丝 GTAW 虽然能够获得优质的焊接接头, 但生产率仍然较低。一台 600MW 的锅炉有约 6 万个焊接接头, 应积极推进窄间隙气体保护焊, 包括窄间隙热丝 (GTAW-NG), 特别是熔化极气体保护波控焊接、高效双丝焊接, 以及激光/熔化极气体保护焊等先进焊接技术的应用, 以提高焊接生产率。

由于 T/P92 钢、T/P122 钢及 E911 钢等新型铁素体钢严格控制了碳含量, 降低了马氏体转变温度, 焊接冷裂纹的敏感性明显低于合金含量低的 P22 钢。奥氏体钢不但容易产生焊缝结晶裂纹, 也容易在近缝区产生液化裂纹。研究表明, Super304H 钢和 TP347HFG 钢的热裂纹敏感性低于常规的 TP347H 钢, 而 HR3C 钢的热裂纹敏感性较高。对镍基合金 Inconel 740 和 Haynes 230 厚板进行埋弧焊时, 热裂纹严重, 在采用氦/氩混合气体保护热丝钨极氩弧焊时, 采用匹配焊丝, 焊缝的抗裂性能显著提高。长期服役的 P91 钢厚壁部件对 IV 形裂纹很敏感, 并成为焊接接头的薄弱环节。IV 形裂纹不仅发生在细晶区及靠近母材的亚临界热影响区, 也出现在厚壁多层焊的焊缝金属中, IV 形裂纹的形成机制与焊接接头局部软化有关。

2013 年的国家电网数据显示, 清洁能源装机容量首超 1/4, 我国能源结构进入了加速调整期。2015 年“十二五”末, 煤炭在一次能源消费中的比重将从 2009 年的 70% 下降到约 63%, 天然气从目前的 3.9% 提升到 8.3%, 水电与核能从 7.5% 提升到 9%, 其他非化石能源 (主要是风能、太阳能和生物质能) 的电力消费比重将从目前的 0.8% 上升到 2.6%。

目前, 全世界核电运行机组共有 437 台, 总装机容量达 371762MW, 在建机组 64 座。核电凭借清洁环保、安全经济、稳定性好等优势得到各国广泛认可。随着我国核电设备国产化率的不断提升, 未来 20 年将是我国核电建设高速增长的黄金期。据统计, 我国目前已建成浙江秦山、广东大亚湾和江苏田湾三个核电基地, 17 台机组在运行, 总装机容量 1475 万 kW, 预计到 2020 年核电装机总容量将达到 8000 万 kW。核电厂由核岛 (核反应堆及蒸汽供应系统)、常规岛 (汽轮/发电机组) 和电厂配套设施构成。西屋公司开发的 AP1000 非能动型压水堆, 属第三代反应堆。浙江三门一号机组是全球首个 AP1000 反应堆, 电功率 1250MW, 设计寿命 60 年, 主要安全系统采用非能动设计, 布置在安全壳内。安全壳为双层结构, 外层为预应力混凝土, 内层为板焊结构, 安全壳直径约 40m, 高约 66m。AP1000 简化了安全系统设计, 减少了部件数量, 相应减



少了所需的试验、检查和维护，可在无需操作人员及交流电支持的情况下维持堆芯冷却和安全壳的完整性，以防止严重事故的发生。

AP1000 的一回路系统由两个各带一个热段和两个冷段的热传输回路、一台蒸气发生器和与之相连的两台反应堆冷却剂泵组成，如图 1-6 所示。反应堆冷却剂系统压力边界是阻止反应堆放射性泄漏的屏障。反应堆压力容器总高 10.075m，上下封头为半球形，筒体法兰外径 3.99m，壁厚 175mm，材料为 ASME SA508，内表面为不锈钢堆焊层，设计承压 17.1MPa，343℃。主冷却剂管道材料为 316L 超低碳不锈钢锻件，热段外径 953mm，壁厚 83mm，冷段直径 686mm，壁厚 65mm，现场环缝采用窄间隙 GTAW 全位置自动焊接，一个坡口需要 7~10 个工作日。

焊接是核电站制造、安装及服役维护中的关键技术，焊接条件复杂、工作量大、质量要求高。在机组安装工程中，以田湾核电站主岛为例，每个核岛涉及主管道 36 个焊接接头，辅助管道 15 万米以上。AP1000 的接管安全端异种材料焊接接头，是核反应堆一回路压力边界，是重点监控的安全部位，接管采用镍基合金 Inconel 82 堆焊过渡层，与安全端 316L 不锈钢管道连接的焊接材料为 Inconel 182，如图 1-7 所示。

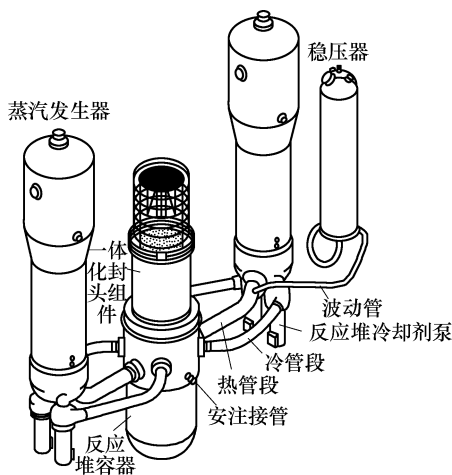


图 1-6 AP1000 压水堆主要组件

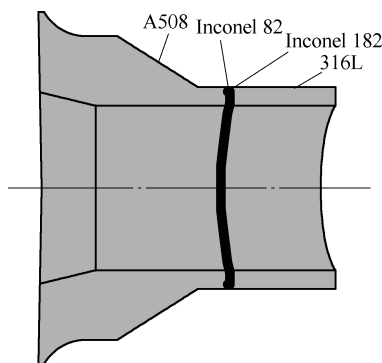


图 1-7 接管安全端异种材料焊接接头

水电是一种经济、清洁的可再生能源。著名的长江三峡水电站，总装机容量 1820 万 kW，共 26 台轴流式水轮机，单机装机容量 70 万 kW。每台机组的特大型引水管由 600MPa 高强度钢制成，直径 12.8m、壁厚 26~60mm，共 72 个管节拼焊连接，单节重量为 20~50t。蜗壳进水口直径 12.4m，壁厚 24~120mm。图 1-8a 为水轮机蜗壳，一端与进水管连接，蜗壳中间是环座固定导叶。水轮机的环座位于水轮机底部蜗壳内侧，上部安装水轮机转轮，为平板式组焊结构，环座总重 382t，分为 6 瓣现场组焊，单瓣最重约 70t，组装后最大外径约 14.5m，高 4.265m。转轮直径 10.43m，高 5.08m，质量 450t，由上冠、下环、15 块叶片、上下止漏环和泄水锥焊接而成，是目前世界上最大的水电铸钢焊接件，如图 1-8b 所示。转轮材料为 410NiMo 马氏体不锈钢 (13% Cr、4% Ni、0.5% Mo)，焊接用于转子部件的组装和铸造缺陷的修补。主要焊接方法是焊条电弧焊及双丝埋弧焊，焊丝为实心及金属粉芯两种，每个转子的组装需焊接材料 7~10t。焊接接头的性能要求是：0℃最低吸收能量为 50J（热处理状态）及 20J（焊态），热处理后接头最低屈服强度 550MPa，抗拉强度 760MPa。另外，金属结构的焊接工作量大，仅各种闸门就有 282 扇，闸门长度为 40~60m，且要求焊接变形不得超过 5~10mm。



图 1-8 三峡水轮机蜗壳与转轮

a) 蜗壳 b) 转轮

为了满足东部经济发达地区的能源需求,改善东部地区的环境压力,开发西部,中央政府及时提出了西气东输的发展战略,将我国西部及中亚地区丰富的天然气输往东部。现已完成西气东输一线和二线工程,正在建设三线,未来还要建设四线、五线工程,形成横贯祖国大江南北的能源大动脉。一线工程干线采用 X70 管线钢,图 1-9 为中卫黄河跨越工程,管道为 $\phi 1016\text{mm} \times 26.2\text{mm}$,全长 540m,直缝埋弧焊管,输气压力 10MPa。二线及三线工程采用 X80 高钢级管线钢。管径 1219mm,壁厚 15.3 ~ 33mm。三线工程的管线设计系数从二线工程的 0.72 提升到 0.80,高韧性 X80 钢管材的最小冲击吸收能量要求由 240J 提高到 280J,壁厚减薄到 16.5mm,节能节材,降低了工程投资,高压长输管线具有抗强震和断层活动的止裂能力。



图 1-9 西气东输一线中卫黄河跨越工程

X80 螺旋焊管在制管企业广泛采用双丝埋弧焊焊接,直缝焊管多采用多丝纵向串列埋弧焊焊接,内焊最多可采用 4 丝,外焊 5 丝,焊接速度可达 2m/min,生产效率高。 $\phi 1219\text{mm} \times 22\text{mm}$ 直缝埋弧焊管,钝边 7mm,坡口角度 37° ,X 形坡口,预焊焊丝为 $\phi 3\text{mm}$ 的 CHW60C、内外焊采用 $\phi 4\text{mm}$ 的 MK680 焊丝与 SJ101G 焊剂匹配。 $\phi 1219\text{mm} \times 18.4\text{mm}$ 螺旋埋弧焊管,钝边 7mm,上坡口角度 35° ,下坡口角度 40° ,X 形坡口,内外焊采用 H08C 焊丝与 SJ101G 焊剂匹配。管线现场施工时,采用焊条电弧焊或 STT 半自动焊进行根焊,采用焊条电弧焊填充和盖面。在大直径厚壁管道施工中,自动焊的优势是非常明显的,也是当今世界大直径管线焊接施工的主流,需要内对口机、管端坡口整型机等配套机具。

3. 造船与海洋工程结构

据 2011 年统计,我国造船完工量 7665 万载重吨,占世界市场份额的 45.1%,居全球首位。船舶种类繁多,品种各异。在民用船舶方面,除了散货船、集装箱船等主力船型外,已能批量建造大型液化天然气船和液化石油气船、超大型油船、大型滚装船、科考船和海洋调查船等高技术、高附加值船舶。我国开发的 17.5 万 t 好望角型散装货轮,已成为国际知名品牌,已能独立制造 30 万 t 大型油轮和液化天然气船。2012 年“辽宁”号航母完工和“蛟龙”号 7000m 深潜成功,开启了我国船舶和海洋工程结构的新篇章。

船舶结构复杂、整体刚性大、钢材用量和焊接工作量大。焊接技术在船舶建造中占有举足轻



重的地位。目前,下料工序普遍采用数控火焰及水下等离子弧切割,激光切割正扩大使用,大拼板采用多丝埋弧焊单面焊双面成形,气体保护半自动焊和自动焊广泛使用,船厂也是药芯焊丝的主要用户。德国等欧洲国家在船舶建设中还广泛采用激光焊,以舰船甲板、舱壁、壳体等结构的T形梁为例,当采用传统GMAW焊时,T形梁为双面坡口焊接,采用激光-电弧复合焊时,可以无坡口实现全熔透焊接,焊丝消耗可减少至原来的 $1/4$ 至 $1/7$,甲板焊接变形程度减小 $2/3$,大幅降低焊接工时和焊后矫形。焊接材料消耗的减少,还能降低舰船的自重。目前高性能的三体舰船,广泛采用铝合金结构及搅拌摩擦焊,但腐蚀问题仍待解决。图1-10为我国建造的第一艘液化天然气船“大鹏昊”号,全长292m,型宽43.35m,型深26.25m,装载量为14.7万 m^3 。该船采用保温瓶原理,货舱设计了半米厚的隔热“内胆”,其中双层绝缘箱内藏珍珠岩,有效阻隔热量传递。内壁使用0.7mm厚的殷瓦合金板,手工与自动TIG焊接,不能有任何泄露,全船焊缝长度超过100km,设计寿命40年。

勘探和开发海洋油气资源正逐步成为缓解能源紧张、增加石油天然供应的重要途径。资料显示,我国南海石油地质资源量至少为300亿吨,天然气总地质资源量约为16万亿 m^3 ,占我国油气总资源量的 $1/3$ 。随着我国海洋油气事业的发展,由浅海走向深海,海洋工程装备制造业已进入黄金发展期。目前,我国已基本实现浅水油气装备的自主设计建造,深海装备制造正在取得突破。2011年我国首座自主设计建造的深水半潜式钻井平台“海洋石油981”已经顺利交付使用,钻井平台长114m,宽89m,平台正中是五六层楼高的井架。该平台自重30670t,承重12.5万t,可起降直升机,具有勘探、钻井、完井与修井作业等多种功能,最大作业水深3000m,钻井深度10000m,如图1-11所示。目前在建的超深水钻井船“大连开拓者号”,可以在水深3050m海域进行钻井作业,钻井深度12000m,储油100万桶。钻井平台采用高强度或超高强度钢厚板焊接结构,对材料的韧性和焊接性有较高要求。半潜式钻井平台多采用抗拉强度为500MPa的高强度钢,自升式钻井平台,桩腿结构多采用屈服强度大于690MPa的高强度调质钢。目前,焊接方法主要为焊条电弧焊、气体保护焊和埋弧焊。焊接过程应严格控制焊接工艺、焊接变形和尺寸精度。

4. 汽车制造

现在我国汽车年产量已超过2000万辆,成为世界第一汽车生产大国,汽车保有量已经过亿。汽车的车桥、车架、车身、车厢、发动机及变速器6大部件都离不开焊接。电阻点焊在汽车制造中应用最广,通常一辆货车有3500~4500个焊点,轿车和箱式汽车有8000~12000个焊点。我国在车身制造中,电阻点焊约占75%,在车桥、车架和车厢制造中,气体保护焊约占90%。随



图1-10 我国建造的第一艘液化天然气船



图1-11 深水半潜式钻井平台“海洋石油981”