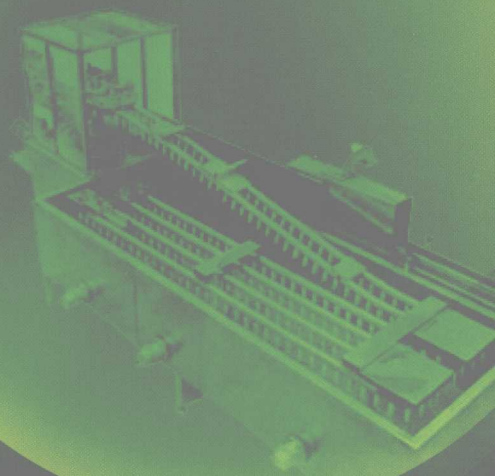
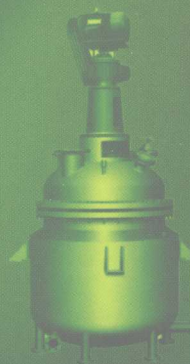


中等职业学校规划教材·化工中级技工教材

# 化工设备与维护

杨育红 主编 罗俊明 主审



化学工业出版社

中等职业学校规划教材·化工中级技工教材

# 化工设备与维护

杨育红 主编

罗俊明 主审



化学工业出版社

·北京·

本书针对中级技工教育特点,简化了设备设计内容,以设备的结构分析、安装与维修为重点进行了阐述,主要内容包括压力容器结构与压力容器附件结构、功能与选用;高压容器结构、换热器结构、塔类设备结构、反应釜结构与类型;容器设备安装维护与检修;化工设备的防腐;化工设备安全使用等。

本书是中等职业学校化工机械专业教材,也可作为化工企业工人培训教材使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

化工设备与维护/杨育红主编. —北京:化学工业出版社, 2008. 2

中等职业学校规划教材·化工中级技工教材

ISBN 978-7-122-02091-8

I. 化… II. 杨… III. 化工设备-维护-技工学校-教材 IV. TQ050.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第016537号

---

责任编辑:高钰

文字编辑:韩庆利

责任校对:宋玮

装帧设计:王晓宇

---

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:化学工业出版社印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张9 $\frac{3}{4}$  字数234千字 2008年3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: 16.00 元

版权所有 违者必究

# 中等职业学校规划教材

## 全国化工中级技工教材编审委员会

主任 毛民海

副主任 (按姓氏笔画排序)

王黎明	刘 雄	苏靖林	张文兵
张秋生	律国辉	曾繁京	

委员 (按姓氏笔画排序)

马武飏	王 宁	王跃武	王黎明
毛民海	刘 雄	米俊峰	苏靖林
李文原	李晓阳	何迎建	宋易骏
张 荣	张文兵	张秋生	陈建军
林远昌	周仕安	郑 骏	胡仲胜
律国辉	郭养安	董吉川	韩 谦
韩立君	程家树	曾繁京	雷 俊

# 前 言

本教材是根据中国化工教育协会制定的《全国化工中级技工教学计划》，由全国化工高级技工教育教学指导委员会领导组织编写的全国化工中级技工学校教材，也可作为化工企业工人培训教材使用。

本书共八章，主要讲述了薄壁容器、高压容器、容器附件、换热器、塔设备、釜式反应器的结构与维护等基本知识，并对化工设备的腐蚀与防护、压力容器的安全使用与监察管理进行了介绍。

为了体现中级技工的教育特点，本教材内容力求通俗易懂、涉及面宽，突出实际技能训练。本书简化了设备设计内容，以设备的结构分析、安装与维修为重点，强化与实践操作内容的联系，体现教学理论为实践服务、突出动手能力的教学特色。

本书在处理计量和单位时执行国家标准(GB 3100-3102—93)，统一使用我国法定计量单位，设备标准采用最新国家与行业标准。

本书由杨育红主编、罗俊明主审。全书共分八章。绪论、第五、六、七、八章由杨育红编写；第一章和第二章由张继宏编写；第三章和第四章由刘飞编写。马俊、张勇等参加审议。

本教材在编写过程中得到中国化工教育协会、全国化工高级技工教育教学指导委员会及相关学校领导和同行们的大力支持和帮助，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，不完善之处敬请读者和同行们批评指正。

编者

2008年1月

# 目 录

绪论 .....	1
第一节 化工设备概述 .....	1
一、化工设备在化工生产中的重要地位 .....	1
二、化工设备工业的发展 .....	1
三、压力容器的分类 .....	1
四、化工设备的基本要求 .....	3
第二节 化工设备常用材料 .....	3
一、对压力容器用钢的基本要求 .....	3
二、常用钢材的基本介绍 .....	3
第一章 薄壁容器基础知识 .....	5
第一节 内压薄壁容器 .....	5
一、内压薄壁圆筒的强度计算 .....	5
二、内压球形容器 .....	8
三、容器厚度的确定 .....	8
四、焊后热处理 .....	9
第二节 内压封头形式的选用与计算 .....	10
一、封头的形式及选用 .....	10
二、封头厚度计算 .....	11
第三节 外压容器简介 .....	14
一、外压容器的失效 .....	14
二、外压容器的临界压力 .....	14
三、提高外压容器稳定性的措施 .....	15
第四节 压力试验与致密性试验 .....	16
一、压力试验 .....	16
二、致密性试验 .....	18
第五节 压力容器的维护和检修 .....	19
一、压力容器的维护与检查 .....	19
二、压力容器的检修 .....	21
思考题 .....	25
习题 .....	26
第二章 容器附件 .....	27
第一节 法兰连接 .....	27
一、法兰连接的组成 .....	27
二、法兰的结构形式 .....	27
三、法兰连接的密封 .....	28
四、法兰标准 .....	31

第二节 容器其他主要零部件 .....	38
一、接口管、凸缘和视镜 .....	38
二、人孔和手孔 .....	39
三、支座 .....	40
第三节 容器的开孔补强 .....	47
一、容器开孔附近的应力集中 .....	47
二、对容器开孔的限制及补强结构 .....	47
思考题 .....	49
<b>第三章 高压容器</b> .....	50
第一节 概述 .....	50
一、高压容器的总体结构和特点 .....	50
二、高压容器筒体的主要结构形式 .....	51
第二节 高压容器的零部件 .....	53
一、高压容器的筒体端盖 .....	53
二、高压容器的筒体端部 .....	54
三、高压容器的主要连接件 .....	54
四、高压容器的开孔补强 .....	55
第三节 高压容器的密封 .....	55
一、高压容器的强制式密封 .....	55
二、高压容器的自紧式密封 .....	56
第四节 高压容器的维护 .....	58
一、高压容器的维护要点 .....	58
二、高压容器的定期检查要点 .....	58
三、高压容器的检修要点 .....	59
思考题 .....	60
<b>第四章 换热器</b> .....	61
第一节 概述 .....	61
一、混合式换热器 .....	61
二、蓄热式换热器 .....	61
三、间壁式换热器 .....	62
第二节 传热基础知识 .....	62
一、传热基本概念 .....	62
二、传热基本方式 .....	62
三、强化传热的措施 .....	63
第三节 列管式换热器 .....	64
一、列管式换热器类型 .....	64
二、列管式换热器主要部件及结构 .....	67
三、列管式换热器标准 .....	73
第四节 其他形式换热器 .....	74
一、沉浸式换热器 .....	74
二、喷淋式换热器 .....	74
三、套管式换热器 .....	75

四、夹套式换热器 .....	75
五、平板式换热器 .....	75
六、螺旋板式换热器 .....	76
七、热管式换热器 .....	76
第五节 列管式换热器的维护检修 .....	77
一、管壁积垢的清除 .....	77
二、管子泄漏的修理 .....	78
三、管子振动的修理 .....	78
思考题 .....	79
<b>第五章 塔设备及传质基础知识 .....</b>	<b>80</b>
第一节 概述 .....	80
一、塔设备在化工生产中的作用和地位 .....	80
二、化工生产对塔设备的基本要求 .....	80
三、塔设备的分类和总体结构 .....	80
第二节 传质基础知识 .....	81
一、传质基本概念 .....	81
二、吸收 .....	82
三、蒸馏 .....	82
四、精馏 .....	82
五、萃取 .....	82
第三节 填料塔 .....	83
一、填料塔的组成 .....	83
二、填料塔的工作原理 .....	83
三、填料塔的主要部件及结构 .....	84
第四节 板式塔 .....	94
一、板式塔的组成及工作原理 .....	94
二、板式塔的结构及主要部件 .....	96
第五节 其他塔设备 .....	105
一、折流板式萃取塔 .....	105
二、填料萃取塔 .....	105
三、筛板萃取塔 .....	106
第六节 塔设备的维护检修 .....	106
一、塔设备的维护与检查 .....	106
二、塔设备的检修 .....	108
思考题 .....	110
<b>第六章 釜式反应器 .....</b>	<b>111</b>
第一节 概述 .....	111
一、反应器的基本要求 .....	111
二、反应器的分类 .....	111
第二节 釜式反应器的搅拌装置 .....	113
一、搅拌器的类型及选择 .....	113
二、搅拌附件 .....	115



三、传动装置及搅拌轴 .....	116
第三节 搅拌器的轴封 .....	118
一、填料密封 .....	119
二、机械密封 .....	119
三、填料密封与机械密封的比较 .....	119
第四节 搅拌反应器的罐体 .....	120
一、罐体 .....	120
二、传热装置 .....	120
三、工艺接管 .....	121
第五节 釜式反应器的维护检修 .....	122
一、釜式反应器的维护 .....	122
二、釜式反应器的检查 .....	123
三、釜式反应器的修理 .....	123
思考题 .....	126
<b>第七章 化工设备的腐蚀与防护 .....</b>	<b>127</b>
第一节 概述 .....	127
一、腐蚀的定义 .....	127
二、腐蚀与防护的重要性 .....	127
三、腐蚀的类型 .....	127
第二节 常用材料的耐腐蚀特性 .....	128
一、金属材料的耐腐蚀性 .....	129
二、非金属材料的耐腐蚀性 .....	130
第三节 化工设备的防腐 .....	132
一、影响金属腐蚀的因素 .....	132
二、常用化工防腐蚀方法 .....	133
思考题 .....	134
<b>第八章 压力容器的安全使用与监察管理 .....</b>	<b>135</b>
第一节 压力容器的安全附件 .....	135
一、超压泄放装置 .....	135
二、安全阀 .....	135
三、爆破片装置 .....	138
四、压力表与液位计 .....	139
第二节 压力容器的安全使用 .....	140
一、压力容器的普查登记 .....	140
二、压力容器的定期检验 .....	141
第三节 压力容器的监察管理 .....	141
一、实施监察管理的依据 .....	141
二、压力容器安全状况等级 .....	142
三、事故调查处理规定 .....	142
四、事故技术分析 .....	144
思考题 .....	145
<b>参考文献 .....</b>	<b>146</b>

# 结 论

## 第一节 化工设备概述

### 一、化工设备在化工生产中的重要地位

化学工业在国民经济中占有重要地位，它与农业、工业、国防以及人民的衣食住行都有极为密切的关系。

石油、化工产品都是按照一定的工艺过程，利用与之相配套的机械设备生产出来的。例如，生产硫酸就需要与硫酸工艺配套的化工机械，加工原油就需要与原油加工工艺相配套的精馏塔、换热器、加热炉、泵等。因此化工机械是为化工工艺服务的，是实现化工生产的工具和手段。不同的化工工艺过程对化工机械提出了不同的要求，促进了化工机械的发展，而设计合理、质量优良的新型高效化工机械又会促使产品质量和产量的提高和消耗的降低，甚至使原来难以实现的生产工艺成为现实，生产出许多新的产品。

化工机械分为两大类：一类为动设备，如各种类型的泵、压缩机、离心机等，通常称为“机器”；另一类为静设备，如用于精馏、解吸、吸收、萃取等工艺的塔设备，用于合成材料聚合、加氢、裂解等工艺的反应设备，用于气、液体加热、冷却、液体汽化、蒸汽冷凝及废热回收的各种热量交换设备，用于原料、成品及半成品储存、运输、计量的储运设备等，通常称为“设备”，即本书所讲的“化工设备”。化工厂的机械装备 80% 左右属于化工设备。

本课程的主要任务：研究典型化工设备及常用零部件的材料选用、结构组成、性能特点、日常维护的方法。

### 二、化工设备工业的发展

新中国成立前，我国没有完整的化工设备工业，大部分生产设备及备品配件均靠国外进口。新中国成立后，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，我国氨碱厂的设备已经处于国际先进水平，可生产石墨换热器、氟塑料制成酸冷却器、硝酸吸收塔、30m<sup>3</sup> 聚合釜、年产 30 万吨合成氨、52 万吨尿素联合装置等化工设备。20 世纪 90 年代化工设备发展已具备向世界先进水平挑战的能力。21 世纪，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、信息化、机电一体化发展。展望未来，化工设备必将以适应现代化学工艺生产的需要而飞速发展。

### 三、压力容器的分类

化工生产中所用的设备虽大小不一，形态各异，内部结构千差万别，但它们都有一个外壳，这个外壳统称为容器。容器是化工设备的基本组成部分。

## 1. 压力容器的定义

压力容器是指压力和容积达到一定的数值，容器所处的工作温度使其内部介质呈气体状态的密闭容器。按照我国《压力容器安全技术监察规程》的规定，同时具备下列条件的容器就称为压力容器：

- ① 最高工作压力大于或等于 0.1MPa（不含液柱静水压力）；
- 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 0.025m<sup>3</sup>；
- 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。

## 2. 压力容器的分类

压力容器的应用十分广泛，形式多种多样，根据不同的需要分类方法如下。

### (1) 按压力性质分类

- ① 内压容器，是指内部承受流体的压力，即容器内部压力大于外界压力的容器；
- ② 外压容器，是指外部承受流体的压力，即容器外界压力大于内部压力的容器。

### (2) 内压容器按其承压大小分类

- ① 低压容器（代号 L）， $0.1 \leq p \leq 1.6 \text{MPa}$ ；
- ② 中压容器（代号 M）， $1.6 < p \leq 10 \text{MPa}$ ；
- ③ 高压容器（代号 H）， $10 < p < 100 \text{MPa}$ ；
- ④ 超高压容器（代号 U）， $p \geq 100 \text{MPa}$ 。

### (3) 按容器壁厚分类

- ① 薄壁容器，是指器壁的厚度小于容器内径的  $\frac{1}{10}$  者，即  $K = \frac{D_o}{D_i} < 1.2$ ；
- ② 厚壁容器，是指器壁的厚度大于或等于容器内径的  $\frac{1}{10}$  者，即  $K = \frac{D_o}{D_i} \geq 1.2$ 。

式中  $K$  为直径比， $D_o$  是圆筒外径， $D_i$  是圆筒内径。

### (4) 按工作温度分类

- ① 常温容器， $-20^\circ\text{C} < t < 300^\circ\text{C}$ ；
- ② 高温容器， $t \geq 300^\circ\text{C}$ ；
- ③ 低温容器， $t \leq -20^\circ\text{C}$ ；
- ④ 超低温容器， $t \leq -50^\circ\text{C}$ 。

(5) 按安全技术监察规程分类 我国《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。

① 一类容器，除第二类、第三类压力容器以外的所有的低压容器。

② 二类容器，有下列情况之一者：中压容器；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；剧毒介质的低压容器；低压管壳式余热锅炉；搪玻璃压力容器。

③ 三类容器，有下列情况之一者：高压超高压容器；剧毒介质  $pV$ （设计压力与容积的乘积） $\geq 0.2 \text{MPa} \cdot \text{m}^3$  的低压容器或剧毒介质的中压容器；易燃或有毒介质，且  $pV \geq 0.5 \text{MPa} \cdot \text{m}^3$  的中压反应器和  $pV \geq 10 \text{MPa} \cdot \text{m}^3$  的中压储运器；高压、中压管壳式余热锅炉。

除上述常见的分类外，还可按工艺用途、制造方法来分类。

## 四、化工设备的基本要求

化工生产具有生产过程复杂，工艺条件苛刻，介质具有易燃、易爆、有毒、腐蚀性强、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

化工设备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。机械制造人员所提供的设备从结构形式和性能特点应能在指定的生产条件下完成指定的生产任务。所以化工设备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，化工设备发生的事故相当频繁，而且事故的危害性极大，尤其是对环境的破坏。为了保证其安全运行，防止事故发生，世界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指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（稳定性）、密封性、耐久性、耐腐蚀性等多个方面。

### 3. 经济合理性要求

化工设备在满足工艺要求和保证安全可靠运行的前提下，应尽量做到经济合理。从选材、设计、制造、安装等方面减少费用。不仅要降低设备本身的成本，还要考虑操作、维护、修理费用，能源及动力的消耗等。

## 第二节 化工设备常用材料

材料是构成化工设备的物质基础，化工生产工艺的复杂性决定了化工设备选材的广泛性，但使用最多的还是各种钢材。

### 一、对压力容器用钢的基本要求

压力容器用钢首先应有足够的强度以满足压力载荷的需要，若强度过低会使容器壁过厚而显得粗笨且使制造安装不便；其次，容器在制造中是用冷卷、热冲压成型工艺和焊接连接的，要求材料应有良好的塑性和焊接性；为防止因缺陷形成应力集中，要求材料有良好的韧性；在交变载荷作用下具有抗疲劳破坏的能力，并能抵抗化工生产介质的腐蚀。

综上所述，对压力容器用钢的基本要求是：较高的强度，良好的塑性、韧性，良好的焊接性、抗疲劳能力和耐腐蚀性。

### 二、常用钢材的基本介绍

#### （一）钢材种类

压力容器用钢数量最多的是钢板，现就 GB 150—1998《钢制压力容器》中允许选用的钢板简要介绍如下。

### 1. 碳素结构钢钢板

在压力容器中可供选用的碳素结构钢钢板的牌号有 Q235-A·F、Q235-A、Q235-B、Q235-C。这属于一般用途的碳素结构钢而非压力容器专用钢，但由于其轧制技术成熟，质量稳定，价格较低，在限定的条件下是可靠的，所以在规定的条件下可用于压力容器。

### 2. 压力容器用碳素钢和低合金钢钢板

这类钢板是按 GB 6654—1996《压力容器用钢板》生产的，是一般的压力容器专用钢板，包括 20R、16MnR、15MnVR、18MnMoNbR、13MnNiMoNbR 及未列入 GB 6654—1996 而被纳入 GB 150—1998 的 07MnCrMoVR 等七个钢号。与普通碳素钢比，具有高强度、高韧性和良好的可焊性，广泛用于各种塔器、换热器、容器、储槽和管道等。

### 3. 低温压力容器用低合金钢钢板

低温容器的壳体应选用耐低温的钢板，如 16MnDR、15MnNiDR、09Mn2DR、09MnNiDR 等。具有足够的强度、韧性指标和低温力学性能，主要用于制冷、空分和加氢设备等。

### 4. 不锈钢钢板

这类钢板在空气、酸、水及其他强腐蚀性的介质中耐腐蚀或者在高温时抗氧化抗蠕变。其价格约为碳钢的 10 倍，一般不宜采用。不锈钢大部分用作设备衬里和内件或者与碳钢组成复合钢板制作容器。

#### (二) 常用钢板名义厚度

碳素钢和低合金钢钢板有：

3, 4, 5, 6, 8, 10, …, (以 2 递进) …, 60 (单位为 mm)。厚度 60mm 以上依据钢板需要和供货情况而定。

高合金钢钢板有：

2, 3, 4, …, (以 1 递进) …, 20 (单位为 mm)。厚度 20mm 以上钢板依据需要和供货情况而定。

# 第一章 薄壁容器基础知识

## 第一节 内压薄壁容器

### 一、内压薄壁圆筒的强度计算

#### 1. 受力与变形

图 1-1(a) 所示为一圆筒形容器，筒体的平均直径为  $D$ ，厚度为  $\delta_0$ ，内部介质压力为  $p$  (大于筒体外部压力)，筒身为长  $l$ 。现分析薄壁筒体在介质压力作用下的受力与变形。

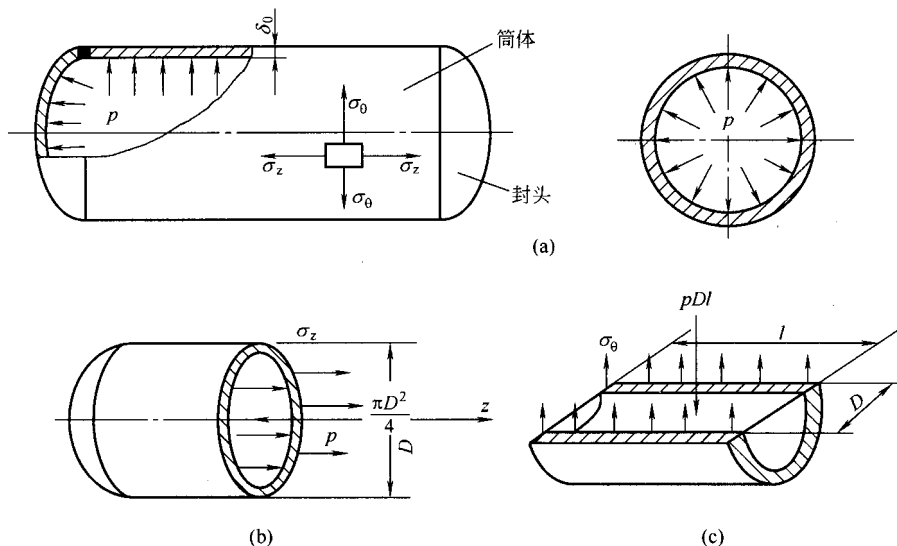


图 1-1 筒体的受力分析

由截面法分析得知，薄壁筒体在内压作用下，筒壁的轴向和环向都将受到拉伸，因而在横截面上存在轴向拉伸应力，用  $\sigma_z$  表示，如图 1-1(b) 所示；在纵截面上存在环向拉伸应力，用  $\sigma_\theta$  表示，如图 1-1(c) 所示，根据对称关系，内压力  $p$  在筒体的纵横截面上不会引起剪应力，只会产生轴向应力  $\sigma_z$  和环向应力  $\sigma_\theta$ ，即薄壁筒体处于两向应力状态。由于薄壁筒体厚度  $\delta_0$  远远小于直径  $D$ ，可以假设  $\sigma_z$  和  $\sigma_\theta$  沿厚度均匀分布。

#### 2. 应力计算

筒体内轴向应力 ( $\sigma_z$ ) 和环向应力 ( $\sigma_\theta$ ) 的数值，可用截面法求出。

(1) 计算轴向应力 假想用一垂直于轴线的平面将筒体截开，如图 1-1(b) 所示，内压  $p$  的轴向合力为  $p \frac{\pi D^2}{4}$ ，截面上的内力 (轴向应力  $\sigma_z$  的合力) 为  $\pi D \delta_0 \sigma_z$ ，根据静平衡条件  $\sum p_z = 0$ ，即

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

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

(2) 环向应力计算 假想用一过轴线的平面将筒体截开, 如图 1-1(c) 所示, 并取长度为  $l$  的一段进行受力分析。内压  $p$  的合力为  $pDl$ , 截面上的内力 (环向应力  $\sigma_\theta$  的合力) 为  $2\delta_0 l \sigma_\theta$ , 根据静平衡条件  $\sum p_\theta = 0$ , 即

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

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

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两倍, 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. 强度计算公式

由于筒体的环向应力较大, 因此, 对强度起决定作用的是环向应力  $\sigma_\theta$ , 所以筒体内产生的环向应力应小于或等于材料的许用应力, 其强度条件为

$$\sigma_\theta = \frac{pD}{2\delta_0} \leq [\sigma]' \quad (1-3)$$

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, 使得接头处强度低于母材的强度, 故引入焊接接头系数  $\phi$  ( $\phi \leq 1$ ) 补偿接头对强度的影响, 即接头处的许用应力为  $[\sigma]'\phi$ 。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

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

整理后得计算厚度为

$$\delta_0 = \frac{pD_i}{2[\sigma]'\phi - p}$$

考虑到化工生产中许多介质有腐蚀性, 钢板厚度的不均匀和制造过程的损耗等, 上式的计算厚度还必须增加一个厚度附加量  $C$ , 于是内压容器的厚度计算公式应为  $\delta = \delta_0 + C$ , 即

$$\delta = \frac{pD_i}{2[\sigma]'\phi - p} + C \quad (1-4)$$

式中  $p$ ——设计压力, MPa; 是指设定的容器顶部的最高压力, 其值不得小于工作压力, 具体取值按表 1-1 选取;

$D_i$ ——圆筒的内直径, mm;

$[\sigma]'$ ——材料在设计温度下的许用应力, MPa;

$\phi$ ——焊接接头系数, 按表 1-2 选取;

$C$ ——厚度附加量, mm。

厚度附加量按以下公式确定

$$C=C_1+C_2+C_3$$

其中  $C_1$  表示钢板厚度负偏差, 查表 1-3、表 1-4。当钢板厚度大于 60~100mm 时钢板厚度负偏差取 1.5mm, 当钢板厚度负偏差小于 0.25mm 且不超过钢板标准规格厚度的 6% 时, 可取  $C_1=0$ ;  $C_2$  为腐蚀裕量, 对于碳素钢和低合金钢, 当介质为空气、水和水蒸气时取  $C_2$  不小于 1mm, 对于不锈钢当介质的腐蚀性极微小时  $C_2$  等于 0, 具体可参考表 1-5;  $C_3$  为加工减薄量, 筒体采用冷加工方法制造, 取  $C_3=0$ , 封头  $C_3$  的取值见表 1-6。

表 1-1 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
使用爆破片作为安全漏放装置	取防爆片的爆破压力
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 1-2 焊接接头系数确定

焊接接头形式	焊接接头系数		
	全部无损探伤	局部无损探伤	不作无损探伤
双面焊的对接接头	1.0	0.85	0.7
单面焊的对接焊接接头, 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 1-3 薄钢板厚度负偏差  $C_1$

mm

名义厚度 $\delta_n$	2	2.2	2.5	2.8~3.0	3.2~3.5	3.8~4.0
厚度负偏差 $C_1$	0.18	0.19	0.20	0.22	0.25	0.30

表 1-4 厚钢板厚度负偏差  $C_1$

mm

名义厚度 $\delta_n$	4.5~5.5	6~7	8~25	26~30	32~34	36~40	42~50	52~60
厚度负偏差 $C_1$	0.5	0.6	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3

表 1-5 腐蚀裕量的选取  $C_2$

mm

容器类别	碳素钢 低合金钢	铬钼 钢	不锈 钢	备注	容器类别	碳素钢 低合金钢	铬钼 钢	不锈 钢	备注
塔器及反应器壳体	3	2	0		不可拆内件	3	1	0	包括双面
容器壳体	1.5	1	0		可拆内件	2	1	0	包括双面
换热器壳体	1.5	1	0		裙座	1	1	0	包括双面
热衬里容器壳体	1.5	1	0						



表 1-6 冲压成型封头的厚度拉伸减薄量  $C_3$

mm

封头形式	封头图样厚度	拉伸减薄量
椭圆形、碟形、折边锥形	$\leq 40$	$0.11(\delta_0 + C_2)$
	$> 40$	$0.15(\delta_0 + C_2)$
球形	所有厚度	$0.18(\delta_0 + C_2)$

## 二、内压球形容容器

化工设备中的球罐以及其他压力容器中的球形封头，都属于球形壳体。球形壳体的特点

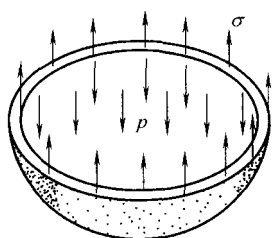


图 1-2 球壳的受力分析

是中心对称，且各处的应力均相同，即轴向应力与环向应力相等，故没有“轴向”与“环向”之分。因此，球形壳壁上的应力值同样可以用截面法求出。如图 1-2 所示，用通过球心的平面把球形壳体截成两半，球形壳体在内压力  $p$  的作用下，产生垂直于截面的总外力为  $p \frac{\pi}{4} D^2$ 。这个总外力有使壳体两半分开的趋势，因此在壳体截面上产生拉应力  $\sigma$ ，而整个截面上的总内力为  $\sigma \pi D \delta_0$ 。

上述两个力为平衡状态，即

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

故

$$\sigma = \frac{pD}{4\delta_0}$$

根据强度条件，同理可得

$$\delta_0 = \frac{pD_i}{4[\sigma]'\phi - p}$$

考虑实际应用时的具体情况，内压球壳的厚度计算公式为

$$\delta = \frac{pD_i}{4[\sigma]'\phi - p} + C \tag{1-5}$$

式中各符号与式(1-4)意义相同。

将式(1-5)与式(1-4)比较，可以看出，在同样直径，同样压力的情况下，球形壳壁的厚度仅是圆筒形壳体壁厚的一半；在相同的容积下，球形壳体表面积最小，故采用球形容器可以节省不少金属材料，因此球形容器得到广泛应用，一般多用来储存氧气、石油液化气、乙烯、氨、天然气等。但是球形容器在加工制造方面较麻烦，需要分瓣冲压后再焊接。图 1-3 所示的球形储罐主要用于压力较高的气体或液体的储存。随着设计、制造水平的不断提高，目前高压设备也有采用球形的。

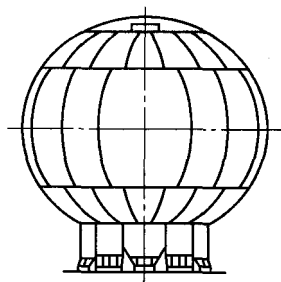


图 1-3 球形储罐

## 三、容器厚度的确定

### 1. 最小厚度 $\delta_{\min}$

工作压力很低的容器，按强度公式计算的厚度往往是很小的，壳体很容易变形，不能满