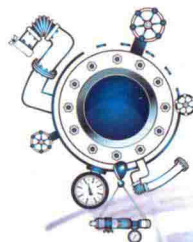
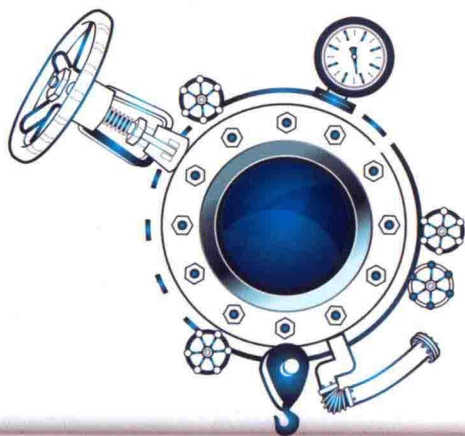
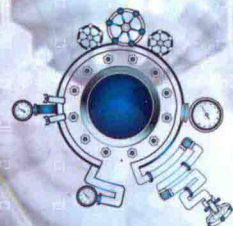




普通高等教育“十三五”规划教材



过程设备 制造工艺学



樊玉光 袁淑霞 编著

Technology and Theory of
Process Equipment Manufacturing

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

普通高等教育“十三五”规划教材

过程设备制造工艺学

樊玉光 袁淑霞 编著

中国石化出版社

内 容 提 要

本书以培养工程能力和创新能力为主旨,致力于提高学生的工艺实践能力、按工程要求创造性地完成过程装备制造工艺编制的能力,注重传承专注、严谨、精益求精的“工匠精神”。主要内容包括设备制造的材料准备工艺、成形工艺、焊接工艺、组装工艺、质量检验工艺、热处理工艺,并涵盖了过程设备的现代制造技术以及质量控制及管理体系等内容,全面介绍了过程装备制造工艺过程及主要方法,系统地论述了过程装备制造所需要掌握的基础知识和基本方法。

本书可以作为普通高等院校过程装备与控制工程及相关专业的本科教材,也可作为从事过程装备设计、制造、检验和使用等工程技术人员的参考书及培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

过程设备制造工艺学 / 樊玉光, 袁淑霞编著. —北京:
中国石化出版社, 2017. 3
普通高等教育“十三五”规划教材
ISBN 978-7-5114-4426-4

I. ①过… II. ①樊… ②袁… III. ①化工过程-化工
设备-制造-工艺学-高等学校-教材 IV. ①TQ051.06

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 086025 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市朝阳区吉市口路9号
邮编:100020 电话:(010)59964500
发行部电话:(010)59964526
<http://www.sinopec-press.com>
E-mail:press@sinopec.com
北京柏力行彩印有限公司印刷
全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 16 印张 397 千字
2017 年 5 月第 1 版 2017 年 5 月第 1 次印刷
定价:39.00 元

前言

制造工艺是指按照技术要求,运用知识和技能,利用客观工具,通过相应的方法和手段,使原材料在一定条件下发生物理、化学变化,转化成工具、设备和产品的过程。过程设备制造工艺则是以金属板材为主要原材料,以成形、焊接为主要工艺的制造石化、化工、石油等流程工业静设备的过程。对其中“方法和手段”的研究称之为“学”。《过程设备制造工艺学》是过程装备与控制工程专业及相关专业必须掌握的核心专业课程之一。

近年来,随着石化、石油、化工等流程性过程工业的迅猛发展,过程设备制造业也得到了快速发展,以有色金属为代表的新材料在过程设备中也得到广泛的应用,相应的设备制造方法也应随之更新;制造业的发展带来制造工艺的进步,制造方法也推陈出新,而焊接设备、机加工设备和数控技术的进步也带来了制造方法的变革。随着人类社会资源与环境问题的日益突出,绿色、可持续发展理念逐渐贯穿于制造过程,为此,党的十八大提出“实施创新驱动发展战略”、《十三五规划纲要》提出“创新、协调、绿色、开放、共享”等可持续发展理念、《中国制造2025》提出坚持“创新驱动、质量为先、绿色发展、结构优化、人才为本”的基本方针。以上发展和变革也促进了过程设备制造的相关标准(国家标准及行业标准)和法规的更新和完善。

为适应新技术、新标准、新要求以及创新型社会发展的需要,满足“以智能制造为主导的第四次工业革命——工业4.0”对专业人才的需求,对《过程设备制造工艺学》课程内容的改革也势在必行。本书是在广泛参阅及吸收国内外过程装备制造的新工艺、新方法、新标准的基础上,结合编者多年来的教学经验编著而成的。

本书以培养工程能力和创新能力为主旨,致力于提高学生工艺实践能力、按工程要求创造性地完成过程装备制造工艺编制的能力,注重传承专注、严谨、精益求精的“工匠精神”。其内容包括设备制造的坯料准备工艺、成形工艺、焊接工艺、组装工艺、检验工艺、热处理工艺,并包括过程设备的现代制造技术以及质量控制及管理体系等内容,全面地介绍了过程装备制造工艺过程及主要方法,系统地论述了过程装备制造所需要掌握的基础知识和基本方法。本书的特色在于融入了现代设备制造的机械化、自动化和智能化等内容,介绍了自动

化制造、虚拟制造、物联网制造和绿色制造、再制造等现代制造技术在过程设备制造过程中的应用，内容体现新标准、新知识、新技术、新方法，适当留有供自学和拓宽专业的知识内容；顺应材料学科发展趋势，包含了铝、钛、镍、锆等有色金属及其合金材料的设备制造方法。

本书绪论及第5章、第6章、第7章、第9章由樊玉光教授编写；第1章、第2章、第3章、第4章、第8章由袁淑霞编写。

本书部分文字及插图来自辛希贤、樊玉光、康勇主编的《化工设备制造工艺学》一书，对该书作者辛希贤教授及康勇教授表示感谢，同时也感谢本书参阅的其他教材、专著、论文、标准的作者。

在编写过程中得到了陕西化建工程有限责任公司设备制造公司林雅岚总工程师以及陕西省锅炉压力容器检验所夏锋社副总工程师的现场技术帮助，在此表示感谢；同时感谢陕西应用物理化学研究所高级工程师张迎春帮助校阅书稿。

由于作者水平所限，书中不可避免地会存在一些缺点、不足，恳请各位读者指正。

目 录

0 绪论	(1)
0.1 课程内容、性质及要求	(1)
0.2 过程设备的种类	(1)
0.2.1 设备类型	(1)
0.2.2 设备分级	(2)
0.3 过程设备制造特点及工艺要求	(4)
0.3.1 过程设备制造特点	(4)
0.3.2 过程设备制造工艺要求	(4)
0.4 现代设备制造的特点	(5)
0.4.1 多尺度制造	(5)
0.4.2 标准化、个性化共存	(7)
0.4.3 先进制造工艺的迅猛发展	(8)
0.4.4 以材料科学为导向的制造技术	(8)
0.4.5 全生命周期及可持续发展制造	(9)
1 过程设备材料及其预处理	(10)
1.1 过程设备主要用材及选材原则	(10)
1.1.1 过程设备用钢	(10)
1.1.2 过程设备用铝及铝合金	(11)
1.1.3 过程设备用钛及钛合金	(12)
1.1.4 过程设备用镍及镍合金	(13)
1.1.5 过程设备用锆及锆合金	(13)
1.1.6 材料的选用原则	(14)
1.1.7 材料的验收	(15)
1.2 材料预处理	(15)
1.2.1 净化	(15)
1.2.2 矫形	(17)
1.3 划线	(22)
1.3.1 设备的组成及划线的目的	(22)
1.3.2 分拆和展开	(23)
1.3.3 排板和号料	(24)
1.3.4 标记和标记移植	(28)
2 切割及边缘加工	(29)
2.1 机械切割	(29)
2.1.1 剪切方法简介	(29)

2.1.2	剪切机工作原理	(30)
2.1.3	其他剪切机	(31)
2.2	氧气切割	(31)
2.2.1	氧气切割原理和条件	(31)
2.2.2	氧气切割适用范围	(32)
2.2.3	氧气切割工艺	(33)
2.2.4	氧气切割对切口金属性能的影响	(35)
2.3	等离子切割	(36)
2.3.1	等离子切割的特点	(36)
2.3.2	等离子切割的适用范围	(36)
2.3.3	等离子切割的原理	(37)
2.3.4	等离子切割设备与切割工艺	(39)
2.4	碳弧气刨切割	(41)
2.4.1	碳弧气刨的原理	(41)
2.4.2	碳弧气刨的切割范围	(41)
2.4.3	碳弧气刨工艺	(42)
2.4.4	碳弧气刨常见的缺陷和预防措施	(42)
2.5	激光切割	(43)
2.5.1	激光切割的基本原理	(43)
2.5.2	激光切割分类	(43)
2.5.3	切割范围	(44)
2.5.4	激光切割工艺参数	(45)
2.6	高压水射流切割	(46)
2.6.1	高压水射流切割原理	(46)
2.6.2	高压水射流切割范围及特点	(46)
2.6.3	高压水射流加工参数	(46)
2.7	边缘加工方法和工艺	(47)
2.7.1	边缘加工目的	(47)
2.7.2	边缘加工的方法	(47)
3	材料的成形加工工艺	(50)
3.1	金属材料的塑性变形	(50)
3.1.1	金属材料的冷变形	(50)
3.1.2	金属材料的热加工及其要求	(50)
3.2	板材的弯曲变形理论	(53)
3.2.1	板材弯卷的变形率、临界变形率	(53)
3.2.2	最小冷弯半径	(53)
3.2.3	不同材料的最小冷弯半径	(54)
3.2.4	影响最小弯曲半径的因素	(55)
3.3	板材弯卷设备及工艺	(56)

3.3.1	对称式三辊卷板机	(56)
3.3.2	对称式四辊卷板机	(58)
3.3.3	其他三辊卷板机	(59)
3.3.4	卷制条件改变时卷板机工作参数计算	(59)
3.3.5	卷圆质量保证	(61)
3.3.6	锥形筒体加工	(62)
3.4	管材的弯曲	(64)
3.4.1	管子弯曲加工原理	(65)
3.4.2	弯管工艺及方法	(68)
3.5	封头的成形	(75)
3.5.1	封头的整体冲压成形	(76)
3.5.2	封头的旋压成形	(81)
3.5.3	封头的爆炸成形	(82)
4	设备的焊接	(84)
4.1	焊接接头	(84)
4.1.1	焊接接头的基本形式	(84)
4.1.2	焊接接头的特点	(85)
4.1.3	压力容器焊缝级别分类	(86)
4.1.4	焊接坡口	(87)
4.1.5	焊缝表示符号	(88)
4.2	焊接的热过程	(89)
4.2.1	焊接热源	(89)
4.2.2	焊条融化与焊接熔池的形成	(90)
4.2.3	焊接热循环	(92)
4.3	焊接的冶金过程	(94)
4.3.1	焊接的液相冶金(化学冶金)	(94)
4.3.2	焊接的凝固冶金(金属结晶)	(96)
4.3.3	焊接的固相冶金(物理冶金)	(98)
4.4	焊接缺陷与焊接性	(104)
4.4.1	焊接裂纹的分类	(104)
4.4.2	焊接热裂纹	(105)
4.4.3	焊接冷裂纹	(107)
4.4.4	金属材料的焊接性	(110)
4.5	焊接方法、设备及工艺	(114)
4.5.1	焊条电弧焊	(115)
4.5.2	埋弧焊	(116)
4.5.3	熔化极气体保护焊(GMAW)	(119)
4.5.4	钨极惰性气体保护焊(TIG 焊)	(121)
4.5.5	电渣焊	(121)

4.5.6	激光焊接	(123)
4.6	常用金属材料的焊接工艺	(123)
4.6.1	焊接工艺分析	(123)
4.6.2	焊接工艺设计	(124)
4.6.3	常用材料焊接问题分析	(127)
4.6.4	异种金属焊接	(132)
5	设备的组装工艺	(135)
5.1	设备组对工艺的要求	(135)
5.1.1	设备组对	(135)
5.1.2	设备组对的技术要求与公差	(136)
5.2	组对工艺及技术要求	(142)
5.2.1	组对装配单元及划分	(142)
5.2.2	设备组装的工艺要求	(142)
5.2.3	拼装组对过程焊接变形和应力	(143)
5.3	典型组对拼装设备	(145)
5.3.1	纵缝组装机机械	(145)
5.3.2	环缝组装机机械	(147)
5.3.3	组对-焊接变位机械	(150)
5.4	典型换热设备的组装制造过程	(153)
5.4.1	管板及折流板加工	(153)
5.4.2	管箱组焊	(155)
5.4.3	管束组装	(156)
5.4.4	管和管板的连接	(157)
6	过程设备制造质量检验	(160)
6.1	设备制造质量缺陷	(160)
6.1.1	制造质量缺陷的种类	(160)
6.1.2	缺陷的危害	(162)
6.2	质量检验的基本要求	(163)
6.2.1	质量检验的意义	(163)
6.2.2	质量检验的内容和方法	(163)
6.2.3	质量检验标准与基本要求	(164)
6.3	理化试验	(165)
6.4	无损检测	(166)
6.4.1	无损检测的通用要求	(166)
6.4.2	射线检测	(169)
6.4.3	超声检测	(177)
6.4.4	磁粉检测	(186)
6.4.5	渗透检测	(191)
6.4.6	衍射时差法超声检测	(193)

6.4.7	涡流检测及脉冲涡流检测	(198)
6.4.8	新型检测技术	(200)
6.5	耐压试验和泄漏试验	(202)
6.5.1	耐压试验	(203)
6.5.2	泄漏试验	(204)
7	设备热处理	(206)
7.1	设备热处理概述	(206)
7.1.1	设备热处理目的	(206)
7.1.2	热处理范围	(207)
7.1.3	热处理工艺	(208)
7.2	炉内整体热处理	(210)
7.2.1	整体热处理概述	(210)
7.2.2	加热炉及温度控制	(210)
7.2.3	整体热处理的膨胀及变形	(211)
7.3	局部热处理	(211)
7.3.1	局部热处理要求	(212)
7.3.2	局部热处理加热方式	(212)
7.4	内热式整体热处理	(213)
7.4.1	热处理加热方法	(213)
7.4.2	内热式热处理操作	(214)
7.4.3	大型设备热处理问题分析	(214)
8	过程设备现代制造技术	(215)
8.1	现代制造的内涵及科学基础	(215)
8.1.1	现代制造的内涵	(215)
8.1.2	现代制造技术的科学基础	(216)
8.2	自动化制造	(217)
8.2.1	自动化制造技术的定义、内涵	(217)
8.2.2	自动化制造技术的关键技术	(218)
8.2.3	计算机集成制造	(218)
8.2.4	典型的自动化制造系统	(219)
8.3	虚拟制造	(223)
8.3.1	虚拟制造的产生背景	(223)
8.3.2	虚拟制造技术的内涵	(223)
8.3.3	虚拟制造的关键技术	(224)
8.3.4	虚拟制造技术在设备制造中的应用	(224)
8.4	物联网制造	(225)
8.4.1	物联网制造的内涵	(226)
8.4.2	物联网制造的体系结构	(226)
8.4.3	制造物联的关键技术	(227)

8.5 可持续发展制造 (227)

8.5.1 绿色制造 (227)

8.5.2 再制造技术 (229)

9 过程设备制造质量控制 (231)

9.1 设备制造质量管理与安全监察 (231)

9.1.1 设备制造质量管理的意义 (231)

9.1.2 过程设备的制造许可管理 (231)

9.2 压力容器制造过程与质量保证体系 (233)

9.2.1 质量保证体系基本要求 (234)

9.2.2 质量监督 (240)

9.2.3 事故反馈机制 (241)

参考文献 (243)

0 绪 论

0.1 课程内容、性质及要求

过程设备服务于过程工业，过程工业是加工制造“流程性材料产品”的现代国民经济支柱产业之一，如化工工艺过程、炼油工艺过程、制药工艺过程等。“流程”是在过程机器与设备的合力搭配下完成的，其实现和发展必然要求越来越先进的机械化、自动化、智能化和绿色化的设备。过程装备与控制工程是机械、化学、电学、能源、信息、材料工程等学科的交叉学科，是集成创新的新学科，具有强大的生命力和广阔的发展前景。

装备制造业是为国民经济和国防建设提供技术装备的基础产业，装备制造业的发展是提高生产力、实现现代化的基础，是提高国际竞争力的根本体现，更是实现国民经济全面协调可持续发展的战略举措。随着人类的活动空间的拓展，太空、海洋、乃至地球深处都将是过程装备大有作为的领域^[1]，而这一切也需要过程装备制造技术发展的支持。研究完成工艺过程中的各种设备(如塔器、换热器、储罐、反应器及其他非标准设备)及其主要部件制造工艺理论与技术的课程，称之为设备制造工艺学。其内容包括设备制造的坯料准备工艺、成形工艺、焊接工艺、组装工艺、检验工艺及质量管理等。过程设备大多数属于压力容器，而压力容器的设计和制造需要特种设备许可证及相应的质保体系，通过课程教学，使学生初步掌握特种设备制造的基本原理和基本知识，培养学生联系实际，一切从实际出发的思维模式，初步学会过程设备制造的基本技能以及质量控制和技术管理的方法。

0.2 过程设备的种类

0.2.1 设备类型

根据设备在过程工程中所起的作用，将其分为储运设备、热交换设备、分离设备、反应设备和特殊设备等。

(1) 储运设备(代号 C，其中球罐代号 B) 主要用来盛装过程工程中的物料，如酸、碱、氨、氧、氮等工业液体、气体、液化气体及其加工品等。用作储存物料的设备称作储罐，如圆筒形储罐和球形储罐；运输物料的设备称为槽车，如汽车槽车和铁路槽车。

储罐的结构较简单，虽然其承受的压力差别较大，但大多属薄壁容器的范畴。除球形储罐外，几乎均由圆筒形筒体加上各种封头组成。

槽车由于流动性大，载荷状态与静止设备不同，可能发生的意外情况较复杂，因此比一般储罐有更严格的要求。

(2) 热交换设备(代号 E) 主要用于完成过程工程中介质的热量交换，如各种热交换

器、冷却器、冷凝器、蒸发器等。就结构而言，主要有管壳式、板式、螺旋板式和板翅式等几种类型。

(3) 分离设备(代号 S) 主要用于完成介质的流体压力平衡缓冲和气体净化分离的压力容器，例如各种分离器、过滤器、集油器、洗涤器、吸收塔、铜洗塔、干燥塔、汽提塔、分汽缸、除氧器等。其中塔设备通常分为板式塔和填料塔两大类。其基本结构一般包括由筒节和各种封头组成的塔体，由塔板或填料及其支承构件组成的内件、裙式支座、人孔、进出料接管、仪表接管以及平台扶梯和保温层等附件。

(4) 反应设备(代号 R) 主要是用于完成介质的物理、化学反应的压力容器，例如各种反应器、反应釜、聚合釜、合成塔、变换炉、煤气发生炉等。

(5) 特殊设备 一些特殊的过程设备，如管式加热炉(其结构一般分圆筒式和箱式两种)，除直立的外壳和钢架结构外，内部构件通常是由炉管、弯头、支架或吊挂以及各种燃烧器等组成。

随着制造技术的发展，过程设备的制造过程也越来越现代化，数控加工等自动化制造技术早已在过程设备制造中采用；将仿真与制造相结合的虚拟制造技术也在重要设备中得到应用；互联网技术的发展将设备的定制、加工、使用过程之间建立了有机联系；随着集约型社会的发展，可持续发展的理念也体现在设备制造过程中，设备中的塔内件、换热管、加热炉炉管等容易损坏或影响性能的内件均可进行再制造，提高效能，节约资源。

0.2.2 设备分级

从壳体的几何形状和受力特点看，上述设备(除加热炉外)都是含有压力介质的容器，故又统称为压力容器。《固定式压力容器安全技术监察规程》(TSG 21—2016)^[2]中，规定工作压力大于或者等于 0.1MPa、容积大于或者等于 0.03m³并且内直径(非圆形截面指截面内边界最大几何尺寸)大于或者等于 150mm、盛装介质为气体、液化气体以及介质最高工作温度高于或者等于其标准沸点的液体的容器为压力容器。

按容器内压力 p 的大小，压力容器又分为外压容器(如减压塔、真空容器等)和内压容器。内压容器按压力范围可分类如下：

低压容器(代号 L)： $0.1\text{MPa} \leq p < 1.6\text{MPa}$

中压容器(代号 M)： $1.6\text{MPa} \leq p < 10.0\text{MPa}$

高压容器(代号 H)： $10.0\text{MPa} \leq p < 100.0\text{MPa}$

超高压容器(代号 U)： $p \geq 100.0\text{MPa}$

从安全技术管理和监督检查出发，根据容器压力的高低，介质的危害程度以及在生产过程中的重要作用，TSG 21—2016^[2]中将压力容器分为Ⅰ类、Ⅱ类和Ⅲ类容器。根据压力及容积，三类容器的分类见图 0-1 和图 0-2。

不同种类的容器不仅在设计上有不同的依据与要求，在制造和检验方面也有不同的特点和要求。

虽然压力容器的形状各不相同，但在不同程度上却有其共同的特征，包括：

- (1) 设备体积和重量较大，但除高压和超高压容器外，一般筒壁均较薄；
- (2) 设备本体的承压部分通常由圆筒体和各种形状的封头组成，大多由板材制成，其主要制造工序包括板材的预加工、弯卷、成形、焊接及无损检测等；
- (3) 内件的制造和组装通常应满足传热、传质、分离以及物料反应等工艺要求；

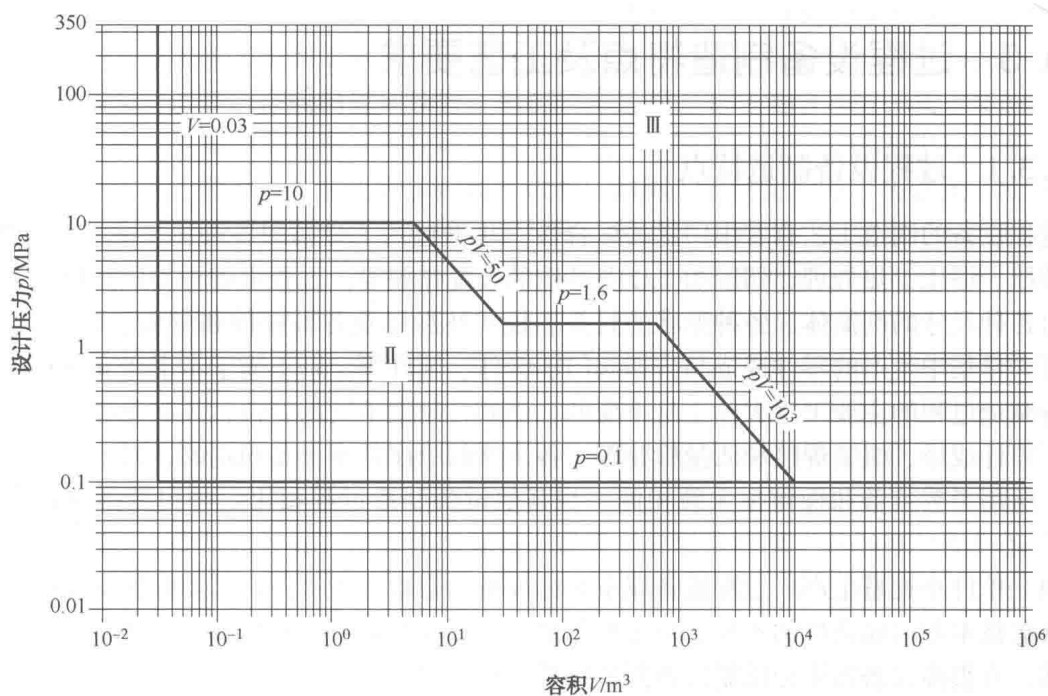


图 0-1 压力容器分类图(剧毒、高危、易爆及液化气介质)

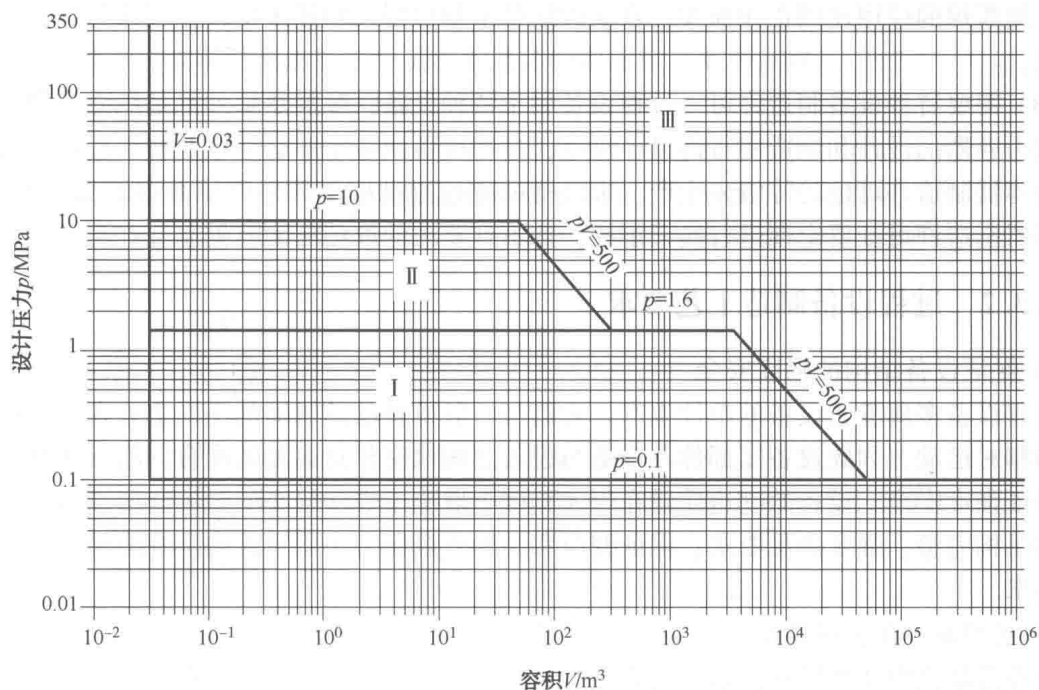


图 0-2 压力容器分类图(其他介质)

(4) 各连接部件具有很高的密封性要求；

(5) 设备用材料除应满足强度、制造工艺性、耐腐蚀性要求外，其表面不得有降低上述性能的各种缺陷。

过程设备具有的上述特点决定了设备制造工艺的特殊性。

0.3 过程设备制造特点及工艺要求

0.3.1 过程设备制造特点

过程设备的制造工艺有着很广泛的综合性，几乎包括了金属的各种加工方法，如焊接、冷热冲压、锻压、热处理、切削加工以及特殊的装配作业等。过程设备种类虽然很多，但大多是由各种尺寸的圆筒体、各种形状的封头、板式坯料以及各种杆件和弯头、弯管等构成。其他可大量集中生产的零件或成品，如阀门、管件、配件等，则不属于本书研究的对象。过程设备制造过程的主要工序大体上是不变的，例如，制造不同的容器，其制造过程可概括为备料、零件成形、组装焊接和质量检验等。各工序的顺序基本上是固定的，同一工序的基本原理、所用工艺装备和操作也大致相同。与其他设备制造过程相比，过程设备制造有以下特点：

(1) 单件小批量生产 过程设备属于非标设备，很难批量生产，需要根据设备的结构特点、制造技术和运输条件的不同，确定整体制造、分段制造还是现场制造，随着设备大型化的发展，有很多设备需要分段制造再到现场进行整体组装。

(2) 以焊接为主体的制造工艺 由于过程设备主要由板材加工而成，焊接是其主要加工工艺。在过程设备焊接过程中，焊条电弧焊的应用比例正在降低；埋弧自动焊、CO₂气体保护焊、氩弧焊的应用比例正在加大；自动焊接技术和机器人的使用使大型容器的焊接实现了自动化。

(3) 需要特种设备制造许可 过程设备属于特种设备，除加热炉外都是压力容器，我国规定压力容器的设计和制造实行许可证制度，过程设备制造企业必须按照技术监督部门批准的压力容器制造许可证的等级来生产，未经批准或超过批准范围生产压力容器都是非法的。压力容器制造许可证要定期进行换证审核，达不到要求的取消压力容器制造许可证。

0.3.2 过程设备制造工艺要求

1) 保证设备结构的强度安全

过程设备多属静止设备的单件生产。它们与一般可转动的机器的不同之处在于没有机件之间的相对运动，因此设备零部件及设备与设备之间没有相对运动的配合问题，其制造过程主要保证强度安全。设备的制造质量在很大程度上取决于焊接接头质量的优劣，因此，保证设备的结构完整、强度满足要求；保证壁厚和结构残余应力小以及无内部缺陷是设备制造的关键要求。

2) 必须充分保证可靠性

在设备制造中还必须对设备的可靠性有充分的保证，这是保证过程设备长周期正常安全操作的重要条件之一。必须在备料、零部件成形、组装焊接和质量检验各环节保证设计要求，各道工序之后一般都有检验工序，以确保后继工序的质量。利用无损检测技术最大程度发现结构内部缺陷，消除事故隐患，结合压力试验保证过程设备的安全可靠性。故而，制造质量检验是设备制造的另一关键工序。

3) 制造许可制度要求质量保证体系和过程管理

过程设备要充分保证其可靠性，其制造质量管理工作也要更加科学化和现代化。为此在

制造过程中及最后大多要求进行严格的无损检验及压力试验,以保证设备质量及生产安全。当代石油化工过程装备与控制工程领域的发展方向是使过程装备高效率、高自动化、安全可靠、数据参数自动监控、在线测量和预报、系统故障远程诊断与自愈调控,其主要的研究方向有:研究故障产生规律及早期发现故障的征兆信息,研究故障信号处理及识别特征,应用红外、涡流、绝缘、超声、X射线等多种技术诊断、预测工业装备故障,装备状态检测诊断及控制一体化系统、主动控制系统,压力容器技术,装备密封技术,高效分子蒸馏技术,过程机械计算机辅助工程(CAE),高聚物加工技术及装备,过程智能检测与先进控制工程等。

4) 大型设备制造要求多种制造工艺、大型制造设备和现场组装技术

为确保压力容器大型化和在高参数下安全操作,实现制造工艺多样化、管理科学化,必须保证制造质量。为此,出现了多种制造工艺。如壳体,最早用整体锻造,以后随着焊接技术的发展与冶金技术水平的提高,出现了锻焊及单层卷焊等壳体结构,接着又出现了多层包扎和槽型绕带等组合式壳体结构。20世纪60年代以来,重点发展了组合式壳体制造工艺,如大型多层热套、冷套胀合等。在超高压容器中发展了自增强技术。另据有关资料报道,在前联邦德国还试制成功了大型全焊肉(The Total Weldment)容器,如已制造出了直径为6m、长10m、重200t的高压容器。

随着设备制造技术及运输能力不断发展,设备在制造厂预制工作量的比重已大幅度提高。这有利于设备制造质量的提高和成本的降低,但仍有些设备无法整体在制造厂预制,如大型球罐直径可达26m(10000m^3),无法用铁路运输,只能将容器的构件在制造厂预制后再到现场安装和焊接。因此设备制造有现场组装工作量大的特点。另外,由于有些设备直径大而壁厚相对较薄,故在制造过程中为了保持筒体的稳定性,需加支撑。

5) 降低制造成本、缩短制造周期

在保证设备安全可靠性的前提下,降低制造成本、缩短制造周期,是设备制造企业主要追求的目标。采用合理的最适合企业的工艺方法和工序、应用先进的工装设备和计算机辅助制造技术(数控加工、自动检测、CAPP等)可以在缩短制造周期的同时、保证稳定的制造质量、降低制造成本。

0.4 现代设备制造的特点

现代设备制造的特点是机械化、自动化、智能化和绿色化。对于重大装备与关键产品,大型化、系统化、轻量化和高可靠性是其发展趋势,这也对制造业提出了新的挑战。

0.4.1 多尺度制造

过程装备的大型化及微型化集成是近年来的发展趋势。

1) 设备大型化

(1) 过程设备的大型化

近几十年来,随着工业生产的需求和科学技术水平的发展,化工设备的发展主要表现在规格大型化、高设计参数、结构的改进及材料的进步等各个方面。例如,合成氨装置产量已由20世纪50年代的0.1万吨/年发展到如今的120万吨/年;在20世纪50年代单套炼油装置产量为200万~300万吨/年,目前世界上最大的单套炼油装置规模已达到1750万吨/年;2013年埃克森美孚公司位于新加坡裕廊岛的乙烯装置生产量已达350万吨/年。对于单件设

备,亚洲直径最大的塔设备直径已达 18m,塔设备最大厚度已达 300mm 以上;最大的换热器换热面积已达 13000m²;加氢反应器单件重达 1500t。

(2) 过程设备大型化对制造技术的要求

① 对材料的要求 设备大型化首先要求强度高的材料,以尽可能降低容器壁厚,达到减轻重量的目的,便于运输和安装。例如,大型加氢反应器的厚度已达到 300mm 以上,重量已达 1500t,急需强度更高的材料。如果将材料强度提高 8%,质量便可减少 120t,节省费用十分可观。

② 对设计技术的要求 为了尽量减轻设备的重量和确保使用安全性,对大型承压设备往往需要采用以应力分析为基础的设计方法。大型压力容器采用分析设计方法具有明显的经济效益。例如,一个单体质量 1000t 的加氢反应器按分析方法设计比常规方法设计可减轻设备重量约 20%,节省投资 1000 万~1200 万元。

③ 对制造技术的要求 大型设备意味着规格大、设备厚度大、重量大以及制造难度大和工作量大,因此制造技术的先进性、高效性显得尤为重要。首先是先进、高效的焊接技术。例如,一台大型储罐,焊缝总长度达几千米,提高焊接速度是保证按期完工的关键因素。其次是锻件空心浇注技术。大型加氢反应器绝大多数采用锻焊结构,对于其筒形锻件坯料的生产,国外一些公司采用空心浇注技术,而国内只能采用整体浇注技术。前者具有成材率高、加工量小、成本低的优点,具有强大的市场竞争力。第三是现场组装技术。由于运输条件的限制,一些大型加氢反应器已不能完全在制造厂内制造,只能在制造厂先制成几部分,然后再在使用现场进行组焊。现场组焊技术中很重要的一项是热处理,大型设备现场热处理技术的发展也使得设备现场组装成为可能。设备大型化也对无损检测技术提出了更高要求。

2) 微小型化

(1) 微型化工设备

微化工技术是集微机电系统设计思想和化学化工基本原理于一体并移植集成电路和微传感器制造技术的一种高新技术,涉及化学、材料、物理、化工、机械、电子、控制学等各种工程技术和学科^[3]。微型化工设备是微化工过程的核心部分,其开发和应用为微化工过程的实现提供了强大的支持,按其用途将微型化工设备分为微换热器、微反应器、微混合器、微分离器等。

① 微换热器 微换热器考虑了热质传递过程的尺度微细化、结构与条件复杂化等效应,微尺度流动与传热已成为现代高新技术的理论和基础之一。由于其通道尺寸小(一般在微米级)、比表面积大,因此与传统的换热器相比,其温度梯度和传热系数大。微换热器的传热系数较常规换热器大 1~2 个数量级^[4]。

② 微反应器 微反应器也被称作是微通道反应器,是强化化工过程的微型仪器^[5]。微反应器内部微通道的特征尺寸一般在数十到几百微米之间^[6],特征通道中单相流动的特点为较低的雷诺数,由层流扩散影响混合,局部也会形成二次流混合^[7]。微反应器的尺寸属于微尺度范畴,所产生的直接优势就是扩散时间很短,混合过程很快。尺寸的缩小赋予微反应器无与伦比的比表面积,可以达到 10000~50000m²/m³,而传统的搅拌设备的比表面积最多可以达到 1000m²/m³。

③ 微混合器 微混合器是一种能在微尺寸条件下实现多相混合的设备。它一般通过微通道实现,多股流体分别在多个通道内流动,然后汇合在一起,从而起到混合流体的作用。