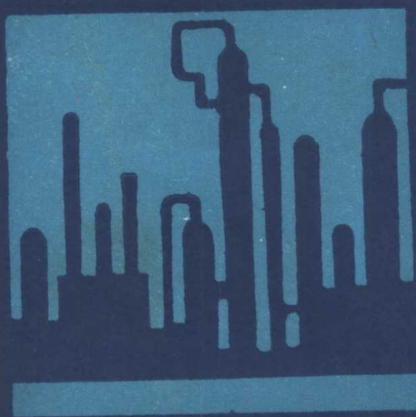


压力容器及化工设备

陈国理 主编



上册

华南理工大学出版社

压力容器及化工设备

上 册

陈国理 主编

吴泽炜 主审

华南理工大学出版社

内 容 简 介

本书是按化机专业指导性教学大纲编写的化机专业通用教材。

全书分上、下两册。上册为压力容器部分，除绪言外，共三篇(十二章)，内容有压力容器的结构材料及其选用；内压薄壁壳体的常规设计；压力容器的稳定性设计；平板理论及设计；压力容器的零、部件设计；高压容器的结构设计及厚壁圆筒的强度计算；高压容器的零、部件设计；超高压容器设计；压力容器的应力分类设计法；压力容器的防脆断设计及缺陷评定；压力容器的疲劳分析；压力容器的蠕变问题。下册为化工设备部分，共一篇(五章)，内容有塔设备；换热设备；反应设备；贮罐及异型容器。

本书作为高等院校化机专业教材，也适合于大专班、业余大学、职工大学的化机专业使用，亦可供化工设计及生产部门的工程技术人员参考。

压力容器及化工设备

上 册

陈国理 主编

吴泽伟 主审

责任编辑 潘宜玲

华南理工大学出版社出版发行

(广州 五山)

各地新华书店经销

韶关新华印刷厂印装

开本787×1092 1/16 印张26.25(插页1) 字数622千

1988年11月第1版 1990年5月第2次印刷

印数5 001—10 000

ISBN 7-5623-0070-4/TQ·3

定价：7.75元

前 言

我国化工机械专业自创办以来专业教材的编写进行过多次,每次编写的教材都有其特色及适用场合。华南、西北及东北地区部分院校化机专业的教师,总结了80年代以来专业教学的情况及教材的问题,并鉴于我国目前生产、科研及教学改革的情况,进行了新教材的编写以适应新历史时期的需要。编写的指导思想是:

- 1.发扬过去每次教材的优点,解决不适应的问题;
- 2.尽量反映80年代化工机械学科的新理论、新技术及新的设备结构;
- 3.密切联系国内目前有关规范;
- 4.加强设备结构分析,增加结构内容。既有教学大纲又不限于教学大纲的内容,增加一些自学内容,供自学及毕业设计参考。

本书编写分工如下。

华南理工大学:第一章(廖景娱),第二章(洪锡纲),第五章(陈柏暖),绪言及第六、八、十五章(陈国理),第七、九、十二章(张泽湘),第十章(通用机械研究所李泽震及周道祥),第十一章及第十四章的第三节(黎廷新),第十四章除第三节以外各节(钱颂文);广西大学:第三、四章(林榕端);沈阳化工学院:第十四章(贾春厚);大庆石油学院:第十六章(潘秉智、朱瑞东);甘肃工业大学:第十七章(张镜清)。全书由华南理工大学陈国理教授主编,由华东化工学院吴泽炜教授主审,参加审阅的还有成都科技大学古大田教授、浙江工学院张康达教授及化工部化工设备设计技术中心站俞天慧高级工程师等。本书编写过程中得到华南理工大学教务处的的大力支持;化机教研组江楠讲师为本书的出版、校对做了许多工作;华东化工学院吴泽炜教授对本教材的编写给予了大力支持,审阅书稿花费了大量的时间,并为本书作序,在此表示衷心的感谢。

编 者

1988年4月于华南理工大学

序

压力容器及化工设备是化工机械专业中的一门主要课程,包括压力容器设计及化工设备两部分内容。

随着化学工业日益发展进步,化工厂所用设备亦需继续不断更新。因此,近年来我国出现了多种压力容器及化工设备方面的教材及专业参考书,以满足读者的需要。

作为教学用书,应使学生能用较少的时间学到较多的专业知识。过去有关压力容器及化工设备的教材各有其特色,各有其最适宜的使用场合。华南理工大学等院校合编的这本教材在保证讲清基本理论的前提下,适当介绍结构分析及部分规范资料,使学生读过此书后,能顺利地进行毕业设计。书中除一般化工设备外,还对超高压容器、反应设备、贮罐、异形容器等方面内容作适当的介绍;除过去沿用常规设计方法外,还适当介绍容器设计的新方法与新准则,以开阔视野,提高学生处理新问题的能力。

本书可用作四年制化工机械专业本科生的教材。如省略部分章节,三年制专科学校及职工大学亦可采用。由于书中内容比较丰富、实用,对有关工程技术人员亦有较大的参考价值。

本书参加编写的人员为国内各高等院校或研究单位长期从事化机专业教学与科研的教师或高级工程师,有较丰富的教学与实践经验。由于参编的人员较多,且分布在华南、东北与西北广大地区,书中名词、术语、符号不一致之处可能不少,虽经多次审阅,可能还有遗漏,务望读者指出,以期改进。

吴泽炜

1988年4月于上海华东化工学院

绪 言

一、化机专业教材的沿革

本教材为化工机械及设备专业的专业课教材,包括压力容器及化工设备。

众多的化工过程可以归纳为流体动力过程、传热过程、传质过程以及化学反应过程。这些过程的基本原理,处理这些过程的内件设计计算已分别在《化工过程及设备》及《化学工艺学》等课程中讲授。本课程着重阐明设备的结构原理,根据受载情况进行应力分析与强度计算,并按各种规范进行机械设计。

繁多的化工设备又主要是管壳式换热设备、塔式传质设备、化学反应设备以及各种贮罐,而这些设备实质上又是由限制设备工作空间的受载外壳及其内件组成。因而,设计的内容主要是压力容器与内件设计。内件的型式与尺寸的决定已在《化工过程及设备》中阐述,因此本课程的任务主要是压力容器设计。从受载的情况看,由于压力等级的差异,结构设计和规范的不同,压力容器可分为中、低压容器和高压、超高压容器。

80年代压力容器服务的重点已由化学工业转移到与能源有关的工业;此外,轻工、食品、医药等工业部门也使用大量的压力容器。为了扩大适应性,本教材的内容不限于化工用的容器,因而教材的名称改为《压力容器及化工设备》。考虑到80年代以来,高压聚乙烯的操作压力已达 3200kgf/cm^2 (约 320MPa),人造水晶釜、等静压挤压器……等过程的操作压力都在 1000kgf/cm^2 (约 100MPa)以上,使用超高压容器的部门日益增多,因此教材中增加了超高压容器的内容份量,并把高压、超高压容器独立为一篇(第二篇)。

鉴于80年代压力容器技术的进展,应力分析法设计、以疲劳分析为基础的设计方法国内外均已拟订了规范;断裂力学已在压力容器中的应用,压力容器缺陷评定规范也已公布试用;70年代以来合成氨厂中氢的制备,960℃的高温蒸汽转化已代替过去的中温变换;随着高温化工操作的增多,设备的高温蠕变分析也提到了议事日程。为了使系统地学习这方面的新理论、新知识,工作后具有解决这些问题的基础,本教材将这些方面的内容独立写成一篇,称为压力容器设计的新方法、新准则(第三篇)。

为了扩大学生对化工设备各种类型的了解,加强学生对化工设备结构的掌握,化工设备的内容除教学大纲规定的换热设备、塔设备外,还增加了化学反应设备、贮罐、异型容器等三章。这三种设备目前在石油化工厂中使用很多,可作为学生自学的内容,供毕业设计时参考。这部分单独一篇,称化工设备(第四篇)。

因此,本教材由压力容器(三篇)、化工设备(一篇)组成。以压力容器设计为主,并辅以设备内件设计,加强设备的结构分析。

从强度计算来看,容器与设备的外壳都是回转壳体在受内、外压下的应力分析与强度计算问题。对于中低压容器则是薄壳理论与平板理论及其在压力容器设计中的应用问

题,这方面苏联学者3.Б.康特罗维奇教授、中国学者王仁东教授做了大量的理论工作;对于高压、超高压容器,大厚度大变形弹塑性的分析,本构方程的建立,极限压力的计算,王仁东教授做了出色的工作,都为本专业教材作出了贡献。

随着化学工业、能源工业以及其他工业的发展,压力容器及化工设备的工作条件愈来愈苛刻,操作压力从高度真空到数千大气压,工作温度从 -250°C 到 2000°C 左右,工作介质从三酸两碱到尿液,有强烈的腐蚀性、毒性、易燃易爆性,核反应堆容器还有中子照射,使材料变脆的问题。由于化工生产单系列大型化,容器的尺寸不断地增大。例如,煤的气化及液化装置,内径约 $3\sim 5\text{m}$,壁厚 $200\sim 400\text{mm}$;核能装置、反应堆容器内径目前已达 6.4m ,壁厚 156mm ,即将达到内径 7.8m ,壁厚 190mm ;炼油装置、加氢反应器,内径达 4.2m ,壁厚 300mm ;球形贮罐的容积已达 10000m^3 。这些大型的容器,里面安装各种型式的内件,器壁上有各种用途的开孔与接管……,这些容器工作条件苛刻、结构复杂,制造与安装特殊的容器与设备,设计者只懂得应力分析与强度计算是不够的,还必须学会从化工工艺过程、制造、安装、生产操作的要求去分析结构,进行结构设计,使设计出来的容器,不但强度保证,机械可靠,而且结构合理。要做到这样,结构分析是重要的一着。苏联学者A.Д.杜马什涅夫教授在本专业的第一版教材中指出:“在任何结构中,决没有偶然的和多余的东西,所有结构的产生都有一定原因的,学会分析设备的结构,能找出为什么采取这种结构的原因,应该是本课程的基本任务之一。”本教材将遵循这个原则,加强设备的结构分析。

本专业教材自1957年杜马教授撰写问世以来,几经增订改编,理论水平不断提高,内容不断更新并切合中国实际。在这些工作中,吴泽炜教授、贺匡国教授在薄壁容器所做的工作,戴树和教授在厚壁容器所做的工作,余国琮教授在塔设备所做的工作,都是卓有成果的,本教材吸收了这些成果,并发扬光大。

压力容器设计各种尺寸除了按理论计算外,还必须符合规范。本教材所推荐的设计计算公式与参数,力求与我国《钢制石油化工压力容器设计规定》取得一致,但该《规定》只是对设计压力不大于 350kgf/cm^2 的常规设计方法作的规定,规定以外的设计需参考国外有关规范。常用的规范有:美国ASME《锅炉及受压容器规范》第Ⅷ篇第二分篇、日本高压力技术协会《超高压圆筒容器设计指针》,前者对应力分析法设计及疲劳分析设计等非常规的设计规范,后者对工作压力 1000kgf/cm^2 至 $10\,000\text{kgf/cm}^2$ 的设计规范均有所推荐。我国学者琚定一教授、高家驹高级工程师对这些规范进行过不少研究与介绍,可作参阅借鉴,本教材亦将推荐。

70年代以来,我国引进了10多套大型合成氨及尿素装置、大型乙烯装置、维尼龙装置,在这些引进装置中,有许多先进的设备结构型式,在消化吸收的基础上,本教材将在有关章节予以介绍。

在党的十一届三中全会正确路线指引下,高等院校既是教学中心,又是科研中心,各院校压力容器与化工设备的试验研究,无论在理论上或技术上都取得不少成果。例如,扁平绕带高压容器、压力容器的防爆膜;超高压容器自增强理论与应用;螺旋板换热器的稳定性;膨胀节的结构强度与稳定;塔与换热器的流体诱导振动;断裂力学在压力容器中的应用以及压力容器的疲劳寿命分析等的研究,都取得了卓越的成果,有些在生产上取得了较大的经济效益,这些成果也提供了充实本教材的内容。

二、对压力容器及化工设备的基本要求

压力容器及化工设备有些是化工生产流程中使用的,有些压力容器则不一定在化工生产中使用。在化工生产使用的容器与设备,有些是生产中的关键设备,有些是辅助设备。不管是关键设备、辅助设备,还是非化工容器,都有其一定的生产任务,作为压力容器都有着安全运转的问题。为了使压力容器及化工设备有较高生产效能,能长期安全运转,对其有如下的基本要求:

(一)机械可靠

这是容器设备的首要条件。如果机械不可靠,设备便不能实际应用,或者在使用过程中发生失效事故。国内外都曾发生过不少压力容器失效的事故,有些还是灾难性的。容器设备要机械可靠,应满足下面几个方面的要求:

1.强度 强度是容器设备在载荷作用下抵抗破坏的能力。每台容器设备,不论壳体或部件,都应该具有足够的强度,否则不能正常操作和保障工人的安全。但是也不能为了保证强度而把安全系数提得太高,这样也会造成材料的浪费。一般取容器的相当应力稍低于材料的许用应力便可。设计容器的各个部件最好采取等强度原则。

2.刚度 刚度是构件在外力作用下保持原来形状的能力。受外压的容器如果刚度不够,将失稳而破坏。对于受压壳体或零部件,评定机械可靠的标准往往是刚度而不是强度。例如受外压的容器,即使强度足够,但刚度不够也会失稳破坏。

3.紧密性 压力容器或化工设备往往里面盛贮有易燃、易爆、有毒性及强腐蚀的流体介质。如果容器的端盖或开孔连接处不够紧密,这些介质便会泄漏出来,给环境带来严重污染,使工人的健康受到严重的损害,而且泄漏这些介质本身也是一个损失。如果是真空设备,器内虽无有毒介质,但若紧密性不好,漏进空气破坏真空,也是不能允许的。因此,紧密性对化工容器来说是非常重要的问题。有些人对高压容器的密封很重视,但对中低压容器却忽视,故一些化工厂的跑、冒、滴、漏往往出现在中低压容器。因此,必须强调除常压容器外,任何压力容器(含真空容器)都不能忽视端盖与接管的紧密性。

4.耐久性 压力容器及化工设备的耐久性根据所要求的使用年限而定。压力容器及化工设备的使用年限一般为10~12年,但实际使用年限往往超过这个数字。化工设备的耐久性大多数决定于介质的腐蚀情况,尿素及酸、碱设备尤其如此。在受反复载荷、高温操作或流体振动的情况下,容器的寿命还取决于设备的疲劳、蠕变及振动磨损等因素。在科学技术日新月异的今天,新的结构型式不断出现,对设备的使用年限要求太长是不合适的。但高压容器可较长一些,因为高压容器的外壳成本很高,一般要求使用年限长达20~25年。现在有些氨合成塔的使用年限都已超过30年。

(二)单位生产能力高

压力容器及化工设备的单位生产能力是指单位时间、单位设备容积(或面积)处理物料的数量。例如,硫酸吸收塔的单位生产能力为每小时每立方米容积所处理的硫酸公斤数;换热设备的单位生产能力为每小时每平方米传热面积的传热量千卡数。化工设备不但要求处理物料量大,而且要求效率高,而这两者往往存在矛盾,如处理量大的设备有时效率低,或者反之。单位生产能力实际上就是处理量与设备效率的综合指标。单位生

产能力愈高愈好，设备的效率与内件的设计有关。

(三)消耗系数低

消耗系数是指生产单位重量或单位体积产品所需消耗的原材料及能量，即原料、燃料、水、电、蒸汽、压缩空气等。容器及设备的消耗系数一方面与工艺路线有关，一方面又与设备的设计有关。例如氨合成塔气体通过触煤层及通道的阻力大，则压强降大，压缩机的动力电力消耗也大。消耗系数愈低愈好，这也与内件的设计有关。

(四)制造方便

要满足这个要求，容器及设备在结构上必须有良好的加工工艺性，制造方便且能保证质量。例如壁厚圆筒的筒体，应尽量避免深厚环焊缝，尽量避免多焊缝，并应尽量避免复杂的加工工序，需要机加工的地方尽量减少切削加工量，光洁度高的部位尽量减少。可以用焊接的结构尽量用焊接，避免锻造与铸造；可以用标准件的尽量用标准件。这样可以减少制造的工作量并缩短制造的周期，降低成本，并可保证质量。

(五)运输与安装方便

容器与设备制造好后，要从制造厂运至使用厂进行安装，还要求运输与安装方便。特别是70年代以来，化工生产单系列大型化，塔的直径达5m或更大，高20m以上，重达600~1000吨，大型球罐的容积达5000~10 000m³，这样的高、大、重型的容器，必须考虑运输的可能性与安装的方便性。要考虑水运及铁路运输，如水运时轮船的宽度与长度、上下码头的方便。对铁路运输，还要根据隧道口的大小，决定单件的外廓尺寸。要根据起吊设备的吨位，决定单件的最大重量；需要整体吊装时，要根据最大的吊装高度，决定设备的长度。在容器设备上面，还需在合适的位置装设吊装环。大型球罐的球片，在运输过程中必须有不致由于球片的重量而使其变形的固定装置。

(六)运转性能好

容器及设备在使用操作中要求运转性能好，具体的要求是：

1. 运转方便，操作简单，在运转时没有噪音与振动；
2. 能连续进行操作，自动化程度高，并易于维持；
3. 装拆和检修方便；
4. 能进行试验与监控；
5. 能用标准零件替换。

以上这些都是在使用过程中发生的问题，在设计时必须加以考虑。例如压缩机的缓冲容器及有蒸汽通入的设备，操作时往往由于流体脉冲及流体诱导而引起剧烈的振动，设计时必须考虑消除这种振动，或者在基础上设吸振装置，以吸收振动。

为了使设计的压力容器及化工设备能安全使用，并且生产能力高，操作运转性能好，从各个方面提出了上述这些要求，这些要求有些是互相联系补充的，有些要求则是互相矛盾不协调的。前者可以充分满足；后者则要作具体分析，找出主要矛盾以及矛盾的主要方面，满足主要要求，略去次要要求，采取辩证的方法解决。

本课程是工程专业课，学习本课程不但要有辩证观点，还需有工程观点。

三、压力容器的分类

压力容器有各种不同的分类方法，按所受压力的高低，压力容器分为低压、中压、

高压及超高压容器。根据《压力容器安全监察规程》的规定： $1\text{kgf/cm}^2 \leq p < 16\text{kgf/cm}^2$ 为低压容器； $16\text{kgf/cm}^2 \leq p < 100\text{kgf/cm}^2$ 为中压容器； $100\text{kgf/cm}^2 \leq p < 1000\text{kgf/cm}^2$ 为高压容器； $p \geq 1000\text{kgf/cm}^2$ 为超高压容器。受压力的大小影响容器壁应力的水平以及强度计算的方法，学术研究与设计计算多数按这样的分类。此外，还有按制造方法、容器形状、材料性能等方法分类，根据研究、处理的目的而定。

劳动部门为便于安全管理和监督检查，根据容器受压力的高低、生产过程中的重要性以及介质的危害程度等原则进行分类，从安全监督管理角度将压力容器划分成三类。具体的划分标准如下：

1. 属于下列情况之一者为一类容器：

- ① 非易燃、易爆、无毒介质的低压容器；
- ② 易燃、易爆、有毒介质的低压容器。

2. 属于下列情况之一者为二类容器：

- ① 任何介质的中压容器；
- ② 剧毒介质的低压容器；
- ③ 易燃、易爆、有毒介质的低压反应器和贮运容器；
- ④ 容器壁温 $0^\circ\text{C} \geq t \geq -20^\circ\text{C}$ 。

3. 属于下列情况之一者为三类容器：

- ① 任何介质的高压、超高压容器；
- ② 剧毒介质容器，且 $p \times V \geq 2000 (\text{L} \cdot \text{kgf/cm}^2)$ ；
- ③ 易燃、易爆、有毒介质的中压反应器；且 $p \times V \geq 5000$ ；中压贮运容器 $p \times V \geq 50\,000$ ；
- ④ 容器壁温：高温容器 $t > 450^\circ\text{C}$
低温容器 $t < -20^\circ\text{C}$

其中 p 为压力 (kgf/cm^2)； V 为容积 (L)

目前我国对这三类容器的设计、选材、制造检验分别提出不同的要求、设计、制造的资格，也是按这三类容器的要求审定。

目 录

绪言.....	
---------	--

第一篇 中、低压容器

第一章 压力容器的结构材料及其选用	1
第一节 压力容器的失效与材料的关系.....	1
一、韧性断裂.....	1
二、脆性断裂.....	2
三、疲劳.....	2
四、蠕变.....	2
五、腐蚀.....	3
第二节 材料的基本性能.....	4
一、力学性能.....	4
二、耐腐蚀性能.....	7
三、加工工艺性能.....	7
四、物理性能.....	8
第三节 压力容器常用结构材料	9
一、钢材.....	9
二、有色金属.....	13
三、非金属材料.....	14
第四节 压力容器材料的选用.....	14
第二章 内压薄壁壳体的常规设计	16
第一节 一般回转薄壳的几何概念	16
第二节 回转薄壳的无力矩理论与壳体中的应力	17
一、壳体理论的基本概念.....	17
二、无力矩理论的基本方程式.....	18
三、回转薄壳中的薄膜应力.....	21
四、无力矩理论的应用条件.....	26
五、壳体中应力分析举例.....	26
第三节 有力矩理论与壳体的边缘问题.....	29
一、有力矩理论.....	29
二、壳体的边缘问题.....	36
第四节 内压薄壁壳体的设计	48
一、强度设计公式.....	48
二、计算壁厚的有关参数.....	56

三、容器的最小壁厚	63
四、容器的耐压试验	64
第五节 壳体结构与强度	65
一、壳体的形状与强度	65
二、壳体的焊缝结构	66
第三章 压力容器的稳定性设计	69
第一节 概述	69
一、外压容器的稳定性	69
二、外压容器的临界压力	69
三、轴向压缩圆筒的稳定性	70
四、弹性失稳及非弹性失稳	70
第二节 外压圆筒的稳定性计算	71
一、长圆筒受均布外压时的临界压力	71
二、短圆筒受均布径向外压时的临界压力	76
三、临界长度	78
四、圆筒受径向及轴向均布外压时的临界压力	79
第三节 外压圆筒设计	79
一、外压容器设计参数	79
二、外压薄壁圆筒的许用压力	81
三、外压厚壁圆筒的许用压力	83
四、图算法	84
第四节 圆筒壳受轴向压缩、弯曲载荷及复合载荷的稳定性计算	93
一、圆筒壳受轴向压缩	93
二、圆筒壳受弯曲载荷	94
三、圆筒壳在轴向压缩(包括弯曲载荷)和外压同时作用下的稳定性计算	94
第五节 外压圆筒加强圈的设计	97
一、加强圈的作用	97
二、加强圈的计算	98
三、加强圈的结构设计	101
第六节 外压封头设计	104
一、外压球壳	104
二、外压凸形封头	105
三、外压锥形封头	105
第四章 平板理论及设计	108
第一节 概述	108
一、平板分类	108
二、基本假设	108
第二节 受轴对称载荷圆形薄板的基本方程式	109
一、平衡方程	109
二、几何方程	111
三、物理方程	112
四、受轴对称载荷圆形薄板的弯曲微分方程式	112

第三节 受均布载荷的圆形薄板	114
一、周边固定、受均布载荷的圆形薄板	114
二、周边简支、受均布载荷的圆形薄板	116
第四节 受轴对称载荷的环形薄板	118
一、外周边固支、内周边自由、受均布载荷的环形薄板	118
二、外周边简支、内周边自由、受均布载荷的环形薄板	121
三、各种环板的应力及变形	122
第五节 受均布载荷的矩形薄板	125
一、周边简支、受均布载荷的矩形薄板	125
二、周边固支、受均布载荷的矩形薄板	125
第六节 平盖设计	127
一、圆形平盖	127
二、非圆形平盖(椭圆形、长圆形、矩形、正方形)	129
第五章 压力容器的零、部件设计	131
第一节 中、低压容器法兰联接的密封设计	131
一、密封原理和密封垫片的选择	131
二、螺栓设计	148
三、法兰(Flange)设计	153
第二节 容器开孔与补强	180
一、开孔附近的应力分析	180
二、受内压壳体开孔-接管处的应力集中	185
三、开孔补强设计	188
第三节 容器支承结构	203
一、立式设备支承	204
二、卧式设备支承——鞍式支座	210
参考文献	230

第二篇 高压及超高压容器

第六章 高压容器的结构设计及厚壁圆筒的强度计算	232
第一节 概述	232
一、高压容器在化学、石油化工及其他工业中的应用	232
二、高压容器的结构特点	233
三、高压容器的结构型式	233
四、高压容器的材料选择	240
第二节 厚壁圆筒的应力及应变分析	243
一、整体式厚壁圆筒受内、外压作用下的应力	243
二、厚壁圆筒受内、外压作用下的径向位移	251
三、厚壁圆筒的温差应力	251
第三节 厚壁圆筒的强度计算	255
一、高压容器筒体失效的几个准则	255
二、单层厚壁圆筒按弹性失效准则的计算	256
三、多层厚壁圆筒按弹性失效准则的计算	262

第七章 高压容器的零、部件设计	270
第一节 高压容器的密封设计	270
一、高压容器的密封原理和基本要求	270
二、高压容器密封结构的分类与型式	270
三、双锥环高压密封的设计计算	279
第二节 高压容器的端盖及筒体端部法兰	284
一、高压容器的端盖	284
二、筒体端部法兰	287
第三节 高压容器的紧固件及开孔补强	289
一、高压螺栓	289
二、卡箍连接	290
三、抗剪螺栓连接	291
四、径向销连接	292
五、高压容器的开孔补强	292
第八章 超高压容器设计	294
第一节 概述	294
一、超高压容器在工程上的应用	294
二、超高压容器筒壁应力的特性	294
三、提高圆筒强度的途径	296
四、超高压容器材料的选择问题	296
第二节 厚壁圆筒按塑性失效与爆破失效的设计	297
一、厚壁圆筒的极限承载能力	297
二、按极限压力的壁厚计算	299
三、非理想塑性体圆筒破坏过程及爆破压力计算	300
第三节 自增强容器设计	302
一、厚壁圆筒自增强的机理	302
二、自增强容器的设计计算	303
三、最佳超应变度的选择	308
四、自增强处理的方法	312
五、自增强容器的设计步骤	313
六、自增强圆筒的性能	313
参考文献	317

第三篇 压力容器设计的新方法、新准则

第九章 压力容器的应力分类设计法	318
第一节 压力容器中的应力分类	318
一、应力分类设计法的基本概念	318
二、一次应力及其类别	319
三、二次应力(Q)	319
四、峰值应力(F)	319
五、压力容器典型零、部件中的应力分类	320
第二节 极限设计法和安定状态	321

一、极限设计法	321
二、安定状态的概念	325
第三节 压力容器设计中各类应力的许用值及其分析	327
一、压力容器设计中各类应力值的限制	327
二、关于应力分类设计法的分析与评述	328
第十章 压力容器的防脆断设计及缺陷评定	329
第一节 概述	329
一、工程结构及压力容器的低应力脆断	329
二、防脆断研究的兴起	330
第二节 断裂力学基础	331
一、线弹性断裂力学	331
二、弹塑性断裂力学	336
第三节 裂纹的疲劳扩展	342
一、压力容器疲劳裂纹的扩展过程	342
二、疲劳裂纹的亚临界扩展规律	343
三、压力容器疲劳寿命的估算	346
第四节 压力容器的破坏事故分析与断裂力学在压力容器上的应用	347
一、国内外的压力容器事故及原因分析	347
二、断裂力学在压力容器安全工作中的应用	349
第五节 国外压力容器缺陷评定规范简介	350
一、安全评定规范与质量控制标准	350
二、压力容器缺陷评定规范的基础	351
三、美国(ASME)《锅炉及压力容器规范》的有关准则	353
四、国际焊接学会(IIW)的缺陷评定方法	355
五、英国 BSIPD6493 焊接缺陷验收标准	356
六、日本 WES-2085 按脆断评定的焊接缺陷验收标准	357
七、联邦德国 DVS2401-1 焊接接头缺陷评定规范	358
八、英国 CEGB 带缺陷结构完整性的评定	359
第六节 我国 CVDA 规范简介及压力容器安全评定实例	360
一、我国 CVDA 规范及其具体使用方法	360
二、评定实例	365
第十一章 压力容器的疲劳分析	370
第一节 疲劳曲线与方程式	371
一、高循环疲劳曲线	371
二、低循环疲劳曲线	372
三、低循环疲劳曲线方程式	373
第二节 平均应力对低循环疲劳的影响	374
一、平均应力的真实值与“虚拟应力”大小的关系	374
二、考虑平均应力影响后的疲劳寿命计算	376
三、低循环疲劳曲线的修正	377
第三节 结构对低循环疲劳的影响	379
一、接管连接及焊缝型式的影响	380

二、接管方位和几何参数的影响.....	381
第四节 疲劳累积损伤	382
第五节 疲劳设计规范	383
一、我国以疲劳分析为基础的设计方法	383
二、日本超高压圆筒容器设计指针(HPIS-C-103-1980)	388
第十二章 压力容器的蠕变问题	392
第一节 蠕变现象的特点及蠕变许用应力	392
一、蠕变现象及其影响因素	392
二、蠕变的许用应力	392
第二节 蠕变曲线的分析与 应用	393
一、蠕变曲线及其测定	393
二、单向应力状态下的蠕变方程	394
三、三向应力状态下的蠕变方程	395
四、厚壁圆筒的蠕变计算	397
第三节 高温密封螺栓的应力松弛	401
一、应力松弛及其与蠕变的区别和联系	401
二、松弛后的应力与时间的关系	402
三、应用实例	403
参考文献	403
附表 工程单位与法定计量单位的换算	404

第一篇 中、低压容器

本篇讨论承压 $p < 100 \text{ kgf/cm}^2$ 的各种薄壁回转壳体的应力分析、强度计算及稳定计算；材料的选用及结构设计，各种设计参数的选定；薄平板的弯曲、应力分析及强度计算；作为容器组成部分的各种零部件的应力分析、强度计算。本篇的理论基础为板壳理论。

第一章 压力容器的结构材料及其选用

材料是压力容器的物质基础，正确选用压力容器材料是保证压力容器长期安全使用的一个基本条件。压力容器应用很广泛；各行各业都有，工作条件多种多样，加上近年来石油化工、核能、宇航等工业的不断发展，工艺过程向高压、超高压、高温、低温和超低温开拓，由此对构成压力容器的材料提出了更高的要求。如何正确选用结构材料，保证压力容器长期安全运行，这是一个很重要的问题。

第一节 压力容器的失效与材料的关系

压力容器及其零部件在使用过程中，常常会发生各种形式的失效。结合失效特点及通常的分类习惯，压力容器常见有韧性断裂、脆性断裂、疲劳、蠕变、腐蚀等失效形式。这些失效的原因无不与制造容器的材料有着密切关系。

一、韧性断裂

压力容器在压力的作用下，当器壁应力超过材料屈服点后，器壁材料会发生塑性变形。随着应力的不断增加，当器壁上的应力超过材料的抗拉强度后，容器会产生明显的宏观塑性变形而至断裂失效。这种失效形式就是韧性断裂。

在韧性断裂失效的容器上，如果材料本身没有宏观的缺陷，内部裂纹很小很小，一般失效容器的圆周伸长率和容积增大率高达百分之十以上，容器断裂后没有碎片或偶然有少量碎片。断裂断口的宏观形貌可为剪切唇或纤维状。在平面应力条件下产生的韧性断裂，其断口宏观表面平行于最大切应力方向而与最大拉应力方向成 45° 角，断口表面较光滑，称为剪切唇；在平面应变条件下产生的韧性断裂，其断口宏观表面与最大拉应力方向垂直，断口表面具有凹凸不平的形貌特征，没有金属光泽，呈暗灰色纤维状。韧性断裂的微观形态对不同的材料有较大的差异。常用的钢铁工程结构材料的韧性断裂，其微观形态为微孔聚集型断口，电子金相特征是断口上有大量的微坑花样，这种微坑也称孔坑、微孔、迭波、韧窝等；此时，变形不仅集中在微孔附近，而且整个金属都有很