



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

GUOCHENG SHEBEI HANJIE JIEGOU

过程设备焊接结构

■ 唐委校 编著



化学工业出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

过程设备焊接结构

唐委校 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书以过程设备及其焊接结构的基础理论和工程应用方法为主要内容,全书共分8章。第1、2章介绍过程设备焊接结构的特点,焊接接头、焊接温度场以及焊接规范的基本概念和描述方法;第3~5章分别介绍焊接变形与应力产生的机理、控制方法和焊接接头的静载强度计算方法;第6~8章介绍过程设备焊接结构的失效方式、控制方法以及常用材料及典型焊接结构的实例和设计方法。

本书可作为机械类及过程装备与控制工程专业高年级本科生的教材,也可供有关科学研究人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

过程设备焊接结构/唐委校编著. —北京:化学工业出版社, 2010.6

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-122-08211-4

I. 过… II. 唐… III. 化工过程-化工设备-焊接结构-高等学校-教材 IV. TQ051

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第063985号

责任编辑:程树珍

装帧设计:杨 北

责任校对:吴 静

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:三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张14 $\frac{3}{4}$ 字数369千字 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:34.00元

版权所有 违者必究

前 言

随着过程工业的快速发展,过程设备的应用越来越广泛。过程设备中的承压设备数量多,且基本都是焊接结构。由于在复杂苛刻的操作环境(高温或低温、高压或真空、腐蚀、毒性、易燃易爆)条件下工作,过程设备具有一定的危险性和危害性。工程实际中属于特种设备的压力容器经常出现断裂和爆炸事故,而且很多事故的主要原因出在焊接接头上。因此,过程设备焊接结构的合理设计、焊接质量的控制,是过程设备乃至整个过程工业安全运行的重要保证。

本书在编写中遵循密切结合过程工业实际、过程设备及其焊接结构的最新发展趋势,展现学科发展前沿的原则,力求能全面反映和应用过程设备焊接结构的基本理论和工程应用方法、新标准规范和最新科研成果。

全书共分为8章。第1章绪论,介绍了过程设备焊接结构的应用特点和基本要求,以及焊接技术的发展现状与趋势;第2章焊接接头、焊接温度场与焊接规范,介绍了焊接接头的形式与特点,焊接温度场和焊接规范对焊缝成型的影响,以及焊接接头的标注方法;第3章焊接变形与应力,主要介绍焊接变形和应力的分类及其在不同拘束条件下随着时间的变化规律;第4章焊接残余变形和应力及其控制方法,分析了不同接头形式的残余变形和应力的影响因素及分布规律,介绍了预防和消除焊接残余变形与应力的方法;第5章焊接接头的静载强度计算,介绍了应力集中对焊接结构强度的影响和焊接接头强度计算的方法;第6章焊接结构的断裂失效与防治,简要分析了焊接接头的脆性断裂、疲劳断裂以及应力腐蚀断裂的失效机理,并给出了相应的防治方法;第7章过程设备常用金属材料的焊接,介绍了过程设备常用材料的焊接性以及相应的焊接工艺要点,本章贴近工程实际,应用性强;第8章过程设备典型焊接结构设计,介绍了压力容器焊接接头的分类方法和常用典型焊接结构设计方法与实例,是对前面章节所述焊接结构设计理论与方法的综合应用。

本书可作为各类高等院校机械类相关专业及过程装备与控制工程专业高年级本科生专业教材,也可供有关科研和工程技术人员参考。本书用于教学时,建议应尽量突出重点,以第2、3、4、5、6和8章为重点教学内容,其余可酌情选择作为一般性了解,或作为辅助内容。

本书由山东大学唐委校教授编著。本书编写过程中宋清华博士、吕宏卿、孙珊珊、鞠华伟、周洪亮、常峰和郭冰等做了大量工作,太原理工大学段滋华教授、昆明理工大学宋鹏云教授和天津特种设备监督检查技术研究院王泽军高工等提出了许多宝贵的建议,在此深表谢意。

由于编者水平所限,书中疏漏和不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

编者
2010年3月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 过程设备的应用特点及基本要求	1
1.2 焊接结构的应用	2
1.3 焊接结构的性能与特点	3
1.3.1 焊接结构的性能	3
1.3.2 焊接结构的优点	4
1.3.3 焊接结构的缺点	5
1.4 焊接技术及其发展	5
1.4.1 常用的焊接方法	6
1.4.2 焊接技术的发展历程	6
1.4.3 现代焊接技术的任务与展望	8
第 2 章 焊接接头、焊接温度场与焊接规范	11
2.1 焊接接头和焊接过程及其特点	11
2.1.1 焊接接头	11
2.1.2 焊接过程及其特点	15
2.1.3 焊接冶金过程及其特点	16
2.1.4 焊接热循环及其对接头组织的影响	17
2.2 焊接温度场	19
2.2.1 电弧焊电弧对金属的加热	19
2.2.2 焊接温度场及其分类	20
2.2.3 焊接温度场的影响因素	21
2.3 焊接规范的选择	22
2.3.1 手工电弧焊焊接规范	22
2.3.2 埋弧自动焊焊接规范	28
2.3.3 气体保护焊焊接规范	34
2.3.4 电渣焊焊接规范	39
2.4 焊接规范对焊缝形状的影响	41
2.4.1 焊缝形状特征	41
2.4.2 焊接规范对焊缝形状的影响	42
2.5 焊接接头形式及焊缝代号	44
2.5.1 焊接接头形式及特点	44
2.5.2 焊缝代号及标注方法	45

思考题	52
第3章 焊接变形与应力	53
3.1 焊接应力与变形的基本概念	53
3.1.1 焊接应力及其分类	53
3.1.2 焊接变形及其分类	55
3.2 杆件在均匀加热和冷却过程中的变形和应力	57
3.2.1 简化假定	58
3.2.2 不同拘束条件下杆件均匀加热和冷却时的变形和应力	59
3.3 长板条在不均匀温度场的变形和应力	63
3.3.1 补充假定	63
3.3.2 长板条对称加热的变形和应力	64
3.3.3 长板条非对称加热的变形和应力	67
思考题	69
第4章 焊接残余变形和应力及其控制方法	70
4.1 常见焊接残余变形	70
4.1.1 纵向收缩变形及其产生的弯曲变形	71
4.1.2 横向收缩变形及其产生的挠曲变形	75
4.1.3 角变形	79
4.1.4 波浪变形	82
4.1.5 错边变形	83
4.2 预防和矫正焊接残余变形的的方法	83
4.2.1 预防焊接残余变形的的方法	84
4.2.2 矫正焊接残余变形的的方法	89
4.3 焊接残余应力	90
4.3.1 焊接残余应力的分布	90
4.3.2 焊接残余应力的影响	96
4.4 焊接残余应力的调节及消除方法	99
4.4.1 调节残余应力的方法	99
4.4.2 消除残余应力的措施	101
4.5 焊接残余应力的测定	103
4.5.1 应力释放法	103
4.5.2 x射线衍射法	105
思考题	106
第5章 焊接接头的静载强度计算	107
5.1 焊接接头的应力集中和接头形式选择	107
5.1.1 应力集中的概念	107

5.1.2	焊接接头中存在应力集中的影响因素	107
5.1.3	焊接接头形式的选择	108
5.2	电弧焊焊接接头的应力分布	110
5.2.1	对接接头的应力分布	110
5.2.2	T(十字)形接头的应力分布	111
5.2.3	搭接接头的应力分布	111
5.2.4	点焊接头的应力分布	113
5.3	焊缝的静载强度计算	114
5.3.1	焊缝接头强度计算的假设	114
5.3.2	电弧焊焊接接头的静载强度计算	115
5.4	母材及焊缝的许用应力	124
	思考题	125
第6章	焊接结构的断裂失效与防治	126
6.1	焊接结构断裂失效的分类及危害	126
6.1.1	焊接结构断裂失效的分类及危害	126
6.1.2	压力容器断裂破坏典型案例分析	128
6.2	焊接结构脆性断裂及其防治方法	129
6.2.1	焊接结构脆性断裂的原因	129
6.2.2	焊接结构脆性断裂的防治方法	130
6.3	焊接结构疲劳断裂及其防治方法	132
6.3.1	焊接结构疲劳断裂的原因和影响因素	132
6.3.2	提高焊接结构疲劳强度的方法	133
6.4	焊接结构应力腐蚀断裂及其防治方法	135
6.4.1	应力腐蚀裂纹产生的机理和影响因素	135
6.4.2	防止和控制焊接结构产生应力腐蚀的措施	138
	思考题	139
第7章	过程设备常用金属材料的焊接	140
7.1	常用金属材料的焊接性及其评定方法	140
7.1.1	影响金属材料焊接性的主要因素	140
7.1.2	工艺焊接性的评定方法	141
7.2	普通低合金钢的焊接	143
7.2.1	普低钢的分类与焊接性	144
7.2.2	普低钢的焊接	145
7.2.3	耐腐蚀低合金钢的焊接	147
7.3	低、中碳钢的焊接	149
7.3.1	低碳钢的焊接	149
7.3.2	中碳钢的焊接	150

7.4 不锈钢的焊接	151
7.4.1 不锈钢的分类与性能	151
7.4.2 奥氏体不锈钢的焊接	152
7.4.3 铁素体不锈钢的焊接	156
7.4.4 马氏体不锈钢的焊接	158
7.4.5 奥氏体-铁素体双相钢的焊接	159
7.5 有色金属的焊接	160
7.5.1 铝及其合金的焊接	160
7.5.2 钛及其合金的焊接	162
7.5.3 镍及其耐蚀合金的焊接	164
7.6 低温用钢的焊接	166
7.7 低合金珠光体耐热钢的焊接	168
7.8 异种钢的焊接	169
7.8.1 奥氏体钢与珠光体钢的焊接	169
7.8.2 奥氏体钢与铁素体钢和马氏体钢的焊接	171
7.8.3 不同强度级别珠光体钢的焊接	171
7.8.4 复合钢板的焊接	172
思考题	173

第8章 过程设备典型焊接结构设计 174

8.1 过程设备焊接结构设计要求	174
8.1.1 总的设计要求	174
8.1.2 焊接接头的设计	175
8.1.3 焊接结构设计的步骤与内容	176
8.2 压力容器焊缝形式及分类	177
8.2.1 压力容器焊接接头形式	177
8.2.2 压力容器焊缝分类	177
8.2.3 不同类别接头的探伤及要求	180
8.3 过程设备常用焊接结构	182
8.3.1 容器主体的焊接接头	183
8.3.2 接管与壳体的焊接接头	186
8.3.3 凸缘与管嘴的焊接接头	192
8.3.4 接管与法兰的焊接接头	194
8.3.5 管板与筒体及管子的焊接接头	194
8.3.6 筒体与夹套连接的焊接结构	197
8.3.7 容器支座与主体的连接	198
8.3.8 多层容器的焊接结构	202
8.3.9 大型储罐的焊接结构	207
8.4 压力容器典型焊接技术实例	212

8.4.1 薄壁容器的焊接	212
8.4.2 厚壁容器的焊接	214
思考题	216
附录 1 过程设备焊接结构常用网址	217
附录 2 过程设备焊接结构名词中英文对照	218
参考文献	224

第1章 绪论

过程设备的应用十分广泛,不仅是化工、炼油、制药、环保、核能、动力、冶金、轻工、建材、采矿、海洋、生物工程等传统行业的必需设备,在一些高新技术领域,如航空航天、能源、先进防御技术等的应用也越来越多。过程工业的设备种类繁多,分类也有许多不同的方法。从生产工艺的整体和系统性考虑,一般称为装置,如乙烯装置、合成氨装置等;从不同的单元操作考虑,有传热、反应、混合、分离、储存设备等;按照有无运动构件可划分为动设备与静设备,动设备是指有产生运动或相对运动的构件的设备,也称机器或机械;静设备是指构件不产生运动或相对运动的设备。

由于过程设备处理的对象主要是流体(含粉体)介质,要求密封性且承受介质压力、温度等载荷作用,因此,几乎所有的过程设备都是采用焊接方法制造的焊接结构。

本书主要介绍过程设备如塔设备、换热设备、反应设备和储存设备等焊接结构的一般设计方法。过程设备焊接结构是一门涉及多学科、综合性很强的课程。

1.1 过程设备的应用特点及基本要求

过程设备与一般的机械设备不同,涉及的生产工艺复杂并与加工的流程性材料的性能密切相关,涉及多项工程技术,如反应工程、传热、混合和分离工程等,因此,它具有很强的多学科交叉性、综合性和集成性,涉及化学工程、机械工程、控制工程、力学、材料科学、工程热力学、流体力学及燃烧学等多学科。过程设备中流程性材料性能的改变涉及传热、传质和反应等过程,随着整个过程工业向成套化、大型化、高效化、自动化和智能化发展,过程设备的内件结构也日趋复杂,对焊接结构的要求也越来越高。

过程设备的突出特点是在高温(或低温)、高压(或真空)、腐蚀及有毒介质等复杂、苛刻操作条件下工作,一旦失效发生爆炸,危害极大。大量事实证明,过程设备尤其是压力容器出现的断裂和爆炸事故,大多数源于其焊接接头。因此,过程设备焊接结构的合理设计、焊接质量的控制,是过程设备乃至整个过程工业安全可靠运行的重要保证。

随着科技与经济的发展,过程工业一方面要推出新工艺、新材料、新技术和新的焊接结构形式来满足生产发展的需要,另一方面焊接结构自身也要针对其高压、高温、低温、深冷、腐蚀、易燃、易爆、有毒等特点,向着大型化、高参数、长运行周期和长寿命的方向发展,这对过程装备和焊接技术提出了更高的要求。

I. 为满足高压、高温、低温、深冷和腐蚀等苛刻环境下长周期运行以及装备大型化、高参数化的要求,过程设备的制造要采用具有特殊性能的材料,如高强钢、耐热钢、抗氢钢和低温钢等,这给焊接增加了难度,同时也促使一些新的焊接材料、焊接工艺方法应运而生并快速发展,如等离子焊、厚板窄间隙气体保护电弧焊等。

II. 过程设备中压力容器占的比例很大,压力容器属于特种设备^[1,2,3],是过程工业生产中的关键设备,工作条件与环境苛刻,并要求长周期、长寿命运行,一旦出现故障或事故,不仅使整个系统停产造成严重的经济损失,还常常给人民的生命财产带来不堪设想的后果。因而确保结构运行的安全可靠性是至关重要的。由于焊接结构自身固有的缺陷,如结构

性能不均匀性、焊接变形与应力、应力集中以及焊接缺陷等都可能是导致故障和事故发生的根源。这就要求在设计、制造、生产运行、维修、退役、回收及再利用的整个生命周期中,对焊接结构的质量进行全面、有效地严格控制,迫切需要焊接机械化、自动化、智能化、计算机和机器人的工程应用,也正是在确保焊接质量的要求下形成了新的焊接技术的发展趋势。

Ⅲ. 压力容器及其焊接结构的设计、制造技术、检测方法等要确保其在全寿命周期内安全可靠地运行,尤其对于有易燃、易爆、剧毒介质的设备,需要考虑在火灾、爆炸、冲击等情况下的失效规律、风险分析和安全评价方法以及灾害控制技术,采用先进可靠的焊接技术,在焊接结构设计、制造的源头上有效防止灾难性事故的发生,降低风险。

1.2 焊接结构的应用

焊接作为实现可靠和高效连接的关键技术,广泛应用在航空、航天、过程工业、能源、交通、建筑等工程装备和结构中。现代工业中,随着焊接技术的不断发展,焊接结构在各行业中的应用越来越广泛,不少过去一直用整铸整锻方法生产的大型毛坯也改成了焊接结构,大大简化了生产工艺,大幅度提高了查收效率,降低了成本。全世界焊接结构占钢产量的比重越来越高。据不完全统计,目前世界总钢产量的近 50% 用于焊接结构。

在航空航天领域,焊接是运载火箭、导弹、卫星、航天飞机以及空间站等航天结构的主要制造工艺,如长征三号运载火箭推进剂储箱的焊缝总长度近 600m,螺旋管式喷管焊缝总长 820m。马丁公司和马歇尔飞行中心采用变极性等离子弧焊焊接铝锂合金外储箱,焊接厚度 3~26mm、焊接长度达 900mm,比采用气体保护钨极电弧焊大幅度提高了焊接质量,降低了成本。近年来,搅拌摩擦焊在航空航天业得到关注和应用,英国焊接研究所(TMI)应用搅拌摩擦焊为波音公司制造铝合金航天飞机燃料储箱。国际著名的航空航天公司和焊接研究机构,如洛克希德-马丁公司、波音-麦道公司、罗克韦尔集团和爱迪生焊接研究所都加速搅拌摩擦焊的研究、应用评估和开发计划。

现代大飞机正在不断扩大焊接结构的应用范围。新型战斗机的承力框、带筋壁板等采用焊接结构可降低材料及加工制造成本。新材料应用如钛合金等构件的氩弧焊、电子束与激光焊合等离子弧焊等先进工艺的应用可以减轻构件重量、提高结构的整体性等优势。大力发展摩擦焊、扩散焊和电子束焊焊接技术应用于高性能发动机的制造。研究开发线性摩擦焊制造整体叶盘、采用超塑成型-扩散焊制造风扇叶片等。

现代造船技术中,焊接是关键工艺技术之一。船体结构由板材和型材等焊接而成,焊接工时在整个船体建造周期中约占 30%~40%。对船舶质量、制造周期、经济成本等都起不可或缺的关键作用。

核电设备中,核反应堆压力容器是要求最高的关键设备,一般由高强度低合金钢锻件焊接而成。由于在高温高压下长周期运行,并承受中子和 γ 射线辐照,锻件厚度通常在 200mm 以上,核反应堆压力容器内表面堆焊超低碳不锈钢,压力壳顶盖组合件和筒体环焊缝均采用埋弧自动焊。为防止大厚度壳壁多层焊时产生过大的残余应力,需进行多次消除应力热处理,因此,要求核反应堆压力容器用高强度低合金钢必须具有良好的焊接性,避免裂纹产生,保证焊缝和热影响区有良好的塑性和低温冲击韧度。对于辐照区的焊缝,则要求有充分的塑性和韧性储备,以确保长期安全、可靠地运行。

石油天然气工业的快速发展,使长距离、大口径和高压力管道已成为石油天然气输送的

主要手段, X56~X100 系列高强管线用钢正研发并逐渐应用于长输管线建设中。如我国 2004 年完成的新疆轮南至上海的西气东输管线, 总长约 4000km, 直径为 1016mm, 采用 X70 钢, 管子的对接焊缝 35 万条, 对接焊缝总长约 1100km。焊接质量是保证长输管线安全运行的关键之一。如此多且长的焊缝, 焊接过程中不可避免地存在各种焊接缺陷、焊接残余应力、焊接区材料性能劣化及焊接接头部位的应力集中等, 加之运行条件等的变化, 因此防止焊接接头的断裂破坏、保证长输管线的安全可靠运行具有十分重要的意义。

开采海洋油气资源的海上平台是大型焊接结构, 由于工作环境恶劣, 对其有很高的安全性要求。焊缝质量和性能是此类工程结构的关键。海上平台焊接结构完整性评估技术及安全标准, 以及降低维修要求和提高焊接结构的成本效益都是发展利用海洋油气资源的迫切需求。

过程工业涉及化工、炼油、制药、能源、环保、核能、动力、冶金、轻工、建材、采矿、生物技术等多个工业行业, 过程工业的快速发展, 加速了过程装备大型化、高参数化的进程, 大型反应器如氨合成塔、尿素塔、催化裂化炼油装置、加氢反应器和乙烯装置等的焊接技术水平不断提高。目前, 过程工业中的承压设备几乎全部采用焊接作为连接工艺建造, 属于复杂、可靠性和安全性要求高的焊接结构。因此, 过程设备焊接结构的质量保证对于国民经济的支柱产业的安全、可靠、高效运行具有重要意义。

1.3 焊接结构的性能与特点

1.3.1 焊接结构的性能

焊接结构是为满足特定的使用要求和功能而设计的, 也是设计过程中材料选择与焊接工艺制定的依据。焊接结构的基本性能要求如下。

(1) 结构可用性和效能

关于焊接结构的可用性(适用性或合于使用性), 国际焊接学会推出的焊接结构的合于使用评定指南定义为: 合于使用是指结构在规定的寿命周期内具有足够的可以承受预见的载荷和环境条件(包括统计变异性)的功能。结构效能是指在规定条件下结构达到规定的使用目标的能力, 也即结构具有规定的功能并有效地完成任务的能力。结构效能是指结构系统分配给各个构件部分所应具有的能力, 如过程设备的焊接结构要具有密封性、承受各种外载荷以及耐介质腐蚀能力等。

结构效能是结构的作用与其固有性能的综合体现。在结构设计、选材和加工工艺制定时要进行效能分析, 以优化设计和制造过程。

(2) 综合经济性

综合经济性是对设备在预期的寿命周期内, 结构的研制、生产、运行、维护、废弃、回收及再制造所需的总费用的经济评价。指在整个寿命周期内以最少的劳动消耗和费用, 取得最大经济成果的能力。

对于焊接结构, 其结构效能不仅取决于其承担的作用和性能, 更有赖于其可靠性、安全性和维修性等多种因素。而这些因素又同时决定了结构的寿命周期费用, 其中材料的选用和焊接工艺对结构寿命周期费用的影响不可忽略。

(3) 结构可靠性、安全性与维修性

可靠性与安全性是工程结构的两大主要特性。两者含义及目的是有差异的。结构的可靠

性一般是指结构在规定的条件下和时间内完成规定功能的能力，安全性是指结构在各种环境作用条件下，不发生事故的能力。可靠性研究的对象主要是故障，其目的是减少故障的发生。安全性研究的对象是危险，其目的是减少事故的发生。可靠性要求结构在长期反复使用过程中不出或少出故障，可用的时间越长越好。可靠性是工程结构安全性的基础。对于焊接件的可靠性，最重要的是全面准确地了解焊接结构性能的可靠性数据及其影响因素，并分析其分布规律，按照结构的可靠性要求对材料和焊接结构的质量与寿命进行评估，从而保证其安全性。

结构的维修性是结构在规定的条件下和时间内，按规定的程序和方法进行维修时保持或恢复到规定状态的能力，是指结构维修的难易程度，提高维修性的目的是缩短结构在寿命周期中的非可用时间。

(4) 结构完整性与风险

焊接结构的完整性是保证焊接结构在承受外载和环境作用下的整体性要求。焊接结构整体性要求包括接头的强度、刚度及稳定性、抗断裂性及耐久性等。与其他形式的结构一样，焊接结构在制造和使用过程中也有一定的风险。风险包括两部分：一方面是出现危险事件的概率；另一方面是一旦危险出现其后果的严重程度及造成损失的大小。危险是客观存在的，无法改变，但风险在一定程度上与人们的认识和防范能力有关，即人们有可能改变危险出现或事故发生的概率，以及一旦出现危险通过增强防范措施从而改变损失的程度^[4]。

焊接结构的风险性与结构的完整性密切关联，而保证结构的完整性是降低技术风险的关键。焊接材料和焊接质量是结构完整性的基础，因此，从防范风险的角度来看，必须重视材料和焊接技术以提高焊接结构的完整性。

1.3.2 焊接结构的优点

焊接技术之所以能在工业中，尤其在过程装备制造中得到如此广泛的应用和迅速的发展，主要是因为它具有以下优点。

i. 结构可靠。焊接接头的承载能力强，一般优质焊接接头可以与母材等强度，而铆接接头很难与母材等强度。将焊接接头的断裂强度与母材断裂强度之比称为接头连接系数，即接头连接系数 = $\frac{\text{接头断裂强度}}{\text{母材断裂强度}} \times 100\%$ ，优质的焊接接头的连接系数可达 100%，而铆接达到 70% 已经很困难。

ii. 密封性能好。焊接结构对各种流体介质都具有很好的密封性，适应于各类压力容器、船舶和储罐等结构，是过程设备制造不可缺少的连接技术。

iii. 连接厚度大。当板厚大于 50mm 时，铆接就十分困难，而焊接结构的厚度可达 100mm，甚至更多，理论上讲焊接结构的厚度不受限制，重型和超重型结构的大厚度件的连接，只能采用焊接。

iv. 可焊接不同材料。焊接结构可按不同要求在不同的部位实现不同材料的连接，满足过程工业生产中耐腐蚀、耐高温、高强度等不同操作条件的要求。

v. 与铆接和铸件相比，结构简化，设计灵活、简单。焊接结构可通过对接、角接、搭接等多种方式实现任意结构的要求，避免了铸、铆、锻等工艺对工件形状等的诸多要求限制，灵活方便，可实现性强。同样的承载条件，焊接结构更轻更薄，可节省大量的材料、模具等。

vi. 制造工艺简便, 生产周期短, 成本低, 适合大型化和重型设备的制造, 更易实现专业化批量生产, 经济效益好。

1.3.3 焊接结构的缺点

任何事物都有两面性, 焊接结构也有其不容忽视的缺点, 主要有如下几点。

(1) 结构止裂性能差

与铆接、螺纹连接等机械连接形成的结构相比, 焊接结构所特有的整体性和高刚度使其自身的止裂性能差。焊接结构一旦有裂纹形成并扩展, 就很难被止住, 而铆接结构中, 如果有裂纹产生并扩展时, 裂纹扩展到铆钉孔处便终止, 铆接接头起到限制裂纹扩展的作用。因而在一些重要的结构中, 常用机械连接接头作为止裂件。

(2) 焊接应力与变形

形成焊接接头的过程中, 由于局部高温加热会引起较复杂的瞬态热应力和热变形, 最后导致焊接结构中存在焊接残余应力和变形。若加热时产生较大的拉伸应力会导致焊接裂纹或开裂。有时存在于焊缝、近缝区的残余拉应力值竟高达材料的屈服强度值, 会大大降低结构的承载能力。焊接残余应力的存在, 对焊接结构的强度、刚度、抗脆断性能、抗疲劳性能、耐腐蚀性能、尺寸精度及稳定性均有显著的影响。

(3) 接头性能不均匀

焊接接头是典型的组织性能不均匀体。焊缝、热影响区和母材之间的强度和韧性存在严重的不均匀性, 近缝区内受到较大温差所引起的热循环作用, 会导致接头上出现化学成分、金相组织的不均匀, 由于存在焊接残余应力和变形, 且接头上会出现一定程度的应力集中现象, 焊接结构中还可能出现几何和力学性能的不均匀。这种性能的不均匀对整个结构的强度和断裂行为有显著的影响, 是影响焊接结构总体性能的重要因素。

(4) 应力集中

焊接结构的应力集中主要包括焊接接头区的焊趾、焊根及焊接缺陷产生的应力集中和结构截面形状或尺寸突变造成的应力集中。如果在结构截面突变处设置焊接接头, 则应力集中会更加严重。焊接结构的整体性使其具有良好的密封性, 但同时由于整体性使结构的刚性增大, 也增大了结构对应力集中的敏感性。应力集中系数高的部位往往是整个结构的最薄弱环节, 应力集中对结构的脆性断裂和疲劳强度有很大影响。

(5) 焊接缺陷

焊接过程的快速加热和冷却使焊接接头的局部材料在极不平衡的条件下经历熔化、凝固及固态相变等过程, 焊接区常常会产生裂纹、气孔、夹渣、咬边和未焊透等焊接缺陷, 尤其对于有些焊接性较差的材料, 如高强度钢等在焊接中极易出现焊接裂纹, 且有较高的缺口敏感性。焊接缺陷往往是焊接结构破坏的根源。

1.4 焊接技术及其发展

焊接技术作为制造业的基础工艺与技术, 在工业中大规模成熟应用的历史并不长, 但近几十年来发展非常迅速。焊接结构的发展也进一步促进了焊接技术的进步, 而焊接材料、焊接工艺方法、焊接设备和焊接基础理论的发展也为满足不断提高的焊接质量要求提供了保障。随着焊接技术在许多重要工业领域中的广泛应用, 已快速发展为一种不可或缺的重要制造技术, 并不断开创了连接技术的新篇章。

1.4.1 常用的焊接方法

焊接是两种或两种以上的材料（同种或异种），在加热或加压（或并用）的状态下，通过原子或分子之间的结合和扩散，形成永久性连接的加工工艺过程。焊接技术应用十分广泛，既可用于金属，也可用于非金属。由于焊接时采用的能源和方式不同，形成了各种类型的焊接工艺方法。随着新材料和新型结构的不断出现，新的焊接技术与方法也不断涌现。

焊接过程的本质是采用加热、加压或两者并用的办法，使两个分离表面的金属原子之间达到晶格距离并形成结合力。由于焊接方法种类繁多，很难用单一的方法对其分类。按照焊接过程中金属所处的状态不同，可以把焊接方法分为熔化焊、固相焊和钎焊三类（见图 1-1）。其中常用的主要焊接方法的原理及用途列于表 1-1。

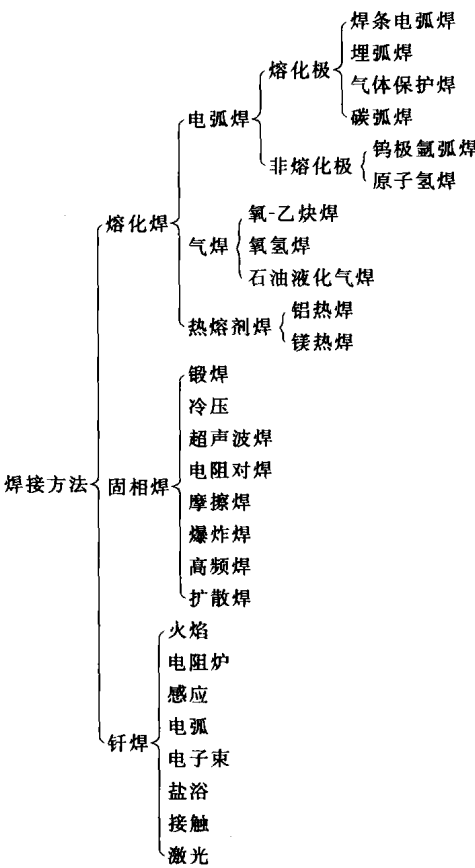


图 1-1 焊接方法分类

1.4.2 焊接技术的发展历程

焊接技术是随着金属材料的应用而出现并逐渐发展起来的。古代的焊接方法主要是铸焊、钎焊和锻焊。如，中国商朝，用铁与铜铸焊制造出铁刃铜钺。春秋战国时期，曾侯乙墓中的建鼓铜座上的许多盘龙是分段钎焊连接而成，所用材料与现代软钎料的成分相近。战国时期，采用加热锻焊制造刀剑，其刀刃为钢，刀背为熟铁。据明朝宋应星所著《天工开物》一书记载：中国古代将铜和铁一起入炉加热，经锻打制造刀和斧；用黄泥或筛细的陈久壁土撒在接口上，分段锻焊大型船锚。中世纪，叙利亚大马士革也曾锻焊制造兵器。

表 1-1 常用焊接方法的原理与用途

焊接方法	原 理	用 途
手工电弧焊	利用电弧热量熔化焊条和母材,形成焊缝的一种焊接方法	应用范围广泛,可焊接各种位置
电渣焊	利用电流通过熔渣产生的电阻热来熔化金属,加热范围大,对大厚度焊件能一次焊成	适用于大型和较大厚度工件的焊接
气体保护焊	采用氩气、氮气、二氧化碳和氢气等保护焊接熔池,使之与空气隔绝的焊接方法	适用于合金钢、铜、铝、钛等有色金属的焊接
埋弧焊	电弧在焊剂层下燃烧,焊缝成型美观,质量好	适用于长焊缝、深厚焊缝的焊接,生产率高
等离子焊	气体在电弧内电离后再经热收缩效应和磁收缩效应产生能量密度大的高温热源	适用于不锈钢、耐热钢、高强度钢及有色金属的焊接

古代焊接技术长期停留在铸焊、锻焊和钎焊的水平上,使用的热源都是炉火,温度低、能量不集中,无法用于大截面、长焊缝工件的焊接,只能用以制作装饰品、简单的工具和武器。19 世纪末以前没有出现电焊的主要原因之一就是缺乏合适的电源。18 世纪末期,意大利人 Volta 和 Galvani 成功发现了电流。最早的焊接实验就是通过不同类型的方法来解决焊接电源。1831 年,Michael Faraday 创立了变压器和电机原理,这是对电源的重要发展。

19 世纪初,英国的戴维斯发现电弧和氧乙炔火焰两种能局部熔化金属的高温热源;1885~1887 年,俄国的别纳尔多斯发明碳极电弧焊钳;1900 年又出现了铝热焊。1905 年,德国 AEG 公司生产了焊接发电机。20 世纪 20 年代直流电用于电弧焊。20 世纪 50 年代末,固体焊接整流器问世,最初使用的是硒整流器,很快出现了硅整流器。此后,硅可控整流器的出现实现了电子控制焊接电流,现在这些整流器仍在普遍使用,尤其是用于大型焊接电源。

20 世纪初,碳极电弧焊和气焊得到应用,同时还出现了薄药皮焊条电弧焊,由于焊接熔池受到熔渣保护,电弧比较稳定,焊接质量得到提高,使手工电弧焊进入实用阶段;电弧焊从 20 年代起发展成为一种重要的焊接方法,美国的诺布尔利用电弧电压控制焊条送给速度,制成了自动电弧焊机,成为焊接机械化和自动化的开端。此后,又发明了不少新焊接方法,人们不断尝试用自动焊代替手工焊,用连续丝让焊接工艺自动化,最成功的发明是埋弧焊,1930 年美国的罗宾诺夫发明了使用焊丝和焊剂的埋弧焊,焊接机械化得到了进一步发展。气体保护电弧焊早在 1890 年就由 C. L. Coffin 获得了专利,但在二战期间,随着航空业需要焊接镁和铝的方法,1940 年,在美国用惰性气体保护电弧的实验开展得如火如荼,由此,钨极和熔化极惰性气体保护焊才相继问世。通过使用钨电极,不用熔化电极也可以打出电弧,使得有无填充金属都可以进行焊接,此方法现在称为 TIG 焊接(钨极惰性气体保护电弧焊)。此后,又出现了用连续放入金属丝作为电极的 MIG 焊接工艺(熔化极惰性气体保护电弧焊)。1951 年,苏联的巴顿电焊研究所开发出电渣焊,成为大厚度工件的高效焊接方法。由于 CO_2 更容易获得,1953 年,苏联的柳巴夫斯基等人发明二氧化碳气体保护焊,称 MAG(活性气体保护电弧焊),促进了气体保护电弧焊的应用和发展,相继出现了混合气体保护焊、药芯焊丝气渣联合保护焊和自保护电弧焊等。1957 年,美国的盖奇发明等离子弧焊;20 世纪 40 年代德国和法国发明的电子束焊,也在 50 年代得到实用和进一步发展。20 世纪 60 年代,等离子焊、电子束焊和激光焊接方法的出现,标志着高能量密度熔焊的新发展,大大改善了材料的焊接性,使许多过去难以用其他方法焊接的材料和结构得以焊接。

其他的焊接技术还有 19 世纪后期美国的汤普森发明的电阻焊, 可用于薄板的点焊和缝焊, 其中缝焊成为压焊中最早的半机械化焊接方法; 20 世纪 20 年代开始使用闪光对焊方法焊接棒材和链条, 至此电阻焊进入了实用阶段。1956 年, 美国的琼斯发明了超声波焊; 苏联的丘季科夫发明了摩擦焊; 1959 年, 美国斯坦福研究所研究成功了爆炸焊; 50 年代末前苏联研制成功了真空扩散焊设备。从 1964 年起, 机器人用于电阻焊, 大约 10 年后出现电弧焊机器人。电动机器人可以设计得非常精确, 达到熔化极惰性气体保护电弧焊焊接的要求。到那时为止, 今天使用的大多数焊接工艺都已发明。后来又出现了其他一些焊接方法, 如英国焊接学会在 1970 年研制出激光束焊和 1992 年申请发明专利的搅拌摩擦焊。搅拌摩擦焊对铝很适用, 铝不用熔化就能接合并形成高质量接合点。该工艺由于具有简单有效、不使用耗材, 能源消耗少, 对环境影响小等突出优势, 被誉为 20 世纪最重要的焊接技术创新之一。

20 世纪末到 21 世纪以来, 伴随着新能源技术、计算机技术的发展, 焊接技术的发展更加迅速。各项焊接技术及其应用日趋成熟、高效, 可焊接的材料种类、焊接速度、焊接质量都大幅度提高。如随着激光技术迅速发展, 激光焊接以其高速度、非接触、变形极小等特点, 非常适合大量、连续的在线加工。尤其近十几年来激光焊接技术及能力不断增强, 目前使用 4kW 的激光器焊接 1mm 的板材焊接速度高达 20m/min, 广泛应用于汽车行业的轿车箱底的大板拼接和过程设备的薄壁合金材料等的焊接。

1.4.3 现代焊接技术的任务与展望

近年来随着制造业的蓬勃发展, 提高焊接生产的生产率, 保证产品质量, 实现焊接生产的自动化和智能化越来越受到生产企业的重视。现代计算机技术、智能控制技术、数字化信息处理技术、图像处理及传感器技术、高性能 CPU 芯片等现代高新技术的融入, 使现代焊接技术取得了长足进步。现代焊接技术的发展水平主要体现在: 焊接工艺高效化、焊接生产自动化、焊接电源控制数字化、焊接质量控制智能化和绿色制造等, 以及智能化技术和以激光焊接为代表的先进焊接技术取得的突破与发展。现代焊接技术发展的主要方向如下。

(1) 能源

目前, 焊接热源已非常丰富, 如火焰、电弧、电阻、超声、摩擦、等离子、电子束、激光束、微波等等, 但焊接热源的研究与开发并未终止, 其新的发展可概括为三个方面。

首先是对现有热源的改善, 使其更为有效、方便和经济适用, 在这方面, 电子束和激光束焊接的发展较显著; 其次是开发更好、更有效的热源, 采用两种热源叠加以求获得更强的能量密度, 例如在电子束焊中加入激光束等; 最后是节能技术, 由于焊接所消耗的能源很大, 所以以节能为目标的新技术不断出现, 如太阳能焊、电阻点焊中利用电子技术的发展来提高焊机的功率因数等。

(2) 计算机技术在焊接中广泛应用

目前以计算机为核心建立的各种焊接过程控制系统包括焊接顺序控制系统、PID 调节系统、最佳控制及自适应控制系统等, 在电弧焊、压焊和钎焊等不同的焊接方法中得到了广泛应用。如弧焊设备微机控制系统, 可对焊接电流、焊接速度和弧长等多项焊接工艺参数进行分析和控制, 并对焊接操作程序和参数变化等做出显示和数据保留, 从而给出焊接质量的确切信息。计算机软件技术在焊接中的应用也越来越得到人们的重视, 目前, 计算机模拟技术已用于焊接热过程、焊接冶金过程、焊接应力和变形等的模拟; 数据库技术被用于建立焊工档案管理数据库、焊接符号检索数据库、焊接工艺评定数据库以及焊接材料检索数据库等; 在焊接领域中, CAD/CAM 技术正处于开发应用阶段, 焊接的柔性制造系统也已出现。