

卓越工程师教育 —— 焊接工程师系列教程

焊接结构理论与制造

第2版

贾安东 张玉凤 编著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

焊接工程师系列教程

焊接结构理论与制造

第2版

贾安东 张玉凤 编著



机械工业出版社

本书是结合高等学校“卓越工程师教育”及现代焊接制造业对“焊接”专业、“材料成型及控制”专业毕业生的要求,使毕业生掌握焊接结构的理论与制造基础知识,具备从事焊接结构制造的基本技术素养而编写的教材。

本书主要内容有:绪论,焊接结构中的应力与变形,焊接结构的脆性断裂,焊接结构的疲劳,焊接结构在环境介质作用下的破坏及高温力学性能,焊接结构设计概论,梁、柱和桁架类焊接结构的设计与生产,典型焊接容器的设计与制造,汽车和列车车身结构的生产,复合结构及焊接机器件的生产。

本书可作为大学本科和高职、高专“焊接”“材料成型及控制工程”(焊接方向)专业相关课程的教材,硕士研究生“材料加工工程”专业相关课程的参考教材,卓越焊接工程师的培训教材,还可以供焊接及相关学科教师及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

焊接结构理论与制造/贾安东,张玉凤编著. —2版. —北京:机械工业出版社,2017.10

卓越工程师教育. 焊接工程师系列教程

ISBN 978-7-111-60254-5

I. ①焊… II. ①贾…②张… III. ①焊接结构—焊接工艺—高等学校—教材 IV. ①TG44

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第134397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

责任校对:樊钟英 封面设计:马精明

责任印制:常天培

北京铭成印刷有限公司印刷

2018年9月第2版第1次印刷

184mm×260mm·21.75印张·530千字

0 001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-60254-5

定价:59.00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

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

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

封面无防伪标均为盗版



卓越工程师教育——焊接工程师系列教程

编委会名单

主 任 胡绳荪

委 员 (按姓氏笔画排序)

王立君 杜则裕

何月秋 杨立军

郑振太 贾安东

韩国明

教育部“卓越工程师教育培养计划”是贯彻落实《国家中长期教育改革和规划纲要（2010—2020年）》和《国家中长期人才发展规划纲要（2010—2020年）》的重大改革项目，也是促进我国高等工程教育改革和创新，努力建设具有世界先进水平和中国特色的现代高等工程教育体系，走向工程教育强国的重大举措。该计划旨在培养和造就创新能力强、适应经济社会发展需要的高质量各类型工程技术人才，为实现中国梦服务。

焊接作为制造领域的重要技术在现代工程中的应用越来越广，质量要求越来越高。为适应时代的发展与工程建设的需要，焊接科学与工程技术人员培养进入了“卓越工程师教育培养计划”，本套“卓越工程师教育——焊接工程师系列教程”的出版可谓恰逢其时，一定会赢得众多的读者关注，使社会和企业受益。

“卓越工程师教育——焊接工程师系列教程”内容丰富、知识系统，凝结了作者们多年的焊接教学、科研及工程实践经验，必将在我国焊接卓越工程师人才培养、“焊接工程师”职业资格认证等方面发挥重要作用，进而为我国现代焊接技术的发展作出重大贡献。

单 平

编写说明

随着高等教育改革的发展,2010年教育部开始实施“卓越工程师教育培养计划”,其目的就是要“面向工业界、面向世界、面向未来”,培养造就创新能力强、适应现代经济社会发展需要的高质量各类型工程技术人才,为建设创新型国家、实现工业化和现代化奠定坚实的人力资源基础,增强我国的核心竞争力和综合国力。

我国高等院校本科“材料成型及控制工程”专业担负着为国家培养焊接、铸造、压力加工和热处理等领域工程技术人才的重任。结合国家经济建设和工程实际的需求,加强基础理论教学和注重培养解决工程实际问题的能力成为了“卓越工程师教育计划”的重点。

在普通高等院校本科“材料成型及控制工程”专业现行的教学计划中,专业课学时占总学时数的比例在10%左右,教学内容则要涵盖铸造、焊接、压力加工和热处理等专业知识领域。受专业课教学学时所限,学生在校期间只能是初知焊接基本理论,毕业后为了适应现代企业对焊接工程师的岗位需求,还必须对焊接知识体系进行较系统的岗前自学或岗位培训,再经过焊接工程实践的锻炼与经验积累,才能成为焊接卓越工程师。显然,无论是焊接卓越工程师的人才培养,还是焊接工程师的自学与培训都需要有一套实用的焊接专业系列教材。“卓越工程师教育——焊接工程师系列教程”正是为适应高质量焊接工程技术人才的培养和需求而精心策划和编写的。

本系列教程是在机械工业出版社1993年出版的“继续工程教育焊接教材”系列与2007年出版的“焊接工程师系列教程”的基础上修订、完善与扩充的。新版“卓越工程师教育——焊接工程师系列教程”共11册,包括《焊接技术导论》《熔焊原理》《金属材料焊接》《焊接工艺理论与技术》《现代高效焊接技术》《焊接结构理论与制造》《焊接生产实践》《现代弧焊电源及其控制》《弧焊设备及选用》《焊接自动化技术及其应用》《无损检测与焊接质量保证》。

本系列教程的编写基于天津大学焊接专业多年的教学、科研与工程科技实践的积淀。教程取材力求少而精,突出实用性,内容紧密结合焊接工程实践,注重从理论与实践结合的角度阐明焊接基础理论与技术,并列出了较多的焊接工程实例。

本系列教程可作为普通高等院校“材料成型及控制工程”专业(焊接方向)本科生和研究生的参考教材;适用于企业焊接工程师的岗前自学与岗位培训;可作为注册焊接工程师认证考试的培训教材或参考书;还可供从事焊接技术工作的工程技术人员参考。

衷心希望本系列教程能使业内读者受益,成为高等院校相关专业师生和广大焊接工程技术人员的良好良师益友。本套教程中难免存在瑕疵和谬误,恳请各界读者不吝赐教,予以斧正。

编委会

前 言

本书是在2007年“焊接工程师系列教程”《焊接结构与生产》的基础上进行修改、补充和完善后改版而成。例如，在绪论中除回顾近年来随改革开放和国民经济的大发展，焊接生产和焊接结构的大发展外，增加了焊接结构制造的安全注意事项、焊接结构的工作图；在焊接结构的疲劳一章中，用“低周疲劳”取代了“应力疲劳和应变疲劳”，对应变疲劳有较深刻的阐述；用“焊接结构在环境介质作用下的破坏及高温力学性能”取代了原“焊接结构的应力腐蚀破坏”，增加了一些新内容；用“焊接结构设计概论”取代了原第5章，而原第5章中的焊接生产工艺过程设计内容将于新书《焊接生产实践》中介绍。为更全面介绍典型焊接结构的设计和制造，本书增加了两章内容：汽车和列车车身结构的生产、复合结构及焊接机器件的生产。

本书的主要内容有：绪论，焊接结构中的应力与变形，焊接结构的脆性断裂，焊接结构的疲劳，焊接结构在环境介质作用下的破坏及高温力学性能，焊接结构设计概论，梁、柱和桁架类焊接结构的设计与生产，典型焊接容器的设计与制造，汽车和列车车身结构的生产，复合结构及焊接机器件的生产。

本书可作为大学本科和高职、高专“焊接”“材料成型及控制工程”（焊接方向）专业相关课程的教材，硕士研究生“材料加工工程”专业相关课程的参考教材，卓越焊接工程师的培训教材，更适合刚入职的由传统“焊接工艺及设备”专业改为宽口径的“材料加工及成型”类专业的本、专科毕业生，到钢结构制造、造船、压力容器、焊接桥梁等企业、设计院所工作，进行入职培训用，也可供这类企业、设计院所对从事上述行业工作的技术人员进行培训和学习，使之适应焊接工程师的工作需要。

本书第1版由天津大学贾安东教授主编，霍立兴教授主审，单平教授和张玉凤教授分别编写了第1章和第2章，其余由贾安东教授编写；第2版由贾安东教授、张玉凤教授编著，贾安东教授编写了1、2、6、7、8、9、10章，张玉凤教授编写了3、4、5章。

本书在编写过程中参考了许多文献资料，有些是作者在工厂中工作收集的，这些文献资料对本书成书作用巨大，在此对原作者、工厂的工程技术人员表示衷心的感谢。

由于编著者水平有限，错误在所难免，敬请广大读者批评指正。

编著者

目 录

序	影响	36
编写说明	2.2.3 预防和消除焊接残余应力的措施	37
前言	2.2.4 焊接残余应力的测定	47
第1章 绪论	2.3 焊接残余变形	52
1.1 焊接结构和焊接生产的发展	2.3.1 焊接残余变形的分类及其影响	52
1.1.1 焊接结构的发展	2.3.2 各种焊接残余变形的产生及变形值的估算	53
1.1.2 焊接生产的发展	2.3.3 预防和消除焊接残余变形的措施	64
1.2 焊接结构的特点、分类与相关标准	第3章 焊接结构的脆性断裂	81
1.2.1 焊接结构的优点	3.1 结构的脆性断裂事故及其特征	81
1.2.2 焊接结构存在的问题	3.2 金属材料脆性断裂的能量理论	83
1.2.3 焊接生产的特点	3.3 金属材料脆性断裂及其影响因素	84
1.2.4 焊接结构的分类	3.3.1 金属材料断裂的基本概念	84
1.2.5 焊接结构设计和制造的相关标准	3.3.2 典型的断裂机制	85
1.3 焊接结构制造的安全注意事项	3.3.3 影响金属材料脆性断裂的主要因素	87
1.3.1 焊接的危险和有害因素	3.4 影响焊接结构脆性断裂的因素	91
1.3.2 焊接生产的安全技术	3.4.1 焊接结构的特点对脆性断裂的影响	92
1.3.3 焊接生产的劳动卫生	3.4.2 焊接结构制造工艺的特点对脆性断裂的影响	92
1.4 焊接结构的图样表示法	3.5 焊接结构防脆性断裂设计准则及相关的评定方法	97
1.4.1 基本符号	3.5.1 焊接结构防脆性断裂的	
1.4.2 补充符号		
1.4.3 指引线、尺寸符号及数据		
第2章 焊接结构中的应力与变形		
2.1 焊接应力与变形概述		
2.1.1 应力与变形的基本概念		
2.1.2 构件中焊接应力与变形的产生		
2.2 焊接残余应力		
2.2.1 焊接残余应力的分布		
2.2.2 焊接残余应力对焊接结构的		



设计准则	97	4.6.3 残余应力的影响	156
3.5.2 断裂评定方法	98	4.6.4 其他因素的影响	158
3.5.3 典型试验方法介绍	100	4.7 提高焊接接头疲劳强度的措施	160
3.6 防止焊接结构发生脆性断裂的途径	109	第5章 焊接结构在环境介质作用下的破坏及高温力学性能	166
3.6.1 正确、合理地选用材料	109	5.1 应力腐蚀破坏	166
3.6.2 采用合理的焊接结构设计	113	5.1.1 应力腐蚀及应力腐蚀破坏	166
3.6.3 合理安排结构制造工艺	116	5.1.2 焊接结构的应力腐蚀破坏	167
第4章 焊接结构的疲劳	117	5.1.3 应力腐蚀断裂的机理及断口特征	168
4.1 焊接结构的疲劳概述	117	5.1.4 断裂力学在结构抗应力腐蚀中的应用	170
4.1.1 疲劳断裂事例	117	5.1.5 防止焊接结构产生应力腐蚀的措施	173
4.1.2 焊接结构常见的疲劳类型	118	5.2 氢脆	176
4.2 疲劳断裂的过程和断口特征	120	5.2.1 氢脆的类型及特征	176
4.2.1 疲劳断裂的过程	120	5.2.2 氢脆机理	178
4.2.2 疲劳断口的特征	121	5.2.3 影响材料氢脆的外部因素	178
4.3 疲劳载荷及设计方法	123	5.2.4 应力腐蚀开裂和氢脆的关系	179
4.3.1 应力循环特征及S-N曲线	123	5.3 焊接接头的高温性能	180
4.3.2 疲劳设计	127	5.3.1 蠕变及蠕变曲线	180
4.4 断裂力学在疲劳裂纹扩展研究中的应用	145	5.3.2 高温蠕变性能	180
4.4.1 裂纹的亚临界扩展	145	第6章 焊接结构设计概论	183
4.4.2 疲劳裂纹扩展特性 $da/dN - \Delta K$ 曲线的一般关系	147	6.1 焊接结构的设计特点	183
4.4.3 疲劳裂纹扩展寿命的估算	149	6.1.1 焊接结构设计的内容	183
4.5 低周疲劳	149	6.1.2 焊接结构设计的基本要求和遵循原则	183
4.5.1 表征低周疲劳的滞后回线	150	6.2 焊接结构常用的设计方法	184
4.5.2 循环硬化与循环软化	150	6.3 焊接接头和结构细节设计	189
4.5.3 $\Delta\epsilon_1 - N$ 曲线	151	6.3.1 焊接接头	189
4.6 影响焊接结构疲劳强度的因素	152	6.3.2 焊接接头的设计和焊接结构细节的设计	195
4.6.1 应力集中的影响	152	第7章 梁、柱和桁架类焊接结构的设计与生产	205
4.6.2 近缝区金属性能变化的影响	155		



7.1 焊接梁、柱和桁架的结构特点、用途和种类	205	第9章 汽车和列车车身结构的 生产	285
7.1.1 焊接梁	205	9.1 汽车车身焊接结构的特点	285
7.1.2 焊接柱和桁架	209	9.1.1 概论	285
7.2 焊接梁、柱和桁架的 结构设计	212	9.1.2 车身的功用及其结构 特点	285
7.2.1 焊接梁的设计	212	9.1.3 汽车车身设计的特点	286
7.2.2 焊接柱及桁架的设计	232	9.1.4 汽车车身的结构特点	291
7.3 典型焊接梁、柱及桁架的 焊接生产	237	9.2 轿车车身焊接结构的设计与 制造	294
7.3.1 焊接梁的生产	237	9.2.1 轿车车身(白车身)焊接 结构的设计特点	294
7.3.2 焊接柱和桁架的生产	240	9.2.2 轿车白车身的制造特点	295
第8章 典型焊接容器的设计与 制造	242	9.3 铁路车辆焊接结构的特点	299
8.1 容器类焊接结构	242	9.3.1 铁路车辆的分类	299
8.1.1 储罐类焊接容器	242	9.3.2 一般铁路车辆的组成	300
8.1.2 工业锅炉及电站锅炉 锅筒	245	9.4 客车和动车组的焊接结构及 制造特点	303
8.1.3 化工反应类容器	247	9.5 铁路货车焊接结构的设计与 制造	305
8.1.4 冶金建筑和建材工业 设备	250	9.5.1 敞车车底架的结构特点与 焊接生产	305
8.1.5 特殊用途的焊接容器	250	9.5.2 敞车墙体的结构特点与 焊接生产	307
8.2 焊接容器的设计计算	252	第10章 复合结构及焊接机器件的 生产	310
8.2.1 薄壁容器的设计计算 理论	252	10.1 复合结构及焊接机器件的 结构	310
8.2.2 关于钢制压力容器的设计 规定	255	10.1.1 复合结构及其优越性	310
8.2.3 容器的开孔补强和容器焊接 接头的设计特点	260	10.1.2 复合结构及焊接机器件的 特点	311
8.2.4 厚壁圆筒的应力分析及 设计	268	10.1.3 某些复合结构焊接机器件的 设计	314
8.3 典型焊接容器的焊接生产	274	10.2 复合结构及焊接机器件的 焊接生产	324
8.3.1 立式圆筒(柱)形容器的 焊接生产	274	10.2.1 水轮机转轮的 焊接生产	324
8.3.2 卧式圆筒容器的 焊接生产	276	10.2.2 60000kN 自由锻造水压机下 横梁的焊接生产	326
8.3.3 核容器和加氢反应器等厚壁 圆筒的焊接生产	277		
8.3.4 球形储罐的焊接生产	282		



10.2.3 40000kN 冲压机床身的	生产.....	331
装配—焊接.....		330
10.2.4 4000~7000 马力 (2.94~	10.2.5 焊接汽轮机 (燃气轮机)	
5.15MW) 柴油机机体和	零件的制造.....	333
汽车传动桥的焊接.....	10.2.6 水轮机主轴的制造.....	334
	参考文献.....	335

1.1 焊接结构和焊接生产的发展

焊接结构随焊接技术的发展而产生,从 20 世纪 20 年代开始得到了越来越广泛的应用。第一艘全焊远洋船是 1921 年建造的,但开始大量制造焊接结构是 20 世纪 30 年代以后。伴随焊接结构的发展也发生了一些事故,如 20 世纪 30 年代末有名的比利时全焊钢桥的断裂和第二次世界大战期间紧急建造的 EC2 货轮的断裂等。随着冶金和钢铁工业的发展,焊接新工艺、新材料、新技术不断涌现,促进了焊接技术和理论的发展,更重要的是国民经济和军事工业发展的需要,大大推动了焊接结构及焊接生产的迅猛发展。

1.1.1 焊接结构的发展

1) 焊接结构向大型化、高参数、精确尺寸方向发展。如长 382m、宽 68m、高 252m 的 50 万 t 级巨型油轮;直径为 33m、容积为 20000m³ 的大型球罐;国产核电站 600MW 反应堆压力壳,高达 12.111m、内径 3.85m、外径 4.5m、壁厚从 195~475mm,国外还有 1480MW (我国 2010 年已有多台 100 万千瓦级反应堆压力容器交付使用) 反应堆压力壳,高 12.85m、直径 5~5.5m、壁厚从 200~600mm、重达 483t;1.2GW 电站锅炉工作压力为 32.4MPa,温度为 650℃;大型高炉,工作在热疲劳条件下,容积为 5080m³;阿波罗登月舱着陆发动机的延伸管,其进出口直径分别为 860mm 和 1499mm,材质为钛合金,内表面涂耐高温抗氧化层,在 1482℃ 高温下工作达 1000s 以上;560t 热壁加氢反应器,壁厚达 200~210mm、内径 2m、筒体部件长 20 多米;众所周知,总发电装机容量达 1820 万 kW 的三峡电站,其 26 台 70 万 kW 水轮发电机组已全部并网发电,单台水轮机的座环、转轮——叶片、主轴、蜗壳等都是巨型焊接结构,如蜗壳,其进口直径就达 12m,壁厚 70~80mm,而水轮机叶片不仅焊接量大,而且要求精度高。与结构向大型化、高参数、精确尺寸方向发展相对应,数控切割、数控卷板、少切屑、无切屑和一次成形、精密成型的应用使得一些重型机械的主要部件在设计时采用焊接件,已经突破了将其作为毛坯的传统概念,这些焊接件采用先进的切割和焊接方法,不经机械加工或很少加工,即可直接进行装配,并保证必要的安装装配精度和公差要求。如近净形焊熔(焊熔工件达到或接近净加工尺寸外形)技术——特别适用于对材料有特殊要求或对形状有一定要求的场合,可获得或接近获得最终形状的零部件,故特别适用于零部件原型的开发。

2) 焊接结构材料已从碳素结构钢转向采用低合金高强度结构钢、合金结构钢、特殊用途钢,工业发达国家采用了的而我国已经开发的微合金化控轧钢(如 TMCP 钢)、高强度细晶粒钢、精炼钢(如 CF 钢)、非微合金化的 C-Mn 钢、制造海洋平台基础导管架和高层、



超高层建筑钢结构用的 Z 向钢。高强度和超高强度钢也开始广泛用于制造焊接结构，如高强管线钢 X80、X100、X120 钢，汽车车身用超轻型结构用钢，为发展建筑钢结构，武钢集团专门研发了高耐火性、耐气候腐蚀、高双向性和优良焊接性皆具备的高层建筑用钢 WJ510C2；制造固体燃料火箭发动机壳的 4340 钢，抗拉强度可达 1765MPa 等。

与焊接结构的使用条件日益复杂和苛刻相对应，一些耐高温、耐腐蚀、耐深冷及脆性断裂的高合金钢及非钢铁合金也在焊接结构中获得了应用，如 3.5Ni、5.5Ni 及 9Ni 钢，不锈钢和耐热钢，铝及铝合金，钛及钛合金，还有用特殊合金制造输送液化天然气的货船和球罐等。

3) 焊接结构的设计应依据其工作条件和要求分别按照有关的规范进行，接受有关部门的监督，但结构设计共同的发展趋势是采用计算机辅助技术进行优化设计，从而使结构更加经济合理，并且减少了设计的工作量。

1.1.2 焊接生产的发展

与以上焊接结构的发展趋势相适应，必然有以先进的焊接工艺为基础的焊接生产的发展。近年来焊接生产的主要发展趋势如下：

1) 先进的优质、高产、低耗、廉价和清洁的焊接工艺不断发展并快速在焊接生产中获得应用。如在很多场合，CO₂ 气体保护焊代替了焊条电弧焊；用富氩的混合气体保护焊、氩弧焊（MIG 焊和 TIG 焊）焊接高强度钢、大厚度的压力容器；热壁加氢反应器采用窄间隙焊；需要单面焊的压力容器和管道中常用 TIG 焊、STT（表面张力过渡法）焊打底；药芯焊丝气体保护焊已用于诸如造船、重型机械、大型储罐等焊接结构的空间焊缝；管道的高速旋转电弧焊，全自动的气电保护焊和脉冲闪光焊；在汽车制造业、航天航空、核设备的焊接中使用了激光焊、氩弧焊。一些传统的焊接工艺又有了新发展，如搅拌摩擦焊、活性焊剂氩弧焊，埋弧焊有了多丝（串联和并联），还有热丝、填金属粉、窄间隙埋弧焊等。即使采用焊条电弧焊的场合，也采用了高效焊接工艺，例如在长输管道的焊接中采用向下立焊方法对接、在造船焊接中采用重力焊、广泛应用铁粉焊条等。

2) 包括上述先进焊接工艺在内的焊接机械化和自动化得到推广，焊接机器人得到应用。表 1-1 是 20 世纪 90 年代国外一些工业先进国家按焊接填充金属重量计算已达到机械化、自动化的水平，我国与之相比差距较大。但近年来有巨大进步，2004 年这一指标升至 35%。各行业不均匀，有资料介绍：造船业 2005 年，焊接效率为 80%，CO₂ 焊占 55%。

表 1-1 工业先进国家已达到机械化、自动化比例

国 别	苏联	美国	日本	德国	中国
机械化和自动化所占百分比	40%	55%	45%	64%	25%

高效、优质的机械化和自动化是靠相应的自动化设备和焊接材料支持的。像大型化的焊接成套设备，具有自动跟踪焊缝、检测、调整等功能，如长输管线的全位置气电自动焊的成套设备、脉冲闪光焊的成套设备，这不仅可以大幅度提高焊接质量和生产率，也为改善工人的劳动强度，进而向无人化生产铺平道路。又如大型储油罐壁焊缝自动焊机，特别是焊接机器人，目前在世界上所有的工业机器人中，50% 以上为焊接机器人，在一些劳动条件十分恶劣的场合，为摆脱对高级熟练焊工的依赖，进一步提高劳动生产率和质量，选择焊接机器人



是重要的途径。

3) 焊接生产中的备料工艺有了重大进步。这是使整个生产工艺现代化、自动化和短流程的一个重要环节。例如广泛采用数控热切割,目前主要采用数控氧乙炔气割下料,如海上平台的导管架,全部管节点的构成管头各种空间曲线,都采用了精密的数控切割。有的工厂6mm以上的钢材大都采用数控热切割方法下料,使划线、下料实现了自动化,保证了零件的形状、尺寸正确,边缘光滑,不再需用边缘刨削来改善零件精度,80%以上的板料零件只需这道下料工序和修磨即可进入装配。一些工厂根据产品特点还保留了部分剪床下料,但由剪切向热切割、向数控切割过渡的趋向已十分明显。与上述变化相对应,热切割工艺与设备得到了很大发展,新的热切割工艺,如等离子弧切割、激光切割等获得应用。

备料生产中的材料成形工艺也有了很大变化,如制造圆筒容器所用的大量卷板工艺,已经开始采用数控卷板代替繁重的手工卷板。各种封头的成形工艺也有了很大进步。

4) 加强了基本金属如钢材、铝合金等的表面处理和边缘处理,以保证热切割的连续、焊接及装配质量和成品涂饰质量。

综上所述焊接结构与焊接生产的发展趋势,不难看出无论在结构设计还是在焊接工艺、焊接设备、备料工艺与设备和焊接材料方面均有较大的发展。在图样设计方面采用了先进的技术标准、高性能的材料,在制造时采用了与技术标准和材料相适应的高质、高效、低成本的工艺,制造出了一流的产品,而焊接生产是整个生产制造过程中主要的一环,占有极重要的地位。现在我国已加入WTO,我国产品进入国际市场,面临着残酷激烈的竞争,我国机电产品,包括焊接结构能否在国际市场站住脚,争得一席之地,这与焊接生产的能力有很大关系,它往往是产品打入国际市场,在国内取代进口产品,能否成为与外商合作的伙伴,并参与国际竞争的首要条件之一。

1.2 焊接结构的特点、分类与相关标准

1.2.1 焊接结构的优点

焊接结构之所以能有巨大的发展,是与焊接结构的一系列优点分不开的。

1) 采用焊接结构可以减轻结构的重量,提高产品的质量,特别是大型毛坯的质量(相对铸造毛坯)。相对铆接结构其接头效能较高,节省金属材料,节约基建投资,可以取得较大的经济效益。如120000kN水压机改用焊接结构后,主机重量减轻20%~26%,上梁、活动横梁减轻20%~40%,下梁减轻50%;某大型颚式破碎机改用焊接结构后,节约生产费用30多万元,成本降低了20%~25%。

2) 焊接结构由于采用焊接连接,理论上其连接厚度是没有限制的(与铆接相比),这就为制造大厚度巨型结构创造了条件。采用焊接能使结构有很好的气密性和水密性,这是储罐、压力容器、船壳等结构必备的性能。焊接的热壁式加氢反应器和核容器就是极好的实例。

3) 焊接结构多用轧材制造,它的过载能力、承受冲击载荷能力较强(与铸造结构相比)。对于复杂的连接,用焊接接头来实现要比用铆接简单得多,训练有素的焊接结构设计人员可以灵活地进行结构设计,并有多种满足使用要求的设计可供选择,简单的对接焊和角



焊就能构成各种焊接结构。

4) 焊接结构可根据结构各部位在工作时的环境,所承受的载荷大小和特征,采用不同的材料制造,并采用异种钢焊接或堆焊制成。从而既满足了结构的使用性能,又降低了制造成本。如热壁式加氢反应器,内壁要有抗氢腐蚀能力,如全用抗氢钢卷制,贵而不划算。尿素合成塔则要耐包括尿素在内多种化工产品的腐蚀,故这类厚壁筒内壁采用堆焊(或内衬)不锈钢(或镍基合金)来制造。

5) 节省制造工时,同时也就节约了设备及工作场地的占用时间,这也可以获得节约资金的效果。例如在现代化造船厂里,一个自重 200000t 的油轮,可在不到 3 个月的时间里下水,同样的油轮如用铆接制造,需要一年多的时间才能下水。与焊接结构的经济性相关,它还具有结构制造成品率高的特点,即焊接结构制造过程中一旦出现焊接缺陷,修复比较容易,很少产生废品。

1.2.2 焊接结构存在的问题

焊接结构也存在一些问题,这些问题正是本书要进行讨论的主要内容之一。

1) 焊接结构中必然存在焊接残余应力和变形。绝大多数焊接结构都是采用局部加热的焊接方法制造,这样不可避免地将产生较大的焊接应力和变形。焊接应力和变形不仅将影响结构的外形和尺寸;在一定条件下,还将影响结构的承载能力,如强度、刚度和稳定性;给焊后加工也带来一些问题,如尺寸的稳定性和加工精度;同时还是导致焊接缺陷的重要原因之一。

2) 焊接过程会局部改变材料的性能,使结构中的性能可能不均匀。尤其是某些高强度、超高强度钢,如微合金控轧钢有优良的性能,但它要求焊接过程实现焊缝金属净化化和通过微合金化使之实现细晶粒化。一些金属材料焊接比较困难,这就导致了焊接缺陷,虽然焊接缺陷大多数能够修复,但是一旦漏检或修复不当则可能带来严重的问题,例如,形成应力集中,加之性能不均匀将更严重地影响结构的断裂行为,降低结构的承载能力。

3) 焊接结构是一个整体,这一方面是气密、水密的前提,另一方面刚度大,在焊接结构中易产生裂纹,使之很难像铆接或螺栓连接那样在零件的过渡处被制止,由于这个原因和上述原因(焊接应力和变形、缺陷、大应力集中、性能不均匀等)导致焊接结构对脆性断裂和疲劳、应力腐蚀等环境因素导致的破坏特别敏感。

4) 由于科学技术的进步,无损检测手段获得了重大发展,但到目前为止,经济而十分可靠的检测手段仍感缺乏。

1.2.3 焊接生产的特点

焊接生产过程是指采用焊接的工艺方法把毛坯、零件和部件连接起来制成焊接结构的生产过程。如上所述,各种各样的焊接结构都是焊接生产的产品,有许多就是最终的制成品,如大型球罐、全焊钢桥、热风炉、加氢反应器、蒸煮球、尿素合成塔等;更多则是最终制成品的主要部件或零件,如全焊船体、电站锅炉的锅筒、起重机的金属结构、压力容器的承压壳、油罐车的油罐和底架、内燃机车柴油机的焊接机体及水轮机的主轴、转轮和座环等。

在工厂中负担焊接生产的车间,如金属结构车间、装焊车间、总装车间等是工厂的主要车间之一,在一些情况下,它是初级产品、半成品的准备车间(如汽车制造厂的车体车间



或车身车间), 是工厂最终产品的总装车间、涂饰车间或成品库的供应者, 同时它也是工厂的备料车间(切割下料与冲压成形、零件机加工等)、机加工车间、某些中间仓库的“消费者”。它还必须由动力车间(包括变电站、空压站、锅炉房、氧乙炔站等)提供能源。总之, 焊接生产和工业生产的其他部门有着紧密的联系, 随着焊接结构和焊接生产的发展, 焊接生产在工业生产中占有越来越重要的地位。

此外, 焊接生产在工程建设和工程施工中也是最重要的环节之一, 例如在石油化工企业的建设中, 焊接工作量约占 $1/3$; 已于 2005 年交付投产的西气东输管线一线干线长 4200km 的管线, 采用 X70 钢管, 直径 1016mm, 压力 10MPa, 壁厚 14.6 ~ 26.2mm, 仅接头就有约 40 万个, 共用钢材 174 万 t, 焊条 5100t。还未计入各种附属设施、闸阀门、加温装置等的焊接接头。可见焊接生产的水平是加快基本建设速度, 提高工程质量, 保证建成的工程和企业很快投产、达产的重要保证。

1.2.4 焊接结构的分类

广泛采用的焊接结构难于用单一的方法将其分类。有时按制造焊接结构板件的厚度分为薄板、中厚板、厚板结构; 有时又按最终产品分为飞机结构、油罐车、船体结构、客车车体等等; 按采用的材料, 可分为钢焊结构, 铝、钛合金结构等等。按结构工作的特征, 并与其设计和制造紧密相连, 结构的分类及其各自的特点可简述如下:

1) 梁、柱和桁架结构。分别工作在横向弯曲载荷下和纵向弯曲或压力下的结构可称为梁和柱。由多种杆件被节点连成承担梁或柱的载荷, 而各杆件都是主要工作在拉伸或压缩载荷下的结构称为桁架。作为梁的桁架结构杆件分为上下弦杆、腹杆(又分竖杆和斜杆), 载荷作用在节点上, 从而使各杆件形成只受拉(或压)的二力杆。实际上, 许多高耸结构, 如输变电钢塔、电视塔等也是桁架结构。

梁、柱和桁架结构是组成各类建筑钢结构的基础, 如高层建筑的钢结构、冶金厂房的钢结构(屋架、吊车梁、柱等)、冶炼平台的框架结构等。它还是各类起重机金属结构的基础, 如起重机的主梁、横梁, 门式起重机的支腿、栈桥结构等等。用作建筑钢结构的梁、柱和桁架常常在静载下工作, 如屋顶桁架。而作为起重机的金属结构, 包括桥梁桁架和起重机桁架则在交变载荷下工作, 有时还是在露天条件下工作, 受气候环境与温度的影响, 这类结构的脆性断裂和疲劳问题应引起很大关注。

2) 壳体结构。它是充分发挥焊接结构水、气密特点, 运用最广、用钢量最大的结构。它包括各种焊接容器、立式和卧式储罐(圆筒形)、球形容器(包括水珠状容器)、各种工业锅炉、废热锅炉、电站锅炉的锅筒、各种压力容器, 以及冶金设备(高炉炉壳、热风炉、除尘器、洗涤塔等)、水泥窑炉壳、水轮发电机的蜗壳等。

壳体结构大多用钢板成形加工后拼焊而成, 要求焊缝致密。一些承受内压或外压的结构一旦焊缝失效, 将造成重大损失。

3) 运输装备的结构。它们大多承受动载, 有很高的强度、刚度、安全性要求, 并希望重量最小, 如汽车结构(轿车车体、载货车的驾驶室等)、铁路敞车、客车车体和船体结构等。而汽车结构全部、客车体大部分又是冷冲压后经电阻焊或熔焊组成的结构。

以上所述结构因失效会造成严重损失, 这类结构的设计和制造、监察应按国家法规进行。



4) 复合结构及焊接机器零件。这些结构或零件是机器的一部分,要满足工作机器的各项要求,如工作载荷常是冲击或交变载荷,还常要求耐磨、耐蚀、耐高温等。为满足这些要求,或满足零件不同部位的不同要求,这类结构往往采用多种材料与工艺制成的毛坯再焊接而成,有的就构成所谓的复合结构,常见的有铸-压-焊结构、铸-焊结构和锻-焊结构等。

复合结构的焊接可以在加工毛坯后完成,如挖掘机的焊接铲斗;而大多数是粗加工或未经机加工的毛坯焊接成结构后再精加工完成,如巨型焊接齿轮、鼓筒、汽轮发电机的转子和水轮机的焊接主轴、转轮和座环,60000kN 水压机的立柱、各梁、工作缸等。

1.2.5 焊接结构设计和制造的相关标准

焊接结构设计和制造不仅要依据焊接标准,而且由于焊接结构的广泛应用,焊接结构已成为各相关行业的产品、部件或毛坯,故这类标准除最基础标准外,还大量存在相关行业的标准。故相关行业的一些标准也是焊接结构设计和制造所必须遵循的。这里我们列举最重要和最常用的一些标准,以便在具体工作中参照执行,先列举与焊接结构设计有关的标准,然后是有关结构制造(施工)及验收(质量监控)的规范。有一些在下面的有关章节将会作进一步介绍。

1. 焊接基础标准

焊缝符号表示法(GB/T 324—2008); 焊接术语(GB/T 3375—1994);

气焊、焊条电弧焊、气体保护焊和高能束焊的推荐坡口(GB/T 985.1—2008);

埋弧焊的推荐坡口(GB/T 985.2—2008);

焊接及相关工艺方法代号(GB/T 5185—2005);

钢、镍及镍合金的焊接工艺评定试验(GB/T 19869.1—2005);

金属材料熔焊质量要求(GB/T 12467.1~4—2009);

钢熔化焊焊工技能评定(GB/T 15169—2003)。

2. 锅炉、压力容器、核电用容器常用标准及规程

压力容器安全技术监察规程; 蒸汽锅炉安全技术监察规程;

热水锅炉安全技术监察规程; 压力容器(GB/T 150.1~150.4—2011);

钢制球形储罐(GB/T 12337—2014);

钢制塔式容器(JB 4710—2000);

液化石油气钢瓶(GB 5842—2006); 水管锅炉(GB/T 16507—2013);

锅炉角焊缝强度计算方法(JB/T 6734—1993);

工业锅炉焊接管孔(JB/T 1625—2002);

2×600MW 压水堆核电厂核岛系统设计建造规范(GB/T 15761—1995);

锅炉压力容器焊工考试规则(劳动部);

压水堆核电厂核岛机械设备焊接规范(EJ/T 1027.1~1027.19 包括焊接材料验收、工艺评定、焊工的资格评定等19项)。

3. 造船和建筑工程行业常用标准及规程

钢质海船入级与建造规范; 船舶焊缝代号(CB/T 860—1995);

921A 等钢焊接坡口基本形式及焊缝外形尺寸(CB 1220—2005);