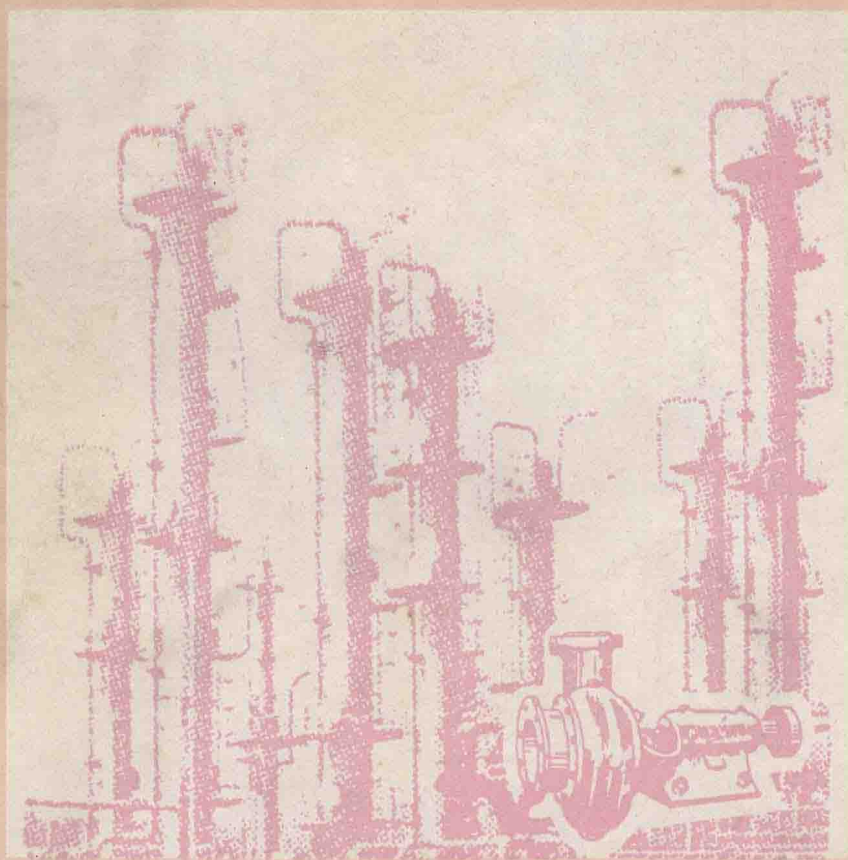




中等专业学校教材

化工设备

南京化工学校 李健 主编



化学工业出版社

中等专业学校教材

化 工 设 备

南京化工学校 李 健 主编

化学工业出版社

(京)新登字039号

内 容 简 介

本书主要阐述薄壁和厚壁容器、外压容器、塔设备及卧式设备、反应釜及列管式换热器的设计计算以及容器的开口补强、密封与主要零部件设计计算等。

本书采用的计算方法与GB150—89《钢制压力容器》、GB151—89《钢制管壳式换热器》相同。

本书附有三个综合性例题，各章也编有例题及习题。书中的材料许用应力表及弹性模量、膨胀系数表均来源于《钢制压力容器》，读者可直接用于设计计算。

本书可作为四年制中等专业学校化工机械专业教材，也可供从事压力容器、化工设备设计、制造与使用部门的技术人员参考。

中等专业学校教材

化 工 设 备

南京化工学校 李 健 主编

责任编辑：孙 世 斌

封面设计：季 玉 芳

*

化学工业出版社 出版

(北京市朝阳区惠新里3号)

北京市燕山联合印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

开本787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张20 字数496千字

1993年5月第1版 1994年5月北京第2次印刷

印 数 14,001—27,300

ISBN 7-5025-1086-9/C·291

定 价 9.20元

前 言

本书是化工部教育司组织编写的中等专业学校化工机械专业用教材，其内容符合1987年在泸州制定的《化工设备教学大纲》的要求。

本书的基本要求是使学生掌握容器设计方面的基本理论及典型化工设备的设计计算方法。全书均采用GB150—89《钢制压力容器》及GB151—89《钢制管壳式换热器》所规定的设计计算方法。

本书注重容器设计基本理论的阐述与应用，如对薄壁容器的应力分析作了比较详细的推导；对厚壁容器的应力计算、塔设备与卧式设备的受力分析及开孔补强与密封设计的基本方法等也作了适当的推导。对受液体压力作用壳体的应力分析，采用了全新的推导方法，此方法力学概念清楚，步骤简明，记忆与应用都十分方便。

对外压容器、法兰、膨胀节、管板设计计算等内容，因理论较深，计算也太繁杂，故本书只强调按合理的计算步骤得出正确的结果，而略去其复杂的推导过程。

书中用小字排印的部份，教师可根据具体情况作适当处理，一般只需扼要讲解由学生自学即可。

本书由李健任主编并负责全书的整理工作。第一、二、六章及附录中的例题1、例题2由吉林化工学校刘纯厚编写；第三、八、九章由湖南化工学校郭月群编写；绪论、第四、五、七、十、十一、十二章以及第一章中“受液体压力作用的壳体”与附录中的例题3均由南京化工学校李健编写。

本书由杭州化工学校龚斌主审，常州化工学校尹洪福参审。他们对本书提出了许多宝贵的意见，在此表示衷心地感谢。

限于编者的水平，本书一定会存在许多不足之处，欢迎广大教师、学生以及其它读者提出批评指正。

编者 1991年7月于南京

目 录

绪论	1
第一节 压力容器的分类	1
一、压力容器的压力等级划分	1
二、压力容器品种的划分	1
三、易燃介质与介质毒性程度等级的划分	2
四、压力容器的分类	2
第二节 化工设备的基本要求	3
一、安全性要求	3
二、合理性要求	3
三、技术经济指标	3
第三节 化工设备常用材料	4
一、壳体与封头	4
二、管板与法兰	4
三、接管与换热管	5
四、螺栓与螺母	5
五、支座及其它不重要的附件	5
第一章 旋转壳体的受力分析	6
第一节 旋转壳体的几何概念	6
一、旋转壳体的形成	6
二、旋转壳体的几何参数	6
第二节 旋转薄壁壳体的受力分析	7
一、区域平衡方程式	7
二、微体平衡方程式	8
三、无力矩理论及其应用范围	10
第三节 无力矩理论在典型壳体上的应用	10
一、受气压的壳体	11
二、受液体压力作用的壳体	15
第四节 有力矩理论与边缘应力的基本概念	19
第二章 内压薄壁容器的设计计算	23
第一节 内压圆筒及球形壳体的设计计算	23
一、内压圆筒的强度计算	23
二、球形壳体的强度计算	25
三、设计公式中各参数的确定	26
四、容器最小壁厚的确定	36
五、焊后热处理	37

第二节 内压容器封头的设计计算	33
一、半球形封头	38
二、椭圆形封头	38
三、碟形封头	40
四、锥形封头	41
五、平盖	47
第三节 压力试验和致密性试验	52
一、液压试验	53
二、气压试验	54
三、应力校核	54
四、致密性试验	55
第三章 外压容器设计	57
第一节 外压容器的基本概念	57
一、外压容器的稳定性	57
二、临界压力	57
三、外压容器的分类	58
第二节 圆筒的稳定性计算	58
一、长圆筒的计算	58
二、短圆筒的计算	59
三、刚性圆筒的计算	60
四、计算长度和临界长度	60
五、压力试验	61
第三节 外压圆筒的图算法	61
一、几何参数图	61
二、壁厚计算图	63
三、图算法计算步骤	63
第四节 加强圈设计	69
一、加强圈的作用及其结构	69
二、加强圈最大间距的计算	69
三、加强圈的计算	71
第五节 外压容器封头设计	74
一、球壳(半球形封头)	75
二、椭圆形和碟形封头	75
三、锥形封头	76
第六节 轴向受压圆筒	77
一、轴向受压圆筒稳定性概念	77
二、临界压应力的计算	77
第四章 法兰连接的设计	78
第一节 概述	78
第二节 标准法兰、垫片及选用方法	79

一、压力容器法兰的分类	79
二、常用垫片的类型与选择	79
三、标准法兰的选用方法	82
第三节 法兰的密封设计	84
一、垫片压紧力	85
二、螺栓设计	88
第四节 法兰的强度计算	92
一、法兰型式对法兰强度的影响	92
二、法兰力矩的计算	94
三、法兰应力计算	95
四、法兰应力校核	98
第五章 容器的开孔与补强	106
第一节 开孔附近的应力分析	106
一、平板开小孔的应力集中	106
二、壳体上开小孔的应力集中	107
三、球壳与圆筒开孔接管处的应力集中	109
第二节 容器的开孔补强设计	109
一、开孔补强结构设计	109
二、开孔补强设计的准则	110
三、等面积补强设计	111
第三节 容器的接管、视镜、人孔和手孔	115
一、接管	115
二、视镜	116
三、人孔与手孔	117
第六章 塔设备	121
第一节 概述	121
第二节 板式塔的种类和结构	121
一、板式塔的种类	121
二、板式塔的结构	126
三、裙式支座和吊柱	131
第三节 填料塔	134
一、填料塔的总体结构	134
二、填料的种类及特性	134
三、喷淋装置及再分布装置	136
四、填料的支承结构	139
第四节 塔体应力校核及裙座的设计计算	140
一、塔体及裙座的受载分析	140
二、塔设备使用时的几种情况分析	141
三、塔设备质量的计算	141
四、地震载荷的计算	141

五、风载荷的计算	142
六、塔设备偏心质量产生的弯矩	144
七、塔设备最大弯矩的确定	144
八、塔体横截面轴向应力的计算	145
九、塔体组合应力的计算和强度及稳定性校核	145
十、塔体或裙座危险截面的确定	146
十一、塔体液压试验时的应力校核	146
十二、裙座厚度的计算	147
十三、基础环和地脚螺栓	148
十四、裙座与壳体的连接焊缝	150
第七章 卧式设备	153
第一节 卧式容器的受力分析	153
一、载荷分析	153
二、圆筒轴向弯矩计算	155
三、圆筒的剪力计算	156
第二节 轴向应力校核	156
一、圆筒中间处截面上的轴向应力	156
二、支座处截面上的轴向应力	157
三、圆筒轴向应力的校核	158
第三节 切向剪应力校核	159
一、切向剪应力的计算	160
二、切向剪应力的校核	160
第四节 圆筒周向应力校核	161
一、鞍座处无加强圈时圆筒中周向应力的计算	162
二、鞍座处有加强圈时圆筒中周向应力的计算	164
三、周向应力的校核	165
第五节 鞍座的选用与校核	166
一、鞍座的选用	166
二、鞍座承受水平推力的校核	167
第八章 反应釜	175
第一节 反应釜筒体设计	175
一、筒体直径及高度	176
二、夹套的直径和高度	176
三、蛇管的布置	177
四、工艺接管口	177
五、壁厚计算	178
六、压力试验	179
第二节 搅拌器	179
一、搅拌器的类型和选择	179
二、挡板与导流筒	185

三、搅拌器的功率.....	186
第三节 搅拌轴和轴封.....	189
一、搅拌轴.....	189
二、轴封装置.....	191
第四节 反应釜的支座.....	196
一、悬挂式支座.....	196
二、支承式支座.....	198
第九章 列管式换热器	200
第一节 概述.....	200
一、列管式换热器主要类型.....	200
二、列管式换热器的标准.....	202
三、列管式换热器机械设计.....	203
第二节 列管式换热器结构设计.....	203
一、固定管板式换热器的整体结构.....	203
二、换热管.....	203
三、管板与壳体的连接.....	204
四、折流板、支持板和挡板.....	205
五、管箱及接管.....	206
六、膨胀节.....	208
七、管板结构.....	208
第三节 列管式换热器的强度计算.....	209
一、U形膨胀节的计算.....	209
二、管板的强度计算.....	218
第十章 厚壁容器筒体设计	236
第一节 概述.....	236
一、厚壁容器的结构特点及选材要求.....	236
二、厚壁容器结构类型.....	237
三、厚壁容器失效准则.....	240
第二节 单层厚壁圆筒的设计.....	242
一、应力分析.....	242
二、温差应力.....	247
三、厚壁圆筒的弹性失效设计.....	249
四、单层厚壁圆筒的极限载荷设计概念.....	252
第三节 改善筒壁应力分布的办法.....	255
第十一章 厚壁容器的密封与主要零部件设计	260
第一节 厚壁容器的密封设计.....	260
一、常用密封结构的类型.....	260
二、密封设计.....	268
第二节 零部件设计.....	272
一、平盖设计计算.....	272

二、封头设计计算.....	274
三、筒体端部设计计算.....	277
四、开孔和开孔补强结构.....	278
第十二章 应力分类与几个特殊问题简介.....	280
第一节 应力分类.....	280
一、应力分类.....	280
二、应力强度及其限制.....	281
三、安定状态.....	283
第二节 几个特殊问题简介.....	284
一、疲劳设计简介.....	284
二、蠕变设计简介.....	285
三、断裂力学简介.....	286
四、有限元法在化工设备计算中的应用.....	286
附录.....	287
I、典型化工设备设计例题.....	287
例 1	287
例 2	290
例 3	299
II、锻件许用应力及钢材弹性模量、平均线膨胀系数.....	307
参考资料.....	310

绪 论

化学工业在国民经济中占有重要地位，它与农业、工业、国防以及人民的衣食住行都有极为密切的关系。

化工产品都是利用化工机械按照一定的工艺过程制造出来的，例如生产尿素就需要与尿素工艺配套的化工机械，生产硫酸就需要与硫酸工艺配套的化工机械，因此化工机械是为化学工艺过程服务的，是实现化工生产的手段。另一方面，新的、高效的化工机械又会促使产品质量、产量的提高及消耗的降低，甚至使原来难以实现的生产工艺成为现实，生产出许多新的产品。

在我国相继建成的一批用先进化工设备装备成的30万吨合成氨厂及多座30万吨乙烯厂均具有高质量、低消耗、高效率的特点，这也说明我国的化学工业在近期已取得了很大进展。

化工机械包括化工机器及化工设备两大类。本课程只讲述化工设备。化工设备都要用容器作外壳，故容器是化工设备的重要组成部分。

本课程的任务是研究典型化工设备，例如薄壁容器、厚壁容器、换热器、塔设备、反应釜以及常用零部件，如密封、法兰连接、开孔补强、支座、管板、膨胀节、搅拌装置等的结构、性能、特点和设计计算方法。我们将重点介绍容器设计的基本原理、典型化工设备的整体结构以及按GB150—89《钢制压力容器》和GB151—89《钢制管壳式换热器》所规定的设计计算方法。

第一节 压力容器的分类

化工生产一般都在一定温度与压力下进行，故容器中压力容器占绝大多数。

为有利于安全技术监督和管理，我国劳动部颁发的《压力容器安全技术监督规程》（简称《容规》）根据压力、介质、用途、压力乘容积值将压力容器分为三类。

一、压力容器的压力等级划分

《容规》按压力容器的设计压力（ p ）分为低压、中压、高压、超高压四个压力等级，具体划分如下：

- （1）低压（代号 L ）： $0.1\text{MPa} \leq p < 1.6\text{MPa}$ ；
- （2）中压（代号 M ）： $1.6\text{MPa} \leq p < 10\text{MPa}$ ；
- （3）高压（代号 H ）： $10\text{MPa} \leq p < 100\text{MPa}$ ；
- （4）超高压（代号 U ）： $p \geq 100\text{MPa}$ 。

二、压力容器品种的划分

《容规》按压力容器在生产工艺过程中的作用原理，将压力容器分为四个品种，具体划分如下：

- （1）反应压力容器（代号 R ） 它主要用于完成介质的物理、化学反应，如反应器、反应釜、分解塔、聚合釜、高压釜、合成塔、变换炉、蒸煮锅、煤气发生炉等；
- （2）换热压力容器（代号 E ） 它主要用于完成介质的热量交换，如热交换器、冷却器、冷凝器、蒸发器、加热器、煤气发生炉水夹套等；

(3) 分离压力容器(代号S) 它主要用于完成介质的流体压力平衡和气体净化分离,如分离器、过滤器、缓冲器、洗涤塔、吸收塔、铜洗塔、干燥塔等;

(4) 储存压力容器(代号C,其中球罐代号B) 它主要用于盛装生产用的原料气体、液体、液化气体等,如各种型式的储罐。

如果一种压力容器,同时具备两个以上的工艺作用原理,则应按工艺过程中的主要作用来划分品种。

三、易燃介质与介质毒性程度等级的划分

1. 易燃介质

易燃介质是指与空气混合的爆炸下限小于10%,或爆炸上限和下限之差值大于等于20%的气体,如:一甲胺、乙烷、乙烯、氯甲烷、环氧乙烷、环丙烷、氢、丁烷、三甲胺、丁二烯、丁烯、丙烷、丙烯、甲烷等。

2. 介质毒性程度等级的划分

介质毒性程度参照GB5044《职业性接触毒物危害程度分级》的规定,分为四级,其最高容许浓度分别为:

- (1) 极度危害(I级) $< 0.1 \text{mg/m}^3$;
- (2) 高度危害(II级) $0.1 \sim < 1.0 \text{mg/m}^3$;
- (3) 中度危害(III级) $1.0 \sim < 10 \text{mg/m}^3$;
- (4) 轻度危害(IV级) $\geq 10 \text{mg/m}^3$ 。

属于I、II级的介质有:氟、氢氟酸、光气、氟化氢、碳酰氟、氯等;属于III级的有:二氧化硫、氨、一氧化碳、氯乙烯、甲醇、氧化乙烯、硫化乙烯、二硫化碳、乙炔、硫化氢等;属于IV级的有:氢氧化钠、四氟乙烯、丙酮等。

当压力容器中的介质为混合物质时,应以介质的组成并按以上毒性程度或易燃介质的划分原则,由设计单位的工艺设计或使用单位的生产技术部门,决定介质毒性程度或是否属于易燃介质。

四、压力容器的分类

1. 第一类压力容器

除第二类、第三类压力容器外的所有低压容器。

2. 第二类压力容器

它包括:

- (1) 除第三类压力容器外的所有中压容器;
- (2) 易燃介质或毒性程度为中度危害介质的低压反应容器和储存容器;
- (3) 毒性程度为极度和高度危害介质的低压容器;
- (4) 低压管壳式余热锅炉;
- (5) 搪玻璃压力容器。

3. 第三类压力容器

它包括:

- (1) 毒性程度为极度和高度危害介质的中压容器和 $p \cdot V$ 大于等于 $0.2 \text{MPa} \cdot \text{m}^3$ 的低压容器, p 为设计压力, V 为容积;
- (2) 易燃或毒性程度为中度危害介质且 $p \cdot V$ 大于等于 $0.5 \text{MPa} \cdot \text{m}^3$ 的中压反应器和 $p \cdot V$ 大于等于 $10 \text{MPa} \cdot \text{m}^3$ 的中压储存容器;

(3) 高压、中压管壳式余热锅炉；

(4) 高压容器。

压力容器还有其它分类方法，例如分为内压力容器与外压力容器；薄壁容器与厚壁容器等。一般直径比 $K (= D_o/D_i)$ 如小于1.1，则视为薄壁容器，如 $K \geq 1.1$ 则视为厚壁容器。通常情况下，高压容器都属厚壁容器。

第二节 化工设备的基本要求

化工设备首先应满足化学工艺过程的要求。化工设备的主要结构及尺寸都由工艺设计决定，例如设计一台换热器，工艺设计人员必须给出设计压力、设计温度、介质的特性、换热器的型式、传热面积、直径、长度以及折流板的数目等等，设备设计人员才能根据这些工艺条件设计出满足此工艺要求的换热器。

除了满足工艺要求之外，设备还必须保证在使用年限内能安全运行；必须便于制造、安装、维修与操作；必须有比较高的技术经济指标。现分述如下：

一、安全性要求

化工设备的使用年限一般为10~12年，高压设备使用年限长一点，约为20~30年。因科学技术的发展，设备更新换代的速率在加快，规定更长的使用年限是不经济的。

保证设备的强度、稳定性、密封性及耐蚀性是设备能安全使用的基本要求。

化工设备的所有零部件及其相互之间的连接都必须有足够的强度。在连接处，除法兰外几乎全用焊接，如封头与筒体，接管与设备连接处，这些部位受力复杂，应力集中现象严重，且存在缺陷的可能性也大，是设备的薄弱环节，设计、制造时必须十分重视。

外压力容器主要应保证其稳定性，因为这类容器往往在强度足够，不发生破裂的情况下，会突然丧失其原来形状——失稳，而失去其应有功能。

化工设备必须具备良好的密封性。如果易燃、易爆、有毒的介质泄漏出来，不仅生产会受到损失，而且操作人员的生命会受到威胁，环境会受到污染，甚至引起爆炸，造成极其严重的后果。1984年底在印度博帕尔市一家农药厂发生毒气外泄事故，20万人中毒，其中死亡数千人，并有许多人永久失明，这是非常沉痛的教训。

耐蚀性对保证化工设备是否能安全运行十分重要，化工生产中许多介质都有程度不等的腐蚀性，它会使整个设备的壁厚减薄，以致使设备的使用年限缩短。更危险的是会在应力集中、两种材料焊接等局部区域造成更为严重的腐蚀，从而引起突然的泄漏或爆破。选择合适的耐腐蚀材料或采取相应的防腐蚀措施可大大提高设备的使用寿命。

二、合理性要求

化工设备设计得是否合理，会影响到制造、安装、运输与维修时的成本，还会影响到设备是否能安全运行，操作是否方便，失误动作是否能减少等等。因此设备在结构上应有良好的工艺性，应尽量避免复杂的加工工序，减少加工量；应尽量采用标准件，标准件不仅成本低，质量也易得到保证；在设置阀门、平台、人孔、楼梯时，位置要合适，以便操作或维修。对要长途运输的设备，还需考虑吊装及沿途的道路等一系列问题。

三、技术经济指标

产品总成本要低，是技术经济指标中最综合、最重要的指标，只有这样，产品在市场上才有竞争力。

要降低产品总成本，设备的单位生产能力越高越好，消耗系数越低越好，制造与管理费用

也应力求降低。有时先进设备虽然制造与管理费用高一点，但在单位生产能力、消耗系数及保证产品质量上有突出优点，也应优先采用先进设备。

为了设计、制造出高质量的化工设备，我国已正式颁布了一系列有关设计、制造、安全管理等方面的标准与规定，如：GB150—89《钢制压力容器》，GB151—89《钢制管壳式换热器》，劳动部颁发的《压力容器安全监察规程》以及有关部门规定的一些设计、制造必须遵守的技术条件等等。从事压力容器设计、制造的单位，都必须遵循上述各项规定并通过严格考核，取得相应合格证书后，才能从事该项工作。

第三节 化工设备常用材料

化工设备对材料有严格的要求。金属材料及其机械性能已在前述课程《材料与热处理》、《机械原理与机械零件》等有关章节中详细讲过，故不再赘述。本节着重介绍一台典型化工设备各种主要零部件常用哪些金属材料，有些什么特殊要求。

一、壳体与封头

壳体与封头是化工设备中占有材料最多，要求也最高的部件。常用材料有Q235—AF(代替原A3F及AY3F)、Q235—A(代替原A3及AY3)、Q235—B、Q235—C、16MnR、15MnVR、20R等等。

Q235—AF只能用于设计压力 $P \leq 0.6 \text{ MPa}$ ，温度在 $0 \sim 350^\circ\text{C}$ 及钢板厚度 $\leq 12 \text{ mm}$ 的压力容器。它不得用于盛装易燃、毒性为中度、高度或极度危害介质的压力容器。

Q235—A只能用于 $P \leq 1.0 \text{ MPa}$ ，温度在 $0 \sim 350^\circ\text{C}$ 及钢板厚度 $\leq 16 \text{ mm}$ 的压力容器。它不得用于盛装液化石油气体、毒性为高度或极度危害介质的压力容器。

Q235—B只能用于 $P \leq 1.6 \text{ MPa}$ ，温度在 $0 \sim 350^\circ\text{C}$ 及钢板厚度 $\leq 20 \text{ mm}$ 的压力容器。它不得用于毒性为高度或极度危害介质的压力容器。

Q235—C只能用于 $P \leq 2.5 \text{ MPa}$ ，温度在 $0 \sim 350^\circ\text{C}$ 及钢板厚度不大于 32 mm 的压力容器。

圆筒形壳体基本都是经卷焊后制成，球壳通常是将一定形状的钢板先压成一块块的球瓣，然后再经拼焊后制成。封头是将整块或拼焊好的钢板经热压成型后制成，它与壳体组焊后，就成为一台容器。分析其制造过程，可以看出壳体与封头材料不仅要求强度高，以减少设备材料用量，而且还需塑性、韧性、可焊性也好，以避免在大变形加工或焊接时开裂，塑性好的材料还可以较大的塑性变形来缓解应力集中，使用时比较安全。

用于压力容器制造的钢板，要求其延伸率 $\delta_s = 15 \sim 20\%$ ，冷弯试验要合格，梅氏(U型缺口)试样常温下的冲击韧性 α_K 应 $\geq 40 \sim 60 \text{ J/cm}^2$ ($4 \sim 6 \text{ kg}\cdot\text{m/cm}^2$)，低温下《钢制压力容器》要求采用夏比(V型缺口)试验来测定冲击韧性。

二、管板与法兰

管板与法兰都是钢板或锻件经切削、钻孔后制成，而后再与壳体组焊，因而管板与法兰材料应具有较好的可锻性、切削加工性与可焊性。管板与法兰通常直接与介质接触，受力情况也十分复杂，选材时应慎重。

管板常用材料有Q235—A、Q235—B、Q235—C、16Mn、16MnR等。Q235—AF也可用于管板，其使用条件同前述。

法兰常用材料有Q235—A、Q235—B、Q235—C、16Mn、15MnV等。

不论是管板还是法兰，当选用Q235系列时，都应遵守前面的限制条件。

三、接管与换热管

接管与换热管大多数用无缝钢管，温度较低时（0~350℃）用10、20钢，温度较高时（350~475℃）用16Mn、15MnV等。

四、螺栓与螺母

螺栓与螺母要求机械强度较高、塑性与韧性较好，且可锻性、切削加工性能及热处理性能都较好的材料制成。螺栓与螺母要配对使用，通常螺栓的强度与硬度应比螺母略高。

螺栓常用材料有A3、35、40MnB、35CrMoA等；螺母常用A3、A4、35、40Mn、30CrMoA等。

五、支座及其它不重要的附件

支座及一些不重要的附件，一般不直接与介质接触，使用温度也不高，故常用Q235—AF。

选材时，有一些情况也应充分考虑，如两种材料的两端刚性连接时，材料的膨胀系数应认真选择，以期使温差应力最小，当这两种材料温度基本相同时，应选择膨胀系数相同的材料或同一种材料；对于导热的材料，则要求导热系数比较高等等。

化工设备设计计算中要用到大量的理论力学与材料力学问题，还会碰到一些弹塑性力学及其它一些力学问题，因而在强度计算中不仅会用到 $\sigma \leq [\sigma]'$ 的强度条件，而且还会出现 $\sigma \leq 2[\sigma]'$ 或 $\sigma \leq 3[\sigma]'$ 的强度条件，这与材料力学有很大的不同。有关这方面的原理，请参阅本书第十二章。

第一章 旋转壳体的受力分析

第一节 旋转壳体的几何概念

一、旋转壳体的形成

化工容器及化工设备的外壳，多数都是由旋转壳体组合而成，它们所承受的气压或液压载荷也是轴对称的。因此在研究化工设备之前，首先要把几种典型旋转壳体的几何关系搞清楚，然后才能研究它们的受力关系和设计方法。

任何直线或平面曲线绕其同平面内某一已知直线旋转而形成的曲面称为旋转曲面，这一已知直线叫旋转曲面的轴，形成旋转曲面的直线或平面曲线称为母线。例如平行于轴的直线绕其轴 OZ 旋转形成圆柱面；直角三角形以任一直角边为轴旋转形成锥面；半圆形曲线绕其轴 OZ 旋转形成球面；半椭圆绕其轴 OZ 旋转即成椭球面，如图1-1所示。

与壳体内外面等距离的曲面称为中间面，它是平分壳体厚度的曲面，它反映了壳体的几何特性。如果一壳体的中间面是旋转曲面，则此壳体称为旋转壳体。

二、旋转壳体的几何参数

图1-2表示一旋转壳体的中间面， OZ 为旋转轴， OA 为母线。

过壳体上任一点 a ，作一平面与壳体相切，此平面即称为壳体在 a 点的切平面。过 a 点作切平面的垂线，此垂线即是壳体在 a 点的法线。法线必定与旋转轴相交，例如交于图中的 K_2 点。

通过法线可以作无数平面与中间面相交，相交得到的曲线称为 a 点的法截线。法截线有无数根，其中有两根具有最大曲率与最小曲率且相互正交的法截线，它们可以表征在 a 点附近壳体中间面的特性，称为主法截线。这两条中，一条是通过法线与旋转轴的平面 I 与中间面相交得到的法截线，称为经线（即母线），如图1-2中3所示；另一条是通过法线并与上述平面 I 垂直的平面 II 与中间面相交的法截线，如图1-2中1所示。

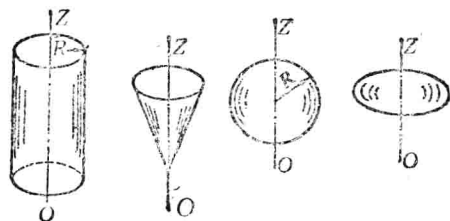


图 1-1 几种旋转曲面

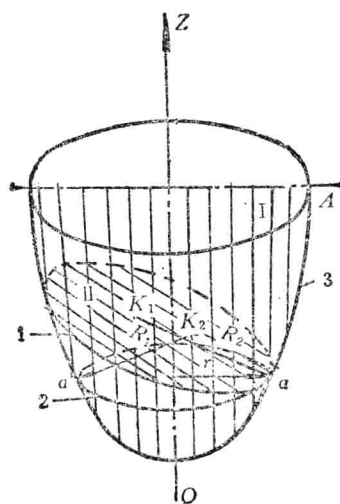


图 1-2 旋转壳体

1—法截线；2—平行圆；3—经线

主法截线的曲率半径称为主曲率半径。为了区别, 经线在 a 点的曲率半径称为第一曲率半径, 以 R_1 表示, 如图 1-2 中 aK_1 所示。另一条主法截线 (今后提到的法截线即特指这一条主法截线) 的曲率半径称为第二曲率半径, 以 R_2 表示, 如图 1-2 中的 aK_2 所示。 a 点的曲率半径 aK_1 、 aK_2 一定与 a 点的法线重合, 而且第二曲率半径的曲率中心 K_2 必定是 a 点处法线与旋转轴的交点。

如经线 (母线) 的形状已知, 则经线在 a 点的第一曲率半径 R_1 可通过求曲线的曲率半径公式得出, R_2 可根据几何关系求出。

以 a 点的法线作为母线, 绕旋转轴旋转形成一锥面 aK_2a' , 与中间面相交, 得到的交线称为纬线; 垂直于旋转轴的平面与中间面相交形成的交线——圆, 称为平行圆, 此圆的半径 r 称为平行圆半径。

对于圆柱形壳体, 因为经线是直线, 故法截线与平行圆重合, 因此第一曲率半径 $R_1 = \infty$, 第二曲率半径 R_2 就是圆柱形壳体中间面的半径, 即 $R_2 = r$; 对于圆锥形壳体 (见图 1-9), 第一曲率半径 $R_1 = \infty$, 第二曲率半径 $R_2 = r / \cos \alpha$; 对于球形壳体, 第一、第二曲率中心重合, 此中心即是球心, 因而第一曲率半径和第二曲率半径相等, 即 $R_1 = R_2 = R$, R 为球中间面的半径; 对于椭圆形壳体 (见图 1-10), 因为中间面各点的经线和法截线的曲率都不一样, 因此它的第一曲率半径 R_1 和第二曲率半径 R_2 是与各点的位置有关的变量。通过计算可得椭圆形壳体上任一点 M 的 R_1 、 R_2 为:

$$R_1 = \frac{[a^4 - x^2(a^2 - b^2)]\sqrt{a^4 - x^2(a^2 - b^2)}}{a^4 b} \quad (1-1)$$

$$R_2 = \frac{\sqrt{a^4 - x^2(a^2 - b^2)}}{b} \quad (1-2)$$

式中 a —— 椭球的长轴半径;
 b —— 椭球的短轴半径;
 x —— M 点到旋转轴的距离。

第二节 旋转薄壁壳体的受力分析

我们任意选取一旋转薄壁壳体, 因为其壁很薄, 又是轴对称的旋转壳体, 所以它在流体内压的作用下, 可以认为截面上产生的正应力沿壁的厚度是均匀分布的, 并可忽略其弯曲应力的影响。

为了求得各截面的应力值, 我们首先采用截面法求出径向应力的计算公式, 然后再应用切割微体的方法, 求出径向应力和环向应力的关系式, 从而就可求出环向应力值。

一、区域平衡方程式

如图 1-3 所示, 任取一旋转薄壁壳体, 在旋转轴上取一点 K_2 , 以 K_2 为中心, 以与 R_2 所在的法线为母线绕旋转轴旋转, 将旋转壳体相切割形成一分离体 nOn' , 取截面下部分分离体进行受力分析。

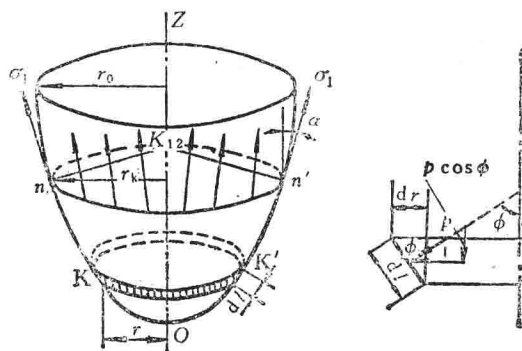


图 1-3 分离体受力分析