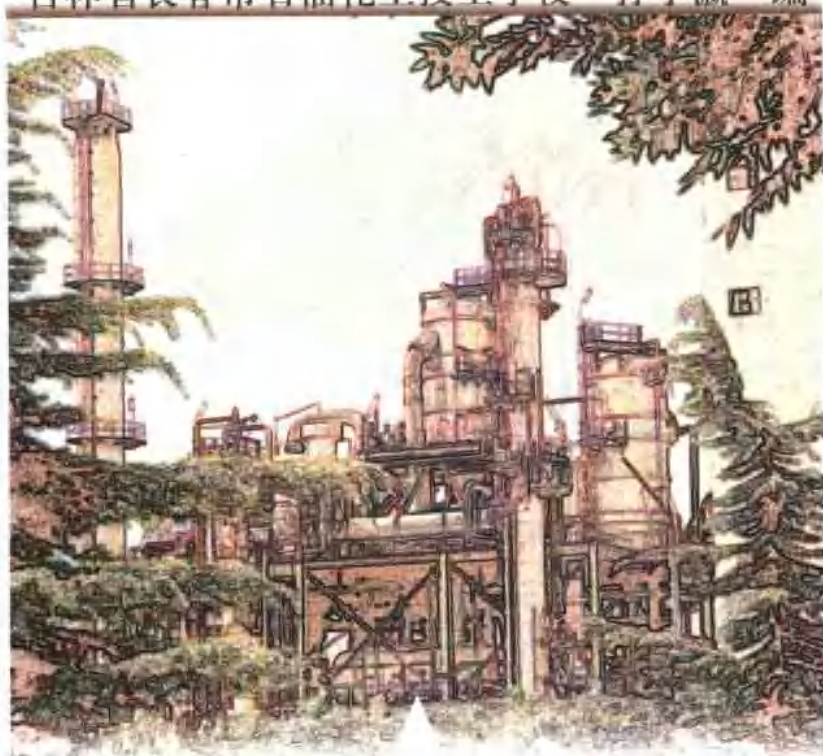




全国技工学校教材
劳动保障部培训就业司认定

化工设备

吉林省长春市石油化工技工学校 孙季瀛 编



05-43
28

化学工业出版社
教材出版中心



全国技工学校教材
劳动和社会保障部培训就业司认定

化 工 设 备

吉林省长春市石油化工技工学校 孙季瀛 编

化学工业出版社
教材出版中心
· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

化工设备/孙季瀛编. —北京: 化学工业出版社,
2000. 6

全国技工学校教材

ISBN 7-5025-2668-4

I. 化… II. 孙… III. 化工设备-技工学校-教材
IV. TQ05

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 21599 号

全国技工学校教材

劳动和社会保障部培训就业司认定

化 工 设 备

吉林省长春市石油化工技工学校 孙季瀛 编

责任编辑: 孙世斌

责任校对: 陶燕华

封面设计: 郑小红

*

化学工业出版社
教材出版中心

出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市彩桥印刷厂印装

开本 787mm × 1092mm 1/16 印张 9¼ 字数 238 千字

2000 年 6 月第 1 版 2005 年 3 月北京第 2 次印刷

ISBN 7-5025-2668-4/G · 699

定 价: 16.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

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
第一章 薄壁容器及附件基础知识	3
第一节 概述	3
第二节 内压薄壁容器	8
第三节 内压封头型式的选用与计算	13
第四节 外压容器简介	17
第五节 容器附件	20
第六节 压力试验与致密性试验	36
第七节 压力容器的维护和检修	38
思考题及习题	44
第二章 高压容器	46
第一节 概述	46
第二节 高压容器的零部件	51
第三节 高压容器的密封	55
第四节 高压容器的维修要点	60
思考题	61
第三章 换热器及传热基础知识	62
第一节 概述	62
第二节 传热基础知识	63
第三节 列管式换热器	66
第四节 其他型式换热器	80
第五节 列管式换热器的维护检修	85
思考题	87
第四章 塔设备及传质基础知识	89
第一节 概述	89
第二节 传质基础知识	89
第三节 填料塔	90
第四节 板式塔	99
第五节 塔设备维护与检修	112
思考题	117
第五章 釜式反应器	118
第一节 概述	118
第二节 釜式反应器	119
第三节 釜式反应器的维修	125
思考题	128

第六章 化工设备的腐蚀与防护	129
第一节 概述.....	129
第二节 常用材料的耐蚀特性.....	131
第三节 化工设备的防腐.....	135
思考题.....	137
附录	138
一、钢板的许用应力.....	138
二、各类法兰的公称直径和公称压力级别.....	139
三、甲型平焊法兰尺寸表 (JB 4701—92)	140
四、乙型平焊法兰尺寸表 (JB 4702—92)	140
五、长颈对焊法兰尺寸表 (JB 4703—92)	140
六、甲、乙型法兰的最大允许工作压力.....	141
七、长颈法兰的最大允许工作压力.....	142
八、法兰类型、密封面型式和公称直径.....	143
九、法兰、垫片、紧固件选配表.....	144
十、按介质选用耐腐蚀金属材料表.....	145
主要参考文献	149

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、化学反应和物料贮存等方面。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贮运设备(如贮槽、球罐、槽车等)、反应设备(如釜式反应器、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)等等。

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、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。60 年代,国内化工生产逐步实现了设备大型化。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、30m³ 聚合釜、内径 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。90 年代化工设备工业发展速度更加迅猛,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,我们坚信化工设备工业以适应现代化学工业生产的需要必将飞速发展。

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《化工设备》课，必须有正确的学习方法。

(1) 在《化工设备》的学习中，常常要与许多基础理论知识相联系，涉及的知识面比较广。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过的知识，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

化工生产中所用的设备虽然大小不一,形状各异,内部构件千差万别,但是,它们都有一个外壳,这个外部壳体统称为容器。它们一般是轴对称的,容器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,压力容器必须同时具备下列三个条件:

- ① 最高工作压力大于或等于 0.1MPa (不含液体静压力);
- ② 内直径(非圆形截面指断面最大尺寸)大于等于 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

(一) 压力容器的组成

化工厂中常用的中低压容器大多是圆筒形容器,如图 1-1 所示。它是由壳体(筒体)、封头(端盖)、法兰、支座、接口管及人孔、手孔、视镜等组成,这些统称为化工设备通用零部件。

(二) 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

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。

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

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

中压容器(代号 M) $1.6 \leq p < 10\text{MPa}$;

高压容器(代号 H) $10 \leq p < 100\text{MPa}$;

超高压容器(代号 U) $p \geq 100\text{MPa}$ 。

3. 按容器壁厚分

薄壁容器 是指器壁的厚度小于容器内径的 $\frac{1}{10}$ 者,即 $K = \frac{D_o}{D_i} < 1.2$ 。

厚壁容器 是指器壁的厚度大于等于容器内径的 $\frac{1}{10}$ 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

常温容器 $-20^\circ\text{C} < t < 300^\circ\text{C}$

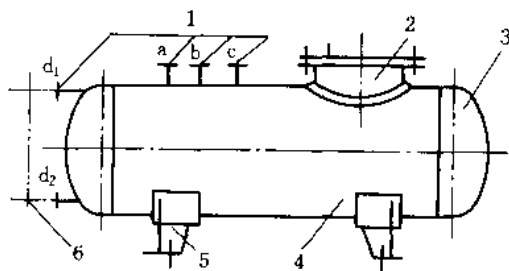


图 1-1 容器的结构

1—接管; 2—人孔; 3—封头; 4—筒体;
5—支座; 6—液面计

高温容器 $t \geq 300^{\circ}\text{C}$

低温容器 $t \leq -20^{\circ}\text{C}$

超低温容器 $t < -50^{\circ}\text{C}$

5. 根据劳动部 1990 年颁发的《压力容器安全技术监察规程》的规定分

一类容器为下列情况之一者：非易燃或无毒介质的低压容器；易燃或有毒介质的低压分离容器和换热器。

二类容器为下列情况之一者：中压容器；剧毒介质的低压容器；易燃或有毒介质的低压反应器和贮运器；内径小于 1m 的低压废热锅炉；搪玻璃压力容器。

三类容器为下列情况之一者：高压超高压容器；剧毒介质 $p \cdot V$ （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 $p \cdot V \geq 0.5\text{MPa} \cdot \text{m}^3$ 的中压反应器和 $p \cdot V \geq 10\text{MPa} \cdot \text{m}^3$ 的中压贮运器；高压、中压管壳式余热锅炉。

除上述常见的分类方法外，还可按材料和制造方法及工艺用途等进行分类。

二、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常用的钢材。

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 用于制造压力容器的壳体和封头等。

低合金钢 其所含合金总量不超过 2.5%，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、贮槽和管道等。

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机械性能，以防脆性破裂造成严重事故。

不锈钢 主要指在空气、酸、水及其他强腐蚀性的介质中耐腐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）机械性能也很好，但其价格约为碳钢的 20 倍，一般不宜采用。不锈钢大部分用做设备衬里和内件或者与碳钢组成复合钢板制作容器。

（一）钢材选用原则

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，如机械性能、物理性能和化学性能，以及材料价格、制造费用和使用寿命。

在选用时还应考虑国家标准 GB 150—89^① 中相应的有关规定和要求，如附加要求的力学性能试验项目、质量检验要求等。还应注意到中、高温、低温及腐蚀条件下材料可能出现的问题。如碳素钢、碳锰钢在高于 425℃ 温度下长期使用时，易出现石墨化倾向；低温下某些材料会出现低应力脆断；奥氏体不锈钢在某些特定条件下发生晶间腐蚀；这些均可能导致容器失效。

表 1-1～表 1-3 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必须遵循的基本规定。

（二）常用钢板名义厚度

碳素钢和低合金钢有：

3, 4, 4.5, 6, 8, 10, …, (以 2 递进) …, 60mm。厚度 60mm 以上依据钢板需要和供货情况而定。

^① 编者注：现已有 GB 150—1998 代替。

表 1-1 碳素钢板

钢 号	钢板标准	使用状态	厚 度 mm	适 用 范 围 (注)			推荐的焊接材料			弹性模量 (按 GB 150 表 15)	平均线胀 系数 (按 GB 150 表 16)
				容器设计 压力 MPa	钢板使用 温度 °C	用作壳体 厚度 mm	容 器 盛装介质	手弧焊 焊条型号 (对应牌号示例)	埋 弧 焊 焊丝型号 (对应牌号示例)		
Q235-A, F (A3F, AY3F)	GB 912	热轧	3~4	<0.6	0~250	<12	非易燃 轻度危害 (Ⅳ级)毒性	E4303(J422)	H08 H08Mn	碳素钢 (C<0.30%)	碳素钢
	GB 3274		4.5~16								
Q235-A (A3, AY3)	GB 912	热轧	3~4	<1.0	0~350	<16	非石油液化气、 轻度(Ⅲ级)中度 (Ⅳ级)危害毒性	E4303(J422)	H08 H08Mn	碳素钢 (C<0.30%)	碳素钢
	GB 3274		4.5~40								
Q235-B	GB 912	热轧	3~4	<1.6	0~350	<20	轻度(Ⅳ级)、 中度(Ⅲ级) 危害毒性	E4303(J422)	H08 H08Mn	碳素钢 (C<0.30%)	碳素钢
	GB 3274		4.5~40								
Q235-C	GB 912	热轧	3~4	<2.5	0~350	<32		E4303(J422)	H08 H08Mn	碳素钢 (C<0.30%)	碳素钢
	GB 3274		4.5~40								
20R	GB 6654	热轧或 正火	6~100	-20~475	-20~475			E4316(J426) E4315(J426)	H08A H08MnA	碳素钢 (C<0.30%)	碳素钢
	YB(T)40		6~100								

表 1-2 低合金钢板

钢 号	钢板标准	使用状态	厚 度 mm	使用温度 °C	推荐的焊接材料(GB/T 4709)			弹性模量 (按 GB 150 表 15)	平均线胀系数 (按 GB 150 表 16)
					手弧焊 焊条型号(对应牌号示例)	埋 弧 焊 焊丝型号(对应牌号示例)	埋 弧 焊 焊剂型号(对应牌号示例)		
16MnR	GB 6654 YB(T)40	热轧或正火	6~100	-20~475	E5003(J502)	H10Mn2	HJ402-H10M2(HJ350)	碳锰钢	
16MnRC	GB 5681	热 轧	4	-20~400	E5016(J506)	H10MnSi	HJ401-H08A(HJ431)		
15MnVR	GB 6655	热 轧	6~8	-20~475	E5015(J507)	H10Mn2	HJ402-H10Mn2(HJ350)		
15MnVRC	GB 6654 YB(T)40	热轧或正火	6~60	>-20~475	E5016(J506)	H10MnSi	HJ401-H08A(HJ431)		
15MnVRC	GB 6655	热 轧	6~8	>-20~475	E5015(J507)	H10Mn2	HJ402-H10Mn2(HJ350)		
15MnVNR	GB 6654 YB(T)40	正 火	17~60	>-20~475	E6015-G(J557)	H08MnMoA	HJ401-H08A(HJ431)		
15MnVNR	GB 6655	热 轧	6~8	>-20~475	E6016-D1(J606)	H08MnMoA	HJ402-H10Mn2(HJ350)		
15MnVNR	GB 6654 YB(T)40	正 火	17~60	>-20~475	E6015-D1(J607)	H08MnMoA	HJ401-H08A(HJ431)		
15MnVNR	GB 6655	热 轧	6~8	>-20~475	E6016-D1(J606)	H08MnMoA	HJ402-H10Mn2(HJ350)		
15MnVNR	GB 6654 YB(T)40	正 火	17~60	>-20~475	E6015-D1(J607)	H08MnMoA	HJ401-H08A(HJ431)		
18MnMoNbR	GB 150, A2.2 条	正火+回火	30~100	>-20~525	E7015-D2(J707)	H08Mn2MoA	— (HJ250G)		
13MnNiMoNbR	GB 150, A2.2 条	正火+回火	50~125	>-20~500	E7015-D2(J707)	H08Mn2MoA	— (HJ250G)		

续表

钢 号	钢板标准	使用状态	厚度 mm	使用温度 ℃	推荐的焊接材料(GB/T4709)			弹性模量 (按 GB 150 表 15)	平均线胀系数 (按 GB 150 表 16)
					手弧焊 焊条型号(对应牌号示例)	焊丝钢号	埋 弧 焊 焊剂型号(焊剂牌号示例)		
16MnDR	GB 3531	正 火	6~32	-40~100	E5016-G(J506RH)	—	—	碳锰钢	
09Mn2NbDR			34~50	-30~100	E5015-G(J507RH)	—	—		
06MnNbDR			6~32	-70~100	E5515-C1(W707Ni)	—	—		
15Cr-MoR (1Cr-0.5Mo)	GB 150	正 火	6~16	-70~100	E5515C2(W907Ni)	—	—	低铬铝钢	
12Cr2Mo1R	A2.3 条	调 质	6~30	-20~550	E5515-B2(R307)	—	—		
(2.25Cr-1Mo)	GB 150	退火或回火 正火+回火	6~100 6~150	>-20~575	E6015-B3(R407)	—	—		

表 1-3 高合金钢板

钢 号	钢板标准	对应的 美国钢材 类 型	使用状态	使用温度 ℃	推荐的焊接材料			弹性模量 (按 GB 150 表 15)	平均线胀系数 (按 GB 150 表 16)
					手弧焊 焊条型号(对应牌号示例)	焊丝钢号	埋 弧 焊 焊剂型号(焊剂牌号示例)		
0Cr13	GB 4237	410S	退火	>-20~500	E1-13-16(G202)	—	—	高铬钢	
0Cr19Ni9		304	固溶	-196~700	E0-19-10-16(A102) E0-19-10-15(A107)	—	—		
0Cr18Ni11Ti	GB 4237 不锈钢 热轧钢板	321	固溶或 稳定化		E0-19-10Nb-16(A132) E0-19-10Nb-15(A137)	—	—	奥氏体钢	
0Cr17Ni12Mo2	GB 4238 耐热钢板	361	固溶		E0-18-12Mo2-16(A202) E0-19-12Mo2-15(A207)	H00Cr19 Ni12Mo2	HJ260		
0Cr19Ni13Mo3		317			E0-19-13Mo3-16(A242)	—	—		
00Cr19Ni11	GB 4237	304L		-196~425	E00-19-10-16(A002)	—	—	奥氏体钢	
00Cr17Ni14Mo2		316L		-196~450	E00-18-12Mo2-16(A022)	H00Cr20 Ni14Mo3	HJ260		
00Cr19Ni13Mo3		317L			E00-19-13Mo3-16	—	—		

高合金钢板有：

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

表 1-4 为螺栓螺母选用表。

为避免螺栓与螺母‘咬死’，螺栓用材料的硬度应比螺母稍高，一般约高出 HBS30 为宜。

表 1-4 螺栓和螺母的组合

螺栓 钢材标准	螺栓钢材 使用状态	螺栓用钢	螺母用钢	螺母 钢材标准	使用温度 范围/℃
GB 700	热轧	Q235—A (A3, AY3)	Q215—A (A2, AY2) Q235—A (A3, AY3)	GB 700	>0~300
GB 799	正火	35	Q235—A (A3, AY3)	GB 700	>-20~300
			15	GB 699	>-20~350
GB 3077	调质	40MnB, 40MnVB, 40Cr	35, 40Mn, 45	GB 699	>-20~400
		30CrMoA	30CrMoA	GB 3077	-100~500
		35CrMoVA	40Mn, 45	GB 699	>-20~400
			30CrMoA, 35CrMoA	GB 3077	-100~500
		35CrMoA	35CrMoA, 35CrMoVA	GB 3077	>-20~500
		25Cr2MoVA	30CrMoA	GB 3077	>-20~500
			25Cr2MoVA	GB 3077	>-20~550
		1Cr5Mo	1Cr5Mo	GB 1221	>-20~600
GB 1221					
GB 1220		2Cr13	1Cr13, 2Cr13	GB 1220	>-20~450
		0Cr19Ni9	25Cr2MoVA	GB 3077	>-20~550
			0Cr19Ni9	GB 1220	-196~750
		0Cr17Ni12Mo2	0Cr17Ni12Mo2	GB 1220	-196~700

注：表中列出的适用范围是标准所允许的材料使用条件，并不意味着该条件范围内任意材料都是合理的，选用材料时还应根据容器的具体设计条件和 GB 150—89 第 2 章的规定提出钢材的使用状态，附加要求的力学性能试验，质量检验要求，还应注意到高温、低温、腐蚀条件下材料可能出现的问题。

三、压力容器零部件的标准化

压力容器零部件已经标准化，这样即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。

公称直径 是将压力容器的直径加以标准化以后的标准直径，用“DN”表示。容器的公称直径是它的内径，见表 1-5 所示。管子的公称直径即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。采用无缝钢管制做筒体时其外径为公称直径，可按表 1-6 选取。

公称压力 是为了设计、制造和使用方便而人为地规定一个标准压力，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 0.25、0.6、1.0、1.6、2.5、4.0、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 1-7 所示。

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						

表 1-6 无缝钢管制筒体的公称直径 DN/mm

159	219	273	325	377	426
-----	-----	-----	-----	-----	-----

表 1-7 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

化工生产的特殊性要求压力容器一要满足化工工艺要求，二要安全可靠，结构合理。应

(1) 强度 压力容器所有零部件都应有足够的强度，以保证化工生产的安全运行。

(2) 刚度 压力容器要求有足够的刚度和稳定性。

(3) 耐久性 压力容器的耐久性要求有足够的耐蚀性、耐疲劳、耐蠕变及抗断裂等性能。

(4) 密封性 在使用、安装和检修中应密切关注压力容器的密封，防止泄漏。

(5) 制造、操作和运输要方便 在保证压力容器安全可靠的前提下，应尽可能减少贵重材料的消耗，尽量降低维护操作费用。

第二节 内压薄壁容器

一、内压薄壁圆筒

(一) 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。

由截面法得知，薄壁筒体存在两向应力状态，根据对称关系，内压力 p 在筒体的纵横截

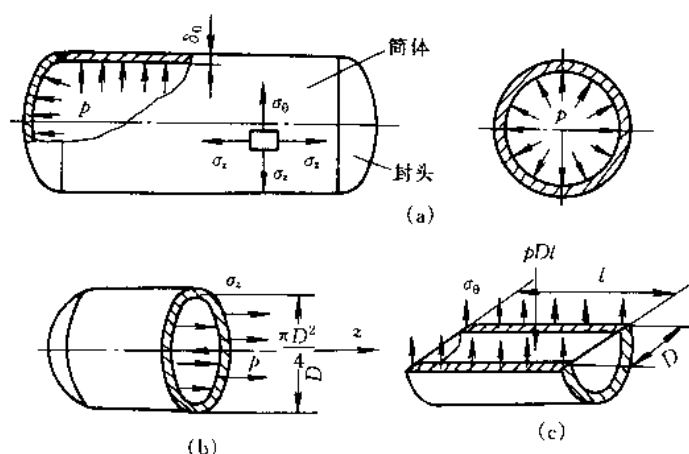


图 1-2 筒体的应力分析

面上不会引起剪应力的, 只会产生轴向应力 σ_z 和环向应力 σ_θ 如图 1-2 (a) 所示。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。筒体在内压作用下, 在纵向, 由于纵向拉力, 产生拉伸变形, 故在横截面上存在轴向应力 σ_z , 如图 1-2 (b) 所示; 在横向, 由于横向拉力筒体直径将要增大, 故在纵截面上存在环向应力 σ_θ , 如图 1-2 (c) 所示。

(二) 应力计算

1. 轴向应力计算

筒体内 σ_z 和 σ_θ 的数值, 可用截面法求出。图 1-2 (b) 表示内压 p 的轴向合力为 $p \cdot \frac{\pi D^2}{4}$, 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 $\sum P_z = 0$,

$$\begin{aligned} \text{故} \quad & \pi D \delta_0 \sigma_z - p \frac{\pi D^2}{4} = 0 \\ \text{得} \quad & \sigma_z = \frac{pD}{4\delta_0} \end{aligned} \quad (1-1)$$

2. 环向应力计算

图 1-2 (c) 表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 p 的合力为 pDl , 截面上的内力 (环向应力 σ_θ 的合力) 为 $2\delta_0 l \sigma_\theta$, 根据静平衡条件 $\sum P_\theta = 0$,

$$\begin{aligned} & 2\delta_0 l \sigma_\theta - pDl = 0 \\ \text{得} \quad & \sigma_\theta = \frac{pD}{2\delta_0} \end{aligned} \quad (1-2)$$

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, 因圆筒在制做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, $\frac{\delta_0}{D}$ 值的大小反映了筒体的承压能力。参见 $\sigma_z = \frac{p}{4\delta_0/D}$ $\sigma_\theta = \frac{p}{2\delta_0/D}$

(三) 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, 所以筒体的强度条件为

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

即筒壁内产生的环向应力小于或等于材料的许用应力, 才能保证容器安全可靠。上式是在理想状态下的强度计算公式, 而实际应用时还应考虑以下几种具体情况。

① 筒体除了用无缝钢管制造外, 一般均由钢板卷焊而成。考虑到焊缝质量, 故将钢板的许用应力乘以一个小于或等于 1 的焊接接头系数 φ , 那么焊接接头处金属的许用应力为 $[\sigma]\varphi$, 代入式 (1-3) 得

$$\frac{pD}{2\delta_0} \leq [\sigma]\varphi$$

② 一般由工艺条件确定的是筒体内径 D_i , 将 $D = D_i + \delta_0$ 代入式 (1-3) 得,

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

经整理得:

$$\delta_0 = \frac{pD_i}{2[\sigma]^t\varphi - p}$$

③ 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

$$\delta = \delta_0 + C$$

$$\text{即} \quad \delta = \frac{pD_i}{2[\sigma]^t\varphi - p} + C \quad (1-4)$$

式中 D_i ——筒体内径, mm;

p ——设计压力, MPa; 是指设定的容器顶部的最高压力, 与相应设计温度下用以确定容器厚度的压力, 也是标在铭牌上容器的设计压力, 其值不得小于工作压力, 具体取值见表 1-8;

$[\sigma]^t$ ——设计温度下筒体材料的许用应力, MPa;

φ ——焊接接头系数; 选取时主要考虑两方面的因素, 一是受压部分的焊缝位置, 二是无损探伤检验的要求, φ 值按表 1-9 选取;

t ——设计温度, $^{\circ}\text{C}$; 是指容器在正常工作过程中, 设定的受压筒体壁的金属温度, 即标在铭牌上的设计温度;

C ——厚度附加量, mm; 是按以下公式确定: $C = C_1 + C_2 + C_3$ (其中 C_1 表示钢板或钢管负偏差, 查表 1-10、表 1-11。当钢板厚度大于 60~100mm 的钢板厚度负偏差取 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; C_3 为加工减薄量, 筒体采用冷加工方法制造时, 取 $C_3 = 0$ 。封头 C_3 的取值见表 1-12)。

表 1-8 设计压力

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, 容器顶可能达到的最高压力。

表 1-9 焊接接头系数

焊 接 接 头 型 式	焊接接头系数 φ		
	全部无损探伤	局部无损探伤	不作无损探伤
双面焊的对接焊接接头	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
单面焊的对接焊接接头, 无垫板	—	0.7	0.6

表 1-10 钢板负偏差 C_1/mm

钢板厚度	2.8~3.0	3.2~3.5	3.8~4.0	4.5~5.5	6~7	8~25	26~30	32~34	36~40	42~50	52~60
负偏差	0.22	0.25	0.3	0.5	0.6	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3

表 1-11 钢管负偏差 C_1/mm

钢管种类	壁厚/mm	负偏差%	钢管种类	壁厚/mm	负偏差%
碳素钢	≤ 20	15	不锈钢	≤ 10	15
低合金钢	> 20	12.5		$> 10 \sim 25$	20

表 1-12 冲压成型封头的厚度拉伸减薄量 C_2 值

封头型式	封头图样厚度/mm	拉伸减薄量/mm
椭圆形、碟形、折边锥形	≤ 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 1-3 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 σ ，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

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

所以

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

为使球形壳体安全可靠应满足的强度条件为

$$\frac{pD}{4\delta_0} \leq [\sigma]$$

考虑实际应用时的具体情况，内压球壳的厚度计算公式为

$$\delta = \frac{pD_i}{4[\sigma]\varphi - p} + C \quad (1-5)$$

把上式与式 (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，一般多用来贮存氧气、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

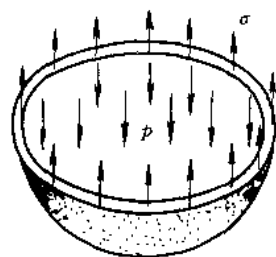


图 1-3 球壳的受力分析

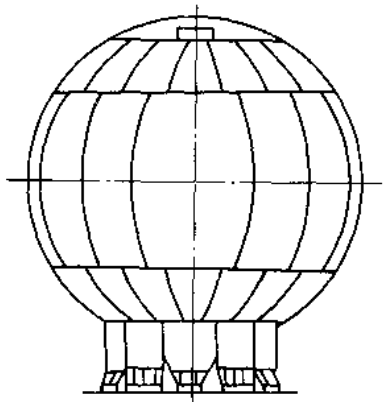


图 1-4 球形贮罐