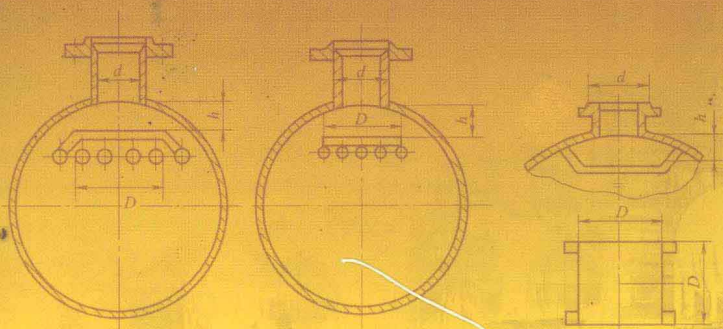


中等职业教育规划教材

化工设备

第二版

匡照忠 主编 孙季瀛 主审



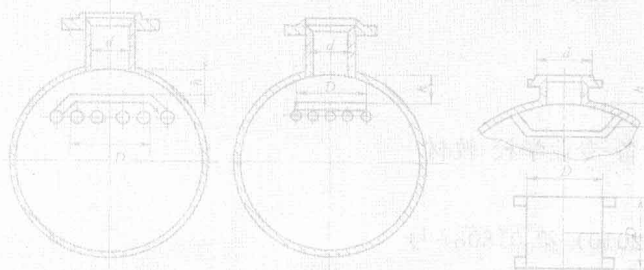
化学工业出版社

中等职业教育规划教材

化工设备

第二版

匡照忠 主编 孙季瀛 主审



化学工业出版社

· 北京 ·

本书内容包括薄壁容器及附件基础知识、高压容器、换热器及传热基础知识、塔设备及传质基础知识、反应器及化工设备的腐蚀与防护等。修订时,除按新颁布的标准更新有关内容外,还对原有的结构进行了调整。

本书可作为中等职业院校化工机械类专业的教材,也可作为职业培训和职业技能鉴定教材及化工机械行业工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

化工设备/匡照忠主编. —2版. —北京:化学工业出版社, 2010.3
中等职业教育规划教材
ISBN 978-7-122-07709-7

I. 化… II. 匡… III. 化工设备-专业学校-教材
IV. TQ05

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 018087 号

责任编辑:高 钰
责任校对:王素芹

文字编辑:项 激
装帧设计:尹琳琳

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 11½ 字数 283 千字 2010 年 4 月北京第 2 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:19.00 元

版权所有 违者必究

第二版前言

本书是根据原化学工业部批准颁发的《化工检修钳工》工种教学计划和教学大纲及相关工种国家职业标准、职业技能鉴定规范编写的。

本书力求采用最新国家标准，以通俗易懂的语言和较恰当的选材阐述了化工设备的基本理论和基本技能知识，为便于学生学习和掌握，每章后面均有综合练习题。教学中要注意理论联系实际，学校应努力创造条件，组织必要的参观、多媒体教学和实习教学。

本书由山东化工技师学院的匡照忠主编，孙季瀛老师主审。

由于编者水平有限，不足之处敬请读者和同行们批评指正。

编 者

2009.12

第一版前言

根据原化学工业部 1997 年 12 月批准颁发的《化工检修钳工》工种教学计划和教学大纲要求,“全国化工技校教学指导委员会”化机专业组于 1997 年开始组织编写《化工检修钳工》工种的专业基础课和专业课教材。

本次教材以 1992 年国家颁布的工人技术等级标准为依据,将中级工应掌握的技术知识和应具备的专业能力有机结合,组成基础课和专业课教材共 10 种 13 本。

《化工设备》是化工检修钳工工种的专业课之一,教材力求采用最新国家标准,以通俗易懂的语言和较恰当的选材阐述了化工设备的基本理论和基本技能知识,为便于学生学习和掌握,每章后面均有综合练习题。

教学中要注意理论联系实际,学校应努力创造条件,组织必要的参观、电视教学和实习教学。

本书由吉林省长春市石油化工技校孙季瀛主编,山东省鲁南化工技工学校李旻任主审,天津市大沽化工厂技工学校张凤岭、河南省开封化工技工学校赵振山和穆运庆、山东省鲁南化工技工学校苏军生和原学礼等参审。

由于水平有限,且时间仓促,故缺点错误在所难免,恳请广大读者批评指正。

全国化工技工教学指导委员会化机专业组

1999 年 12 月

目 录

绪论	1	二、压力容器的检修	54
一、化工设备在化工生产中的重要地位	1	思考题	58
二、化工设备在化工生产中的作用	1	第二章 高压容器	59
三、我国化工设备工业的发展	1	第一节 概述	59
四、本课程的任务和学习方法	1	一、高压容器的总体结构和特点	59
第一章 薄壁容器及附件基础知识	3	二、高压容器筒体的主要结构形式及 应用	60
第一节 概述	3	第二节 高压容器的零部件	65
一、压力容器的组成与分类	3	一、筒体端盖(封头)	65
二、压力容器用钢	5	二、筒体端部	66
三、压力容器零部件的标准化	6	三、主要连接件	67
四、压力容器基本要求	7	四、高压容器的开孔补强	68
五、压力容器的失效形式	7	第三节 高压容器的密封	69
第二节 内压薄壁容器	8	一、强制密封	69
一、内压薄壁圆筒	8	二、自紧密封	71
二、内压球形容 器	11	第四节 高压容器的维修	74
三、容器最小壁厚	11	一、高压容器的维护要点	74
四、容器厚度的确定	11	二、高压容器的定期检查要点	75
第三节 内压封头形式的选用与计算	13	三、高压容器的检修要点	75
一、封头的形式及选用	13	思考题	76
二、封头厚度计算	15	第三章 换热器及传热基础知识	77
第四节 外压容器简介	18	第一节 概述	77
一、外压容器的失稳	18	一、换热器的分类	77
二、外压容器失效的特点	18	二、换热器的发展方向简介	79
三、临界压力	18	第二节 传热基础知识	79
四、影响临界压力的因素	19	一、传热基本概念	79
五、提高外压容器稳定性的措施	19	二、传热基本方式	79
第五节 容器附件	21	三、传热基本方程	80
一、法兰连接	22	四、强化传热的措施	81
二、接口管及凸缘	36	第三节 列管式换热器	82
三、手孔、人孔和视镜	36	一、列管式换热器类型	82
四、开孔补强	38	二、列管式换热器的主要部件及结构	85
五、压力容器支座	41	三、列管式换热器型号及标准	94
第六节 压力试验与致密性试验	50	第四节 其他形式换热器	97
一、压力试验	50	一、沉浸式换热器	97
二、致密性试验	51	二、喷淋式换热器	97
第七节 压力容器的维修	51	三、套管式换热器	98
一、压力容器的维护与检查	51		

四、夹套式换热器	98	第一节 概述	147
五、螺旋板式换热器	98	一、对反应器的基本要求	147
六、平板式换热器	100	二、反应设备的种类及特点	147
七、热管式换热器	101	第二节 搅拌式反应器的结构	149
第五节 列管式换热器的维修	102	一、釜体	149
一、换热器的维护与检查	102	二、搅拌器	150
二、换热器的检修	103	三、传动装置	152
思考题	104	四、轴封装置	153
第四章 塔设备及传质基础知识	106	五、换热装置	153
第一节 概述	106	第三节 搅拌式反应器的维修	153
一、塔的用途	106	一、搅拌式反应器的维护	153
二、常用塔的形式	106	二、搅拌式反应器的检查	153
第二节 传质基础知识	106	三、搅拌式反应器的修理	154
一、传质基本概念	106	思考题	156
二、吸收	106	第六章 化工设备的腐蚀与防护	157
三、蒸馏	107	第一节 概述	157
四、精馏	107	一、金属的腐蚀	157
五、萃取	107	二、金属的腐蚀速度及评定标准	158
第三节 填料塔	107	第二节 常用材料的耐蚀特性	159
一、填料塔的组成	107	一、金属材料	159
二、填料塔的工作原理	108	二、非金属材料	161
三、填料塔的主要部件及结构	108	第三节 化工设备的防腐	163
第四节 板式塔	121	一、化工设备常用防腐方法	163
一、板式塔的组成及工作原理	121	二、化工设备防腐技术发展简介	165
二、板式塔的结构及主要部件	121	思考题	165
三、常用板式塔	135	附录	167
第五节 塔设备的维修	141	附录一 常用钢板许用应力	167
一、维护与检查	141	附录二 常用钢管许用应力	170
二、塔设备的检修	142	附录三 按介质选用耐蚀金属材料表	173
思考题	146	参考文献	177
第五章 反应器	147		

绪 论

一、化工设备在化工生产中的重要地位

化工生产是以自然界中的各种物质为原料，对其进行化学或物理处理，制成为人类衣、食、住、行服务的具有较高价值的产品。例如，以石油为原料制成的液化石油气、合成纤维、合成橡胶、塑料制品；以原油或焦炭、空气和水为原料制成的合成氨、碳酸氢铵肥料；以食盐为主要原料制成的纯碱和烧碱等。化工设备在化工生产所有的装备中约占 80%。广泛用于传热、传质、化学反应和物料储存等方面。显然化工设备运行状况的好坏，将直接影响化工产品的产量和质量以及生产的连续化、稳定性和安全性。因此，强化化工设备的维护管理，提高职工队伍的技术素质，确保化工设备的正常运行，在化工生产中至关重要。

二、化工设备在化工生产中的作用

化工设备是化工生产中的重要生产工具。由于现代化工生产过程复杂，操作条件要求苛刻，工艺过程往往需要在深冷、高温、高压、真空、易燃、易爆、有毒等条件下进行，几乎每个化工产品都有独特的工艺过程和专用设备，所以化工设备种类繁多、结构复杂。

化工设备根据功能的不同大致可归纳为储运设备（如储槽、球罐、槽车等）、反应设备（如搅拌式反应器、聚合釜、合成塔等）、传热设备（如热交换器、蒸发器、重沸器、冷凝器等）、传质设备（如蒸馏塔、精馏塔、吸收塔、解吸塔、干燥器）等。

化工设备是为化学工艺过程服务的，先进的化工设备可以保证新的化学工艺过程得以实现，因此，化工生产中对化工设备的基本要求是：

- ① 必须满足化学工艺条件的要求；
- ② 在规定的使用年限内运行安全可靠；
- ③ 制造、安装、维修费用低，力争操作方便。

三、我国化工设备工业的发展

中华人民共和国成立后，才陆续建立了一批化工机械厂来配合化工企业的生产。20 世纪 50 年代末，我国已经能够生产压力为 32.4MPa 的多层包扎式高压容器。化工设备的发展，为化工工艺开发奠定了基础。20 世纪 60 年代，国内化工生产逐步实现了设备大型化。20 世纪 80 年代，我国氨碱厂的设备在当时已经处于国际先进水平。与此同时可生产石墨换热器、氟塑料制成酸冷却器、硝酸吸收塔、不锈钢高压釜、内径为 3.2m 的氨合成塔、年产 300000t 合成氨、520000t 尿素联合装置的设备及大型高压洗涤器和直径为 3.2m 的碳化塔等化工设备。20 世纪 90 年代化工设备工业发展更加迅猛，已具备向世界先进水平挑战的能力。随着科学技术的进步，化工设备不仅向标准化、节能化、大型化发展，而且还向精细化、国有化和机电一体化发展，展望未来，21 世纪将是一个知识经济、信息经济时代。化学工业为基础产业，也必须跟上知识经济时代的变化。

四、本课程的任务和学习方法

通过本课程的学习应能掌握典型化工设备的构造、用途及工作原理，为今后工作中对设备进行正确维护和检修打下坚实的理论基础。

如同其他课程一样，要学好本课程，必须有正确的学习方法。

① 在本课程的学习中，常常要与许多基础理论知识相联系，涉及知识面比较广。例如，学习薄壁容器需要工程力学中的受力分析知识；要了解设备的工作原理、性能，需要数学、物理和化学等有关知识；要了解设备的结构，需要制图、机械基础等相关知识，所以要不断地复习巩固所学知识，勤于思考，灵活运用。

② 本课程有一定的理论分析，且实践性很强，故在学习中除应注意课堂教学环节外，亦应对生产实际、必要的参观给予高度重视。要通过实习把对理论知识的理解和增强动手能力结合起来，提高判断和解决生产实际问题的能力。

第一章 薄壁容器及附件基础知识

第一节 概 述

化工生产中有很多用来储存物料、进行物理过程和化学反应的设备。这些设备虽然作用不同，大小形状各异，内部构件的类型更是千差万别，但它们有个共同的特点，就是都有一个外壳。化工生产中所用各种设备的外部壳体统称为容器。所以，容器也是化工设备的一个基本组成部分。

承受介质压力且与外界隔离的密闭容器称为压力容器。这类容器应用广泛，形式繁多，又比较容易发生事故，且事故的危害往往是严重的，因此，各国工业部门都把压力容器作为受安全监察的一种特殊设备。

按照《压力容器安全技术监察规程》的规定，压力容器同时具备下列条件：

① 最高工作压力大于或等于 0.1MPa（不含液柱静压力）；

② 内直径（非圆形截面指断面最大尺寸）大于或等于 0.15m，且容积大于或等于 0.025m³；

③ 介质为气体、液化气体或最高工作温度高于或等于标准沸点的液体。

一、压力容器的组成与分类

1. 压力容器的组成

压力容器最基本的结构是一个密闭的壳体。化工厂中常用的中低压容器大多数是圆筒形容器，它是由壳体（筒体）、封头（又称端盖）、法兰、支座、接口管及人孔、手孔、视镜等组成，如图 1-1 所示。它们统称为化工设备通用零部件。常、低压化工设备通用零部件大都已标准化，设计时可直接选用。

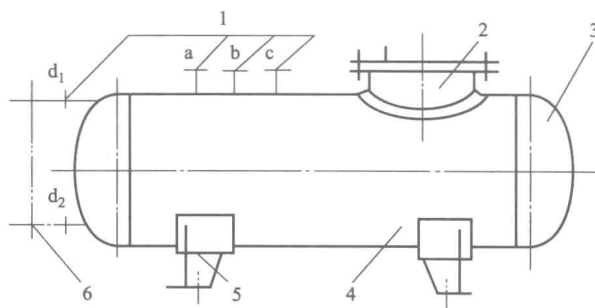


图 1-1 容器的结构

1—接管；2—人孔；3—封头；4—筒体；5—支座；6—液面计

2. 压力容器的分类

压力容器的应用十分广泛，品种很多，分类方法也很多。通常可按以下几种方法分类。

(1) 按工艺用途分

① 反应压力容器 (R): 主要用于完成介质的化学反应, 如反应器、聚合釜、合成塔。

② 换热压力容器 (E): 主要用于完成介质的热量交换, 如冷却器、冷凝器、蒸发器、加热器等。

③ 分离压力容器 (S): 主要用于完成介质的流体压力平衡和气体净化分离等, 如分离器、过滤器、集油器、缓冲器、吸收塔等。

④ 储存压力容器 (C、B): 主要用于盛装原料、半成品、成品等, 如储槽、球罐、槽车等。

(2) 按承压性质分 容器按承压性质分为内压容器和外压容器。内部介质压力大于外部介质压力的容器称为内压容器, 这种容器使用最多。外部介质压力大于内部介质压力的容器称为外压容器, 如减压塔和真空容器等。带夹套的反应设备, 夹套内介质压力高于容器内介质压力时, 也属外压容器。

内压容器按其承受压力 (表压) 的大小又可分为以下几类。

① 低压容器 (L): $0.1 \leq p < 1.6 \text{ MPa}$ 。

② 中压容器 (M): $1.6 \leq p < 10 \text{ MPa}$ 。

③ 高压容器 (H): $10 \leq p < 100 \text{ MPa}$ 。

④ 超高压容器 (U): $p \geq 100 \text{ MPa}$ 。

(3) 按容器壁厚分

① 薄壁容器: $K = \frac{D_o}{D_i} \leq 1.2$ 。

② 厚壁容器: $K = \frac{D_o}{D_i} > 1.2$ 。

D_o 、 D_i 分别为容器的外直径和内直径。

(4) 按容器的工作温度分类

① 低温容器: $t \leq -20^\circ\text{C}$ 。

② 常温容器: $-20^\circ\text{C} < t \leq 200^\circ\text{C}$ 。

③ 中温容器: $200^\circ\text{C} < t \leq 450^\circ\text{C}$ 。

④ 高温容器: $t > 450^\circ\text{C}$ 。

按工作温度分类虽然没有严格的科学依据, 但其意义在于温度对材料的性能影响较大, 在不同的温度区间, 对容器材料选用上要考虑一些特殊的问题。

(5) 按《压力容器安全技术监察规程》分类 为了区别对待安全要求不同的压力容器的技术管理和监督检查, 《压力容器安全技术监察规程》按容器的压力等级、容积大小、介质的危害程度及在生产过程中的作用综合考虑, 把压力容器分为三个类别, 其中第三类压力容器最为重要, 要求也最严格。这种分类方法对从事压力容器的设计、制造、安装及管理人员而言更为重要。具体划分如下。

① 第一类压力容器。除第二类、第三类压力容器以外的所有的低压容器。

② 第二类压力容器。包括以下类型:

a. 除第三类压力容器以外的所有中压容器;

b. 易燃介质或毒性程度为中度危害介质的低压反应容器和储存容器;

c. 毒性程度为极度和高度危害介质的低压容器;

d. 低压管壳式余热锅炉;

e. 搪玻璃压力容器。

③ 第三类压力容器。包括以下类型：

a. 毒性程度为极度和高度危害介质的中压容器和设计压力与容积的乘积大于或等于 $0.2\text{MPa} \cdot \text{m}^3$ 的低压容器；

b. 易燃或毒性程度为中度危害介质且其设计压力与容积的乘积大于或等于 $0.5\text{MPa} \cdot \text{m}^3$ 的中压反应容器和设计压力与容积的乘积大于或等于 $10\text{MPa} \cdot \text{m}^3$ 的中压储存容器；

c. 高压、中压管壳式余热锅炉；

d. 高压容器。

除上述常见的分类方法外，还可按材料、制造方法及安放方式等进行分类。

二、压力容器用钢

1. 压力容器用钢

化工生产中大多数容器都是用钢材制成的，而且所用的材料种类繁多，这里仅介绍几种化工设备中常用的钢材。

(1) 碳钢 化工中最常用的是普通碳素钢，主要用来制造压力、温度都不高的容器，如 Q235-B 用于制造压力容器的壳体和封头等。

(2) 低合金钢 其所含合金总量不超过 5%，与普通碳素钢相比，具有高强度、高韧性和良好的可焊性，广泛用于制造各种塔器、换热器、容器、储槽和管道等。

(3) 低温钢 主要用于制冷、空分和加氢设备等。低温钢除了具有足够的强度指标外，更要求具有足够韧性和其他低温力学性能，以防脆性破裂造成严重事故。

(4) 不锈钢 主要指在空气、酸、水及其他强腐蚀性介质中耐蚀的钢或者在高温时抗氧化、抗蠕变的耐热钢，采用不锈钢制造压力容器不仅能耐蚀，而且强度、塑性、低温、高温力学性能也很好，但其价格约为碳钢的 20 倍。不锈钢大部分用于设备衬里和内件或者与碳钢组成复合钢板制作容器。

2. 压力容器用钢的选择

选用时必须考虑压力容器的工作条件，如温度、压力和介质特性及材料的使用性能，如力学性能、物理性能和化学性能，以及材料价格、制造费用和使用寿命。同时还应考虑国家标准 GB 150—1998 中的有关规定和要求，如附加要求的力学性能试验项目、质量检验要求等。

表 1-1～表 1-4 列出了各种钢板在不同厚度和热处理状态下允许使用的介质、压力及温度范围，这是选用压力容器用钢时必须遵循的基本规定。

表 1-1 碳素结构钢板

钢号	钢板标准	使用状态	厚度/mm	适用范围			
				容器设计压力/MPa	钢板使用温度/℃	用作壳体时的厚度/mm	介质
Q235-A·F	GB 912	热轧	3~4	≤ 0.6	0~250	≤ 12	不得用于易燃介质及毒性程度为中度以上的介质
	GB 3274		4.5~16				
Q235-A	GB 912	热轧	3~4	≤ 1.0	0~350	≤ 16	不得用于液化石油气介质及毒性程度为高度以上的介质
	GB 3274		4.5~40				
Q235-B	GB 912	热轧	3~4	≤ 1.6	0~350	≤ 20	不得用于毒性程度为高度以上的介质
	GB 3274		4.5~40				
Q235-C	GB 912	热轧	3~4	≤ 2.5	0~400	≤ 32	
	GB 3274		4.5~40				

表 1-2 压力容器用碳素结构钢和低合金钢板

钢号	钢板标准	使用状态	厚度/mm	使用温度/℃	其他条件
20R	GB 6654—1996	热轧或正火	6~100	-20~475	下列情况应在正火状态下使用： ①用于壳体厚度大于 30mm 的 20R 和 16MnR ②用于其他受压元件(法兰、管板、平盖等)的厚度大于 50mm 的 20R 和 16MnR ③厚度大于 16mm 的 15MnVR 下列情况应逐张进行拉伸和夏比(V 形缺口)冲击(常温或低温)试验： ①调质状态供货的钢板 ②多层包扎压力容器的内筒钢板 ③用于壳体厚度大于 60mm 的钢板 下列情况应每批抽一张钢板进行低温冲击试验： ①使用温度低于 -50℃ 时，厚度大于 25mm 且小于 60mm 的 20R，厚度大于 38mm 且小于 60mm 的 16MnR、15MnVR 和 15MnVNR，任何厚度的 18MnMoNbR、13MnNiMoNbR 和 07MnCrMoVR ②使用温度低于 -10℃，厚度大于 12mm 的 20R，厚度大于 20mm 的 16MnR、15MnVR 和 15MnVNR。使用 07MnCrMoVR 和 14Cr1MoR 时应考虑介质的应力腐蚀问题
16MnR		热轧或正火	6~120	-20~475	
15MnVR		热轧或正火	6~60	-20~400	
15MnVNR		正火	6~60	-20~400	
18MnMoNbR		正火加回火	30~100	-20~475	
13MnNiMoNbR		正火加回火	30~120	-20~400	
15CrMoR	—	正火加回火	6~100	-20~550	
07MnCrMoVR		调质	16~50	-20~350	
14Cr1MoR		正火加回火	16~120	-20~550	

表 1-3 低温压力容器用低合金钢板

钢号	钢板标准	使用状态	厚度/mm	使用温度/℃	最低冲击试验温度/℃
16MnDR	GB 3531—1996	正火	6~36	-40~350	-40
			36~100	-30~350	-30
15MnNiDR		正火 正火加回火	6~60	-45~100	-45
09Mn2VDR		正火 正火加回火	6~36	-50~100	-50
09MnNiDR		正火 正火加回火	6~60	-70~350	-70
07MnNiCrMoVDR	—	调质	16~50	-40~350	-40

表 1-4 不锈钢钢板

钢号	钢板标准	使用状态	厚度/mm	使用温度/℃	其他要求
0Cr13	GB 4237—1992	退火	2～60	—20～600	按 GB 4237—1992 的规定
0Cr18Ni9		固溶	2～60	—196～700	
0Cr18Ni10Ti		固溶稳定化	2～60		
0Cr17Ni12Mo2Ti		固溶	2～60		
0Cr18Ni12Mo2Ti		固溶	2～60	—196～500	
0Cr19Ni13Mo3		固溶	2～60	—196～700	
00Cr19Ni10		固溶	2～60	—196～425	

三、压力容器零部件的标准化

压力容器零部件大多已经标准化，这样既增强了容器部件的互换性，又解决了加工量

小、成本高、质量差等问题，更利于专业化大批量生产。我国原化学工业部、机械工业部等部门对容器零部件制定了一系列标准。

容器零部件标准化的基本参数是公称直径和公称压力。

(1) 公称直径 是将压力容器的直径加以标准化后的标准直径，用“DN”表示。容器的公称直径是它的内径，见表 1-5。管子的公称直径既不是它的内径也不是它的外径，而是与两者相近的某一个数值，故而是一个“名义”直径。采用无缝钢管制作筒体时其外径为公称直径，可按表 1-6 选取。

表 1-5 压力容器的公称直径 DN

mm

300	(350)	400	(450)	500	(550)	600	(650)	700	800
900	1000	(1100)	1200	(1300)	1400	(1500)	1600	(1700)	1800
1900	(2000)	2100	(2200)	2300	(2400)	2600	2800	3000	3200
3400	3600	3800	4000						

无缝钢管制筒体的公称直径 DN 有 159mm、219mm、273mm、325mm、377mm、426mm。

(2) 公称压力 是为了设计、制造和使用方便而人为规定的一个标准压力，它分为若干标准压力等级，从而使容器的壁厚和部件标准化，用“PN”表示。中低压范围分为 0.25MPa、0.6MPa、1.0MPa、1.6MPa、2.5MPa、4.0MPa、6.4MPa。

法兰的公称直径和公称压力是根据与之相配的容器或管子的标准而制定的，压力容器法兰与管法兰的公称压力见表 1-6。

表 1-6 压力容器法兰与管法兰的公称压力 PN

MPa

容器法兰	—	0.25	—	0.6	1	1.6	2.5	4	6.4
管法兰	0.1	0.25	0.4	0.6	1	1.6	2.5	4	6.4

四、压力容器基本要求

化工生产生产过程复杂，工艺条件苛刻，介质具有易燃、易爆、有毒、腐蚀性强等特点，还有生产装置大型化及生产过程的连续性、自动化程度高等特点。因此要求化工设备既能满足化工工艺的要求，又要能安全可靠地运行，同时还应经济合理。

1. 满足工艺要求

在化工生产中设备是为工艺服务的，压力容器的许多结构尺寸都是由工艺计算决定的，工艺人员通过工艺计算确定容器的直径、容积等尺寸并提出压力、温度、介质特性等生产条件。机械人员所提供的设备从结构形式和性能特点上应能在指定的生产条件下完成指定的生产任务。所以压力容器首先应满足化工工艺的要求。

2. 安全可靠运行

化工生产的特点决定了化工设备安全可靠运行的重要性。国内外生产实践表明，压力容器发生事故相当频繁，而且事故一旦发生，危害极大。为了保证其安全运行，防止事故发生，各国都先后成立了专门的研究机构，从事专门的研究工作并制定了相关的技术规范。

保证化工设备安全可靠运行具体体现在强度、刚度、密封性、耐久性及耐蚀性等方面。

五、压力容器的失效形式

容器或其零部件在使用过程中，尺寸、形状或材料性能发生改变而完全失去或不能良好地实现原有功能的现象，称为容器或其零部件的失效。引起容器失效的因素是多方面的，一

般可归为操作条件、设计和制造、使用与维修三个主要方面,其中操作条件包括受载情况与工作环境。

1. 变形失效

(1) 弹性变形失效 当所承受的工作载荷或工作温度引起容器或其零部件产生的可恢复的弹性变形大到足以妨碍其正常工作时,就称为过度弹性变形或弹性变形失效。如露天立置的塔设备在受到风力作用下,塔顶发生过度的弹性挠曲,其挠度超过许用值,导致破坏塔的正常操作或塔体受到过大弯曲应力,即属弹性变形失效。

(2) 塑性变形失效 由于容器发生过大的塑性变形而不能继续工作的失效,称为塑性变形失效或过度塑性变形。如受均匀内压的容器,当容器内的压力异常升高导致器壁中的平均应力超过容器材料的屈服点时,容器的变形迅速增大,筒身发生膨胀,且当压力卸除之后,容器不能恢复原来形状而保留一部分残余变形。

(3) 失稳 当作用在压力容器上的外压力达到临界水平时,径向挠度迅速随压力的增加而增加,直到产生褶皱、塌陷、弯曲等不可复原的塑性变形。虽从强度观点来看,压力所产生的应力可能完全在材料的弹性或屈服点以下,但当达到临界状态时由于任何的外界干扰而引起挠度突然增大破坏了结构的平衡,使其突然崩溃或翘曲。这种失效形式称为容器的失稳失效或翘曲失效。

2. 断裂失效

(1) 脆性断裂 容器或其零部件,当其材料变化表现出脆性时产生裂纹,这些裂纹迅速扩展,最后导致整个容器或零部件破裂,即为脆性断裂。

(2) 疲劳断裂 压力容器在交变循环载荷的作用下,经过一定周期后发生的断裂,称为疲劳断裂。疲劳断裂是压力容器最常见的失效形式之一。

(3) 蠕变断裂 压力容器或其零部件在高温和应力的共同作用下,经过一段时间,其塑性变形不断增大,以致累积的尺寸变化使容器或其零部件不能具有预定的功能,直至出现破裂,称为蠕变断裂。压力容器一般较少发生蠕变断裂失效。

3. 腐蚀失效

压力容器由于接触化学介质,其材料与环境之间会发生化学反应和电化学反应,引起材料减薄、局部腐蚀或变质,使得容器不能正常使用,甚至发生破裂,即为腐蚀失效。

第二节 内压薄壁容器

一、内压薄壁圆筒

1. 受力与变形

图 1-2(a) 所示为一圆筒形容器,筒体的平均直径为 D ,厚度为 δ_0 ,内部介质压力为 p (大于筒体外部压力),筒身为 l 。现分析薄壁筒体在介质压力作用下的受力与变形。

薄壁筒体在内压作用下,筒壁的经向“纤维”和环向“纤维”都将受到拉伸,因而在横截面上存在轴向拉伸应力,用 σ_z 表示,如图 1-2(b) 所示;在纵截面上存在环向拉伸应力,用 σ_θ 表示,如图 1-2(c) 所示,根据对称关系,内压力 p 在筒体上不会引起切应力的,只会产生轴向应力 σ_z 和环向应力 σ_θ ,即薄壁筒体处于两向应力状态。由于壁薄筒体厚度 δ_0 远远小于直径 D ,可以假设 σ_z 和 σ_θ 沿厚度均匀分布。

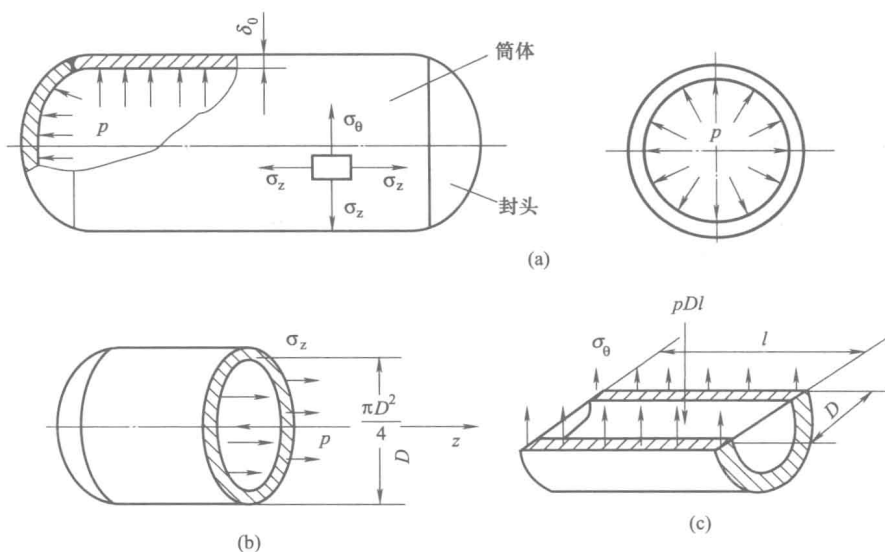


图 1-2 圆筒形容器的受力分析

2. 应力计算

筒体内轴向应力 (σ_z) 和环向应力 (σ_θ) 的数值, 可用截面法求出。

(1) 计算轴向应力 如图 1-2(b) 所示, 内压力 p 的轴向合力为 $p \frac{\pi D^2}{4}$, 截面上的内力 (轴向应力 σ_z 的合力) 为 $\pi D \delta_0 \sigma_z$, 根据静平衡条件 $\sum P_z = 0$, 有

$$\pi D \delta_0 \sigma_z - p \frac{\pi D^2}{4} = 0$$

$$\text{得} \quad \sigma_z = \frac{pD}{4\delta_0} \quad (1-1)$$

(2) 环向应力计算 如图 1-2(c) 所示, 假想将筒体沿其轴向截开, 并取长度为 l 的一段进行受力分析。内压力 p 的合力为 pDl , 截面上的内力 (环向应力 δ_0 的合力) 为 $2\delta_0 l \sigma_\theta$, 根据静平衡条件 $\sum P_\theta = 0$, 有

$$2\delta_0 l \sigma_\theta - pDl = 0$$

$$\text{得} \quad \sigma_\theta = \frac{pD}{2\delta_0} \quad (1-2)$$

比较式 (1-1) 与式 (1-2) 可得出如下结论:

① 薄壁圆筒的环向应力是轴向应力的 2 倍, 即 $\sigma_\theta = 2\sigma_z$ 。

② 实验证明, 因圆筒在制作过程中焊缝处可能存在缺陷, 所以裂纹常发生在纵向焊缝处, 故内压筒体易产生纵向裂纹而破裂。在设计和制造容器时, 纵向焊缝的质量要求较高, 开孔也最好避开纵向焊缝。在筒体上开设椭圆形人孔时, 其短轴应与筒体纵向相一致, 以降低开孔对筒壁强度的削弱程度。

③ 筒体在承受内压时, 筒壁内产生的应力和圆筒的 $\frac{\delta_0}{D}$ 成反比, $\frac{\delta_0}{D}$ 的大小反映了筒体的承压能力。

3. 强度计算

按第一强度理论, 即最大主应力理论, 圆筒的当量应力就是其最大的主应力 σ_θ , 所以

强度条件为

$$\frac{pD}{2\delta_0} \leq [\sigma]^t \tag{1-3}$$

由于圆筒除直径较小时可用无缝钢管制作外，一般都由钢板卷制焊接而成。焊接接头中可能存在的气孔、夹渣、未焊透、裂纹等缺陷及热影响区，使得接头强度低于母材的强度，故引入焊接接头系数 ϕ ($\phi \leq 1$) 补偿接头对强度的影响，即接头处的许用应力为 $[\sigma]^t \phi$ 。因圆筒的内径是由工艺计算决定的，所以把中径 D 换为以内径 D_i 表示的形式，即 $D = D_i + \delta_0$ ，使强度条件变为

$$\frac{p(D_i + \delta_0)}{2\delta_0} \leq [\sigma]^t \phi$$

整理后得

$$\delta_0 = \frac{pD_i}{2[\sigma]^t \phi - p} \tag{1-4}$$

- 式中 δ_0 ——圆筒的计算厚度，mm；
 p ——设计压力，MPa，按表 1-7 选取；
 D_i ——圆筒的内直径，mm；
 $[\sigma]^t$ ——材料在设计温度下的许用应力，MPa，见附录一、附录二；
 ϕ ——焊接接头系数，按表 1-8 选取；
 t ——设计温度，℃，当容器内介质被热载体或冷载体间接加热或冷却时，按表 1-9 选取，当容器内壁与介质直接接触且有外保温时，按表 1-10 选取。

表 1-7 设计压力确定

情况	设计压力 p 取值
容器上装有安全漏放装置	等于或稍大于安全漏放装置的开启压力 p_z ① [$p_z \leq (1.05 \sim 1.10)p_w$ ②]
单个容器不装安全漏放装置	取略高于工作压力
使用爆破膜作为安全漏放装置	取防爆膜的爆破压力
装有液化气体的容器	根据容器的充填系数和可能达到的最高温度确定

① 开启压力 p_z 为安全阀阀瓣开始升起介质连续排出时的瞬时压力。
② p_w 为容器工作压力，指在正常工作情况下，容器内可能达到的最高压力。

表 1-8 焊接接头系数

焊接接头形式	焊接接头系数		
	全部无损探伤	局部无损探伤	不进行无损探伤
双面焊的对接接头	1.0	0.85	0.7
单面焊的对接接头，在焊接过程中沿焊缝根部全长有紧贴基本金属的垫板	0.9	0.8	0.65
单面焊的对接接头，无垫板	—	0.7	0.6

表 1-9 设计温度（有载体时）

传热方式	设计温度 t	传热方式	设计温度 t
外加热	热载体的最高工作温度	内加热	被加热介质的最高工作温度
外冷却	冷载体的最低工作温度	内冷却	被冷却介质的最低工作温度