



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

Y ALI RONGQI  
YU GUOCHENG SHEBEI

# 压力容器 与过程设备

喻九阳 徐建民 主编 冯兴奎 主审



化学工业出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 压力容器与过程设备

喻九阳 徐建民 主编  
冯兴奎 主审



化学工业出版社

·北京·

## 内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。“压力容器与过程设备”是过程装备与控制工程专业的特色课程。本书将培养地方高校和独立院校的本科学生的实践能力和设计能力作为主要目标。前6章介绍了回转壳体与平板的应力分析的基本理论和基本知识,结合目前新版的设计标准介绍了压力容器及其零部件的常规设计方法。后4章分别介绍了换热设备和塔设备的机械与结构设计,反应设备的结构与工艺设计,蒸发、浓缩与干燥设备的分类、选型与设计要点。附录列出了压力容器与过程设备设计的常用标准和材料,方便理论教学过程和实践环节使用。

书中语言浅显易懂,基本理论阐述简明,基本概念定义准确,紧扣最新设计标准和规范并将通过网络不断充实和更新,方便教师教与学生学。

本书既是地方高校和独立院校过程装备与控制专业学生的理想教材,也是压力容器设计人员掌握相关基础理论知识的理想参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

压力容器与过程设备/喻九阳,徐建民主编. —北京:  
化学工业出版社, 2011.7  
普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
ISBN 978-7-122-10878-4

I. 压… II. ①喻…②徐… III. ①压力容器-高等学校-教材②化工过程-换热设备-高等学校-教材  
IV. ①TH49②TQ051.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第051644号

---

责任编辑:程树珍 金玉连  
责任校对:宋 玮

装帧设计:周 遥

---

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:北京市兴顺印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张16 字数426千字 2011年7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: 34.00 元

版权所有 违者必究

# 前 言

随着科学技术的发展，与压力容器制造、设计相关的标准规范在不断更新改进。同时，随着我国教育事业的发展壮大，本科人才培养也由精英教育向大众教育转变，过程装备与控制工程专业本科学生的培养定位的改变，需要一本既重视基础理论学习，又有利于培养学生实践创新能力和设计能力的教材，这正是本书编者多年的夙愿。本书的编者都是从事压力容器和过程设备教学、设计工作几十年的教师。

作为过程装备与控制工程专业唯一一门本专业独有的特色课程，本书希望让学生掌握设计、分析的基本理论以及相关基础知识，熟悉相关标准和规范，学生毕业后能够设计出满足工程实际要求的容器和设备，理解设计标准和规范的理论背景知识，达到既知道要怎么做，又懂得为什么要这么做。因此，本书编者在总结数十年的教学改革与工程实践经验的基础上，对内容的取舍和表达等方面做了创新处理。主要特点体现在以下几个方面。

1. 基本理论阐述简明，重视基本概念及相关参数与工程实际的结合，便于学生理解和提高学习兴趣。如在讲述无力矩理论的应用时，因为圆柱形容器的周向应力是经向应力的两倍，其筒体上纵焊缝要比环焊缝危险；如果要在筒体上开设椭圆孔，应使椭圆孔的长轴垂直于筒体的轴线，这样做有利于设备的安全。

2. 引入和遵照最新有关设计标准、规范，更新和充实了承压设备设计中的关键技术问题，着眼设计技能的培养提高。如在讲述焊接接头系数时，对圆筒容器来说，主要存在纵向和环向两种焊接接头。圆筒计算厚度是依据周向应力公式并采用纵向焊接接头系数计算的，环向焊接接头系数在厚度计算中不起控制作用，但对环向焊接接头质量的要求不能降低，仍取同一的焊接接头系数。对于无纵向焊接接头的圆筒（无缝钢管制）焊接接头系数取 1.0；对封头拼接接头的焊接接头系数一般按壳体的纵向焊接接头系数确定。

3. 书中附有承压设备重要及常用法规和标准、承压设备用钢板国内外牌号对照表和许用应力数据表，可为课程设计、毕业设计等实践环节提供方便。

本教材共分 10 章。绪论主要介绍了压力容器的分类方法和世界上主要的压力容器设计标准。第 1 章介绍压力容器常用钢材的性能要求与分类。第 2 章介绍回转壳体与平板的应力分析。第 3~第 5 章分别介绍了内外压力容器及其零部件的设计方法。第 6 章介绍换热设备的机械设计。第 7 章介绍塔设备的机械设计。第 8 章介绍反应设备的结构设计和工艺计算。第 9 章介绍蒸发浓缩与干燥设备的分类、选型与设计要点。全书由喻九阳教授和徐建民教授主编，冯兴奎教授主审。参加编写的有武汉工程大学喻九阳教授（绪论和第 7 章）、徐建民教授（第 2 章、第 3 章、第 4 章、第 5 章、附录）、何家胜教授（第 1 章）、王庆均副教授（第 6 章）、蔡洪涛副教授（第 8 章）；武汉工业学院的丁世云副教授（第 9 章）。要特别感谢的是，冯兴奎教授在主审本教材的过程中付出了大量的辛勤劳动，提出了很多很好的建议和意见，修正了许多内容，对书稿质量的提高起到了很大的作用，在此表示衷心的感谢。同时，对武汉工程大学化工过程机械专业的研究生们在书稿编写过程中所付出的劳动表示感谢！

由于编者水平有限，书中缺点错误在所难免，恳请读者批评指正。

编 者  
2011 年 3 月于武汉

# 目 录

<b>0 绪论</b> .....	1
0.1 过程工业在国民经济中的地位 .....	1
0.2 过程设备的特点及本书任务 .....	1
0.3 介质的危害性与压力容器的分类 .....	2
0.3.1 介质的危害性与分组 .....	2
0.3.2 压力容器分类 .....	2
0.4 压力容器技术标准与技术法规 .....	4
0.4.1 标准与法规的异同关系 .....	4
0.4.2 国外压力容器标准与法规 .....	4
0.4.3 中国压力容器标准与法规 .....	5
0.4.4 压力容器标准与法规使用中应注意的几个问题 .....	6
0.5 中国压力容器的质量保证措施 .....	7
思考题 .....	8
<b>1 压力容器用钢</b> .....	9
1.1 钢的质量与性能影响因素 .....	9
1.1.1 化学成分 .....	9
1.1.2 冶炼方法与脱氧程度 .....	10
1.1.3 热处理及交货状态 .....	10
1.1.4 操作环境引起的钢组织与性能劣化 .....	12
1.2 钢材分类与质量等级 .....	13
1.3 压力容器用钢 .....	14
1.3.1 压力容器用钢的质量、性能要求与分类 .....	14
1.3.2 压力容器用钢板 .....	15
1.3.3 压力容器用钢管与锻件 .....	18
思考题 .....	19
<b>2 承压设备应力分析基础</b> .....	20
2.1 回转薄壳的应力分析 .....	20
2.1.1 回转薄壳的无力矩理论与几何特性 .....	20
2.1.2 无力矩理论的基本方程 .....	22
2.1.3 无力矩理论的应用及条件 .....	24
2.1.4 回转薄壳的边缘问题分析 .....	31
2.2 圆平板中的应力分析 .....	36
2.2.1 圆板轴对称弯曲的基本方程 .....	36
2.2.2 均布载荷下圆板中的应力 .....	39
2.2.3 轴对称载荷下环形板中的应力 .....	43
2.3 厚壁圆筒应力分析 .....	43
2.3.1 厚壁圆筒弹性应力分析 .....	44
2.3.2 厚壁圆筒弹塑性应力分析 .....	49
2.3.3 自增强原理 .....	52
思考题 .....	53
习题 .....	54
<b>3 内压力容器设计</b> .....	55
3.1 概述 .....	55
3.1.1 压力容器设计文件 .....	55
3.1.2 压力容器失效与设计准则 .....	55
3.2 内压圆筒与球壳强度计算 .....	57
3.2.1 圆筒的结构形式 .....	57
3.2.2 $K \leq 1.5$ 圆筒的强度计算 .....	58
3.2.3 $K > 1.5$ 圆筒的强度计算 .....	61
3.2.4 球壳的强度计算 .....	63
3.2.5 设计参数的确定 .....	63
3.2.6 压力试验 .....	66
3.2.7 泄漏试验 .....	67
3.3 内压封头设计 .....	68
3.3.1 封头的结构类型与特点 .....	68
3.3.2 封头强度计算 .....	69
设计举例 .....	75
3.4 内压力容器开孔及补强设计 .....	77
3.4.1 开孔应力集中及应力集中系数 .....	78
3.4.2 球壳开孔接管处应力集中系数曲线及其应用 .....	80
3.4.3 开孔补强设计 .....	82
设计举例 .....	87
3.5 密封连接设计 .....	89
3.5.1 法兰连接概述 .....	89
3.5.2 法兰连接密封设计 .....	93
3.5.3 法兰强度计算 Waters 法 .....	100
设计举例 .....	105

3.5.4 高压密封概论 .....	106	3.6.3 应力强度的限制 .....	114
3.6 压力容器分析设计 .....	110	3.6.4 疲劳设计基本概念 .....	115
3.6.1 分析设计基本概念 .....	110	思考题 .....	118
3.6.2 应力分类 .....	112	习题 .....	119
<b>4 外压容器设计</b> .....	120		
4.1 壳体的稳定性概念 .....	120	4.3.2 外压圆筒设计计算 .....	128
4.2 外压圆筒的稳定性分析与计算 .....	120	4.3.3 加强圈设计 .....	130
4.2.1 受均布横向外压圆筒的临界 压力 .....	120	4.4 外压球壳的稳定性分析与设计 .....	132
4.2.2 其他工况外压圆筒的稳定问题 .....	123	4.5 外压容器零部件设计 .....	133
4.3 外压圆筒设计 .....	124	设计举例 .....	134
4.3.1 图算法原理 .....	125	思考题 .....	136
		习题 .....	136
<b>5 卧式贮罐设计</b> .....	138		
5.1 支座形式及设置 .....	138	5.3.3 鞍座处筒体的周向应力 .....	145
5.2 载荷与内力分析 .....	140	5.4 鞍座选用与设计校核 .....	148
5.2.1 载荷分析 .....	140	5.4.1 鞍座结构与选用 .....	148
5.2.2 内力分析 .....	141	5.4.2 鞍座设计校核 .....	149
5.3 筒体的应力计算与校核 .....	142	设计举例 .....	151
5.3.1 筒体的轴向应力 .....	142	思考题 .....	155
5.3.2 鞍座处筒体的切应力 .....	144	习题 .....	155
<b>6 换热设备</b> .....	156		
6.1 常用换热设备的特点及应用 .....	156	6.5.1 管板受力分析 .....	172
6.2 管壳式换热器的结构类型及特点 .....	158	6.5.2 管板强度计算概要 .....	173
6.3 管壳式换热器设计概要 .....	161	6.6 膨胀节 .....	174
6.3.1 工艺设计 .....	161	6.6.1 膨胀节的设置条件与结构类型 .....	174
6.3.2 机械设计 .....	165	6.6.2 波形膨胀节设计计算概要 .....	174
6.4 管壳式换热器结构设计 .....	165	6.7 管束振动与防振 .....	175
6.4.1 管束 .....	165	6.7.1 振动诱因与计算参数 .....	175
6.4.2 壳体与管箱 .....	169	6.7.2 振动判据与防振措施 .....	176
6.4.3 浮头盖与钩圈 .....	170	思考题 .....	177
6.5 管板强度计算 .....	171		
<b>7 塔设备</b> .....	178		
7.1 概述 .....	178	7.4.2 风载荷 .....	190
7.2 板式塔内件 .....	179	7.4.3 地震载荷 .....	197
7.2.1 塔盘结构 .....	179	7.4.4 偏心弯矩与重力载荷 .....	202
7.2.2 塔盘的强度与刚度校核 .....	182	7.4.5 圆筒塔壳轴向应力计算与校核 .....	202
7.2.3 进料管结构及除沫装置 .....	183	7.5 裙座设计 .....	205
7.3 填料塔内件 .....	185	7.5.1 裙座结构设计要点 .....	205
7.3.1 液体分布与收集装置 .....	185	7.5.2 裙座设计计算 .....	207
7.3.2 填料支承与压紧、限位装置 .....	187	思考题 .....	210
7.4 塔设备载荷分析与计算 .....	187	习题 .....	211
7.4.1 塔的自振周期 .....	188		
<b>8 反应设备</b> .....	212		
8.1 概述 .....	212	8.2 反应器的搅拌罐 .....	215
8.1.1 搅拌反应器的总体结构 .....	212	8.2.1 罐体强度设计 .....	215
8.1.2 搅拌反应器的类型 .....	212	8.2.2 换热元件 .....	216
8.1.3 新型混合与反应设备 .....	214	8.2.3 工艺管口结构 .....	217

8.3 反应器的搅拌装置 .....	218	8.4.2 机架与凸缘 .....	227
8.3.1 搅拌器型式、特点及选择 .....	218	8.4.3 轴封装置 .....	228
8.3.2 搅拌轴 .....	224	思考题 .....	231
8.4 反应器的传动装置 .....	226	习题 .....	231
8.4.1 电动机与减速器的类型及选用 .....	226		
<b>9 蒸发浓缩与干燥设备概论 .....</b>	<b>232</b>		
9.1 蒸发浓缩设备 .....	232	9.2 干燥设备 .....	236
9.1.1 蒸发浓缩设备的分类 .....	232	9.2.1 干燥与干燥器分类 .....	236
9.1.2 蒸发浓缩设备的选型与设计 要点 .....	233	9.2.2 干燥器选型与设计要点 .....	237
9.1.3 常见典型蒸发浓缩设备 .....	234	9.2.3 滚筒干燥器 .....	239
		思考题 .....	241
<b>附录 .....</b>	<b>242</b>		
附录 I 承压设备重要及常用法规和标准 .....	242	附录 IV 常用钢板许用应力 .....	244
附录 II 承压设备用钢板国内外牌号对 照表 .....	243	附录 V 钢管许用应力 .....	245
附录 III 我国部分地区基本风压与地震基 本烈度 .....	243	附录 VI 锻件许用应力 .....	246
		附录 VII 螺柱许用应力 .....	247
<b>参考文献 .....</b>	<b>248</b>		

# 0 绪 论

## 0.1 过程工业在国民经济中的地位

工业生产种类繁多，从生产方式、扩大生产的方法以及生产过程中原材料所经受的主要变化来分，工业生产可以分为过程工业与产品生产工业两大类。

过程工业包括化学、石油炼制、石油化工、能源、冶金、建材、造纸、食品、核能、生物技术以及医药等工业领域，这类工业具有下列特点：

- i. 生产使用的原料，多为自然资源；
- ii. 原料中的物质在生产过程中经过了化学变化或物理变化；
- iii. 生产过程多是密闭连续生产，且多具有压力、高（低）温及腐蚀等；
- iv. 它的产品大多用作产品生产工业的原料；
- v. 产量的增加主要靠扩大工业生产规模来达到；
- vi. 一般来说，这类工业污染较重，且治理比较困难。

产品生产工业主要指生产电视机、汽车、飞机、冰箱、空调和机床等居民生活或企业生产所使用的产品的工业。这类工业使用的原料，大部分为过程工业生产的产品，生产过程基本上是不连续的，主要对物料进行物理加工或机械加工，物料主要发生物理或结构形状变化。其产品大多为人类直接使用，以改善生产条件和生活质量。如果没有过程工业，就不可能有产品生产工业。

过程工业是一个国家发展生产和增强国防力量的基础，也是现代工业的基础。目前，我国过程工业产值约占工业总产值的 37%，占制造业的 46.9%，在国民经济中有着举足轻重的地位。过程工业的产品主要是工农业生产所需的原料及人民生活的必需品。过程工业的发展不仅极大丰富了我国的商品供应，而且使我国一些重要工业产品的产量跃居世界前列。没有过程工业的快速发展，我国不可能在较短的时间内由一个农业国变为世界制造业大国和强国，也不可能实现民富国强的民族复兴和现代文明。

改革开放以来，我国过程工业已有较大的发展，但还不能完全满足市场需要，一些产品还需从国外进口，且进口数量较大。因此，我国过程工业尚有较大的发展空间，未来将继续保持较高的增长速度。近年来，过程工业的技术进步与技术创新步伐有所加快，其发展主要涉及以下三个环节：物质的转化工艺；实现工艺的过程设备；为实现清洁、高效和低耗转化而进行的多个工艺控制系统的集成。

## 0.2 过程设备的特点及本书任务

过程设备是过程工业中必不可少的过程工艺、过程设备、过程控制三大核心技术之一。广义的过程设备包括过程静设备和过程机器及其间的连接管线等。

本书所涉及的领域为压力容器与过程静设备的设计。过程静设备种类繁多，典型的有塔



## 2 压力容器与过程设备

设备、换热设备、分离设备和贮存设备等。各类过程设备内部结构虽有不同，但基本都有一个承受压力的密闭外壳。承压外壳通称为压力容器，是保证设备安全运行的关键部分。因此，过程设备的设计和制造，大都以压力容器的设计和制造为主体，二者密切相关，互为一体。由于压力容器失效的事故损失和危害非常大，故世界各国普遍都将其作为特种设备，对其设计、制造、使用和维护作出专门的规定和要求，并通过标准和法规加以实施和监督。就过程设备的安全性而言，实际指的是压力容器壳体的可靠性。

运行安全可靠、技术先进、经济合理，是过程设备设计的基本要求。但确保安全第一，其经济性必须以安全性为前提。设备及其构件的强度、刚度、稳定性及密封性等安全指标须满足有关规定要求，而经济性又往往与技术先进性分不开。节水、节能且无污染地实现工艺过程，是过程设备发展的重要标志和时代要求。目前过程设备发展的主要趋势是：单元设备大型化；传热、传质等单元设备高效、高精度及操作自动化以及三年以上无检修运行周期等。把握时代要求，尽可能地采用先进技术与工艺，可以取得安全与经济的综合效益。

基于上述理念，本书将从材料、结构、强度等方面，对压力容器与过程设备设计的有关基本理论、方法和法规进行分析论述。其中，重点是压力容器壳体的结构、应力分析与强度设计计算。

### 0.3 介质的危害性与压力容器的分类

压力容器一般指在工业生产中用于完成反应、传质、传热、分离和贮存等生产工艺过程，并能承受一定压力的密闭容器。它在各种介质和环境十分苛刻的条件下进行操作，如高温、高压、易燃、易爆、有毒和腐蚀等。为便于压力容器的设计和安全管理，通常要对压力容器进行分类。

#### 0.3.1 介质的危害性与分组

介质的危害性是指压力容器在生产过程中因事故致使介质与人体大量接触，发生爆炸或者因经常泄漏引起职业性慢性危害的严重程度，用介质的毒性程度和爆炸危害程度表示。

##### (1) 介质的毒性程度

综合性考虑急性毒性、最高允许浓度和职业性慢性危害等因素，将介质的毒性程度分为极度、高度、中度及轻度危害四个等级。危害介质在环境中的最高允许浓度分别为：极度危害 $<0.1\text{mg}/\text{m}^3$ ；高度危害 $0.1\sim<1.0\text{mg}/\text{m}^3$ ；中度危害 $1.0\sim<10\text{mg}/\text{m}^3$ ；轻度危害 $\geq 10\text{mg}/\text{m}^3$ 。

##### (2) 易爆介质

对气体或液体的蒸气、薄雾与空气形成的混合物，当混合物的爆炸下限为介质所占比例小于10%，或混合物爆炸上限和下限的差值为介质所占比例大于或等于20%时，这种介质就被划分为易爆介质。

##### (3) 介质分组

压力容器的介质包括气体、液化气体以及设备最高工作温度高于或者等于标准沸点的液体。根据其危害程度，分为两组：

第一组 毒性程度为极度危害、高度危害的化学介质、易爆介质及液化气体；

第二组 除第一组以外的介质。

#### 0.3.2 压力容器分类

##### (1) 按照设计压力的大小分类

按照容器内外压力的相对大小，压力容器可分为内压力容器与外压力容器。内压力容器的内部

压力大于外部压力，外压力容器则相反。外压力容器中，当容器外部环境为大气压力，而内部绝对压力小于一个大气压时称为真空容器。

按照设计压力  $p$  的大小，内压力容器又分为如下四个等级：

- 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）， $1.6\text{MPa} \leq p < 10.0\text{MPa}$ ；
- iii. 高压容器（代号 H）， $10.0\text{MPa} \leq p < 100.0\text{MPa}$ ；
- iv. 超高压容器（代号 U）， $p \geq 100.0\text{MPa}$ 。

(2) 按作用原理和用途分类

① 反应压力容器（代号 R）主要是用于完成介质的物理、化学反应设备的压力容器，如反应器、反应釜、聚合釜、高压釜、合成塔、蒸压釜、煤气发生炉等。

② 换热压力容器（代号 E）主要是用于完成介质热量交换的压力容器，如管壳式余热锅炉、热交换器、冷却器、冷凝器、蒸发器、加热器等。

③ 分离压力容器（代号 S）主要是用于完成介质流体压力平衡缓冲和气体净化分离的压力容器，如分离器、过滤器、集油器、缓冲器、干燥塔等。

④ 贮存压力容器（代号 C，其中球罐代号 B）主要是用于贮存或盛装气体、液体、液化气体等介质的压力容器，如液氨贮罐、液化石油气贮罐等。

(3) 按安装方式分类

根据容器的安装方式可分为固定式压力容器和移动式压力容器。通常后者的设计制造要求更严些。

(4) 按重要程度分类

为方便对压力容器的安全技术监督和管理，我国根据容器发生事故的可能性以及发生事故后的二次危害程度的大小，对压力容器进行了综合分类。这种分类方法综合考虑了以下几种因素：设计压力的大小；工作介质的危害性；容器几何容积的大小。这种分类方法将压力容器分为 I、II、III 类，从安全的角度反映压力容器的重要程度和对压力容器的不同要求。设计时，首先应根据介质分组、设计压力和容积，按图 0-1 或图 0-2 正确划分压力容器的所属类别。该类别是拟定压力容器制造技术要求的基本依据，在设计图样上要予以标出。

对于多腔压力容器（如换热器的管程和壳程、夹套容器等），应按照类别高的压力腔作

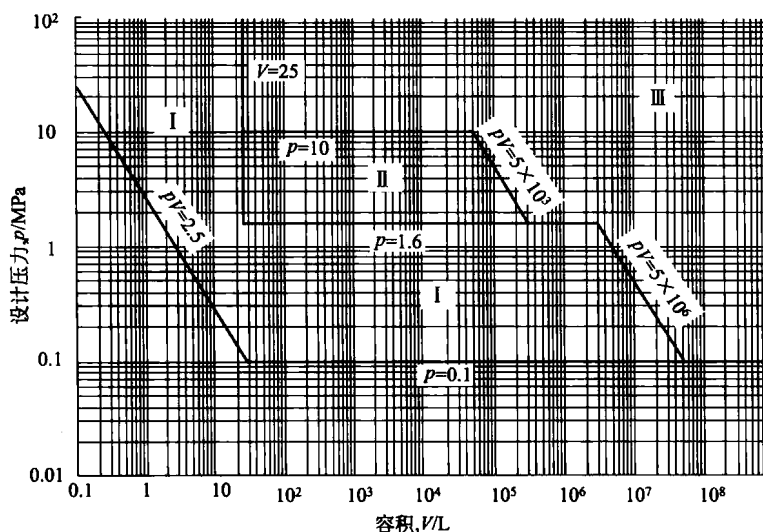


图 0-1 压力容器类别划分图——第一组介质

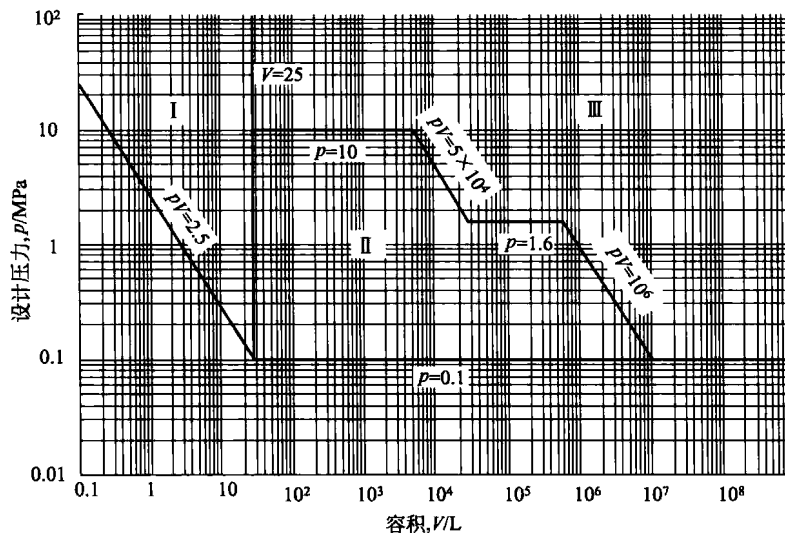


图 0-2 压力容器类别划分图——第二组介质

为该容器的类别并且按照该类别进行使用管理。但设计、制造时应当按照每个压力腔各自的类别分别提出技术要求。对各压力腔进行类别划定时，设计压力取本压力腔的设计压力，容积取本压力腔的几何容积。

## 0.4 压力容器技术标准与技术法规

压力容器具有潜在的危险性，故不论国内还是国外，其设计制造都是依据有关技术标准和技术法规进行的。并且随着科学技术的进步与经验的积累，各国的标准与法规也在不断修改、补充完善和提高，从而形成了本国的压力容器标准和法规体系。

### 0.4.1 标准与法规的异同关系

技术标准与技术法规都是为确保产品质量和使用安全可靠而制定的。但其属性、功用和内容侧重点则有区别。法规通常由政府主管部门制定颁布，属强制执行性的；而标准可由国家有关部门、企业或社会团体制定，可以是强制执行，也可以是推荐性的。在内容上，标准重在产品设计、制造和检验的具体内容与技术要求，是产品设计与生产制造的基本依据；而法规则多侧重产品质量保证和安全管理体系的有关内容与措施，是质量监控机构的执法依据，也是产品设计、制造必须满足的。

在技术法规中，大多要引用相关标准，否则法规要求就不完整。产品按标准进行设计和生产制造，同时还要符合法规的有关规定要求，标准与法规相互补充协调，保证产品的安全可靠。

### 0.4.2 国外压力容器标准与法规

#### (1) 美国压力容器标准与法规

美国是世界上制定压力容器标准最早的国家，但美国没有全国统一的压力容器安全法律法规。有关压力容器安全管理的联邦或各州法规，则大量引用相关标准，如美国国家标准或美国机械工程师协会（ASME）标准等。其中在世界上影响广泛并具有权威的是 ASME 标准，该标准为世界许多国家所借鉴或应用，现已成为美国的国家标准。ASME 标准有如下

特点。

i. 规模庞大、内容全面、体系完整,是目前世界上最大的封闭型标准体系。即它不必借助其他标准或法规,仅依靠自身就可以完成压力容器的选材、设计、制造、检验、试验、安装及运行等全部环节。

ii. 技术先进、安全可靠,修改更新及时,每三年出版一个新的版本,每年有两次增补。

目前,ASME 标准共有 12 卷,外加两个设计案例。其中与压力容器有关的主要是第Ⅷ卷《压力容器》、第Ⅹ卷《玻璃纤维增强塑料压力容器》和Ⅺ卷《移动式压力容器》。而其中第Ⅷ卷又分为以下三个分篇。

ASMEⅧ-1,即第 1 分篇《压力容器》。系常规设计标准,采用弹性失效设计准则,仅对总体薄膜应力加以限制,具有较强的经验性,设计计算简单,适用于设计压力 $\leq 20\text{MPa}$ 的情况。

ASMEⅧ-2,即第 2 分篇《压力容器——另一规则》。系分析设计标准,采用不同的失效设计准则,对不同性质的应力,视其对容器危害程度的不同分别加以限制,适用于设计压力 $\leq 70\text{MPa}$ 的情况。

ASMEⅧ-3,即第 3 分篇《高压容器——另一规则》。系分析设计标准,适用于设计压力 $> 70\text{MPa}$ 的情况。

#### (2) 欧盟压力容器标准与法规

欧洲原来的压力容器标准较为著名的有英国的 BS5500、德国的 AD 和法国的 CODAP 等,但这些标准正逐步被废止。正在欧盟各国强制执行的承压设备法规(简称 PED,属法规类),对于工作压力大于  $0.05\text{MPa}$  的锅炉、压力容器、管道、承压附件等的基本安全要求作出了规定。而与 PED 配套的 EN 协调标准共有 700 余件,内容涉及压力容器和工业管道的材料、部件、设计、制造、安装、使用、检验等诸多方面。其中 EN13445 系列标准是压力容器方面的基础标准,由总则、材料、设计、制造、检测和试验、铸铁压力容器和压力容器部件设计与生产要求、合格评定程序使用指南等 7 部分构成。此外还有简单压力容器通用标准 EN286,系列基础标准 EN764 和一些特定压力容器产品标准,如换热器、液化气体容器、低温容器、医疗用容器等。

#### (3) 日本压力容器标准与法规

日本对锅炉、压力容器、气瓶等特种设备颁布有许多法规,如《高压气体保安法》、《高压气体保安法实施令》及《一般高压气体保安规则》等。并配套执行相关的压力容器标准体系。

日本的压力容器标准体系与美国的 ASME 较为接近,且随着技术的进步,修改调整版本较多。现执行的是 2006 年颁布的 JIS B 8265《压力容器的构造——一般事项》和 JIS B 8266《压力容器的构造——特定标准》体系。其中 JIS B 8265 标准包含材料、设计、焊接、加工、试验和检验等内容。

### 0.4.3 中国压力容器标准与法规

#### (1) 中国压力容器标准系列

中国标准由四个层次组成:国家标准(代号为 GB);行业标准(曾经称为部标准或专业标准);企业标准;地方标准。此处要明确,国家标准是最高级别的和应用最广的标准,但其技术要求和质量指标往往是最底的,即仅是保证压力容器安全的底线。正因为如此,GB 150《钢制压力容器》属强制执行标准。一般而言,仅满足国家标准的产品,可能只是一个合格的产品,而不一定是优质产品。通常行业或企业标准的技术指标高于相应国家标准指标。

## 6 压力容器与过程设备

目前以 GB 150 为核心的压力容器产品标准系列中,共有近 10 个国家标准和 50 个行业标准。其中有基础标准、材料标准、焊接标准、检验标准、设备元件标准、标准零部件标准和单项设备标准等,形成了压力容器标准体系的基本框架。我国的压力容器标准在技术内容上既参照了国外先进国家标准的相应要求,也考虑了我国压力容器行业各生产环节的现状,基本上能够满足行业的需要。

GB 150 是针对固定压力容器的常规设计标准,其技术内容与 ASME VIII-1 大致相当,是基于经验的设计方法,适用于设计压力  $0.1\text{MPa} \leq p \leq 35\text{MPa}$ ,真空度不低于  $0.02\text{MPa}$ 。它采用弹性及失稳失效设计准则与最大主应力理论,设计计算简单,应用方便且使用面广。该标准基本内容包括圆筒和球壳的设计计算、压力容器零部件结构和尺寸的确定、密封设计、超压泄放装置的设置及容器的制造、检验与验收要求等。

JB 4732《钢制压力容器——分析设计标准》是分析设计标准,适用于设计压力  $0.1\text{MPa} \leq p < 100\text{MPa}$ ,真空度不低于  $0.02\text{MPa}$ 。其基本思路与 ASME VIII-2 相同,以应力分析为基础,采用最大切应力理论对容器进行分析设计和疲劳设计,是一种先进合理的设计方法,但设计计算工作量大。

NB/T 47003.1《钢制焊接常压容器》亦是常规设计标准,适用于设计压力  $-0.02\text{MPa} < p < 0.1\text{MPa}$ 。代号中的“T”表示为推荐性标准。

以上三者均为压力容器基础标准。其他有关标准可参见附录 I。

### (2) 中国压力容器法规体系

为保证压力容器产品质量与安全生产,我国还建立了较为完整的压力容器法规体系,相应颁布了《压力容器使用管理规则》、《压力容器制造单位资格认可与管理规则》和《压力容器设计单位资格管理与监督规则》等。2009 年修订颁布的 TSG R0004《固定式压力容器安全技术监察规程》(简称《容规》)是容器法规体系中的核心。它根据国内多年来压力容器事故和管理实践经验教训,制定了某些较国家标准规定更为严格细致的条款,对最高工作压力大于等于  $0.1\text{MPa}$  的压力容器,从材料、设计、制造、安装、改造、维修与使用管理等七个环节做出了监督检查要求。以《容规》为核心的技术法规体系促使中国压力容器的管理与监督工作规范化。国家和地方有关行政安全管理机构,依据这些法规来控制 and 监管压力容器的设计、制造、使用、维修等各个环节。

#### 0.4.4 压力容器标准与法规使用中应注意的几个问题

技术标准与法规是压力容器设计、制造及管理人员不可缺少的常用资料,在使用中应注意各自的使用条件与区别。

##### (1) 标准与法规同时并用,但功能内容有区别

在我国,容器技术标准与技术法规同时实施,二者相辅相成,形成了压力容器产品完整的国家质量标准和安全法规体系。但是应注意,二者性质功用及内容的区别。例如,GB 150 是压力容器设计、制造、检验与验收的依据,而《容规》属法规范畴,是对压力容器进行安全技术监督和管理依据。因此,在压力容器设计图纸的技术要求中,不应写成“本设备按 GB 150 和《容规》进行制造、检验和验收。”而应为“本设备按 GB 150 进行制造、检验和验收,并接受《容规》的监督。”

GB 150 仅适用于设计压力  $0.1\text{MPa} \leq p \leq 35\text{MPa}$ ,真空度不低于  $0.02\text{MPa}$  的各类钢制容器;而《容规》监管的范围包括最高工作压力大于等于  $0.1\text{MPa}$  的钢、铸铁及铝、钛等有色金属制压力容器,其范围较 GB 150 要广。特别是对于有关安全的技术要求与措施,《容规》较 GB 150 更具体详尽。而压力容器的设计和制造,既要符合国家标准,也要遵循和满足《容规》的相关要求。在实际工作中,有时会遇到标准与法规不一致的情况,此时通常以较严者为准,以避免造成不必要的麻烦。

### (2) GB 150 与 JB 4732 等基础标准的合理选用

GB 150《钢制压力容器》设计压力的上限值为 35MPa，而 JB 4732《钢制压力容器——分析设计标准》的上限值为小于 100MPa。显然前者的使用范围为后者全部涵盖，这就存在一个究竟选用何者的问题。如前所述，GB 150 为常规设计标准，具有计算简单，使用方便的特点；而 JB 4732 为分析设计标准，其计算复杂，且选材、制造、检验及验收等要求较为严格。故后者只推荐用于重量大及结构复杂及设计参数较高或需作疲劳分析的压力容器设计。而对于面广量大的中、低压容器，一般是采用 GB 150 进行设计。

上述二标准不涵盖  $<0.1\text{MPa}$  的压力。对于设计压力  $-0.02\text{MPa} < p < 0.1\text{MPa}$  的压力容器应按 NB/T 47003.1《钢制焊接常压容器》进行设计。

### (3) GB 150 与 ASME VIII-1 的主要区别

GB 150 在很大程度上是参照 ASME VIII-1 制订的，其产品质量水平二者相当。但在适用范围和安全系数、探伤比例、压力试验等技术指标上有所不同。GB 150 的压力有明确的限定值，而且仅适用钢制容器；而 ASME 虽有压力限定值，但在满足特定条件后，可以突破限制，且除钢材以外，还适用于有色金属、镍基合金等材料。例如，ASME VIII-1 的水压试验压力为 1.5 倍的设计压力，碳钢及低合金钢的抗拉强度安全系数为 3.5；而 GB 150 相应则分别为 1.25 倍和 3.0。这种差异不应孤立地去看，而是与各自标注体系中的其他技术参数相互对应的。故在采用 GB 150，不能忽视标准体系中其他参数而简单地仅取用 ASME 规定的试验压力或其他参数指标，反之亦然。

## 0.5 中国压力容器的质量保证措施

我国除制订和颁布了较为完整的压力容器标准和法规外，还根据《容规》法规体系的要求，实行了一系列旨在确保压力容器安全的措施。

### (1) 压力容器设计资格取证制度

压力容器设计单位的设计资格和印章必须经省级以上主管部门考核颁发，并在省级以上劳动安全监察部门备案，才能承接压力容器设计任务。否则，属非法无效设计，不得用于制造压力容器。压力容器设计总图上必须加盖设计单位压力容器设计资格印章。资格印章有效期为 4 年，印章失效后的图样不得用于制造生产。从事压力容器的各级设计人员，除必须具备本书的压力容器专业理论知识外，还必须经过考核认证，获得个人设计资格证书，持证上岗。持证单位必须按取证时批准的压力容器类别和品种范围进行设计，超出标准范围的亦无设计权。持证设计制度从源头上保证了压力容器的可靠性。

### (2) 压力容器制造安装资格取证制度

任何压力容器制造厂，均必须经过考核认证，取得制造资格证后才能承接压力容器制造任务。我国压力容器制造单位许可证分为：AR、BR、CR 和 DR 四个级别。其中 AR 为包括高压容器在内的各类固定式容器，CR 为移动式压力容器，DR1~4 为各类气瓶，这三个级别的制造许可证均由国家质量监督检验检疫总局考核颁发；而 BR 为中、低压一、二类固定式容器和 DR5 液化石油气瓶，由省级质量技术监督部门颁发。压力容器制造单位不得越级制造未经授权级别的容器，这对防止粗制滥造起了积极作用。压力容器设备的安装同样也必须履行资格认证制度。

持证单位从事压力容器焊接与无损探伤人员，也必须经相应的培训考核，并取得相应的资格证书，持证上岗作业。

### (3) 压力容器使用登记备案管理制度

## 8 压力容器与过程设备

---

根据质量和安全状况，我国把压力容器划分为五个等级。其中1级为出厂资料齐全，设计、制造质量均符合有关标准与法规要求，质量和安全性最好。而5级质量和安全性最差，属于判废设备。

压力容器使用单位，对新投运和在用的压力容器，必须填写反映安全状况等级的《压力容器使用登记表》，并以此向省（市）质量技术监督部门申报办理备案手续和领取特种设备使用登记证；对在用压力容器，必须按有关法规要求进行定期检查，对其安全状况及时做出评价和处理。无证压力容器禁止使用。

### 思 考 题

1. 压力容器分类常用的有哪几种方式？设计图样上应按何种分类方式标注容器类别？为什么？
2. 在进行压力容器类别划分时，为什么要考虑 $pV$ 值的大小？
3. 压力容器标准与法规有何区别？在不一致时应该如何处理？
4. 《容规》与GB 150有何异同？二者有何关系？
5. GB 150、JB 4732和NB/T 47003.1三个标准有何不同？它们的适用范围是什么？

# 1 压力容器用钢

正确选用材料是承压设备安全可靠运行的保障与技术先进、经济合理的体现，也是承压设备设计的基础和难点。

要做到正确选材，关键是掌握和熟悉材料的使用性能与制造工艺性能。前者如强度、塑性、韧性等力学性能及耐蚀等特殊性能；后者主要指冷、热加工性能，特别是焊接与压力加工性能等。而材料所具有的性能，则决定于其成分和组织。因此，成分、组织、性能与使用是密不可分的。

过程设备操作工况复杂，除大多数承受压力外，许多还具有高温、低温及腐蚀等苛刻的环境，对设备用材料往往具有特殊性能要求。因此，涉及的材料品种类型繁多，有钢、铸铁、有色金属及非金属等，但使用最多最普遍的是各种钢材。故本章仅对承压设备，即压力容器用钢作简介。

## 1.1 钢的质量与性能影响因素

### 1.1.1 化学成分

钢中通常含有磷、硫、氮、氢、氧等杂质元素。作为杂质，这些元素对钢的性能均产生不利影响。

#### (1) 硫、磷杂质

硫和磷是钢中的主要有害杂质，其含量是钢质量优劣的重要指标。硫是由生铁及燃料带入钢中的杂质，硫在钢中主要以 FeS 形式存在，FeS 会与 Fe 形成熔点较低的共晶体（熔点为 980℃）。当钢在 1200℃ 左右开始进行热加工时，分布在晶界的低熔点共晶体会发生溶化而导致开裂，这种现象称为热脆。钢中含有大量硫化物夹杂时，轧成钢板后易于造成分层。

硫还对钢的焊接性能有不良的影响，即容易导致焊接热裂。同时，在焊接过程中，硫易于氧化，生成 SO<sub>2</sub> 气体，使焊缝产生气孔和疏松。

磷是炼钢难以除尽的杂质，它可全部溶于铁素体中，使其强度、硬度提高，但使室温下钢的塑性、韧性急剧降低；并使无塑性转变温度有所升高，使钢变脆，这种现象称为冷脆。磷的存在也使钢的焊接性能变坏，引起焊接热裂纹。

#### (2) 氧、氮、氢微量气体元素

氧以各种夹杂物形式存在于钢中，常常是应力集中源，对钢的塑性和韧性很不利，容易导致时效、对无塑性转变温度极为不利。因此为保证钢的性能，必须严格控制这类夹杂物的数量、形状、大小和分布。

氮作合金元素时可提高钢的强度，是有益的。但在不作为合金元素时它总是作为杂质在钢中有少量存在，对钢的性能产生不利影响。对于低碳钢，Fe<sub>4</sub>N 的析出，会导致时效和蓝脆现象。含微量 N 的低碳钢，在冷加工变形后就会有明显的时效现象和缺口敏感性。当钢中含有磷时，其脆化倾向更大。N 含量超过一定限度时，易在钢中形成气泡和疏松，使冷热加工变得困难。



氢是在冶炼时由锈蚀或含水炉料进入钢中的。它会使钢形成很多严重的缺陷，如白点、点状偏析、氢脆以及焊接热影响区的冷裂纹等。

### (3) 合金元素

碳是钢中的主要合金元素。对于压力容器用碳钢，大多含碳在 0.25% 以下。这类钢随着含碳量的增加，强度、硬度升高，而塑性、韧性降低。特别是低温韧性，会随着含碳量增加急剧下降，同时钢的无塑性转变温度升高。碳也是影响焊接性能的主要元素，钢中含碳量高，其淬硬倾向大，产生焊接冷裂纹的倾向大；同时碳可促使硫化物形成偏析，故碳也是焊缝金属内热裂纹的促生元素。因此焊制压力容器均限用低碳钢。

钢是铁和碳的合金。除碳和存在少量 P、S、N、H、O 等杂质元素处，许多钢中还有目的地加入合金元素，如 Si、Mn、Cr、Ni、Mo、W、V、Ti、Nb、Al 等。但合金元素在钢中的作用和影响十分复杂，同一种合金元素，在不同钢中的作用也不同。例如 Cr，其在 40Cr 中的主要作用是提高淬透性，改善钢的热处理性能；在 12CrMo 中是提高热强性，抑制石墨化倾向；在 Cr13 型钢中是提高耐腐蚀性能，使钢具有不锈性等。掌握合金元素在不同种类钢中的作用和影响，是正确选材的基础。

### 1.1.2 冶炼方法与脱氧程度

#### (1) 冶炼方法

炼钢的主要任务是把钢中的碳以及合金元素的含量调整至有关技术规定范围内，并使 P、S、N、H、O 等杂质的含量降至规定限量之下。冶炼方法不同，去除杂质的程度也不同，所炼钢的质量也有差别。炼钢设备及冶炼方法对钢的质量有直接影响。现代大生产的炼钢炉主要有氧气转炉、电弧炉、电渣炉和感应炉等。对于质量要求高的钢，为了进一步提高钢的内在质量，在前述炉内冶炼后，通常还采用脱 S、P、N、O 等精炼技术，进行二次精炼。测试证明，同一种钢，采用不同冶炼方法，对强度影响较小，但对韧性影响显著。

根据炼钢时选用的原材料、炉渣性质和炉衬材料的不同，通常把炼钢方法和炼钢炉分为碱性和酸性两类。碱性炉渣主要为 CaO，去除 P、S 效果好，但钢中含 H 高。酸性炉渣主要为 SiO<sub>2</sub>，脱氧效果好，钢中气体含量比较低，而且氧化物夹杂少，所含硅酸盐夹杂物多呈球状，对锻件切向性能影响比较小，但不能去除 P、S，对炉料要求严格。

#### (2) 脱氧程度

炼钢脱氧工艺和钢水脱氧程度，对钢的性能和质量具有显著影响。通常，用 Al、Si 等强脱氧剂生产的钢为镇静钢，用 Mn 等弱脱氧剂生产的钢为沸腾钢。

沸腾钢脱氧不完全，钢液含氧量较高，当钢水注入钢锭模后，碳氧反应产生大量气体，造成钢液沸腾，沸腾钢由此得名。沸腾钢锭没有大的集中缩孔，切头少、成材率高，而且沸腾钢生产工艺简单、成本低。但沸腾钢锭心部杂质较多，偏析较严重，组织不致密，有害气体元素含量较多；钢材韧性低，冷脆和时效敏感性较大，焊接性能较差。故我国已禁用沸腾钢作受压元件，该钢主要用于建筑工程结构及一些不重要的机器零部件中。

镇静钢脱氧完全，钢液含氧量低，钢液在钢锭模中较平静，不产生沸腾现象，镇静钢由此得名。镇静钢中没有气泡，组织均匀致密；由于含氧量低，杂质易于上浮，钢中夹杂物较少，纯净度高，冷脆和时效倾向小；同时，镇静钢偏析较小，性能比较均匀，质量较高；镇静钢的缺点是有集中缩孔，成材率低，价格较高。我国规定压力容器均须采用镇静钢。

从化学成分来看，沸腾钢含 Si 极微，一般不大于 0.07%。镇静钢则含 Si 较多，可达 0.17%。沸腾钢有优质钢，也有普通钢，但都是低碳钢；中、高碳钢及合金钢不产生沸腾钢。

### 1.1.3 热处理及交货状态

交货状态是指钢材产品的最终塑性变形加工或最终热处理的状态，如热轧和冷轧等。同