



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

过程机械

上册

(过程容器及设备)

李志义 喻健良 刘志军 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

过程机械

上册

(过程容器及设备)

李志义 喻健良 刘志军 编著

图在版编目(CIP)数据

过程机械.上册:过程容器及设备/李志义,喻健良,刘志军编著.北京:化学工业出版社,2006.12
ISBN 978-7-122-01601-0
I. ①过… II. ①李…②喻…③刘… III. 过程机械—教材 IV. ①TQ02
中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第144821号

责任编辑: 王爱华

封面设计: 王爱华

责任校对: 王爱华

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区黄根大街16号 邮政编码100011)

印 刷: 大厂鑫鑫印务有限公司

装 订: 天津中德风装厂

787mm×1092mm 1/16 印张17.5 字数42.5千字 2006年12月第1版第1次印刷



化学工业出版社

·北京·

本书是将原化工机械与设备专业的化工容器、化工机器和化工设备三门专业课,按照调整后的过程装备与控制工程专业的需要进行整合后编写的一本专业教材,分上、下两册。上册为过程容器及设备,主要介绍压力容器的常规设计、压力容器的分析设计、高压容器设计、球形储罐设计,以及塔、搅拌反应器及换热器等一些典型设备的结构、选型及设计要点。下册为过程机器,主要介绍压缩机、风机、制冷机、泵、离心机等一些典型过程机器的原理、特性、选型及操作维护等。

本书尽量避免窄、专、深、偏,顾及专业知识的系统化和全面化,注重专业基本方法与技能。按层次对过程设备区别对待:对标准化的通用设备,重点介绍选型;对非标准定型设备,重点介绍结构及设计要点;对非标准非定型设备,重点介绍设计方法。对力学问题,不强调推导过程,重视其结果及应用。

本书既适宜作为将过程容器、过程设备及过程机器三方面内容整合后形成的专业课的教材成套选用,也适宜作为单独开设少学时的过程容器及设备专业课和/或过程机器专业课的教材分册选用。本书还适用于化工类专业作为教材或教学参考书选用,也适用于过程装备与控制工程专业及相关专业工程技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

过程机械.上册(过程容器及设备)/李志义,喻健良,刘志军编著. —北京:化学工业出版社,2008.1
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-122-01601-0

I. 过… II. ①李…②喻…③刘… III. ①化工过程-化工机械-高等学校-教材②化工过程-化工设备-高等学校-教材 IV. TQ051

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第184851号

责任编辑:程树珍 金玉连
责任校对:王素芹

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)

印刷:大厂聚鑫印刷有限责任公司

装订:三河市延风装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张17¼ 字数456千字 2008年2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:29.80元

版权所有 违者必究

前言

过程工业是指以改变流程性材料(如气体、液体和粉粒体等)的物理、化学性能为主要目标的加工业,它涵盖诸如化学、化工、石油化工、炼油、制药、食品、冶金等诸多工业门类 and 行业部门。过程工业通过一系列有机结合的工艺过程得以实现。这些工艺过程基本上可以分为物理过程和化学过程两大类,典型的有传质过程、传热过程、流动过程、反应过程、热力过程和机械过程等。

过程装备是实现过程工业生产的硬件设施。广义地讲,过程装备包括了过程装置(或称工艺装置)和辅助设施(如动力及其它公用工程设施等),但狭义上将其与过程装置同称。过程装置是由过程机械(亦称单元设备)和成套技术两部分组成的设备系统,前者是该系统的“硬件”,后者是其“软件”。过程机械可分为过程设备(或称静设备)和过程机器(或称动设备)两大类。在表述上,有时将过程设备(广义地)与过程机械同称,这时它包含了静设备和动设备。

过程工业的工艺过程是在各种各样的过程机械中实现的。过程机械的种类繁多,例如:进行传质过程的传质设备有蒸馏塔、吸收塔、解吸塔、萃取塔、干燥器、结晶器、膜分离器等;进行传热过程的传热设备有换热器、蒸发器、工业炉等;进行流动过程的流动设备有泵、压缩机、离心机、风机、过滤机、旋风分离器、沉淀槽、管道、阀门等;进行反应过程的反应设备有固定床反应器、流化床反应器、滴流床反应器、搅拌反应器、生化反应器、合成塔、裂解炉、反应釜等;进行热力过程的热力设备有冰机、冷冻机、锅炉、蒸汽机等;进行机械过程的机械设备有料仓、破碎机、造粒机、混料仓、分级机、流化床、皮带输送机等。在许多情况下,一台单元设备中同时进行着多种工艺过程。

《过程机械》是为适应“过程装备与控制工程”专业改造和教学改革而编写的。1998年,教育部对高等学校本科专业进行了调整,将原“化工机械与设备”(简称“化工机械”)专业调整为“过程装备与控制工程”,从而丰富了专业内涵,拓宽了专业范围与应用领域。因此,进行专业改造以适应专业调整,便成为设置有该专业的高等学校的当务之急。在教育部过程装备与控制工程专业教学指导分委员会的指导下,各相关高校针对调整后专业的培养目标、知识结构、课程体系及教学内容等,进行了积极的探索与实践。许多高校在专业改造和教学改革的实践中,为调整后的“过程装备与控制工程”专业逐步构筑了三大知识平台:以“工程力学”、“热力学”、“流体力学”和“粉体力学”为主体的理论基础平台;以“过程”、“机械”和“控制”为主线的技术基础平台;以“单元设备”、“成套技术”和“控制技术”为核心的专业知识平台。对“单元设备”进行了整合、重组与扩充,将原来的“化工容器”、“化工机器”和“化工设备”三门课程整合为一门“过程机械”。本教材就是为了适应这种课程整合,在多年教学实践的基础上编写而成的。

在编写本教材时,我们力图避免“窄”、“专”、“深”、“偏”,顾及专业知识的系统化和全面化,注重专业基本方法与技能,不搞“解剖麻雀”。将单元设备按层次分类,然后区别对待。对标准化通用设备,重点介绍选型;对非标准化定型设备,重点介绍结构及设计要点;对非标准化非定型设备,重点介绍设计方法。当涉及力学问题时,尽量采用实用的简化分析方法。对

于一些复杂的力学问题，一般只介绍求解思路，不作详细推导，重点放在结果的讨论及应用上。同时给出相应的参考文献，供进一步深入和扩充。这样，使得本教材既可适用于力学基础较扎实的读者使用，给他们留有扩展和深化知识的空间；也可适用于力学基础较弱者（如化工类本科生）使用，使他们能顺利逾越力学障碍。

基于上述编写思想，本教材不仅扩充了内容，而且压缩了学时。本教材分上、下两册：上册主要为过程容器及设备，下册主要为过程机器。这样既便于将“过程容器”、“过程设备”和“过程机器”三方面内容整合成一门“过程机械”课程的高校成套选用，也有利于单独开设少学时“过程容器及设备”和/或“过程机器”课程的高校分册选用。

本教材上册第1章~第4章由李志义编写，第5章由夏远景编写，第6章由刘学武编写，第7章由喻健良编写，第8章由喻健良、李岳编写，第9章由伊军编写；下册第10章~第13章由刘志军编写，第14章由史启才编写，第15章由刘凤霞编写。全书由李志义主编。本教材每章后附有思考题，引导学生巩固和深化教学内容。其中一些思考题是开放性和探索性的，引导学生在掌握本教材基本内容的同时，进行更深、更广泛的探讨。

许多本专业的优秀教材，如余国琮先生主编的《化工容器及设备》、王志文教授主编的《化工容器设计》、郑津洋教授主编的《过程设备设计》、高慎琴教授主编的《化工机器》、姜培正教授主编的《流体机械》等，对本教材的编写启发颇深，本教材学习和吸收了其中许多精华。在此，对这些作者表示诚挚的谢意。教育部过程装备与控制工程专业教学指导分委员会、大连理工大学教务处和大连理工大学化工机械系对本教材的编写和出版给予了大力支持，在此表示感谢。

由于水平有限，认识不深，本教材会有许多不尽如人意之处，请各位专家和学者不吝赐教。

编著者

2007年12月

于大连理工大学

目 录

(上册)	
1 压力容器设计概述	1
1.1 压力容器及其分类	1
1.1.1 压力容器及其构成	1
1.1.2 压力容器的分类	1
1.2 压力容器的设计要求	2
1.2.1 强度要求	2
1.2.2 刚度要求	3
1.2.3 使用寿命要求	3
1.2.4 结构要求	3
1.3 压力容器材料及选择	3
1.3.1 压力容器用钢	3
1.3.2 对压力容器用钢的要求	4
1.3.3 压力容器用钢的选择	5
1.4 压力容器规范简介	5
1.4.1 国外压力容器规范	6
1.4.2 中国压力容器规范	6
思考题	8
2 压力容器应力分析	10
2.1 中低压容器应力分析	10
2.1.1 压力容器的薄膜应力	10
2.1.2 压力容器的边缘应力	15
2.2 圆筒形高压容器应力分析	17
2.2.1 弹性应力分析	18
2.2.2 弹塑性应力分析	20
2.2.3 温差应力分析	22
2.2.4 机械应力与热应力的综合应力	23
2.3 圆形平盖封头应力分析	24
2.3.1 定解方程及求解	24
2.3.2 变形及应力分布特点	28
2.3.3 压力容器局部应力分析	29
2.3.4 局部应力及分析方法	29
2.3.5 平板开小孔的应力集中	29
2.3.6 压力容器开小孔的应力集中	32
2.3.7 压力容器开孔接管的应力集中	33
思考题	35
3 压力容器常规设计	36
3.1 圆筒形容器筒体的强度设计	36
3.2 压力容器封头的强度设计	38
3.2.1 半球形封头	38
3.2.2 椭圆形封头	39
3.2.3 碟形封头	40
3.2.4 球冠形封头	41
3.2.5 锥形封头	42
3.2.6 平盖封头	43
3.3 法兰连接及密封设计	45
3.3.1 法兰密封及失效	45
3.3.2 法兰密封设计	48
3.3.3 法兰强度设计	56
3.4 开孔接管及补强设计	58
3.4.1 补强结构与设计规则	59
3.4.2 等面积补强设计	60
3.5 容器支座的结构与选型	62
3.5.1 悬挂式支座	63
3.5.2 支承式支座	64
3.5.3 鞍式支座	64
3.6 外压容器稳定性设计	66
3.6.1 圆环的稳定性分析	66
3.6.2 圆柱形筒体的稳定性分析	67
3.6.3 外压圆筒的设计计算	69
3.6.4 外压封头的设计计算	73
3.6.5 加强圈设计	74
3.7 设计参数及压力试验	77
3.7.1 设计参数	77
3.7.2 压力试验	80
思考题	81
4 压力容器分析设计	83
4.1 分析设计概述	83
4.1.1 常规设计的局限性	83

4.1.2 分析设计的基本思想	84	6.2 球罐壳体设计	127
4.1.3 分析设计与常规设计规范比较	84	6.2.1 橘瓣式球壳的设计	128
4.2 应力特性	85	6.2.2 足球瓣式和混合式球壳设计	130
4.2.1 中低压容器	86	6.3 球罐支座设计	131
4.2.2 高压容器	86	6.3.1 赤道正切柱式支座设计	131
4.2.3 平盖封头	88	6.3.2 其它形式的支座结构	134
4.2.4 壳体不连续区	88	6.4 人孔、接管及附件设计	137
4.2.5 容器支座区	90	6.4.1 人孔结构	137
4.2.6 容器接管区	90	6.4.2 接管结构	137
4.2.7 容器热应力	91	6.4.3 球罐附件	138
4.3 应力分类	92	6.5 球罐的抗震结构设计	140
4.3.1 一次应力	92	6.5.1 球罐抗震结构设计的一般要求	140
4.3.2 二次应力	93	6.5.2 球罐抗震设计的方法与措施	140
4.3.3 峰值应力	93	思考题	142
4.4 应力评定	95	7 塔设备	143
4.4.1 应力强度	95	7.1 概述	143
4.4.2 应力强度设计限制	98	7.1.1 塔设备的作用和类型	143
4.4.3 极限载荷设计概念	100	7.1.2 塔型比较及选择	143
4.4.4 结构安定性概念	103	7.1.3 对塔设备的要求	143
4.4.5 疲劳分析设计准则	104	7.2 板式塔	144
思考题	106	7.2.1 设计内容	144
5 高压容器设计	107	7.2.2 总体结构及分类	144
5.1 高压容器设计概述	107	7.2.3 塔盘结构	145
5.1.1 高压容器的结构特点	107	7.3 填料塔	156
5.1.2 高压容器的材料特点	108	7.3.1 设计内容	156
5.1.3 高压容器筒体的结构型式	108	7.3.2 总体结构	157
5.2 高压圆筒的强度设计	113	7.3.3 填料类型及选用	157
5.2.1 高压圆筒强度设计准则	113	7.3.4 液体的分布装置和液体再分布装置	161
5.2.2 单层高压圆筒的强度计算	115	7.3.5 填料的支承装置	165
5.2.3 多层高压圆筒的强度计算	116	7.3.6 填料压板和床层限制板	166
5.3 高压容器的密封结构	116	7.4 辅助装置及附件	167
5.3.1 强制式密封	117	7.4.1 裙座	167
5.3.2 自紧式密封	118	7.4.2 除沫器	168
5.3.3 高压管道密封	121	7.4.3 接管	169
5.4 高压容器的自增强技术	121	7.4.4 吊柱	172
5.4.1 自增强技术原理	121	7.5 塔设备的机械设计	174
5.4.2 自增强处理压力	122	7.5.1 塔体厚度的计算	174
5.4.3 自增强处理应力	122	7.5.2 塔体承受的各种载荷的计算	174
5.4.4 自增强处理半径	123	7.5.3 塔体稳定校核	181
5.4.5 自增强处理方法	124	7.5.4 塔体拉应力校核	182
思考题	124	7.5.5 水压试验时应力校核	183
6 球形储罐设计	126	7.5.6 裙座设计	184
6.1 概述	126	7.6 塔体与裙座的机械设计举例	190
6.1.1 球罐的特点	126	7.6.1 选择材料	190
6.1.2 球罐分类	126	7.6.2 按计算压力计算筒体和封头的	
6.1.3 球罐的设计内容	127		

壁厚	191
7.6.3 塔的质量载荷计算	191
7.6.4 塔的自振周期计算	193
7.6.5 地震载荷计算	193
7.6.6 风载荷和偏心弯矩计算	193
7.6.7 各种载荷引起的轴向应力	195
7.6.8 筒体和裙座危险截面的强度和稳定性校核	195
7.6.9 筒体和裙座水压试验应力校核	196
7.6.10 基础环设计	197
7.6.11 地脚螺栓设计	198
思考题	198
8 换热器	199
8.1 概述	199
8.1.1 换热器的应用	199
8.1.2 换热器的类型	199
8.1.3 换热器的选型	200
8.2 管壳式换热器	201
8.2.1 基本类型	201
8.2.2 管壳式换热器的总体设计	203
8.2.3 管壳式换热器的主要部件与结构设计	204
8.3 膨胀节设计	218
8.4 热管及热管换热器	219
8.4.1 热管简介	219
8.4.2 热管换热器	221
思考题	223

(下 册)

10 压缩机	1
10.1 压缩机的类型及应用	1
10.1.1 压缩机的分类及比较	1
10.1.2 压缩机的应用	3
10.2 往复式压缩机	4
10.2.1 往复式压缩机基本原理	4
10.2.2 往复式压缩机的调节与控制	16
10.2.3 往复式压缩机的典型结构及零部件	20
10.2.4 往复式压缩机的选型	25
10.3 离心式压缩机	29
10.3.1 离心式压缩机基本原理	29
10.3.2 离心式压缩机的工作特性及调节	37
10.3.3 相似理论在离心式压缩机中的	

9 搅拌反应设备	224
9.1 反应器类型	224
9.2 典型搅拌反应器	225
9.2.1 总体结构	225
9.2.2 设计内容及步骤	226
9.3 釜体与传热装置	227
9.3.1 釜体设计	227
9.3.2 传热装置设计	228
9.4 搅拌器及附件的设计	234
9.4.1 搅拌器的功能	234
9.4.2 典型搅拌器	236
9.4.3 搅拌附件	239
9.4.4 搅拌器选型	240
9.4.5 搅拌器转速与搅拌功率	242
9.4.6 搅拌器的强度计算	245
9.4.7 搅拌轴设计	248
9.5 传动装置	251
9.5.1 电动机的基本特性及选用	251
9.5.2 减速机	252
9.5.3 联轴器	256
9.6 轴封装置	257
9.6.1 填料密封	257
9.6.2 机械密封	260
9.6.3 机械密封和填料密封的比较	262
思考题	263
参考文献	264

应用	39
10.3.4 离心式压缩机主要零部件	41
10.3.5 离心式压缩机的选型	42
10.4 其它压缩机	45
10.4.1 螺杆式压缩机	45
10.4.2 单螺杆式压缩机	46
10.4.3 滚动活塞式压缩机	47
10.4.4 滑片式压缩机	47
10.4.5 液环式压缩机	47
10.4.6 涡旋式压缩机	48
10.4.7 轴流式压缩机	48
10.4.8 轴流离心混合式压缩机	49
思考题	49
讨论题	51
11 风机	53
11.1 风机的类型及性能参数	53

11.1.1 风机的类型	53	12.6 其它形式的低温制冷机	104
11.1.2 风机的性能参数	53	12.6.1 斯特林制冷机	105
11.2 离心式风机	56	12.6.2 维勒米尔制冷机	105
11.2.1 离心式风机的工作原理	56	12.6.3 磁性制冷机	106
11.2.2 离心式风机的工作特性及调节	57	12.6.4 吸附制冷机	106
11.2.3 相似理论在离心式风机中的 应用	62	12.6.5 气波制冷机	106
11.2.4 离心式风机的主要零部件	62	思考题	107
11.2.5 离心式风机的选型	64	13 泵	108
11.3 轴流式风机	66	13.1 泵的类型及应用	108
11.3.1 轴流式风机的结构及工作原理	66	13.1.1 泵的类型	108
11.3.2 轴流式风机的特点及性能曲线	67	13.1.2 泵的应用	109
11.3.3 轴流式风机的调节	68	13.2 离心泵	109
11.3.4 轴流式风机的选型	69	13.2.1 离心泵的基本结构与工作原理	109
11.4 其它型式的风机	69	13.2.2 离心泵的操作与调节	112
11.4.1 罗茨鼓风机与叶氏鼓风机	69	13.2.3 相似理论在离心泵中的应用	119
11.4.2 横流式通风机	71	13.2.4 离心泵的主要零部件	122
11.4.3 筒形离心式风机	71	13.2.5 离心泵的选型	123
思考题	72	13.3 其它形式叶片式泵	130
12 制冷机	73	13.3.1 轴流泵和混流泵	130
12.1 概述	73	13.3.2 旋涡泵	131
12.1.1 制冷机的基本原理及分类	73	13.4 容积式泵	132
12.1.2 制冷剂 and 载冷剂	73	13.4.1 概述	132
12.1.3 润滑油	75	13.4.2 往复泵	134
12.2 活塞式制冷机	75	13.4.3 转子泵	135
12.2.1 活塞式制冷机的压缩循环	75	13.5 计量泵	137
12.2.2 活塞式制冷机制冷循环的工作 参数	77	13.6 真空泵	138
12.2.3 活塞式制冷压缩机的选型指南	78	13.6.1 真空泵的性能指标	138
12.2.4 活塞式制冷机的制冷热交换 设备	82	13.6.2 各类真空泵的工作范围及特征	139
12.2.5 活塞式制冷机的辅机系统	83	13.6.3 真空泵的选型	139
12.2.6 活塞式制冷机组	88	思考题	140
12.3 螺杆式制冷机	89	14 离心机	141
12.3.1 螺杆式制冷压缩机的性能参数及 调节	89	14.1 离心分离的基本知识	141
12.3.2 螺杆式制冷机的形式及参数	91	14.1.1 离心力场的基本特性	141
12.3.3 螺杆式制冷机的选型指南	93	14.1.2 离心机的分类	145
12.4 离心式制冷机	95	14.1.3 原料液的特性	146
12.4.1 离心式制冷机的特点及应用	95	14.1.4 原料液的预处理	147
12.4.2 离心式制冷机的基本组成和制冷 循环	95	14.2 过滤式离心机	148
12.4.3 离心式制冷机的选型指南	97	14.2.1 各种过滤式离心机的特点及 应用	148
12.5 吸收式制冷机	100	14.2.2 过滤式离心机的生产能力	151
12.5.1 溴化锂吸收式制冷机	100	14.3 沉降式离心机	151
12.5.2 氨-水吸收式制冷机	104	14.3.1 各种沉降式离心机的特点及 应用	151
		14.3.2 沉降式离心机的生产能力	152
		14.4 分离机	153
		14.4.1 各种分离机的特点及应用	153

14.4.2 分离机的生产能力	157	15.1 高速转子轴的临界转速	166
14.5 离心机功率的确定	157	15.1.1 转轴的临界转速	166
14.6 离心机的主要零部件	157	15.1.2 临界转速的计算	166
14.6.1 转鼓	157	15.2 机器的振动及隔振	167
14.6.2 过滤式离心机滤网	158	15.2.1 隔振的基本原理	167
14.6.3 主轴及支承	158	15.2.2 隔振器及其布置	168
14.7 离心机的选型	158	15.3 高速转盘和转鼓的强度	170
14.7.1 离心机型号的编制	158	15.3.1 高速转盘的强度	170
14.7.2 选型原则	158	15.3.2 高速转鼓的强度	171
14.7.3 选型指南	160	15.4 机器的故障诊断	172
14.8 其它形式的分离机械	164	15.5 流体密封技术	174
14.8.1 旋液分离器	164	15.5.1 往复运动式轴密封	174
14.8.2 重力过滤机	164	15.5.2 旋转式轴密封	175
14.8.3 加压过滤机	164	15.5.3 干气密封	178
14.8.4 真空过滤机	165	15.5.4 浮环密封装置	179
思考题	165	思考题	180
15 过程机器的安全可靠性的	166	参考文献	181

1 压力容器设计概述

1.1 压力容器及其分类

1.1.1 压力容器及其构成

通常,当容器承受的内压大于 0.1MPa 时,才称为压力容器;当内压小于 0.1MPa 时,称为常压容器;当内压小于零时,称为外压容器^①。由于外压容器在设计、制造、检验等方面,与压力容器有一定共性,故将其放在压力容器中一起介绍^②。

压力容器的常见结构型式有两种:圆筒形容器和球形容器。压力容器由容器本体和附件构成。对于圆筒形容器,容器本体由筒体与封头两部分组成。常见的压力容器封头有:球形封头、椭圆形封头、碟形封头、球冠形封头、锥形封头和平盖封头等。容器附件包括:支座、法兰、接管、人孔、手孔、视镜和安全附件等。

1.1.2 压力容器的分类

压力容器有多种分类方法,常见的有如下几种分类。

1.1.2.1 按压力(p)分类

将压力容器分为如下 4 类:

- i. 低压容器 (代号 L) $0.1\text{MPa} \leq p < 1.6\text{MPa}$
- ii. 中压容器 (代号 M) $1.6\text{MPa} \leq p < 10\text{MPa}$
- iii. 高压容器 (代号 H) $10\text{MPa} \leq p < 100\text{MPa}$
- iv. 超高压容器 (代号 U) $p \geq 100\text{MPa}$

1.1.2.2 按其功能分类

将压力容器分为如下 4 类:

- i. 反应容器 (代号 R)
- ii. 换热容器 (代号 E)
- iii. 分离容器 (代号 S)
- iv. 储存容器 (代号 C,其中球罐为 B)

1.1.2.3 按安全技术管理要求分类

将压力容器分为如下 3 类。

(1) 第三类压力容器

符合下列情况之一者,为第三类压力容器:

- i. 高压容器;
- ii. 中压容器 (仅限毒性程度为极度和高度危害介质);
- iii. 中压储存容器 (仅限易燃或毒性程度为中度危害介质,且容器的设计压力 p 与其容积 V 的乘积 $pV \geq 10\text{MPa} \cdot \text{m}^3$);

① 严格地讲,当容器所承受的内压与外压之差小于零时,称为外压容器;当仅受内压且小于零时,往往称为真空容器;如无特殊说明,本书所述的压力均指表压。

② 因此,如果不作特殊说明,以下提到的压力容器也包括了外压容器。

iv. 中压反应容器 (仅限易燃或毒性程度为中度危害介质, 且 $pV \geq 0.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^3$);

v. 低压容器 (仅限毒性程度为极度和高度危害介质, 且 $pV \geq 0.2 \text{ MPa} \cdot \text{m}^3$);

vi. 高压、中压管式余热锅炉;

vii. 中压搪玻璃压力容器;

viii. 使用强度级别较高 (指相应标准中抗拉强度规定值下限大于等于 540MPa) 的材料制造的压力容器;

ix. 移动式压力容器, 包括铁路罐车 (介质为液化气体、低温液体)、罐式汽车 [液化气体运输 (半挂) 车、低温液体运输 (半挂) 车、永久气体运输 (半挂) 车] 和罐式集装箱 (介质为液化气体、低温液体) 等;

x. 球形储罐 (容积 $V \geq 50 \text{ m}^3$);

xi. 低温液体储存容器 (容积 $V > 5 \text{ m}^3$)。

(2) 第二类压力容器

除已归划为第三类压力容器的情况外, 符合下列情况之一者, 为第二类压力容器:

i. 中压容器;

ii. 低压容器 (仅限于毒性程度为极度和高度危害介质);

iii. 低压反应容器和低压储存容器 (仅限易燃介质或毒性程度为中度危害介质);

iv. 低压管壳式余热锅炉;

v. 低压搪玻璃压力容器。

(3) 第一类压力容器

除已归划为第二和第三类压力容器的情况外, 所有的低压容器为第一类压力容器。

上述分类法中的第 3 种, 是我国现行的《压力容器安全技术监察规程》使用的方法。这种分类方法主要依据压力容器的危害性, 综合考虑了压力等级、应用场合、工作介质、几何容积和材料强度等因素, 有利于对压力容器进行分类管理和监督检查。不同类别的压力容器, 在设计、制造 (组焊)、安装、使用、检验、修理、改造等方面, 有不同的规定和要求。容器类别越高, 管理就越严。注意到这一点很重要, 因为对于不同类别的压力容器, 不仅要具有相应的设计和制造资格, 而且其设计和制造成本会有很大差别。

此外, 还可能见到如下一些分类方法: 按制造方法分为焊接容器、锻造容器、热套容器、多层包扎式容器、绕带式容器、组合容器等; 按制造材料分为钢制容器、有色金属容器、非金属容器等; 按几何形状分为圆筒形容器、球形容器、矩形容器、组合式容器等; 按安装方式分为立式容器、卧式容器等; 按固定方式分为固定式容器、移动式容器等; 按受压情况分为内压容器、外压容器等; 按容器壁厚分为薄壁容器、厚壁容器等; 按使用场合分为化工容器、核容器等。

1.2 压力容器的设计要求

对于压力容器设计的基本要求是, 保证它的安全性和经济性。其中安全是核心, 在充分保证安全的前提下, 尽量做到经济。保证安全, 绝不是盲目的增加壁厚、提高材料品质, 而应从合理的结构设计、精确的强度计算、合理的材料选用以及正确的技术要求等方面着手。通常, 压力容器的设计要满足如下基本要求。

1.2.1 强度要求

压力容器应具有足够的强度。容器本体及其附件应有足够的强度来承受工作载荷。设计时应尽可能地使零部件达到等强度, 以降低材料消耗。强度设计是压力容器设计中的重要内容。

1.2.2 刚度要求

压力容器应具有足够的刚度。压力容器的法兰连接系统如果刚度不足、变形过大,就会使密封失效。压力容器(特别是化工压力容器)所盛装的介质往往易燃、易爆或有毒,这些介质泄漏后,不仅会在生产上造成损失,更重要的是会引起火灾、爆炸或中毒事故,后果非常严重。密封设计,也是压力容器设计的重要内容。

外压力容器如果没有足够的刚度,就会丧失稳定性(无法保持原来的形状)而被“压瘪”,从而无法完成预定功能。稳定性设计,也是压力容器设计的重要内容。

1.2.3 使用寿命要求

压力容器应具有足够的使用寿命。压力容器的使用寿命通常决定于介质对于材料的腐蚀性。如果承受波动载荷或工作温度在材料蠕变温度以上,压力容器的使用寿命还取决于疲劳强度和蠕变强度。正确的选材及在特殊情况下的疲劳分析和蠕变分析,也是压力容器设计的重要内容。

1.2.4 结构要求

压力容器应具有合理的结构。压力容器的结构,不仅要满足工艺要求,而且要有良好的承载特性,同时还要方便制造、检验、运输、安装、操作及维修。结构设计也是压力容器设计的重要内容。

1.3 压力容器材料及选择

通常,压力容器材料是钢材。特殊情况下,例如考虑到特殊介质、特殊操作条件和容器重量等因素,也可用镍、钛、铝、铜等有色金属或其合金及搪玻璃等非金属材料和复合材料等。

1.3.1 压力容器用钢

中国压力容器用钢板主要有三个基本类型,即低碳钢、低合金钢和高合金钢。

(1) 低碳钢

低碳钢中可以用于制作压力容器的,有普通碳素结构钢 Q235 系列和优质碳素结构钢 20R。Q235 系列中只有 Q235—B 和 Q235—C 这两种钢号,被 GB 150—1998《钢制压力容器》标准允许制造低参数的压力容器。它们实际上不是压力容器用钢,但因使用经验丰富、价格低廉、来源广泛,至今仍在应用。Q235—B 钢板的适用范围是:容器设计压力 $p \leq 1.6 \text{ MPa}$; 钢板使用温度 $0 \sim 350^\circ\text{C}$; 用于壳体时,钢板厚度不大于 20mm; 不得用于毒性程度为高度或极度危害介质的压力容器。Q235—C 钢板的适用范围是:容器设计压力 $p \leq 2.5 \text{ MPa}$; 钢板使用温度 $0 \sim 400^\circ\text{C}$; 用于壳体时,钢板厚度不大于 30mm。20R 是在优质碳素结构钢 20 钢的基础上发展出来的压力容器用钢,主要是对硫、磷等有害元素的控制更加严格,对钢材的表面质量和内部缺陷的要求也较高。Q235 系列钢出厂时只保证力学性能,而不保证化学成分,而 20R 两者均要保证。

(2) 低合金钢

加入少量合金元素,如 Mn、V、Mo、Nb 等,可显著地提高钢的强度而成本增加不多。同时,低合金钢的低温韧性和高温强度明显优于碳素钢。采用低合金钢,不仅能减小壁厚,而且可以扩大应用范围。常用的低合金钢有以增加强度为主要目的的 16MnR,以中温应用为主要目的的中温抗氢钢 15CrMoR 和以低温 ($T < -20^\circ\text{C}$) 应用为主要目的的低温压力容器钢 16MnDR、15MnNiDR 和 09MnNiDR (D 表示低温) 等。

(3) 高合金钢

压力容器用高合金钢仅限于低碳和超低碳型,应用目的主要是耐腐蚀和耐高温。主要有铁

素体不锈钢 0Cr13, 奥氏体不锈钢 0Cr18Ni9、0Cr18Ni10Ti 和 00Cr19Ni10, 奥氏体-铁素体双相不锈钢 00Cr18Ni5Mo3Si2 等。

1.3.2 对压力容器用钢的要求

在化学成分、力学性能以及工艺性能等方面, 对压力容器用钢提出了特殊要求。

(1) 化学成分

化学成分主要是指钢材中的铁合金元素和杂质元素, 它们的含量对钢材的力学性能、工艺性能和热处理性能影响很大。因此, 压力容器的化学成分应严格控制。

合金元素中, 碳的含量增高, 可使钢材的强度提高, 但导致可焊性变差, 焊接时易在热影响区出现裂纹, 故压力容器用钢含碳量一般不大于 0.25%。钼元素能提高钢材的高温强度, 但含量超过 0.5% 时会影响可焊性。其它合金元素都是按照力学性能要求配比的, 都应控制在一定范围内。

杂质元素一般都有危害作用, 在冶炼中应严格控制。硫和磷是钢中最主要的有害杂质元素。硫能促进非金属夹杂物的形成, 使钢材塑性和韧性下降; 磷能增加钢的脆性, 特别是低温脆性。因此, 压力容器用钢对硫和磷等有害杂质元素的含量应有严格控制。例如, 我国《压力容器安全技术监察规程》规定, 压力容器用钢的硫和磷的含量应分别不大于 0.02% 和 0.03%。随着冶炼水平的提高, 目前已可将硫的含量控制在 0.002% 以内。

(2) 力学性能

材料的力学性能主要指材料的强度、塑性与韧性, 它们是选材和强度计算的主要依据。压力容器设计中, 常用钢材的力学性能指标有抗拉强度 (σ_b)、屈服点 (σ_s)、持久强度 (σ_D)、蠕变极限 (σ_n) 和疲劳极限 (σ_{-1}); 塑性指标有延伸率 (δ_5)、断面收缩率 (ψ); 韧性指标有冲击试验的冲击功 (A_{kv})、韧脆转变温度和断裂韧性等。

韧性是材料对缺口或裂纹敏感程度的反映, 韧性好的材料即使存在宏观缺口或裂纹而造成应力集中时, 也具有相当好的防止发生脆性断裂和裂纹快速失稳扩展的能力。

夏比 V 形缺口冲击试验的冲击功 (A_{kv}) 能较好的反映材料的韧性, 而且对温度变化也很敏感。国内外压力容器标准对压力容器用钢的 A_{kv} 均提出了要求, 例如我国 GB 150《钢制压力容器》规定, 20R、16MnR 及 15MnVR 钢板的常温 A_{kv} 不得小于 31J。低温用钢更应注意对 A_{kv} 值的要求, 例如 16MnDR 钢板在 -40°C 时的 A_{kv} 不得低于 24J。

随着使用温度的降低, 钢材的韧性一般会下降。当温度下降到一定值后, 材料的 A_{kv} 值会突然明显下降 (除面心立方体晶格的材料外), 这个温度称为材料的韧脆转变温度, 它是确定材料最低使用温度的依据。

材料冲击试验的冲击功 (A_{kv}) 只是宏观地反映了材料对缺口的敏感性, 可用作选材的指导, 但不能用作设计计算。为了更科学的判断压力容器用钢对宏观裂纹扩展的抵抗能力, 近年来引入了断裂力学中的断裂韧性指标, 用来对压力容器进行防脆断设计和安全评定。目前用的较多的是应力强度因子临界值 K_{IC} 和裂纹尖端张开位移 (COD) 临界值 δ_c , 但这些断裂韧性指标尚未列入容器标准中。

(3) 工艺性能

钢材的制造工艺性能包括: 可锻性, 可焊性, 切削加工性, 研磨、冲击性能及热处理性能等。对压力容器用钢, 其中焊接性能和加工性能显得更为重要。

一般来说, 钢材强度越高, 焊接热影响区的硬度也越高, 出现焊接裂纹的可能性也就越大。为了保证钢材的焊接性能, 必须对其含碳量或碳当量加以限制。我国《压力容器安全技术监察规程》规定, 用于焊接结构压力容器主要受压元件的碳素钢和低合金钢, 其含碳量不应大于 0.25%。在特殊情况下, 如选用含碳量超过 0.25% 的钢材, 应限定碳当量不大于 0.45%。

国际焊接学会推荐碳当量 (C_{eq}) 按下式估算:

$$C_{eq} = C + \frac{1}{6}Mn + \frac{1}{15}(Ni + Cu) + \frac{1}{5}(Cr + Mo + V)$$

式中的元素符号表示该元素在碳中的百分含量。一般认为 C_{eq} 小于 0.4% 时, 焊接性能优良; C_{eq} 大于 0.6% 时, 焊接性能差。压力容器用钢一般要经过焊接实验, 以确定相应的焊接材料及焊接工艺。

制造过程中进行冷卷、冷冲压加工的零部件, 要求钢材有良好的冷加工成型能力和塑性, 其延伸率应在 15%~20% 以上。为检验钢板的弯曲变形能力, 一般应根据钢板的厚度, 选用合适的弯心直径, 在常温下做弯曲角度为 180° 的弯曲实验, 试样外表面在弯曲实验时不应出现裂纹。

综上所述, 对压力容器用钢要求较严。钢材出厂必检的项目有: 化学成分、抗拉强度 (σ_b)、屈服点 (σ_s)、延伸率 (δ_5)、冲击试验的冲击功 (A_{kv})、180° 冷弯等。制造厂接受钢材来货时, 必须检查钢厂的质量证明书, 对制造重要压力容器的钢材还要进行复验, 甚至进行 100% 面积的超声波检验以确定轧制质量。

1.3.3 压力容器用钢的选择

在进行压力容器设计选材时, 要根据容器的使用环境 (压力、温度、介质特性和操作特性等) 和功能, 综合考虑材料的化学成分、力学性能和工艺性能, 同时还应注意材料的价格、来源及使用经验, 要符合有关设计与材料标准的规定。例如, 不应片面追求采用高强度钢材, 要注意强度与塑性、韧性的综合性能, 强度与可焊性的综合性能。还应注意厚度与性能的关系, 随着厚度的增加, 钢材的力学性能均会有所下降。

材料的价格在压力容器的成本中占较大比例, 选材时应给予充分考虑。如果将普通碳素结构钢 Q235 钢板的价格视为 1, 其余钢板的相对价格大致为: 锰钢约为 1.5, 铬钢约为 5, 奥氏体不锈钢约为 15。当然, 采用廉价的材料经济上并不一定合算, 因为价格贵的材料可能具有更好的性能, 用它可以使容器壁厚减薄、材料消耗量降低, 还可能延长使用寿命, 从而会使综合经济效果更好。

一般来说, 对于普通低压容器, 通常采用 Q235—B、Q235—C 及 20R 等; 对于直径较大的低压容器和中压容器, 通常选用低合金钢, 例如 16MnR、15MnVR 及 15MnVbR 等; 对于直径较大的中压容器和高压容器, 宜选用低合金高强钢, 例如 18MnMoNbR 等; 对于温度较高 (475~540℃) 的中压容器, 常用中温抗氧钢 15CrMoR。

当介质腐蚀性较强时, 应选用高合金不锈钢。铬钢 0Cr13 在室温下对稀硝酸和弱有机酸有一定的耐蚀性, 但不耐硫酸、盐酸和弱磷酸等介质的腐蚀。奥氏体不锈钢 0Cr18Ni9 在氧化性酸和大气、水、蒸汽等介质中有较好的耐蚀性, 但长期在水及蒸汽中工作时, 有晶间腐蚀倾向, 并且在氧化物溶液中易发生应力腐蚀开裂。0Cr18Ni10Ti 具有较高的抗晶间腐蚀的能力, 可在 -196~600℃ 范围内长期使用。00Cr19Ni10 为超低碳不锈钢, 具有更好的耐蚀性。奥氏体-铁素体双相不锈钢 00Cr18Ni5Mo3Si2 具有良好的耐应力腐蚀和小孔腐蚀的性能, 可用于制造介质中含有氯离子的设备。

1.4 压力容器规范简介

鉴于压力容器安全问题的重要性, 世界各工业国家都制定了压力容器的规范, 对其设计、材料、制造、检验等均做出了相应规定。尽管一些技术规范和标准本身不具有法律效力, 但经

一定的法律程序的认定或其中一些条款被一些法规确定后,就得强制执行,否则就会追究法律责任。然而,设计规范不可能包罗万象,不可能对各种设计问题给出具体答案,它只是对“该做什么”和“不该做什么”给出了原则规定,面对具体设计问题,设计者需要在不违反规范的基本规定的前提下,灵活处理,做出最佳的设计方案。

1.4.1 国外压力容器规范

美国 ASME《锅炉与压力容器规范》(以下简称 ASME 规范)是世界上最有影响的一部压力容器规范。它由美国机械工程师协会(ASME)和美国国家标准协会(ANSI)联合颁发,已被美国确认为国家规范,且被美国 50 个州中的 47 个州和加拿大部分省确认具有法律地位。ASME 规范规模庞大,内容丰富、完整,规定严格、明确,且修订、更新及时,得到了世界各国的重视。

ASME 规范的原始版《锅炉制造规范·1914 版》于 1915 年春问世,它是世界第一部关于压力容器的规范。到 1926 年,这部规范发展到第八卷,统称为“ASME 锅炉与压力容器规范”。目前 ASME 规范共有十一卷,包括锅炉、压力容器、核动力装置、焊接、材料、无损检测等内容。ASME 规范每三年发行一个版本,每六个月颁发一次补遗。

ASME 规范中与压力容器设计有关的是第Ⅷ卷《压力容器》,它有三个分卷,即第一分卷《压力容器》、第二分卷《压力容器——另一规程》和第三分卷《高压容器另一规则》(以下分别简称 ASME Ⅷ-1、ASME Ⅷ-2 和 ASME Ⅷ-3)。ASME Ⅷ-1 为常规设计标准,适用压力不超过 20MPa,它不包括疲劳设计,但包括静载下进入高温蠕变范围的容器设计。ASME Ⅷ-2 为分析设计标准,它包括了疲劳设计,但设计温度限制在蠕变温度以内。为解决高温压力容器的分析设计,在 1974 年后又补充了一份《规范案例 N-47》。ASME Ⅷ-3 主要适用于设计压力不小于 10MPa 的高压容器,它不仅要求对容器各零部件作详细的应力分析和分类评定,而且要作疲劳分析或断裂力学评估,是一个到目前为止要求最高的压力容器规范。

除了美国 ASME 规范外,比较有特色的压力容器设计标准有:日本的 JIS B 8270《压力容器(基础标准)》及 JIS B 8271~8285《压力容器(单项标准)》,英国的 BS 5500《非直接火压力容器》,原联邦德国的《AD 压力容器规范》等。此外,欧盟于 1987 年通过了 87/404/EEC《简单压力容器法规》,1992 年正式实施;97/23/EC《承压设备法规》于 2002 年 5 月在欧盟各国强制实施,以代替原各国标准。

1.4.2 中国压力容器规范

(1) 中国压力容器规范体系

中国压力容器规范体系是由法规、技术标准以及相关标准组成。国务院发布的《锅炉压力容器安全监察暂行条例》及其《实施细则》、国家质量技术监督局发布的《压力容器安全技术监察规程》(以下简称《容规》)是两个强制执行的法规。国家标准 GB 150《钢制压力容器》、GB 151《管壳式换热器》、GB 12337《钢制球形储罐》、GB 16749《压力容器波形膨胀节》,行业标准 JB 4732《钢制压力容器——分析设计标准》、JB/T 4735《钢制焊接常压容器》、JB 4710《钢制塔式容器》、JB 4731《钢制卧式容器》等设计标准,以及相关的有关材料、制造、检验的国家标准或部颁标准,例如 GB 6654《压力容器用钢板》、GB 3531《低温压力容器用低合金钢板》、GB 3077《合金结构钢技术条件》、JB 4726《低温压力容器用碳素钢和低合金锻件》、JB 4727《低温压力容器用碳素钢和低合金锻件》、JB 4728《压力容器用不锈钢锻件》、JB 4733《压力容器用爆炸不锈钢复合钢板》、JB 4700《压力容器法兰分类与技术条件》、JB 4708《钢制压力容器焊接工艺评定》、JB/T 4709《钢制压力容器焊接规程》、JB 4730—94《压力容器无损检测》等,属于技术标准和相关标准。这些标准本身不具有法律地位,但由于相关标准(或其中一些条款)被设计标准所引用,设计标准(或其中一些条款)又被技术法规

所引用,因此这些标准(或其中一些条款)被间接地赋予法律效力。例如中国《容规》第40条规定:“钢制压力容器受压元件的强度计算,以及许用应力的选取,应按照GB 150、GB 151、GB 12337和JB 4732等标准的有关规定执行”。第56条规定:“钢制压力容器或受压元件焊后热处理要求,除满足本规程外,还应符合GB 150或JB 4732等标准的有关规定”。

(2) GB 150《钢制压力容器》

这是中国的第一部压力容器国家标准,其基本思路与ASME VIII-1相同,属常规设计标准。该标准适用于设计压力不大于35MPa的钢制压力容器的设计、制造、检验与验收,适用的设计温度范围根据钢材的使用温度确定(从 -196°C 到钢材的蠕变限用温度)。

GB 150只适用于固定的承受恒定载荷的压力容器,不适用于以下8种情况:直接火焰加热的容器,核能装置中的容器,旋转或往复式运动的机械设备中自成整体或作为部件的受压器室的容器,经常搬用的容器,设计压力低于0.1MPa的容器,真空度低于0.02MPa的容器,内径小于150mm的容器和要求作疲劳分析的容器。

GB 150的技术内容包括圆柱形筒体和球壳的设计计算,零部件结构和尺寸的具体规定,密封设计,超压泄放装置的设置,对容器的制造、检验与验收要求,以及对材料的要求等。

GB 150采用第一强度理论——弹性失效准则,这与ASME VIII-1相一致。不同的是,以抗拉强度为基准的安全系数 n_b ,中国取 $n_b=3$ (ASME VIII-1取 $n_b=4$),这是根据国内多年来工业生产的经验确定的;另一个不同点是,GB 150对局部应力参照ASME VIII-2作了适当处理,凸形封头转角及开孔处的局部应力允许其超过材料的屈服点。

(3) JB 4732《钢制压力容器——分析设计标准》

这是中国第一部压力容器分析设计的行业标准,其基本思路与ASME VIII-2相同。该标准适用于设计压力不大于100MPa的钢制压力容器,适用的设计温度范围仍由钢材的使用温度确定。该标准不适用范围与GB 150基本相同,不同的是,它能适用于需作疲劳分析的容器。该标准与GB 150同时实施,在满足各自要求的条件下,设计者可选其中之一,但不得混合使用。

JB 4732采用第三强度理论,可选用弹性失效准则、塑性失效准则、弹塑性失效准则设计。与GB 150相比,JB 4732允许采用较高的设计应力水平,在相同设计条件下,容器壁厚较小,材料消耗较少。但由于设计计算工作量大,选材、制造、检验及验收等方面的要求较严,有时综合效益不一定高。JB 4732一般推荐用于重量大、结构复杂、操作参数较高的压力容器设计。当然,需作疲劳分析的压力容器,必须采用JB 4732进行设计。

(4)《压力容器安全技术监察规程》

中国《容规》是压力容器安全技术管理的技术法规,它对压力容器的材料、设计、制造、使用、检验、修理、改造七个主要方面做出了基本规定,从事压力容器设计、制造、安装、改造、使用、检验、修理的单位都要贯彻执行。《容规》提出的基本规定,是压力容器安全技术的最低要求,凡是压力容器国家标准、部颁标准、企业标准,都不得低于《容规》所规定的要求。《容规》适用于同时具备下列条件的压力容器:

- i. 工作压力大于等于0.1MPa(不含液体静压力);
- ii. 内直径(非圆形截面指其最大尺寸)大于等于0.15m,且容积大于等于0.025m³;
- iii. 盛装介质为气体、液化气体或最高工作温度高于等于标准沸点的容器。

除设计压力超过100MPa的超高压容器外,中国压力容器标准基本上可以覆盖所有的钢制压力容器。表1.1列出了GB 150《钢制压力容器》、JB 4732《钢制压力容器——分析设计标准》和JB/T 4735《钢制焊接常压容器》3个钢制容器标准的适用范围和主要区别。