



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

石油化工压力容器设计

(第二版)

仇性启 主编

石油工业出版社
Petroleum Industry Press



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

石油化工压力容器设计

(第二版)

仇性启 主编



石油工业出版社

内 容 提 要

全书共9章。前5章主要讲述轴对称旋转薄壳、厚壁圆筒、圆板的基本理论及工程设计方法；第6章介绍在压力容器总体设计中应考虑的各种局部应力问题及焊接结构设计问题；第7章介绍压力容器及管道的密封设计；最后2章简要介绍压力容器的应力分析设计方法，以及压力容器的脆性断裂、低周疲劳破坏、高温蠕变和腐蚀破坏等失效问题。

本书注重压力容器设计的基本理论和方法，适于普通高等学校过程装备与控制工程专业本科生使用，也可供从事石油化工容器设计及研究人员阅读和参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

石油化工压力容器设计/仇性启主编. —2版.
北京: 石油工业出版社, 2011. 6

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5021-8478-0

I. 石…

II. 仇…

III. 石油化工-压力容器-高等学校-教材

IV. TQ051.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 099513 号

出版发行: 石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com.cn

编辑部: (010) 64523612 发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京中石油报印刷厂

2011 年 6 月第 2 版 2011 年 6 月第 2 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 17.75

字数: 448 千字

定价: 28.00 元

(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)

版权所有, 翻印必究



前言

1998年,教育部将原“化工机械与设备”专业调整为“过程装备与控制工程”专业,拓宽了专业应用范围。中国石油大学同期对该专业的培养目标、知识结构、课程设置及教学深度进行了系统改革,调整完善以时铭显院士为主倡导的以机械工程为主体、工艺过程和控制技术为两翼协同发展的“一体两翼”学生培养方案,重建了本学科课程体系,构筑了学生培养平台。设备教学则以强度设计为主,在确保设备安全的前提下,注重设备内过程的实现及其强化。

本教材是在十余年来教学改革和实践基础上,根据新修订的教学大纲对沿用教材《石油化工压力容器设计》(赵正修主编)的重编,以适应21世纪本专业人才培养的需要。主要指导思想是:秉承原教材基本理论深入浅出、简明扼要的特点,为便于理解,基本公式都进行了详细推导;调整更新部分教学内容,力求反映本学科新理论、新技术以及研究方向;密切联系目前国内外及本行业相关规范和标准;注重学生工程意识培养。

参加本教材编写的有:中国石油大学(华东)仇性启(第1、2、3章),蒋文春(第4、6章),赵延灵(第5、8、9章),周先军(第7章)。全书由仇性启统编、定稿。本校设备教学组老师对书稿提出了宝贵意见,刘妍卿、王健等对本教材的文字、图表加工做了许多工作,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,虽经努力,修改后的教材恐仍有不妥甚至错误之处,请各位专家学者提出宝贵意见。

编 者
2011年1月

目录

第1章 压力容器设计概论	1
1.1 压力容器总体结构	1
1.2 压力容器分类	3
1.3 压力容器设计基本要求	6
1.4 压力容器设计规范	7
第2章 内压薄壁容器设计	10
2.1 旋转薄壳的几何特征	10
2.2 旋转薄壳的平衡方程	12
2.3 旋转薄壳的无力矩理论	16
2.4 旋转薄壳的变形和物理方程	21
2.5 壳体中的边缘问题	28
2.6 内压薄壁容器的工程设计	45
习题	59
第3章 高压厚壁圆筒结构与设计	62
3.1 厚壁圆筒的结构形式	62
3.2 单层厚壁圆筒设计	66
3.3 单层厚壁圆筒的自增强	81
3.4 组合式厚壁圆筒设计	89
习题	96
第4章 薄板理论及设计	98
4.1 概述	98
4.2 圆形薄板的轴对称弯曲	99
4.3 圆形薄板的计算	104
4.4 矩形薄板计算简介	113
4.5 平盖的工程设计	114
习题	121
第5章 外压薄壁容器设计	122
5.1 外压容器的稳定性	122
5.2 临界压力公式	123
5.3 外压圆筒的图算法	130
5.4 外压球形容器的封头设计	134
5.5 加强圈设计	136
习题	140

第 6 章 压力容器总体设计	141
6.1 总体设计概述	141
6.2 开孔补强设计	143
6.3 局部应力计算	151
6.4 结构设计	161
习题	172
第 7 章 压力容器密封设计	173
7.1 密封基本概念	173
7.2 法兰连接设计	175
7.3 高压容器密封设计	198
第 8 章 压力容器分析设计	208
8.1 概述	208
8.2 应力分类	209
8.3 各类应力强度的限制条件	212
8.4 应力分析设计的程序及应用	218
第 9 章 压力容器失效问题	223
9.1 压力容器的脆性断裂	223
9.2 压力容器的疲劳破坏	233
9.3 高温下的蠕变破坏	241
9.4 压力容器的腐蚀破坏	250
参考文献	259
附表	260
附表 1 碳素钢和低合金钢钢板许用应力	260
附表 2 高合金钢钢板许用应力	263
附表 3 碳素钢和低合金钢钢管许用应力	265
附表 4 高合金钢钢管许用应力	266
附表 5 碳素钢和低合金钢锻件许用应力	270
附表 6 高合金钢锻件许用应力	272
附表 7 碳素钢和低合金钢螺柱许用应力	273
附表 8 高合金钢螺柱许用应力	274
附表 9 钢材弹性模量	275
附表 10 钢材平均线膨胀系数	275

第 1 章 压力容器设计概论

1.1 压力容器总体结构

所谓压力容器，是指盛装气体或者液体，承载一定压力的密闭设备。

石油化工生产过程是用化学或物理方法将物料转变成所需产品的过程。为了实现这些工艺过程，需要各种类型的石油化工设备。例如：

换热设备：主要用于实现介质的热量交换的设备，如热交换器、冷却器、冷凝器、重沸器、蒸发器和管壳式余热锅炉等；

反应设备：主要用于完成介质的化学反应的设备，如反应器、合成塔、聚合釜和变换炉等；

分离设备：主要用于对混合物料进行分离的设备，如分馏塔、汽提塔、吸收塔、稳定塔、干燥器和分离器等；

储存设备：盛装物料的容器，常用的有卧式、立式圆筒形储罐和球形储罐等。

在石油化工单元操作中，由于所完成的工艺不同，其设备具有不同的功能内件和安装方式，但都是在一定的压力、温度和不同特性的介质条件下工作的。从几何形状和受力特点来看，均属于压力容器，其外壳是典型的由板、壳组合而成的焊接结构，图 1-1 为一卧式压力容器结构简图。压力容器主要由六大部件组成。

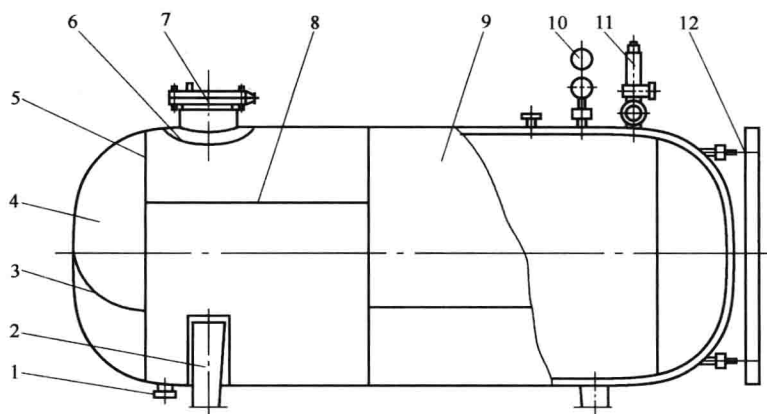


图 1-1 卧式压力容器的结构简图

1—法兰；2—支座；3—封头拼接焊缝；4—封头；5—环焊缝；6—补强圈；
7—人孔；8—纵焊缝；9—筒体；10—压力表；11—安全阀；12—液面计

1) 筒体。筒体的作用是提供工艺所需的承压空间，是压力容器最主要的受压元件之一，其内直径和容积往往需要由工艺计算确定。圆柱形筒体（即圆筒）和球形筒体是工程中最常用的筒体结构。筒体直径较小（一般小于 500mm）时，圆筒可用无缝钢管制作。直径较大时，将钢板在卷板机上卷成圆筒，焊接后形成一段圆节，焊缝方向与筒节纵向平行，称为纵焊缝。直径较大的容器，由于钢板幅面尺寸限制，可能有多条或两条以上的纵焊缝。较短容器可直接在一个筒节的两端连接封头，制成一台压力容器外壳，当容器较长时，需要先制作若干段筒节，再由筒节组焊成所需长度的筒体。筒节与筒节之间、筒体与端部封头之间的连接焊缝为环向，称为环焊缝。筒体按其结构又可分为单层式和组合式两大类。单层式筒体的器壁在厚度方向是由一整体材料构成，其制造方法有单层卷焊式、整体锻造式、锻焊式等；组合式筒体的器壁在厚度方向是由两层或两层以上互不连续的材料构成，按结构和制造方法又可分为多层式和缠绕式两大类，具体结构将在本书第 3 章介绍。

2) 封头。封头是压力容器的端盖，是压力容器的主要承压部件，其品质直接关系到压力容器的长期安全可靠运行。封头根据几何形状的不同，可分为球形、椭圆形、碟形、球冠形、锥壳和平盖等几种，其中球形、椭圆形、碟形、球冠形封头又统称为凸形封头。容器封头有可拆式和不可拆式两种。不可拆式是指在容器组装后不需要开启时（通常是容器无内件或有内件，但无需更换、检修），封头和筒体直接焊在一起，从而保证密封，节省材料和减少加工制造工作量。对于因检修或更换内件而需要多次开启的容器，封头和筒体的连接应采用可拆式结构，此时封头和筒体之间必须有一个密封装置。

3) 密封装置。压力容器上需要许多密封装置，如筒体与封头间的可拆卸连接、容器接管和外管道间的可拆卸连接以及人孔、手孔、观察孔盖的连接等，螺栓法兰连接是一种应用最广的密封装置，具体设计在第 7 章介绍。

4) 开孔与补强。由于工艺要求和检修的需要，常在压力容器的筒体和封头上开设各种大小的孔或接管，如人孔、手孔、观察孔、物料进出口接管，以及安装压力表、液面计、安全阀、测温仪表等。接管开孔等容器开孔后，开孔部位的强度被削弱，因而应进行开孔补强设计，以确保所需强度。

5) 支座。压力容器靠支座支撑并固定在基础上，支座的结构形式主要由容器自身的形式和支座的形状来决定，通常分为立式支座、卧式支座和球形容器支座三类。立式支座又分为悬挂式支座、支承式支座、支承式支脚，支承式支腿、裙式支座等；卧式支座分鞍式支座、圈座和支腿式支座等。球形容器支座分支柱式、裙式、半埋式和 V 形支承等，支座的设计、选用，取决于具体容器的结构。

6) 安全附件。鉴于压力容器的使用特点和内部介质特性，往往需要在容器上设置一些安全和监控装置，以保证压力容器安全使用和工艺过程的正常进行。石油化工装置上常用的安全附件有：

安全阀——主要用于防止容器超压引起爆裂，当容器内的压力超过设置界限时，安全阀会自动打开，排出气体，待压力低于这一界限时，又自动关闭，以保护容器不至于因超压发生事故；

防爆膜——其作用是当容器内部工作压力超过一定限度，会自行破裂，进行泄压，防止发生爆炸；

紧急排气、放空、放料装置——当容器内出现异常情况，温度、压力急剧上升，而有冲料、爆炸危险时，打开排气、放空、放料装置，就能使压力降低，避免事故；

阻火装置——是防止外部火焰窜入有着火爆炸危险的设备、管道、容器，或阻止火焰设备和管道间扩展的一种安全装置，如安全液封、阻火器和止回阀、切断阀等；

监测装置——用于监控工作介质的参数，如压力表、液面计、测温仪表等。

上述六大部件之间多需要经过焊接连接构成一台压力容器的外壳。对于储存用容器，这一外壳即为容器本身。对于其他功能设备，则需在外壳内装设工艺要求的部件，构成一台完整产品。

根据压力容器定义，直接火焰加热的容器，如蒸汽锅炉、受核辐射作用的核能容器，以及需经常搬运的容器，如气瓶、槽车和船舶专用容器等，也属于压力容器的范畴。但应注意的是，这些压力容器是在比较特殊的工况下进行操作。例如，直接火焰加热的蒸汽锅炉易产生高温氧化腐蚀和复杂的温度应力；核容器由于长期承受核辐射作用，会导致材料的韧性和延性下降而产生脆性破坏，特别是核辐射作用对人身有极大的危害，故对整个容器的安全性和密封性有着极其严格的要求；经常搬运的容器会因液体晃动而产生较大的冲击力，而气瓶则会产生脆性爆破而危害人身安全。因此，与石油化工等一般压力容器相比，这些容器在设计、制造、检验和维护等方面均有其特殊的要求，故应遵守专门的规范。

1.2 压力容器分类

压力容器适用于国民经济的各个行业，量大面广、工作条件复杂，发生事故造成的危害程度各不相同。事故的危害程度与多种因素有关，如操作压力、操作温度、介质的危害性、使用环境等。危害程度越高，对压力容器在材料、设计、制造、检验、使用和管理的要求也越高。因此，需要对压力容器进行合理分类。世界各国规范对压力容器分类的方法各不相同，我国 TSG R0004《固定式压力容器安全技术监察规程》中的分类方法有：压力等级、容器品种、安全技术管理。

1.2.1 压力等级划分

按承压方式分类，压力容器可分为外压容器和内压容器。

外压容器：当容器的内压力小于一个绝对大气压（约 0.1MPa）时，包括真空容器，如减压塔等；对于带有夹套的设备，当夹套内的介质压力高于容器内的压力时，即构成一外压容器。

内压容器：容器按设计压力（ p ）划分为低压、中压、高压和超高压四个压力等级：

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

中压（代号 M）： $1.6\text{MPa} \leq p < 10.0\text{MPa}$ ；

高压（代号 H）： $10.0\text{MPa} \leq p < 100.0\text{MPa}$ ；

超高压（代号 U）： $p \geq 100.0\text{MPa}$ 。

1.2.2 压力容器品种划分

压力容器按在生产工艺过程中的作用原理，可分为反应压力容器、换热压力容器、分离压力容器、储存压力容器。具体划分如下：

1) 反应压力容器（代号 R）：主要是用于完成介质的物理、化学反应的压力容器，如反

应器、反应釜、分解锅、硫化罐、分解塔、聚合釜、高压釜、超高压釜、合成塔、变换炉、蒸煮锅、蒸球、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的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、消毒锅、染色器、烘缸、蒸炒锅、预热锅、溶剂预热器、蒸锅、蒸脱机、电热蒸汽发生器、煤气发生炉水夹套等。

3) 分离压力容器(代号 S): 主要是用于完成介质的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、洗涤器、吸收塔、铜洗塔、干燥塔、汽提塔、分汽缸、除氧器等。

4) 储存压力容器(代号 C, 其中球罐代号 B): 主要是用于储存、盛装气体、液体、液化气体等介质的压力容器, 如各种形式的储罐。

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, 应当按工艺过程中的主要作用来划分品种。

1.2.3 压力容器基本划分

上述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, 不能综合反映压力容器的危险程度。压力容器的危险程度还与介质危险性及其设计压力 p 和全容积 V 的乘积有关, pV 值越大, 则容器破裂时爆炸能量越大, 危害性也越大, 对容器的设计、制造、检验、使用和管理的要求越高。TSG R0004 采用既考虑容器压力与容积乘积大小, 又考虑介质危险性以及容器在生产过程中的作用的综合分类方法, 有利于安全技术监督和管理。该方法将压力容器分为三类, 分类时考虑的因素有:

1) 介质。压力容器的介质分为两组, 包括气体、液化气体或者最高工作温度高于或者等于标准沸点的液体。

第一组介质: 毒性程度为极度危害、高度危害的化学介质, 易燃介质, 液化气体。

第二组介质: 除第一组以外的介质。

依据 GB 5044—1985《职业性接触毒物危害程度分级》、HG 20660—2009《压力容器中化学介质毒性危害和爆炸危险程度分类》标准, 对介质的危险性用介质毒性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, 将化学介质分为以下四个级别:

极度危害(I级): 最高容许浓度小于 $0.1\text{mg}/\text{m}^3$;

高度危害(II级): 最高容许浓度 $0.1\sim 1.0\text{mg}/\text{m}^3$;

中度危害(III级): 最高容许浓度 $1.0\sim 10.0\text{mg}/\text{m}^3$;

轻度危害(IV级): 最高容许浓度不小于 $10.0\text{mg}/\text{m}^3$ 。

介质的毒性程度越高, 压力容器爆炸或泄漏所造成的危害越严重, 对容器材料的选用、制造、检验和管理的要求越高。

易爆介质: 指气体或液体的蒸汽、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不小于 20% 。

2) 压力, 指设计压力, 即设定的压力容器顶部压力(表压)。压力与相应的设计温度一起作为设计载荷的条件, 并作为超压释放装置调定压力的基础, 其值不得小于压力容器的最高工作压力。

3) 容积。容积是指压力腔的几何容积, 即由设计图样标注的尺寸计算(不考虑制造公

差), 且不扣除内件体积 (但应扣除与压力容器永久性连接的内件体积), 并经圆整后的容积。永久性连接是指只有通过破坏方式才能分开的连接。

压力容器先按照介质组别选择分类图, 再根据设计压力 p (单位 MPa) 和容积 V (单位为 L), 标出坐标点, 确定压力容器类别。

压力容器的分类如图 1-2 和图 1-3 所示。

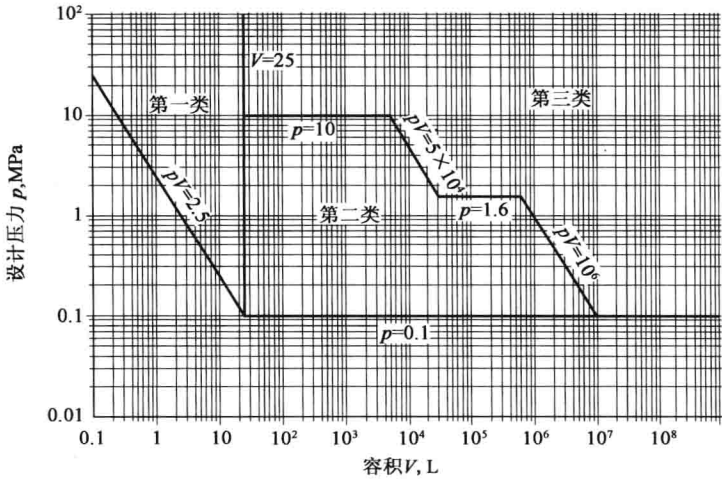


图 1-2 第一组介质的压力容器分类图

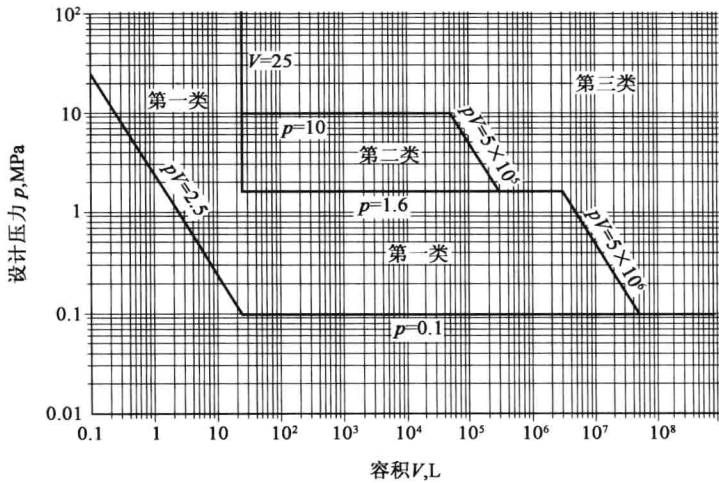


图 1-3 第二组介质的压力容器分类图

对多腔压力容器（如换热器的管程和壳程、夹套压力容器等）按照类别高的压力腔作为该压力容器的类别，并按该类别进行使用管理。但应按照每个压力腔各自的类别，分别提出设计、制造技术要求。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。一个压力腔内有多种介质时，按组别高的介质分类。

TSG R0004 对于不同类别的压力容器，在选材、设计、制造和检验、使用和管理、安全附件等方面都给出了不同的要求和相应的规定，必须遵照执行。该规程规定对于各类压力容器，设计单位必须持有压力容器设计单位批准书，制造和现场组焊单位必须持有压力容器

制造许可证，并按批准的范围进行设计、制造或组焊。否则，不得设计、制造或组焊压力容器。

1.3 压力容器设计基本要求

压力容器的设计就是根据给定的工艺尺寸和工作条件，并考虑到制造和安装检修等要求，对压力容器的各个元件正确地选择材料，全面地进行载荷分析和应力变形分析，选择合适的结构形式，确定合适的强度尺寸，并给出有关制造和检验的技术条件。

石油化工容器通常是在苛刻的操作条件下长期连续工作的。一个零部件的破坏往往会导致整个装置的停工，甚至造成生命财产的严重损失。因而，保证压力容器的长期安全运转对石油化工生产有着非常重要的意义。还应注意，随着科学技术的迅速发展，压力容器趋向大型化，操作条件日益苛刻，不断出现新的材料品种，其强度级别也越来越高，制造和检验技术不断完善，对石油化工压力容器的设计也提出了更高的要求。

对压力容器设计的基本要求是既保证其安全可靠，又要尽量做到经济合理。这就要求对设备的操作条件和载荷进行正确的估计；对容器元件的总体应力、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，并采用不同的设计方法。根据容器的操作条件和作用，正确地选择材料和合理的结构设计往往是保证容器安全可靠性和经济合理性的重要环节。另外，在整个设计过程中，必须遵守相关标准、规范和制造技术条件。对于重要容器，还应进行全面的技术经济分析。

在进行压力容器设计时，首先应知道其工作条件，如最大工作压力、工作温度和环境温度、介质特性等，并据此确定容器的设计压力、设计温度，以及容器类别。因为不同的工作条件和不同类别的压力容器，需符合不同的设计标准或需满足标准中的不同规定。对于腐蚀性介质还需了解其腐蚀特点，如有些腐蚀介质只会造成钢材的表面腐蚀，而有些介质，如氢气则会在一定温度和压力条件下扩散到钢材内部，使钢材产生脆断；有些介质，如海水、硫化氢和碱性介质等，对于承受拉应力的构件会产生应力腐蚀，造成脆断。因而，就需要选用不同的抗腐蚀材料，并采取相应的防护措施。在进行大型室外直立设备，如塔器、反应器等设计时，还应了解其所在地区的基本风压值及地震烈度，计算它们所承受的风载荷和地震载荷。

在确定容器壳体厚度时，设计压力（当液柱静压力达到5%设计压力时，还应加上液柱静压力）通常是最主要的载荷。另外，容器承受的载荷还有：容器的自重（包括内件和填料等）以及正常操作条件下或试验状态下内装物料的重力载荷；附属设备及隔热材料、衬里、管道、扶梯、平台等的重力载荷；风载荷及地震载荷。必要时，还应考虑的载荷有：支座的支撑反力；连接管道和其他部件引起的推力；由于热膨胀量不同而引起的作用力；压力和温度变化的影响；容器在运输或吊装时承受的作用力。

在设计时通常是根据设计压力初步确定容器壳体的厚度后，再对上述载荷或作用力产生的应力进行强度或稳定性校核计算。

在设计压力容器时，还应考虑到其可能产生的失效形式。所谓“失效”是指容器在一定工作条件下丧失其正常工作能力。常见的压力容器失效形式有：

- 1) 强度失效或发生过量的弹塑性变形；

- 2) 在压应力作用下容器的稳定失效;
- 3) 高温下的蠕变破坏;
- 4) 低温或有缺陷时的脆性断裂;
- 5) 交变载荷作用下的低循环、高应变疲劳破坏;
- 6) 腐蚀破坏和密封失效。

对于一般工作条件下的压力容器,通常只需要进行机械强度或稳定性设计,而在某些特定条件下,蠕变破坏、脆性断裂、疲劳破坏、腐蚀破坏等可能成为容器的主要失效形式,因而还需要进行相应的分析和设计。因此,压力容器设计者不仅要掌握强度和稳定设计的基本原理和设计方法,还应具有蠕变分析、疲劳分析、断裂力学在压力容器中的应用、材料腐蚀与防护等方面的基本知识。

高温设备在石油化工行业中有着广泛的应用。高温下钢材的机械强度会显著降低,弹性模量也会明显下降,而线膨胀系数则会增大。对于在高温下压力容器元件的热变形、温差应力、热疲劳、蠕变变形和断裂、金属材料的热脆性和高温腐蚀,以及双层金属和设备衬里由于材料的线膨胀系数不同所产生的鼓包变形和脱落等,在设计、制造和检验中尤其需要给予充分的考虑。

设计温度低于或等于 -20°C 的低温容器在石油化工行业中也常有应用。随着温度的降低,钢材会从塑性断裂转变为脆断,由于制造加工过程中钢材难免存在某些原始缺陷或微小裂纹,再加上温度降低使材料的冲击韧性下降,就存在脆断的危险,在设计和制造低温容器时是应予以特别注意的。因此,对于设计温度低于 -20°C 的碳素钢和低合金钢制作的低温压力容器(奥氏体高合金钢制低温容器在设计温度不低于 -190°C 时除外),或由于环境温度的影响导致容器壳体的金属温度低于 -20°C 时,在材料选择、结构和焊缝形式设计、制造、检验和验收等方面,均应遵守专门的规定。

另外,石油化工容器的密封失效问题也是关系到安全生产和环境保护的一个重要问题。特别是在高温条件下,或当处理易爆和毒性介质时,保持容器密封的长期可靠性也是保证安全生产的重要措施之一。

在设计压力容器时,还应考虑其使用寿命。一般石油化工设备的设计使用年限为12年左右,高压设备约为20~25年,实际使用年限往往会更长些。设备的使用寿命通常决定于腐蚀情况,在某些情况下还决定设备的蠕变、疲劳、材料的断裂韧性以及金相组织的变化等。值得注意的是,不仅要在设计时对设备的安全寿命进行估算,而且在设备使用过程中,还必须定期进行设备检查和安全评定,并预测其剩余寿命,这对设备的安全使用是非常重要的。

1.4 压力容器设计规范

鉴于压力容器在国民经济中的重要作用,并为保证其安全运行,各国根据长期积累的使用经验和大量科学研究的成果,都制订了相应的规范和标准,如:

美国机械工程师学会 ASME 《锅炉和受压力容器规范》;

英国 BS 5500 《非直接火焊制受压力容器规范》;

联邦德国 AD 《受压力容器规范》;

日本 JIS B8243 《压力容器构造》；

法国 SNCT 《非直接火受压力容器规范》；

前苏联 PTM42 《容器和设备零部件强度设计规范》。

ASME 《锅炉和受压力容器规范》是比较有权威性的规范之一，它已为很多国家借鉴或采用。该规范是将锅炉、核能容器与一般的压力容器分开。其第 I 卷为《动力锅炉》，第 II 卷为《核动力装置设备》，一般的压力容器属第 VIII 卷第一册《受压力容器》或第 VIII 卷第二册《受压力容器另一规程》管辖。第 VIII 卷第一册采用传统的常规设计方法，第二册则采用以应力分析为基础的设计方法，简称应力分析法。

我国执行的压力容器标准是 GB 150 《钢制压力容器》，是由全国锅炉压力容器标准化技术委员会制订的。其前身是我国原石油化学工业部和原第一机械工业部制定的《钢制石油化工压力容器设计规定》。

GB 150 的内容主要包括通用要求、材料选择，压力容器元件的设计计算，以及容器的制造、检验与验收。它是我国石油化工等一般压力容器设计、制造、检验、验收以及安全监督的综合性国家标准。该标准适用于压力不大于 35MPa 的钢制压力容器的设计、制造、检验与验收。但不适用于下列各类容器：

- 1) 设计压力低于 0.1MPa，且真空度低于 0.02MPa 的容器；
- 2) 移动式压力容器；
- 3) 旋转或往复运动的机械设备中自成整体或作为部件的受压器室（如泵壳、压缩机外壳、涡轮机外壳、液压缸等）；
- 4) 核能装置中存在中子辐射损伤失效风险的容器；
- 5) 直接火焰加热的容器；
- 6) 内直径（对非圆形截面，指截面内边界的最大几何尺寸，如矩形为对角线，椭圆为长轴）小于 150mm 的容器；
- 7) 搪玻璃容器和制冷空调行业中另有国家标准或行业标准的容器。

在 GB 150 以及其他国家的规范中，仍普遍采用常规设计法，即以容器元件中的总体或基本应力（如壳体中的总体薄膜应力）不超过一定的许用应力值为主要依据。对于边缘应力等局部应力的影响，是以应力增值系数引入计算式，并与基本应力取统一的强度判据。但不同性质的应力对容器元件强度有着不同的影响。所以，某些规范，如 ASME 第 VIII 卷第二册、我国 JB 4732 《钢制压力容器—分析设计标准》采用应力分析法设计，对不同性质的应力取不同的强度判据。应当指出的是，常规设计法的特点是比较简便，并有一定的使用经验，在压力容器的设计中广泛采用。分析设计法是一种先进合理的设计方法，它可合理地利用材料的强度，并可确保压力容器在复杂苛刻条件下安全运行。但这种方法计算工作量大，对材料性能、容器的制造、检验以及操作运行，都有着更加严格的要求，因此它主要用于重要的或需做疲劳分析的容器设计。另外，上述两种不同方法的设计规范可以并行使用，但不能互相取代。

石油化工压力容器的设计、制造和检验除需要符合 GB 150 的规定外，还需遵守 TSG R0004 《固定式压力容器安全技术监察规程》的相关规定。此外，材料的技术条件和试验方法，板材、管材和型钢的品种和规格，筒体和封头的公称直径和结构形式，法兰、人孔、手孔等的结构形式、公称直径和压力等级、紧固件的规格和技术条件、焊接接头的基本形式与尺寸，以及容器的各种检验方法等，都必须符合相应的国家标准或行业标准的规定。熟悉这

些标准对设计者来说是十分重要的。

压力容器设计涉及的理论问题和实际知识非常广泛，本教材不可能对所有这些问题都进行全面的阐述，而只是利用弹塑性力学的基本分析方法，主要讨论压力容器壳体及其主要零部件的应力和变形，以及强度和稳定设计的基本原理和设计方法，并对高温蠕变破坏、低循环疲劳分析、腐蚀与防护、断裂力学在压力容器中的应用等问题进行概括介绍。至于材料的金相组织、性能及热处理方法以及制造、检验等方面的理论知识，已在其他有关课程中讲授，本教材均未涉及。

第2章 内压薄壁容器设计

在石油化工工业中, 钢制压力容器多数为薄壁容器 (即壳体径比 $K \leq 1.2$), 并通常为轴对称问题的旋转壳体。所谓轴对称问题, 是指壳体的几何形状、所受的外部载荷, 以及约束条件均对称于旋转轴。

2.1 旋转薄壳的几何特征

旋转壳体的中面是指与壳体内表面、外表面等距离的曲面, 它是由一条平面曲线 (母线) 围绕同一平面内的轴线旋转一周形成的。例如, 圆柱壳的中面是由一条与轴线平行的直线绕轴线旋转而成的, 球壳和椭球壳的中面则分别由半圆周线和半椭圆线绕轴线旋转而成。

图 2-1 所示为一般旋转壳体的中面。通过旋转轴 OO_1 做一纵向平面, 它与壳体中面的交线 OB 称为经线。显然, 经线与母线 OA 是一致的。纵向平面与旋转壳体的截面称为经向截面。经线上任一点 B 绕轴 OO_1 旋转一周的轨迹称为纬线或平行圆。在 B 点垂直于壳体中面的直线为法线 n , 法线 n 的延长线必与旋转轴相交, 其交角为 φ 。

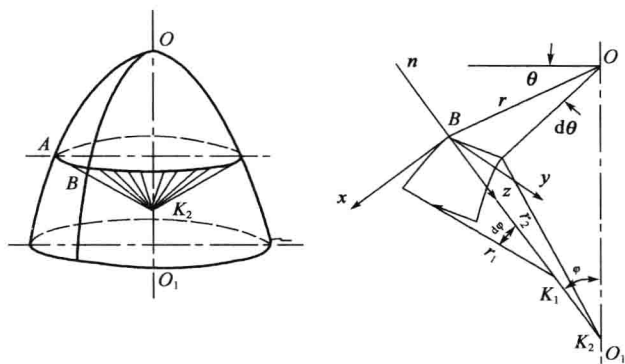


图 2-1 一般旋转壳体的中面

经线的位置由从母线平面量起的角度 θ 确定; 平行圆的位置由角 φ 确定。因此, 壳体中面上任一点的位置可由两个坐标 φ 和 θ 确定。这样, 对于一般旋转壳体通常选用的坐标是经向坐标 φ 、周向坐标 θ , 以及沿中面法线方向的坐标 z , z 的方向以指向壳体中面的曲率中心为正。

经线面和垂直于经线的面是壳体某点上的主曲率面, 即具有最大和最小曲率半径的面。

经线的曲率半径称为第一曲率半径 r_1 ，如图 2-1 所示的 BK_1 沿同一个平行圆的各点作法线的延长线，即形成一与壳体中面正交的圆锥面，圆锥的顶点必在旋转轴上。此圆锥面与壳体的截面称为旋转法截面。此圆锥母线的长度 BK_2 称为该点上壳体中面的第二曲率半径 r_2 ，其长度为

$$r_2 = \frac{r}{\sin\varphi} \quad (2-1)$$

式中 r ——平行圆半径。

正确地求出曲率半径 r_1 和 r_2 对于研究旋转薄壳的应力和变形是很重要的。下面举例说明 r_1 和 r_2 的计算方法。

圆柱壳：设其中面半径为 R ，由于其经线为直线，故 $r_1 = \infty$ ；而垂直于经线的平面与平行圆相重合（即 $\varphi = \pi/2$ ），故 $r = r_2 = R$ 。

球壳：在球壳中面的任一点上，所有法向截面的曲率半径都相等，即等于球体的半径 R ，故 $r_1 = r_2 = R$ 。

椭球壳：其经线为半个椭圆，设椭圆的长半轴为 a ，短半轴为 b ，如图 2-2 所示。

已知椭圆曲线（即椭球经线）方程为

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

由微分学知曲线的曲率半径为

$$r_1 = \frac{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{3/2}}{\frac{d^2y}{dx^2}}$$

由图 2-2 可知

$$r_2 = \frac{x}{\sin\varphi} = \frac{x(1 + \tan^2\varphi)^{1/2}}{\tan\varphi} = \left| \frac{x \left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{1/2}}{\frac{dy}{dx}} \right|$$

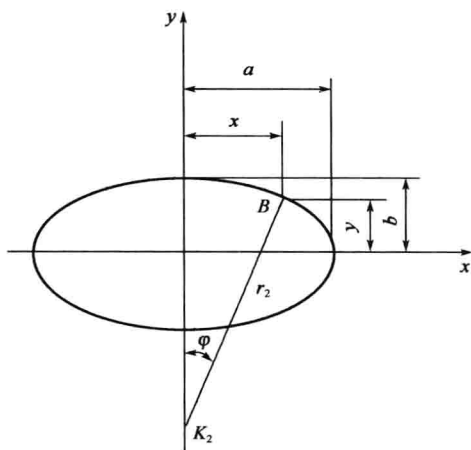


图 2-2 椭球壳

对椭圆方程的 y 求导数，将求得的 $\frac{dy}{dx}$ 、 $\frac{d^2y}{dx^2}$ 代入上述两式，得

$$r_1 = \frac{[a^4 - x^2(a^2 - b^2)]^{3/2}}{a^4 b} \quad (a)$$

$$r_2 = \frac{[a^4 - x^2(a^2 - b^2)]^{1/2}}{b} \quad (b)$$

如果以坐标 φ 表示，代入 $x = r_2 \sin\varphi$ [先代入式 (b) 中求得 r_2 ，再将 $x = r_2 \sin\varphi$ 及 r_2 之值代入式 (a)]，并令 $m = a/b$ ，则得

$$r_1 = \frac{a^2 b^2}{(a^2 \sin^2\varphi + b^2 \cos^2\varphi)^{3/2}} = m a \Psi^3 \quad (c)$$

$$r_2 = \frac{a^2}{(a^2 \sin^2\varphi + b^2 \cos^2\varphi)^{1/2}} = m a \Psi \quad (d)$$

式中

$$\Psi = \frac{1}{\sqrt{(m^2 - 1)\sin^2\varphi + 1}} \quad (e)$$