



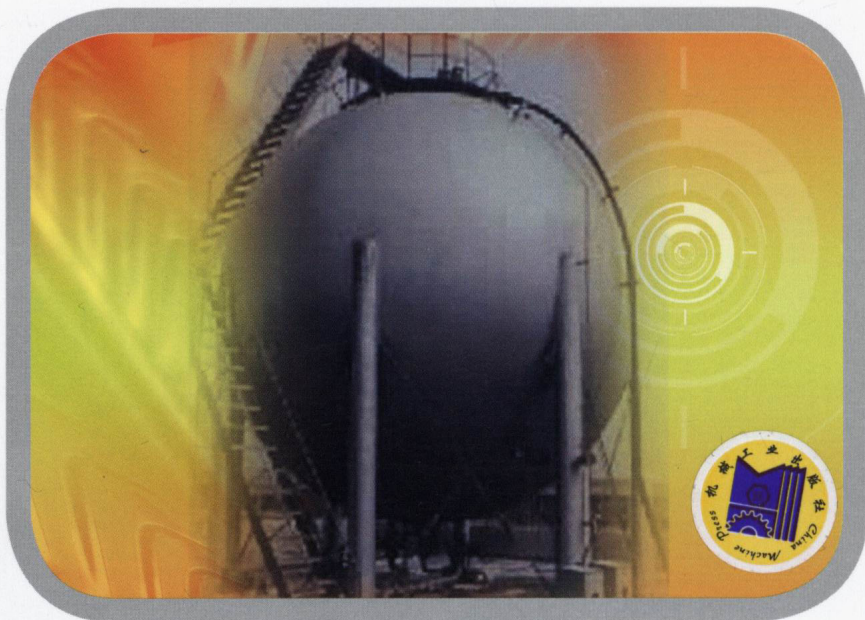
从校园到职场

压力容器设计制造

入门与精通

俞树荣 主编

梁瑞 姜峰 吴健 参编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

从校园到职场

压力容器设计制造入门与精通

主 编 俞树荣

参 编 梁 瑞 姜 峰 吴 健



机械工业出版社

本书针对压力容器设计入门者的特点,较为详细地介绍了压力容器从结构形式选择、设计参数确定,以及压力容器设计需遵循的常用规范、标准,到压力容器选材、设计计算依据等“按规则设计”所涉及的多方面内容,并适当介绍了国内外压力容器“分析设计”的思想和方法。为使入门者更深入理解压力容器设计工作,专门介绍了压力容器常见零部件制造、检验的方法和工艺步骤等内容。

本书可作为高等院校过程装备与控制工程专业高年级本科生和研究生的学习材料,也可供从事压力容器设计的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

压力容器设计制造入门与精通/俞树荣主编. —北京:机械工业出版社, 2012.9

(从校园到职场)

ISBN 978-7-111-39705-2

I. ①压… II. ①俞… III. ①压力容器—设计 ②压力容器—制造
IV. ①TH49

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第214250号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:沈红 责任编辑:沈红 王珑

版式设计:姜婷 责任校对:刘怡丹

封面设计:路恩中 责任印制:乔宇

北京瑞德印刷有限公司印刷(三河市胜利装订厂装订)

2013年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·22.75印张·637千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-39705-2

定价:69.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

压力容器设计是一个综合性很强的工作，要求设计人员具有较为广泛的知识 and 判断能力。对于那些刚踏入压力容器设计岗位的设计者，他们对设计对象的认识是模糊的，亟需一本入门类的指导书，引导他们在设计过程中正确合理地选择结构、材料，了解设计参数和正确使用计算公式，使他们能对制造和检验提出合理的要求，同时让他们了解压力容器的通常生产制造过程工艺及压力容器设计制造需要遵循的法律、法规、规范和标准，并能比较自如地应用于实际工程设计中。本书正是基于这一目的编写而成的。

本书作为一本入门性质的指导书，重点介绍了压力容器的基本结构和现行的管辖压力容器设计、制造和使用的法律、法规以及各种设计规范、标准，并以规范设计和中低压容器设计为主线，较为全面地讲述了压力容器的选材，内外压容器设计计算依据和方法，常用零部件的设计、制造和检验等多方面的问题，考虑到拓展入门设计者的眼界，同时也介绍了一些分析设计、疲劳设计、异形容器设计等压力容器设计的方法和理论。

本书由兰州理工大学俞树荣教授任主编。主要编写人员有：姜峰、俞树荣（第1章、第2章、第3章、第6章第1、2、5节、附录A）；吴健（第4章、第5章、第8章）、俞树荣（第7章）、梁瑞（第6章第3、4节、附录B、附录C）。

本书已列入兰州理工大学规划教材，在编写过程中得到了学校、学院各级领导和同事们的大力支持。此外，研究生陈帅甫参与了部分文字校对等方面的工作，机械工业出版社对本书的出版给予了大力帮助，在此表示深深的感谢。

由于近年国内外标准、规范更新较快，虽经多次修改、补充和审查，仍难免有遗漏。另外由于作者水平有限，书中难免有错误、纰漏之处，恳请专家和读者指正。

编 者

寄语刚参加工作的大学毕业生

当你大学毕业后，无论是在工厂、企业、公司、事业单位从事何种工作，都将发生角色转变，将从一名学生变成一名工程师、设计师、规划师、经济师，等等。可大多数大学生刚毕业时，还不能马上树立比较正确的人生目标，缺少生活经验、工作技能。为了帮助各位学子能尽快转变角色，少走弯路，尽快成为企事业骨干、社会栋梁，机械工业出版社组织编写出版了“从校园到职场”系列丛书，以“学校送一程、企业接一程”的理念，架起从校园到职场的桥梁。

1. 从学生到工程师的心理转变

学生，从小学到大学毕业，经过了16年的历程，已经有了一定的生活经历、生活观念与价值标准。学生成功与否的标准就是看考试成绩，生活的主体就是读书。人与人的关系是靠纯洁的友谊与真理的对错，人和人都是平等的，信念是理想的。但是，参加工作后，理想会有很多与现实不太吻合的东西。首先，判断一个人的成功，不再仅是考试成绩了，不是光靠用功读书就能成功的。工作后，完整地干好领导交给你的事情：修理好一台机器、设计好一个产品、组织一个活动、写一个工作方案等等，你的工作结果是否符合实际要求、是否令同事与领导满意，就是一个判断标准了。

工作成功标准，就是要把交给你的工作先是干完，然后是干好，之后是干精，最后是干出特色与创新。这样，才能逐渐适应工作、熟悉环境、赢得同事与领导的信任，承认你的工作能力，从而把更为复杂、重要的任务交给你，从而得到更多的锻炼，得到重用与提升。所以，进入社会后，首先要降低身份，以平等的地位同一切人交往，向周围的同事、工作人员、领导学习。要做到四勤：手勤、腿勤、嘴勤、脑勤。要做一个为人随和的人、积极向上的人、工作踏实的人。这样你就可以更快、更好地赢得尊重，获得成功。

2. 从学生到工程师的能力转变

一个大学毕业生到了工作岗位，首先要学习基本的技能、知识，熟悉环境、熟悉单位的工作流程，逐渐掌握基本技能。当你能够处理一个环节、一个工序或工艺中的问题，维护生产的正常运行时，你就成为一名初级工程技术人员了；当你能独立主持一件小产品的开发或大型产品里一个部件的开发工作，能把产品设计并制造出来，达到合格的技术要求后，你就是一名工程师了；当你要考虑如何把产品做好、如何把产品做精、如何把产品做出创新时，你就逐渐成为工程师中的高手了；当你可以主持一个大型产品的研发时，你就具有高级工程师的水平了；再继续往上，当你具有把握企业技术发展方向、具有组织大型产品的研发能力时，就是总工程师的水平了。当然，还需要有足够的经历、资历与机会。一名大学生的技术水平就是这样逐渐提高的。

3. 从学生到工程师的专业知识积累

关于专业的问题，一个大学毕业生，是有一个专业特长的，如机械类、电气类、计算机、管理类，等等。在企业，首先要延伸学习你自己的专业知识，在学校所学仅仅是其皮毛而已，其次要注意学习其他专业的知识。因为，到工作岗位后，领导交给你的任务可能是多个专业交叉的问题，不一定是你很熟悉的内容，企业也更需要能为企业提供全面解决方案的综合型人才。此时就要自己学习了，找到有关的书籍，先学习基础理论，再通过网络学习、杂志学习、参观学习较新的知识，了解有关的知识与技能，你就可以获得更宽广的专业知识。此时要有信心，因为学过一个专业后，再学另一个专业，是比较容易的。再者，大学只有四年，工作可能要有四十年，补充新知识是必然的，学习新知识是工作后经常的事。

4. 从学生到工程师的成长建议

判断与取舍：如果做一件事情是自己不擅长的，肯定做不好。只有放弃不适合的，才能在自己更适合的领域内投入做自己更擅长的事业。无法判断该放弃什么的人，也无法判断该干什么。让鸭子学短跑，让兔子学游泳，即使练一辈子，也难以有好结果的。一个技术问题也一样，如果不具有可行性，那就要放弃。对任何一件事，要估计其最好和最坏的程度，如果最坏也能承受，就可以去干。

主动与闯劲：性格决定命运，主动的人比被动的人会有更多机会。要有主动精神与百折不挠的劲头、有闯出新天地的勇气，才有成功的可能。被动、胆小是成功的大敌。

水平与脾气：真正的高手是很谦虚的，因为他知道还有更多的未知。不必要的脾气在与人沟通时会设置障碍，失去获得知识、提高自己的机会。

继承与创新：科技中继承是大多数，创新是一点点，所以先要学会继承并掌握，才能在其基础上提出改进、有所创新。创造条件是创新的基础，只有达到某种条件后，可能才会出现，第一个发现机会并克服困难而成功实践的人，才是真正的高手。

坚持与规划：做事要坐得住，凡是心中长草到处乱跑的人，难以干好一件事情。做人要有规划，做事要有计划。要有近期规划和长远规划，否则极易随波逐流，人生的志向和成功也就丧失在繁琐的日常生活中了。

最后，希望各位学子能尽快适应新的工作岗位，事业顺利，找到自己的发展空间。做人低调，做事认真，忍得住寂寞，受得了批评。还要记住：对于不断追求进步的人，学习是终生的任务和义务。在充满未知与新奇、充满平淡与辉煌、充满快乐与痛苦、充满成功与失败的人生道路上永远向前！向前！当我们年迈时，回首曾经的岁月，不一定有多大的成功，但我们可以说“我认真努力过了，我不后悔。”就足够了。

目 录

前言

第1章 压力容器概况	1	第3章 内压薄壁容器的强度与设计	59
1.1 压力容器基础知识	1	3.1 回转壳体的薄膜应力及应力分析	59
1.2 压力容器安全	3	3.1.1 回转壳体基本概念	59
1.3 压力容器的分类	6	3.1.2 回转薄壁壳体的无力矩理论	60
1.4 压力容器的基本结构、基本技术参数	8	3.1.3 无力矩理论的应用条件	67
1.4.1 压力容器的基本结构	8	3.1.4 边缘应力	68
1.4.2 压力容器的基本技术参数	9	3.2 圆平板中的弯曲应力	70
1.5 压力容器标准体系	14	3.2.1 概述	70
1.5.1 欧盟的压力容器标准体系	14	3.2.2 圆板轴对称弯曲的内力分析	70
1.5.2 美国的压力容器标准体系及主要 标准介绍	15	3.2.3 圆板轴对称弯曲的变形分析	71
1.5.3 我国的压力容器标准体系及主要 标准介绍	17	3.2.4 物理方程	72
第2章 压力容器用材料	22	3.2.5 圆板轴对称弯曲的小挠度微分 方程	73
2.1 材料常用的主要力学性能指标	22	3.2.6 均布载荷下圆板的应力和变形	73
2.1.1 金属材料在室温、短时静载下的 力学性能	22	3.3 强度概况及强度理论、强度设计、 校核方法	76
2.1.2 温度对力学性能的影响	23	3.3.1 压力容器的失效形式	76
2.1.3 金属的缺口冲击试验	24	3.3.2 压力容器的强度失效准则	77
2.1.4 硬度试验和弯曲试验	25	3.3.3 设计方法及强度理论	78
2.2 材料的其他性能	25	3.3.4 强度计算及校核方法	79
2.2.1 物理性能	25	3.3.5 设计参数的确定	80
2.2.2 化学性能	25	3.4 内压圆筒和内压球壳	85
2.2.3 加工工艺性能	27	3.4.1 内压圆筒和内压球壳厚度的 确定	85
2.3 压力容器用钢	29	3.4.2 强度校核	89
2.3.1 铁碳合金的基本组织	29	3.5 内压封头	89
2.3.2 钢铁及合金产品牌号和数字代号 编制介绍	30	3.5.1 凸形封头	90
2.3.3 碳素钢的分类和性能	31	3.5.2 锥形封头	92
2.3.4 低合金钢和高合金钢	33	3.5.3 平盖	99
2.3.5 压力容器用钢的主要品种	36	第4章 外压容器的稳定性	104
2.3.6 国内主要压力容器用钢及相应的 标准	38	4.1 稳定的概念	104
2.4 钢材的热处理工艺	45	4.1.1 外压容器的失效方式	104
2.5 压力容器用其他金属材料	47	4.1.2 外压容器的失稳	105
2.5.1 铜及铜合金	47	4.1.3 外压容器的临界压力	105
2.5.2 铝及铝合金	53	4.2 外压圆筒的周向稳定	105
2.5.3 钛及钛合金	56	4.2.1 临界压力的计算	105
		4.2.2 外压圆筒的稳定计算	108
		4.2.3 图算法	110
		4.3 外压封头和加强圈	117

4.3.1 外压封头和球壳的稳定计算	117	6.5 压力容器应力分析设计——直接法	
4.3.2 加强圈的计算	120	简介	191
4.4 外压圆筒的轴向稳定	122	6.5.1 直接法的术语	192
4.4.1 轴向受压圆筒的临界应力	122	6.5.2 直接法设计校核的步骤	195
4.4.2 轴向受压圆筒图算法计算原理	123	6.5.3 直接法设计校核的原理和应用	
4.4.3 轴向受压缩圆筒的图算步骤	123	规则	197
第5章 压力容器常用零部件及安全		第7章 异形截面容器	202
附件	124	7.1 椭圆形截面容器	202
5.1 法兰连接	124	7.1.1 受力分析	202
5.1.1 法兰的分类与压紧面形式	124	7.1.2 危险截面和综合应力	205
5.1.2 垫片结构类型和应用场合	126	7.1.3 变形计算	207
5.1.3 法兰的密封设计	126	7.1.4 实例	209
5.2 开孔补强	134	7.2 其他常见非圆形截面容器	211
5.2.1 开孔接管处的应力集中	134	7.2.1 带圆角的矩形容器	211
5.2.2 补强结构和计算	139	7.2.2 近似椭圆形截面的容器	213
5.3 容器支座	145	7.2.3 长圆形容器	214
5.3.1 鞍座的结构和选用	145	7.2.4 无圆角的矩形容器	214
5.3.2 立式容器支座结构和选用	147	7.3 任意形状的非圆形截面容器	215
5.4 安全附件(安全阀、压力表、温度计、		7.3.1 受力分析	215
液面计等)	154	7.3.2 回转半径	217
5.4.1 安全阀和爆破片的选用	154	7.3.3 计算公式及其应用	219
5.4.2 压力表、温度计、液面计的结构		7.4 大曲率壳体中的弯曲应力	222
和选用	160	7.4.1 曲梁弯曲时的弯曲应力	222
第6章 分析设计	169	7.4.2 矩形截面曲梁的中性层位置	224
6.1 概述	169	7.4.3 弯曲应力的计算公式	225
6.1.1 压力容器应力分析设计介绍	169	7.5 带有加强筋的非圆形截面容器	226
6.1.2 设计准则	170	7.5.1 外加强圈加强的非圆形截面	
6.1.3 应力分析常用方法	170	容器	227
6.2 压力容器应力分析设计	173	7.5.2 具有内加强筋板的长圆形柱壳	228
6.2.1 失效模式和评定方法	173	7.6 环形壳体	231
6.2.2 载荷情况	173	7.6.1 横截面为圆形的等壁厚环形	
6.2.3 应力分类	174	壳体	231
6.2.4 各类应力的限制条件	177	7.6.2 弯管时壁厚变化的环形壳体	232
6.3 疲劳设计	179	7.6.3 弯管时截面变化的环形壳体	233
6.3.1 低循环疲劳曲线	179	第8章 压力容器的制造工艺及检验	235
6.3.2 平均应力影响下疲劳曲线的		8.1 压力容器的主要制造工艺	235
修正	180	8.1.1 原材料的准备	235
6.3.3 疲劳损伤积累	181	8.1.2 划线	235
6.3.4 疲劳设计的方法过程	182	8.1.3 切割	238
6.3.5 疲劳分析的其他问题	185	8.2 容器通用零件的成形工艺	240
6.4 典型产品的应力分析设计案例	185	8.2.1 筒体的成形	240
6.4.1 工程问题	185	8.2.2 封头的成形	242
6.4.2 力学模型与分析	186	8.2.3 管子的弯曲成形	245
6.4.3 设计状态下的有限元分析结果	186	8.3 压力容器的焊接	246
6.4.4 设计过程	186	8.3.1 焊接接头与坡口	246

8.3.2 常用焊接方法及焊接工艺 248

8.3.3 常用钢材的焊接 253

8.3.4 焊接缺陷及其防治 258

8.3.5 焊后热处理 271

8.4 过程设备的检验 272

8.4.1 无损检测 272

8.4.2 耐压试验及泄漏试验 288

8.5 在用压力容器定期检验 291

8.5.1 定期检验的目的 291

8.5.2 压力容器劣化的原因 292

8.5.3 检验的周期和内容 293

8.6 压力容器的腐蚀与控制 297

8.6.1 压力容器腐蚀的危害性与控制
腐蚀的重要意义 297

8.6.2 常见的腐蚀种类 297

8.6.3 防腐的措施 298

附录 310

附录 A 国内常用压力容器现行规范标准 ... 310

附录 B 制造压力容器常用牌号、标准及使用
状态和力学性能、许用应力 314

附录 C 弹塑性力学及有限元基础 328

参考文献 354

第1章 压力容器概况

1.1 压力容器基础知识

工业可分为过程工业与成品（产品）制造工业两大类。过程工业也称“流程工业”，包括化工、冶金、石油加工业、制药及轻工业等。这类工业大多以天然资源如矿石、煤炭、石油、农产品等为原料，通过物理及化学变化，生产出人类衣、食、住、行等所需的物品和材料，以及成品制造工业需要的原材料。典型的过程工业，如石油化工业、化学工业等，就是利用石油、煤炭、天然气等资源，生产出柴油、汽油、橡胶、化纤等产品。

过程工业在其生产流程中大量使用塔、釜、槽、罐等设备。这些设备有的用来储存物料，如各种储槽、储罐；有的用来对物料进行物理处理，如管壳式换热器、精馏塔、过滤器等；有的用于进行化学反应，如反应器、合成炉、搅拌反应釜等。尽管这些设备的作用各不相同，形状结构差异很大，尺寸大小千差万别，内部构件更是多种多样，但它们都有一个外壳，这个外壳就叫容器。

绝大多数容器的作用是在一定的压力、温度下完成物料储存、反应和热量交换等特定的工艺过程。工业生产中，将具有特定的工艺功能并承受一定压力的密闭设备，称为压力容器。储运容器、反应容器、换热容器和分离容器的外壳均属压力容器。压力容器一般包括筒体、封头、密封装置、开孔接管、支座和安全附件等，其功能是盛装气体或液体，提供能承受一定温度和压力的密闭空间。

生产实践中，除了储运使用的压力容器外，用于反应、换热、精馏、吸收等单元过程的压力容器都有各种形式的内件。例如，换热过程中常用的管壳式换热器，就是由换热管束（内件）和包裹管束的外壳（压力容器）共同组成，以完成相应的热量交换工艺过程。我们一般把压力容器和其内件共同组成的、具有一定功能并能够完成一定工艺过程的装置称为设备。

压力容器最初主要用于石油炼制和化学工业。如今，压力容器已经远远突破了原来的应用局限，它不仅大量地用于石油化工行业，如炼油、化肥、医药、农药、无机化工和有机合成等，还在航空、航天、航海、原子能、冶金、采掘、机械制造、交通、纺织和轻工等行业发挥着不可替代的作用。同时压力容器在农业方面有着广泛的应用。随着农业自动化进程的加快，各种蓄能器、动力机械的辅机、冷却器、油水分离器、气罐、蒸煮釜、烘烤器及大型工程管道等被大量用于实际生产中。此外，在科学研究的许多领域，压力容器也起着重要的作用。

石油、化工生产中较为典型的压力容器示例如下。

（1）球形储罐（图 1-1）

球形储罐（球罐）是储存各种气体和液化气体的常用压力容器之一，为大容量、承压的球形储存容器，广泛应用于石油、化工、冶金等部门，它可以用来作为液化石油气、液化天然气、液氧、液氨、液氮及其他介质的储存容器，也可作为压缩气体（空气、氧气、氮气、城市煤气）的储罐。球罐与立式

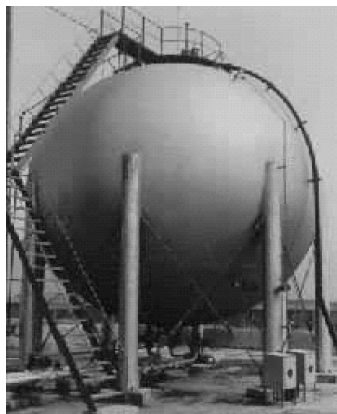


图 1-1 球形高压燃气储罐

圆筒形储罐相比,在相同容积和相同压力下,球罐的表面积最小,故所需钢材较少;在相同直径的情况下,球罐壁受力小,而且均匀,故球罐的板厚只需相应圆筒形容器壁板厚度的一半。采用球罐,可大幅度减少钢材的消耗,一般可节省钢材 30% ~ 45%。此外,球罐占地面积较小,基础工程量小,可节省土地面积。

(2) 加氢反应器 (图 1-2)

加氢反应是现代石油炼制工艺中最重要的转化过程之一,无论是加氢精制、处理还是加氢(裂化)都得到了广泛应用。所谓加氢就是使相对分子质量大的可燃性原料,在高温高压的条件下借助于催化剂与氢反应,来制取相对分子质量较小的各种石油产品。通过加氢,不仅可以减少或去除油品中不纯物质,提高石油产品的质量,而且还可以增加石油产品的收率。加氢反应器是石油炼制的关键设备,它在 10 ~ 25MPa 高压、400 ~ 480℃ 高温、临氢及硫化氢等条件下工作。加氢反应器设计要求高,制造工艺复杂、难度大。为了防止氢脆、氢腐蚀、硫化物腐蚀、Cr-Mo 钢回火脆化以及堆焊层的剥离等严重损伤,加氢反应器对材料、焊接技术以及焊接质量都有很高要求。



图 1-2 运输中的加氢反应器

(3) 尿素合成塔 (图 1-3)

尿素合成塔是尿素生产装置中的关键设备之一,在尿素生产流程中占有重要的地位。尿素合成过程中生成氰酸和氰氧铵,这是一种非氧化性有机酸,对容器材料有强烈的腐蚀作用。同时在反应过程中容器要承受一定的压力和温度,故尿素合成塔是一种典型的耐压、耐较高温度和耐强烈腐蚀的反应器。根据不同的工艺操作,压力也不尽相同,主要有 21MPa 和 16MPa 两种系列,操作温度小于 200℃。

(4) 大型换热器 (图 1-4)

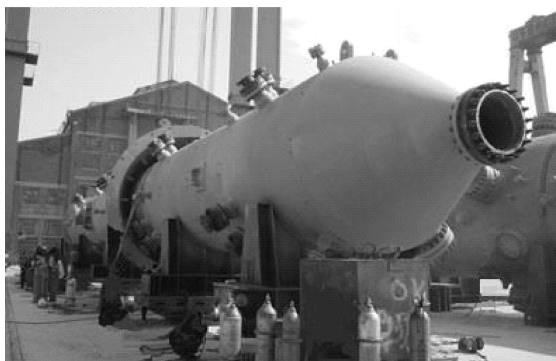


图 1-3 尿素合成塔的安装

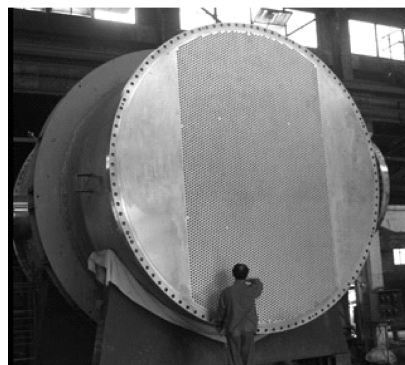


图 1-4 大型换热器的制造

几乎所有的化工工艺过程都伴随着加热、冷却、冷凝、蒸发等现象。换热器是实现能量平衡的关键设备,系统能量的合理使用和分配主要由换热器来实现。目前天然气液化装置、大型炼油装置、大型乙烯装置中的换热器规模已经很大,如某年产量 100 万 t 乙烯装置中的循环气冷却器是装置中的关键设备,该设备壳程长度为 20000mm,壳程筒体内径为 4000mm,管束 6283 根,管束长度为 20000mm,设备总长度为 43725mm,换热面积为 12325m²,设备重量为 370t,是目前国

内自主设计、制造的最大的固定管板式换热器。

(5) 空分设备 (图 1-5)

大规模的空气分离一般采用低温冷冻法进行空气中各组分的分离。该技术经历多年的历程, 现已发展成为一种较成熟的技术。该技术中的空分设备就是以空气为原料, 通过压缩、循环、深度冷冻的方法把空气变成液态, 再经过精馏, 从液态空气中逐步分离生产出氧气、氮气及氩气等气体的一套工业设备。其中空气精馏系统起到将空气中各种组分分离的作用, 主要装置为精馏塔 (上塔、下塔)、冷凝蒸发器、过冷器等各种形式的压力容器和设备。

《特种设备安全监察条例》对压力容器范围作出了详细的规定: 盛装最高工作压力大于或者等于 0.1MPa (表压), 且压力与容积的乘积大于或者等于 $2.5\text{MPa} \cdot \text{L}$ 的气体、液化气体和最高工作温度高于或者等于标准沸点的液体的固定式容器和移动式容器; 盛装公称工作压力大于或者等于 0.2MPa (表压), 且压力与容积的乘积大于或者等于 $1.0\text{MPa} \cdot \text{L}$ 的气体、液化气体和标准沸点等于或者低于 60°C 液体的气瓶、氧舱等。

所谓固定式容器和移动式容器, 是从使用、安装和管理的角度考虑, 把压力容器分为了两大类。这两类容器由于使用情况不同, 对它们的技术管理要求也不一样。

固定式压力容器是指除了用作运输储存气体的盛装容器以外的所有压力容器。这类容器有固定的安装地点和使用地点, 工艺条件和操作人员比较固定, 容器一般是用管道与其他设备相连。移动式容器的主要作用是储装和运输有压力的气体或液化气体, 容器在气体制造厂充装气体, 然后运送到使用单位使用。这类容器没有固定的使用地点, 一般也没有专职的使用操作人员, 使用环境经常更换, 管理比较复杂, 因而也比较容易发生事故。按照容积的大小和结构形式, 移动式压力容器又可分为气瓶和槽 (罐) 车两大类。

我国和其他许多国家对这两类容器都分别制定有不同的管理章程和技术标准、规范等。本书主要介绍固定式压力容器的分类、结构、相关设计方法和各种规范、标准等方面的知识。



图 1-5 空分设备

1.2 压力容器安全

1. 特点

随着科学技术的发展, 压力容器向多功能、大型化、成套化和专业化方向发展, 呈现出以下特点。

(1) 单件或小批量生产

压力容器的用途、盛装介质的特性、操作条件、安装环境和生产能力千差万别, 往往要根据功能、使用寿命、生产条件、环境保护等要求, 采用不同的工作原理、材料、结构和制造工艺。因此, 压力容器是典型的单件或小批量生产的非标设备。例如, 换热设备的传热过程可以是传导、对流和辐射或它们的组合; 低温下工作的过程设备需考虑材料的冷脆特性, 并采用有效的绝热结构; 对于高温下工作的过程设备, 蠕变就成为一个必须考虑的因素; 搅拌设备中, 有的搅拌轴用电动机带动, 有的用磁力带动。工作原理的多样性决定了每种压力容器的设计、制造、安装和管理要求各不相同, 且大多需要针对不同的工艺要求进行单独和特定的考虑。

(2) 操作条件复杂

压力容器的操作条件十分复杂，甚至近于苛刻。随着大型化、高参数化和多功能化要求的提高，越来越多的容器在高温、低温、高压、高真空、强腐蚀等复杂条件下工作。压力从 $(1 \sim 2) \times 10^{-5} \text{ Pa}$ 的真空到高压、超高压，如石油加氢为 $10.5 \sim 21.0 \text{ MPa}$ ，高压聚乙烯为 $100 \sim 200 \text{ MPa}$ ，合成氨为 $10 \sim 100 \text{ MPa}$ ，人造水晶高达 140 MPa ；温度从 -196°C 低温到超过 1000°C 的高温。容器承受的介质载荷复杂，处理介质包罗爆、燃、毒、辐（照）、腐（蚀）、磨（损）等数千个品种，具有潜在的爆炸和泄漏等危险。压力容器的设计寿命较长，在使用期间，除受到压力、重量等静载荷作用外，还可能受风载荷、地震载荷、冲击载荷附加的机械或温度载荷等动载荷的作用。在动载荷作用下，流体介质与结构相互作用，会使压力容器发生剧烈振动甚至失效，引起灾害性后果。

（3）失效危害严重

大多数容器用来容纳压缩气体或饱和液体，若容器破裂，导致介质突然卸压膨胀，瞬间释放出来的破坏能量极大，加之压力容器大多数系焊接制造，难免产生各种焊接缺陷，一旦检验、操作失误容易发生爆炸破裂，容器内易爆、易燃、有毒的介质将向外泄漏，势必造成灾难性的后果。选材不当、材料误用、材料缺陷、材质劣化、介质腐蚀、设计失误、制造缺陷、缺陷漏检、操作不当以及难以控制的环境因素等原因，都有可能造成容器失效。国内外每年都有压力容器爆炸和泄漏事故发生，其后果是造成人员伤亡、企业停产、财产损失和环境污染。对连续生产的流程性企业，容器设备失效必然会导致停工、停产，损失就更大了。

操作条件的复杂性和失效后果的严重性使压力容器从设计、制造、安装到使用、维护都不同于一般机械装备，而成为一类特殊设备。

为提高压力容器运行安全性，世界各国均将其列为重要的监检产品，由国家指定的专门机构，按照国家规定的法规和标准实施监督检查和技术检验。许多国家都结合本国的国情制定了强制性或推荐性的压力容器规范标准，如我国 GB150.1 ~ 150.4—2011《压力容器》、JB4732—1995《钢制压力容器——分析设计标准》、NB/T47003.1—2009《钢制焊接压力容器》和技术法规 TSG R 0004—2009《固定式压力容器安全技术监察规程》等，对压力容器的材料、设计、制造、安装、使用、检验和修理改造提出了相应的要求。

2. 基本要求

（1）安全可靠

为保证过程设备安全可靠地运行，压力容器应具有足够的能力来承受设计寿命内可能遇到的各种载荷。因此要求用于制作压力容器的材料强度高、韧性好，材料与介质相容，压力容器的结构有足够的刚度和抗失稳能力，密封性能好。强度、刚度、韧性和密封性是影响过程设备安全可靠性的主要因素。

强度是压力容器在载荷作用下抵抗永久变形和断裂的能力。压力容器设计时，一般根据不同的强度破坏方式，将应力或与应力有关的参量限制在许用值以内，以满足强度要求。例如，气体储罐不应在介质压力下鼓胀变形或破裂。屈服强度和抗拉强度是钢材常用的强度判据。在相同设计条件下，提高材料强度，就可以增大许用应力，减薄过程设备的壁厚，减轻重量，简化制造、安装、运输和安装，从而降低成本，提高综合经济性。对于大型压力容器，采用高强度材料的效果尤为显著。但也不能过分强调材料的高强度，因为高强度材料往往制造加工困难。

刚度是压力容器在载荷作用下保持原有形状的能力。刚度不足是压力容器过度变形、失稳和泄漏的主要原因之一。例如，螺栓、法兰和垫片组成的连接结构，若法兰因刚度不足而发生过度变形，将导致密封失效而泄漏；在真空下工作和承受外压的容器，若壳体刚度不够，将引起失稳破坏。因此，容器设备应有足够的刚度。

韧性是指材料断裂前吸收变形能量的能力。由于原材料、制造（特别是焊接）和使用（如

疲劳、应力腐蚀)等方面的原因,容器常带有各种各样的缺陷,如裂纹、气孔、夹渣等。研究表明,并不是所有缺陷都会危及容器设备的安全运行,只有当缺陷尺寸达到某一临界尺寸时,才会发生快速扩展而导致容器破坏。临界尺寸与缺陷所在处的应力水平、材料韧性以及缺陷的大小、形状和方向有关,它随着材料韧性的提高而增大。材料韧性越好,临界尺寸越大,容器设备对缺陷就越不敏感;反之,在载荷作用下,很小的缺陷就有可能快速扩展而导致容器设备失效。

密封性是指压力容器防止介质泄漏的能力。压力容器的泄漏可分为内泄漏和外泄漏。内泄漏是指容器内部各腔体间的泄漏,如管壳式换热器中管程介质通过管板泄漏至壳程。这种泄漏轻者会引起产品污染,重者会引起爆炸事故。外泄漏是指介质通过可拆接头泄漏到周围环境中,或空气进入容器设备内的泄漏。压力容器内的介质往往具有危害性,外泄漏不仅有可能引起中毒、燃烧和爆炸等事故,而且会造成严重的环境污染。因此,密封是压力容器安全操作的必要条件之一。

压力容器各零部件的强度并不相同,整体强度往往取决于强度最弱零部件的强度。使各零部件的强度相等,即采用等强度设计,可以充分利用材料的强度性能,节省材料,减轻重量。

材料韧性一般随着强度的提高而降低。在选择材料时,应特别注意材料强度和韧性的合理匹配。在满足强度要求的前提下,尽可能选用高韧性材料,追求强度而忽略韧性是非常危险的。国内外曾发生过多起因韧性不足引起的过程设备爆炸事故。

环境也会影响材料韧性。温度降低、受中子辐照或在高温、高压、临氢条件下工作,都会降低材料韧性,使材料脆化。掌握材料性能随环境的变化规律,防止材料脆化或将其限制在许可范围内,是提高过程设备可靠性的有效措施之一。

(2) 满足生产过程要求

压力容器首先是满足生产上的需要,其主要结构尺寸由工艺决定。设备设计只能根据工艺设计人员提供的工艺条件数据和场地条件进行设计,即满足功能要求。

此外还有寿命要求。例如,在石油化工行业中,一般要求高压容器的使用年限不少于20年,塔设备和反应设备不少于15年。腐蚀、疲劳、蠕变是影响过程设备寿命的主要因素,设计时应综合考虑温度和压力的高低及波动情况、介质的腐蚀性、环境对材料性能的影响和流体与结构的相互作用,采取有效措施,确保压力容器在设计寿命内安全可靠地运行。

(3) 综合经济好

压力容器设计既要保证安全可靠,又要尽量做到技术经济合理,产品总成本最低。要做到这一点,设计压力容器时首先选材要合理,在保证满足生产要求的情况下,结构尽可能简单,材料消耗尽可能少,同时还应考虑制造、检验、安装和维修等因素。对某些技术先进的设备,尽管投资高一些,但如果在单位加工能力、消耗指标、产品质量等方面有较大优点,也应考虑采用。简而言之,压力容器应尽可能满足生产效率高、消耗系数低、结构合理、制造简便、易于运输和安装等要求。

此外,压力容器还应操作简单、可维护性和可修理性好,同时便于自动控制,适宜操作条件的变化,满足环境性能的要求等。

总的来说,压力容器设计的基本要求是既要保证安全可靠,又要尽量做到经济合理。这就要求对容器设备的操作条件和载荷进行正确的估计,对压力容器的总体应力、局部应力和温差应力,以及可能产生的失效形式等进行全面的分析和评价,采取不同的设计方法。同时,根据压力容器的操作条件和作用,选择适当的材料和合理的结构。因此,压力容器设计者不仅仅是依照有关标准和制造条件进行简单的设计,还必须要综合考虑生产条件、安全要求和技术经济上的合理等因素,选择一个最佳设计方案。

1.3 压力容器的分类

压力容器的分类方法很多，从使用、制造和监检的角度，有以下几种分类。

1. 按承压方式分类

内压力容器，即内部介质压力大于外界压力。

外压力容器，即内部介质压力小于外界压力。

真空容器，即内部压力小于一个大气压的外压力容器。

生产中，内压力容器按承受压力的等级分为低压容器、中压容器、高压容器和超高压容器，分类依据见表 1-1。

表 1-1 内压力容器按承受压力的等级分类

容器的分类	设计压力 p/MPa ^①
低压容器	$0.1 \leq p < 1.6$
中压容器	$1.6 \leq p < 10$
高压容器	$10 \leq p < 100$
超高压容器	$p \geq 100$

① 如不加特别说明，本书压力均指表压力。

2. 按盛装介质分类

非易燃、无毒，易燃或有毒，剧毒介质。

3. 按工艺过程中的作用不同分类

反应容器（代号 R），主要是用于完成介质的物理、化学反应的容器，如反应器、反应釜、聚合釜、合成塔、增压釜、煤气发生炉等。

换热容器（代号 E），主要是用于完成介质热量交换的容器，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。

分离容器（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容器，如分离器、过滤器、蒸发器、集油器、缓冲器、干燥塔等。

储运容器（代号 C，其中球罐代号 B），主要是用于储存、盛装和运输气体、液体、液化气体等介质的容器，如液氨储罐、液化石油气储罐等。

在一种压力容器中，如同时具备两个以上的工艺作用原理时，应按工艺过程中的主要作用来划分品种。

4. 按安装方式分类

固定式压力容器：有固定安装和使用地点，工艺条件和操作人员也较固定的压力容器。

移动式压力容器：使用时不仅承受内压或外压载荷，搬运过程中还会受到由于内部介质晃动引起的冲击力，以及运输过程带来的外部撞击和振动载荷，因而在结构、使用和安全方面均有其特殊的要求。

5. 从安全监检和管理的角度分类

上面所述的几种分类方法仅仅考虑了压力容器的某个设计参数或使用状况，还不能综合反应压力容器面临的整体危害水平。从安全监察与管理的角度来看，压力容器的分类应以压力容器的危险性为核心，以分类监管为目的。为此，TSG R0004—2009《固定式压力容器安全技术监察规程》（以下简称《固定容规》）提出由设计压力、容积和介质危害性三个因素决定压力容器类别，

不再考虑容器在生产过程中的作用、材料强度等级、结构形式等因素，简化分类方法，强化危险性原则，从单一理念上对压力容器进行分类监管，突出本质安全思想。根据危险程度的不同，《固定容规》将压力容器划分为三类（Ⅰ类、Ⅱ类和Ⅲ类），利用设计压力 p 和容积 V 值在不同介质分组坐标图上查取相应的类别，简单易行、科学合理、准确唯一。

《固定容规》将压力容器的介质分为两组，包括气体、液化气体或者介质最高工作温度高于或者等于其标准沸点的液体。

1) 第一组介质：毒性程度为极度危害、高度危害的化学介质，易爆介质，液化气体[⊙]。

2) 第二组介质：由除第一组以外的介质组成，如毒性程度为中度危害以下的化学介质，包括水蒸气、氮气等。

压力容器分类应当先按照介质特性选择分类图，再根据设计压力 p (MPa) 和容积 V (L)，标出坐标点，确定容器类别。

1) 对于第一组介质，压力容器的分类如图 1-6 所示。

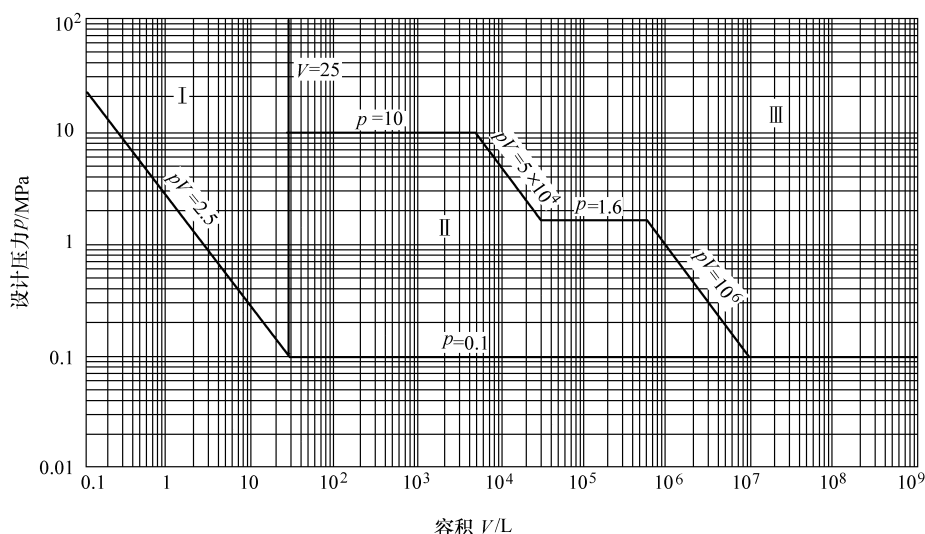


图 1-6 压力容器类别划分——第一组介质

2) 对于第二组介质，压力容器的分类如图 1-7 所示。

6. 按容器壁温分类

常温容器，壁温 $-20 \sim 200^{\circ}\text{C}$ 。

⊙ 介质危害性指设备在生产过程中因事故致使介质与人体大量接触、发生爆炸或因泄漏引起职业性慢性危害的严重程度，用介质毒性危害程度和爆炸危害程度表示。

毒性程度：综合考虑急性毒性和最高容许浓度。极度危害最高容许浓度小于 $0.1\text{mg}/\text{m}^3$ ，高度危害最高容许浓度 $0.1 \sim 1.0\text{mg}/\text{m}^3$ ，中度危害最高容许浓度 $1.0 \sim 10.0\text{mg}/\text{m}^3$ ，轻度危害最高容许浓度大于等于 $10.0\text{mg}/\text{m}^3$ 。

易燃介质：指气体或液体的蒸气、薄雾与空气混合形成的爆炸混合物，其爆炸下限小于 10%，或者爆炸上限和爆炸下限的差值大于等于 20%。

介质毒性危害程度和爆炸危害程度采用 GBZ 230—2010《职业性接触毒物危险程度分级》、HG20660—2000《压力容器中化学介质毒性危害和爆炸危害程度分类》标准。

工作压力：指压力容器在正常工作情况下，其顶部可能达到的最高压力。

容积：指压力容器的几何容积，即由设计图样标注的尺寸计算（不考虑制造公差）并且圆整。一般应当扣除永久连接在压力容器内部的内件的体积。

容器内介质为最高工作温度低于其标准沸点的液体时，如果气相空间的容积与工作压力的乘积大于或等于 $2.5\text{MPa} \cdot \text{L}$ 时，也属于本规程的适用范围。

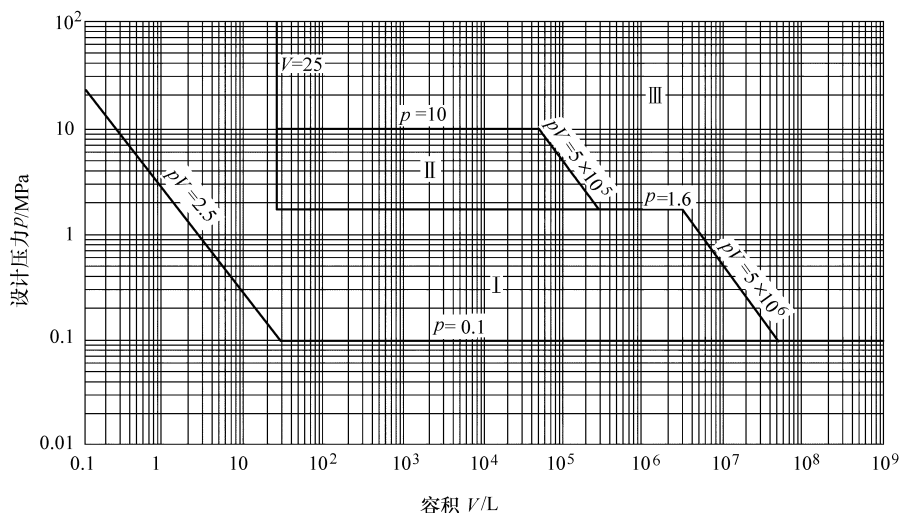


图 1-7 压力容器类别划分——第二组介质

高温容器，壁温达到蠕变温度。碳素钢或低合金钢容器，温度超过 420℃，合金钢超过 450℃，奥氏体不锈钢超过 550℃，均属高温容器。

中温容器，在常温和高温之间的容器。

低温容器，指设计温度低于 -20℃ 的碳钢和低合金钢制容器，设计温度低于 -196℃ 的奥氏体不锈钢制容器。

1.4 压力容器的基本结构、基本技术参数

1.4.1 压力容器的基本结构

压力容器的结构一般比较简单，其主要部件是一个能承受压力的壳体及其他必要的连接件和密封件。壳体的结构形式较多，最常用的是球形壳和圆筒形加封头的组合壳体。出于制造、安装等方面的考虑，圆筒形加封头的组合壳体结构远比球形壳结构应用广泛。后者主要用在物料储存等方面。

球形容器的直径一般都比较大，难以整体或半整体压制成形，所以它大多是由许多块按一定的尺寸预先压制成形的球面板拼接组焊而成（图 1-8）。这些球面板的形状不完全相同，但板厚一般都相同。只有一些特大型、用以储存液化气体的球形储罐，球体下部的壳板才比上部的壳板要稍微厚一些。

圆筒形加封头的组合壳体压力容器一般由筒体、封头、法兰、密封元件、开孔和接管、支座等六大部分构成容器本体（图 1-9）。此外，还配有安全装置、表、计及完成不同生产工艺作用的内件。

压力容器中直接承受压力载荷作用的零部件为受压元件，受压元件以外的其他部件为非受压元件。如筒体、

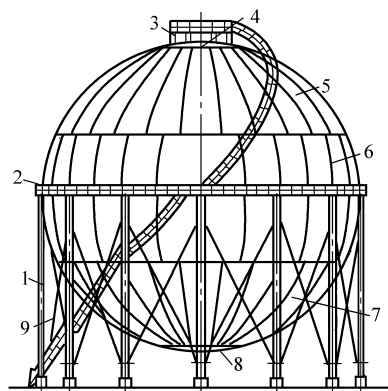


图 1-8 球形壳体容器

- 1—支柱 2—中部平台 3—顶部操作平台
4—北极板 5—北温带 6—赤道带
7—南温带 8—南极板 9—拉杆