

普通高等教育“十三五”规划教材

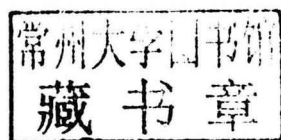
压力容器 PRESSURE VESSEL

王学生 惠 虎 主编

普通高等教育“十三五”规划教材

压 力 容 器

王学生 惠 虎 主编



 华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

· 上海 ·

图书在版编目(CIP) 数据

压力容器 / 王学生,惠虎主编. —上海:华东理工大学出版社,
2018.5

ISBN 978-7-5628-5454-8

(普通高等教育“十三五”规划教材)

I. ①压… II. ①王… ②惠… III. ①压力容器-高等学校-
教材 IV. ①TH49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 081006 号

内容提要

本书根据近年来压力容器安全技术规范以及设计技术标准的新变化,结合国内外压力容器先进技术研究成果,从压力容器设计基本要求、选材、设计、制造和检验以及安全附件几个方面进行了详细介绍与分析。本书共 9 章:第 1 章绪论;第 2 章压力容器基本结构与设计要求;第 3 章压力容器选材;第 4 章薄壁压力容器应力分析;第 5 章内压容器设计;第 6 章外压容器设计;第 7 章压力容器零部件;第 8 章压力容器超压泄放装置;第 9 章压力容器制造与检验。

本书可作为安全工程专业、过程装备与控制工程(化工机械与设备)等相关专业本科生教材或学习参考资料,也可供从事压力容器设计、使用管理人员和科研工程技术人员参考。

.....
策划编辑 / 徐知今

责任编辑 / 徐知今

出版发行 / 华东理工大学出版社有限公司

地 址:上海市梅陇路 130 号,200237

电 话:021-64250306

网 址:www.ecustpress.cn

邮 箱:zongbianban@ecustpress.cn

印 刷 / 江苏凤凰数码印务有限公司

开 本 / 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 / 13

字 数 / 336 千字

版 次 / 2018 年 5 月第 1 版

印 次 / 2018 年 5 月第 1 次

定 价 / 48.00 元
.....

版权所有 侵权必究

前 言

压力容器作为一种特种设备,是现代化生产常用的设备之一,广泛应用于石油化工、化工、煤化工、电力、制冷等行业。近年来随着国内外各流程工业规模的不断扩张,加工深度不断增加,用于高温、高压、危害介质等极端条件的压力容器也越来越多,压力容器的长周期安全生产保障显得非常重要。

我国对压力容器的设计、制造、安装、使用、检验、维修等各个环节改造及报废实行安全监察,颁布了一系列法律、法规、安全技术规范和设计制造标准,以保证压力容器的安全使用。随着材料、结构设计方法、焊接和无损检测等技术的不断进步,新的设计、建造方法不断涌现,压力容器的建造技术也取得了相应的进展。近年来,我国对压力容器的安全技术规范,相关的设计技术标准进行了修订与实施,如 TSG 21—2016《固定式压力容器安全技术监察规程》和 TSG R0005—2011《移动式压力容器安全技术监察规程》、GB/T 150.1—150.4—2011《压力容器》、GB/T 151—2014《热交换设备》、NB/T 47042—2014《卧式容器》、NB/T 47041—2014《塔式容器》、GB 12337—2014《钢制球形储罐》、GB/T 34019—2017《超高压容器》等。压力容器常用材料、压力容器焊接规程以及承压设备无损检测标准也相应进行了修订。

本书根据近年来压力容器安全技术规范以及设计技术标准的新变化,结合国内外压力容器先进技术研究成果,从压力容器设计基本要求、选材、设计、制造和检验以及安全附件等几个方面进行了详细介绍与分析。从基于压力容器主要失效模式和相关设计准则入手,分析了压力容器设计的基本要求,阐述了压力容器常用材料以及选材原则,讨论了薄壁容器的应力分析以及压力容器分析设计基础知识,详细介绍了内压与外压容器的常规设计以及主要零部件的设计方法,针对压力容器安全附件,给出了压力容器安全泄放量的计算方法,最后对压力容器的制造及无损检测方法进行了论述。本书是作者多年来总结专业课程教学与科学研究工作经验,并结合安全工程与过程装备与控制工程本科专业特点后编写而成的。

本书由王学生、惠虎主编,参加编写的有王学生(第1章,第2章,第4章)、惠虎(第6章,第8章)、周帼彦(第7章)、洪瑛(第4章)、陈建钧(第2章)、高连新(第9章)。王学生负责全书统稿和最后修改工作。

限于编者水平,书中如有不妥甚至错误之处,望广大师生和读者给予批评指正,编者将不胜感激。

编者

2018年1月

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 概念	(1)
1.2 技术规范	(1)
1.2.1 《固定式压力容器安全技术监察规程》	(1)
1.2.2 《移动式压力容器安全技术监察规程》	(2)
1.3 技术标准	(2)
1.3.1 GB/T150.1~150.4—2011《压力容器》	(2)
1.3.2 JB 4732—1995《钢制压力容器——分析设计标准》(2005 年确认)	(3)
1.3.3 GB/T 34019—2017《超高压容器》	(3)
1.4 基于失效模式设计	(3)
1.4.1 压力容器失效模式	(4)
1.4.2 设计准则	(5)
习题一	(9)
第2章 压力容器基本结构与设计要求	(10)
2.1 容器的基本结构	(10)
2.2 压力容器分类	(12)
2.2.1 介质组分	(12)
2.2.2 介质危害性	(12)
2.2.3 压力容器分类	(12)
2.3 设计基本要求	(14)
2.3.1 TSG 21—2016《固定式压力容器安全技术监察规程》对压力容器设计的基本要求	(15)
2.3.2 GB/T 150《压力容器》对压力容器设计的基本要求	(17)
2.4 压力容器设计文件	(18)
习题二	(19)
第3章 压力容器选材	(20)
3.1 概述	(20)
3.1.1 力学性能要求	(20)
3.1.2 加工性能要求	(21)
3.1.3 耐腐蚀性	(22)
3.1.4 材料的物理性能	(22)
3.1.5 材料的经济性	(22)
3.2 压力容器常用材料	(22)
3.2.1 钢	(22)
3.2.2 铸铁	(28)
3.2.3 有色金属及其合金	(29)

3.2.4 非金属材料	(33)
3.3 金属的结晶组织	(35)
3.3.1 金属的结晶过程	(36)
3.3.2 铁的同素异构转变	(37)
3.3.3 加热、冷却过程中铁-碳合金组织的转变	(37)
3.3.4 冷却速度对钢材组织及力学性能的影响	(38)
3.4 钢的热处理	(38)
3.4.1 金属材料整体热处理	(38)
3.4.2 化学热处理	(43)
3.5 金属材料的腐蚀与防护	(43)
3.5.1 金属材料的化学腐蚀与电化学腐蚀	(44)
3.5.2 影响腐蚀的因素	(47)
3.5.3 腐蚀评定和防护方法	(48)
习题三	(51)
第4章 薄壁压力容器应力分析	(53)
4.1 回转薄壳的薄膜应力分析	(53)
4.1.1 回转壳体的几何特征	(53)
4.1.2 回转薄壳的无力矩概念	(54)
4.1.3 回转薄壳的薄膜应力分析	(54)
4.2 回转薄壳的薄膜应力计算	(57)
4.2.1 承受气体压力的壳体	(57)
4.2.2 承受液体静压力的壳体	(59)
4.3 边缘应力及其特点	(61)
4.3.1 边缘应力的产生	(61)
4.3.2 边缘应力的特性	(61)
4.3.3 设计中对边缘应力的处理	(62)
4.4 压力容器应力分类及分析设计简介	(63)
4.4.1 常规设计的局限性	(63)
4.4.2 分析设计的基本思想	(63)
4.4.3 分析设计标准的应用	(68)
习题四	(69)
第5章 内压力容器设计	(71)
5.1 设计参数的确定	(71)
5.1.1 设计压力和计算压力	(71)
5.1.2 设计温度	(72)
5.1.3 焊接接头系数	(72)
5.1.4 厚度附加量	(72)
5.1.5 许用应力和安全系数	(73)
5.1.6 厚度	(73)

5.2	压力试验	(73)
5.3	内压圆筒的强度计算	(75)
5.4	内压球壳的强度计算	(76)
5.5	凸形封头的强度计算	(76)
5.5.1	半球形封头	(76)
5.5.2	椭圆形封头	(77)
5.5.3	碟形封头	(77)
5.5.4	球冠形封头	(78)
5.6	锥形封头的强度计算	(79)
5.6.1	锥壳厚度	(80)
5.6.2	受内压折边锥壳	(82)
5.7	平板封头的强度计算	(84)
	习题五	(87)
第6章	外压容器设计	(89)
6.1	外压容器的稳定性	(89)
6.2	临界压力	(90)
6.3	外压薄壁圆筒的稳定性计算	(91)
6.3.1	概述	(91)
6.3.2	受侧向均布外压力的长圆筒的临界压力	(91)
6.4	外压容器的设计计算	(95)
6.4.1	概述	(95)
6.4.2	图算法的原理	(95)
6.4.3	图算法的计算步骤	(100)
6.4.4	有关设计参数的规定	(103)
6.4.5	加强圈的设计计算	(104)
6.5	外压封头的设计计算	(107)
6.5.1	概述	(107)
6.5.2	外压凸形封头	(107)
	习题六	(108)
第7章	压力容器零部件	(110)
7.1	法兰连接设计	(110)
7.1.1	法兰结构类型与标准	(110)
7.1.2	密封设计	(113)
7.1.3	螺栓设计	(122)
7.1.4	法兰设计	(126)
7.2	开孔与补强	(130)
7.2.1	开孔附近的应力分析	(130)
7.2.2	开孔补强设计	(131)
7.2.3	开孔补强计算	(134)

7.3 支座	(140)
7.3.1 鞍式支座的结构与选型	(141)
7.3.2 鞍式支座的设计计算	(142)
习题七	(152)
第8章 压力容器超压泄放装置	(153)
8.1 概述	(153)
8.2 安全阀	(153)
8.2.1 安全阀的结构及性能特点	(153)
8.2.2 安全阀的分类	(154)
8.2.3 安全阀的整定压力	(155)
8.2.4 安全阀的选用	(155)
8.3 安全阀排放量计算	(155)
8.3.1 盛装压缩气体或水蒸气压力容器的安全泄放量	(155)
8.3.2 盛装液化气体压力容器的安全泄放量	(155)
8.3.3 安全阀排放能力计算	(156)
8.3.4 安全阀最小排放面积和口径计算	(157)
8.3.5 确定安全阀的公称压力	(158)
8.4 爆破片	(158)
8.4.1 爆破片装置的性能特点	(158)
8.4.2 爆破片的使用场合	(159)
8.4.3 爆破片的爆破压力	(159)
8.5 安全阀和爆破片装置的组合结构	(160)
习题八	(160)
第9章 压力容器制造与检验	(161)
9.1 压力容器制造	(161)
9.1.1 制造前的准备	(161)
9.1.2 加工成型与组装	(162)
9.1.3 焊接	(171)
9.1.4 热处理	(172)
9.2 压力容器检验	(174)
9.2.1 检验的分类及标准体系	(174)
9.2.2 无损检测	(178)
9.2.3 耐压试验与泄漏试验	(182)
9.2.4 衍射时差法(TOFD)超声检测	(190)
习题九	(194)
附录	(195)
附录 A 高合金钢螺柱许用应力	(195)
附录 B 压力容器材料许用应力	(196)
参考文献	(198)

第1章 绪 论

压力容器作为一种特种设备,在国民经济的各个领域占有十分重要的地位。我国对压力容器的设计、制造、安装、使用、检验、维修、改造的各个环节实行安全监察,颁布了一系列法律、法规、安全技术规范和设计制造标准,以保证压力容器的安全使用。

在基于失效模式设计的基础上,近年来压力容器设计又呈现出了新的发展趋势,如基于风险的压力容器设计,全塑性分析设计,根据使用环境和危害程度确定安全裕度的设计,压力容器轻量化设计等。

1.1 概 念

广义地讲,凡盛装有压力介质的密闭容器统称为压力容器(Pressure Vessel),压力容器广泛地应用于国民经济工农业生产和人民生活的各个领域。

根据不同的用途,压力容器可以有各种不同的尺寸、容积和形状,可以承受大小不同的压力,适用于不同的温度条件下使用,所盛装的介质可以是各种不同的物态、物性或是具有特殊的化学腐蚀、易燃、易爆、毒性危害的物质,制造压力容器的材料可以是钢铁材料、有色金属或其他非金属材料。

压力容器的建造(包括材料、设计、制造、检验、验收的全过程)和使用涉及生产设备和生产安全,压力容器一般在高压、高温或低温下运行,而且介质具有危险性,一旦发生泄漏往往会引起爆炸、火灾、中毒或环境污染等灾难性后果。因此世界各国都有一套适合自身国情的压力容器安全监察管理法规和具有强制性的压力容器产品技术标准。

1.2 技术 规范

安全技术规范(TSG)是政府对特种设备安全性能和相应的设计、制造、安装、修理、改造、使用和检验检测等环节所提出的一系列安全基本要求,以及许可、考核条件和程序的一系列具有行政强制力的规范性文件。其作用是把法规和行政规章的原则规定具体化,由国家质量监督检验检疫总局颁布。目前,与压力容器设计有关的基本安全技术规范为 TSG 21—2016《固定式压力容器安全技术监察规程》和 TSG R0005—2011《移动式压力容器安全技术监察规程》。另外,气瓶与氧舱也有各自相应的监察规程。

1.2.1 《固定式压力容器安全技术监察规程》

2016年2月国家质检总局颁布了 TSG 21—2016《固定式压力容器安全技术监察规程》,规程是以原 TSG R0001《非金属压力容器安全技术监察规程》、TSG R0002《超高压容器安全技术监察规程》、TSG R0003《简单压力容器安全技术监察规程》、TSG R0004《固定式压力容器安全技术监察规程》、TSG R7001《压力容器定期检验规则》、TSG R5002《压力容器使用规则》、TSG R7004《压力容器监督监察规程》等七个规范为基础,整合形成的综合规范(大容

规)。该规程对固定式压力容器的材料、设计、制造、安装、改造、修理、检查检验、使用管理、在用检验等环节提出了基本安全要求。

TSG 21《固定式压力容器安全技术监察规程》适用于同时具备下列条件的固定式压力容器:

- (1) 工作压力大于或者等于 0.1 MPa;
- (2) 工作容积大于 0.03 m³ 且内直径(非圆形截面指界面内边界最大几何尺寸)大于等于 150 mm;
- (3) 盛装介质为气体、液化气体或最高工作温度高于或者等于其标准沸点的液体。

1.2.2 《移动式压力容器安全技术监察规程》

考虑到影响移动式压力容器安全的因素比固定式压力容器更加复杂,以及罐式集装箱的国际流动性,同时为了更好地与国际接轨,中国将固定式压力容器和移动式压力容器分开,2011 年 11 月国家质量监督检验检疫总局颁布了 TSG R0005—2011《移动式压力容器安全技术监察规程》。该规程对移动式压力容器罐体材料、设计、制造、使用管理、充装与卸载、改造与维修、定期检验、安全附件和装卸附件都提出了基本的安全要求,适用于同时满足下列条件的移动式压力容器:

- (1) 具有充装与卸载介质功能,并且参与铁路、公路或者水路运输;
- (2) 罐体工作压力大于或等于 0.1 MPa,气瓶公称工作压力大于或者等于 0.2 MPa;
- (3) 罐体容积大于或者等于 450 L,气瓶容积大于或等于 150 L,且气瓶容积之和不小于 3 000 L;
- (4) 充装介质为气体以及最高工作温度高于或者等于其标准沸点的液体。

1.3 技术标准

压力容器的建造技术涉及材料、力学、机械加工、焊接、无损检测和安全防护等众多学科。随着材料、结构设计方法、焊接和无损检测等技术的不断进步,新的设计、建造方法不断出现,压力容器的建造技术也取得了相应的进步。为了生产和使用更安全、经济的压力容器产品,传统的设计、制造、焊接和检验方法正在逐步被新技术、新方法替代,我国的技术规范和标准的研究也在不断深入和更新。

1.3.1 GB/T 150.1~150.4—2011《压力容器》

GB/T 150—2011《压力容器》是我国压力容器设计、制造和检验的核心技术标准,在中国具有法律地位,其基本思路与 ASME VIII—1 相同,属常规设计标准。该标准规定了压力容器的建造要求,提出了许多新概念、新观点和新方法,体现了我国当前压力容器的建造技术水平,如引入提出风险评估的设计理念 and 以失效模式为基础的压力容器设计理念,修订了确定材料许用应力的安全系数等,其适用的设计压力(对于钢制压力容器)不大于 35 MPa,适用的设计温度范围为-269℃~900℃。

GB/T 150—2011《压力容器》不适用于以下压力容器:设计压力低于 0.1 MPa 或者真空度低于 0.02 MPa 的容器;直接火焰加热的容器;核能装置中存在中子辐射损伤失效风险的容器;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、液压缸等);内直径(对非圆形截面特指截面内边界的最大几何尺寸,如矩形中为对角线,椭圆中

为长轴)小于 150 mm 的压力容器;搪玻璃容器;制冷空调行业中另有国家标准或者行业标准的容器。

GB/T 150—2011《压力容器》界定的范围除壳体本体外,还包括容器与外部管道焊接连接的第一道环向接头坡口端面、螺纹连接的第一个螺纹接头端面、法兰连接的第一个法兰密封面、专用连接件或管件连接的第一个密封面。其他如接管、人孔、手孔等承压封头、平盖及其紧固件,非受压元件与受压元件的焊接接头,直接连在容器上的超压泄放装置均应符合 GB/T 150—2011《压力容器》的有关规定。

1.3.2 JB 4732—1995《钢制压力容器——分析设计标准》(2005 年确认)

JB 4732《钢制压力容器——分析设计标准》是我国第一部压力容器分析设计的行业标准,其基本思路与 ASMEⅧ—2 相同。该标准与 GB/T 150 一起作为压力容器的设计标准并同时实施,在满足各自要求的前提下,设计者可选择其中之一使用,但不得混用。

与 GB/T 150 相比,JB 4732 允许采用较高的设计应力强度,这意味着,在相同设计条件下,容器的厚度可以减薄,重量可以减轻。但是由于设计计算工作量大,选材、制造、检验及验收等方面的要求较严,有时综合经济效益不一定高,一般推荐用于重量大、结构复杂、操作参数较高和超出 GB/T 150 适用范围的压力容器设计。

该标准适用于设计压力大于或等于 0.1 MPa 且小于 100 MPa、真空度高于或等于 0.02 MPa 的容器。其适用的设计温度应低于以钢材蠕变控制其许用应力强度的相应温度。下列容器不在本标准的适用范围内:核能装置中的容器;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、液压缸等);经常搬运的容器;内直径(对非圆形截面特指截面内边界的最大几何尺寸,如矩形中为对角线,椭圆中为长轴)小于 150 mm 的任何长度的压力容器;直接火焰加热的容器等。

1.3.3 GB/T 34019—2017《超高压容器》

GB/T 34019《超高压容器》规定了非焊接单层超高压容器在材料、设计、制造、检验和验收等方面的建造要求。该标准适用于设计压力大于或等于 100 MPa,设计温度范围为 $-40\sim 400^{\circ}\text{C}$ 的容器。下列容器不在本标准的适用范围内:直接火焰加热的容器;核能装置中存在中子辐射损伤失效风险的容器;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、液压缸等);移动式容器;军事用途容器等。

1.4 基于失效模式设计

在外部载荷、服役环境、制造残余影响等因素单独或者共同作用下,往往会造成压力容器损伤。压力容器在规定的服役环境和寿命内,因尺寸、形状或者材料性能变化而危及安全或者丧失规定功能的现象,称为压力容器失效。虽然压力容器失效的原因多种多样,但失效的最终表现形式主要为过度变形、断裂和泄漏。掌握压力容器常见的失效模式及其原因,分析和预防压力容器失效,是压力容器设计的重要任务。

基于失效模式的压力容器设计的基本思想是:在设计阶段,识别压力容器在运输、吊装和使用中可能出现的所有失效模式,针对不同的失效模式确定相应的设计标准,提出防止失效的措施。其核心是失效模式的识别和设计准则建立。

1.4.1 压力容器失效模式

压力容器失效模式是指容器失效后可观察和测量的宏观特征,按失效原因分类,压力容器失效大致分为强度失效、刚度失效、屈曲失效和泄漏失效等四类。

1. 强度失效

因材料屈服或者断裂引起的压力容器失效,称为强度失效,包括塑性垮塌、局部过度应变、脆性断裂、疲劳、棘轮、蠕变、腐蚀等。

(1) 塑性垮塌 是指在单调加载条件下压力容器因过量总体塑性变形而不能承载导致的破坏,其特征是破坏后有肉眼可见的宏观变形,如整体膨胀,周长生长率可达10%~50%,破口处壁厚显著减薄,无碎片,在这种情况下,按实测厚度计算的爆破压力与实际爆破压力相当接近。

壁厚过薄和超压是引起容器塑性垮塌的主要原因。导致壁厚过薄的情况大致有两种,分别为厚度未经正确的设计计算和厚度因腐蚀、冲蚀等原因而减薄;操作失误、液体受热膨胀、化学反应失控等均可引起超压,例如压力较高的气体进入设计压力较小的容器空间、容器内产生的气体无法及时排出等。

严格按照标准进行设计、制造,并配备相应的超压释放装置,同时遵循有关规定进行运输、安装、使用、检验和检测,可以避免压力容器在设计寿命内发生塑性垮塌。

(2) 局部过度应变 是指压力容器结构不连续处因材料延性耗尽而产生的裂纹或者撕裂。在三向拉应力作用下,材料韧性(断裂应变)会下降。在压力容器结构的不连续区,如螺纹根部,有可能在容器没有塑性垮塌前,就因材料延性耗尽产生裂纹而失效。

(3) 脆性断裂 是指压力容器未经明显的塑性变形而发生的断裂,这种断裂是在较低应力水平下发生的,断裂时的应力远低于材料强度极限,故又称为低应力脆断。其特征是:断裂时容器没有明显的鼓胀;断口齐平并与最大主应力方向垂直,断裂速度极快,易形成碎片、由于脆性断裂时容器往往没有超压,爆破片、安全阀等超压释放装置不会动作,其危险性要比塑性垮塌大得多。

材料脆性和缺陷两种原因都会引起压力容器发生脆性断裂,除材料选用不当、焊接与热处理工艺不合理导致材料脆化外,低温、高压氢环境、中子辐照等也会使材料脆化。压力容器用钢一般韧性较好,但若存在严重的原始缺陷(如原材料的夹渣、分层、折叠等)、制造缺陷(如焊接引起的未熔透、裂纹等)或者使用中产生的缺陷也会导致脆性断裂发生。

(4) 疲劳 是指在交变载荷作用下,容器在应力集中部位产生局部的永久性损伤,并在一定载荷循环次数后形成裂纹或者裂纹进一步扩展至完全断裂,其特征是每次载荷循环的前半周和后半周在容器的同一部位相继产生方向相反的应变。

交变载荷是指大小和方向随时间周期性变化的载荷,它包括运行时的压力波动、开车和停车、加热或冷却时由温度变化引起的热应力变化、振动引起的应力变化、容器接管引起的附加载荷的交变而形成的交变载荷等。

焊接接头容易产生应力集中、焊接缺陷、残余应力和微裂纹。这些因素的综合作用,使得疲劳成为焊接接头的主要失效形式之一。疲劳断裂时容器的总体应力水平较低,断裂往往在容器正常工作条件下发生,没有明显的征兆,是突发性破坏,危险性很大。

(5) 棘轮 是指压力容器由于同时承受恒定载荷和交变载荷作用而产生且按逐个循环渐增的累积塑性变形。其特征是每次加载循环的前半周和后半周在容器的不同部位(两个不

同部位的范围有部分重叠)轮流产生方向相同的塑性变形。各个循环产生的塑性变形将逐个累积,直至因产生过量塑性变形而失效。

(6) 蠕变 是指在保持应力不变的条件下,应变随时间延长而不断缓慢增加的现象。长期在高温下工作,蠕变会导致压力容器壁厚变薄、直径增大(鼓胀),甚至造成断裂。从断裂前的变形来看,蠕变具有韧性断裂的特征,而就断裂时的应力而言,蠕变断裂又具有脆性断裂的特征。

(7) 腐蚀 是指金属与其周围介质发生化学或者电化学反应而产生的破坏现象。因均匀腐蚀导致的厚度减薄,或局部腐蚀造成的凹坑。所引起的压力容器失效一般有明显的塑性变形,具有韧性断裂特征;因晶间腐蚀、应力腐蚀等引起的断裂没有明显的塑性变形,具有脆性断裂特征。

2. 刚度失效

由于压力容器的变形大到足以影响其正常工作而引起的失效,称为刚度失效。例如,露天安置的塔在风载荷作用下发生过多的弯曲变形,造成塔盘倾斜而影响塔的正常工作。

3. 屈曲失效

在压应力作用下,压力容器突然失去其原有的规则几何形状而引起的失效称为屈曲失效。容器弹性屈曲的一个重要特征是弹性挠度与载荷不成比例,且临界压力与材料的强度无关,主要取决于容器的尺寸和材料的弹性模量。但当容器中的应力水平超过材料的屈服强度而发生非弹性屈曲时,临界压力还与材料的强度有关。

4. 泄漏失效

压力容器本体或者连接件失去密封功能,称为泄漏失效。泄漏不仅有可能引起中毒、燃烧和爆炸等事故,而且会造成环境污染。设计压力容器时,应重视各个可拆式接头和不同压力腔之间连接接头(如换热管和管板的连接)的密封性能。

1.4.2 设计准则

压力容器设计准则大致可分为强度失效设计准则、刚度失效设计准则、屈曲失效设计准则和泄漏失效设计准则。

1. 强度失效设计准则

在常温、静载条件下,屈服和断裂是压力容器强度失效的两种主要形式。现介绍几种常用的压力容器强度失效设计准则。

(1) 弹性失效设计准则

弹性失效设计准则将容器总体部位的初始屈服视为失效。对于韧性材料,在单向拉伸应力 σ 作用下,屈服失效判据的数学表达式为

$$\sigma = R_{el} \quad (1-1)$$

式中 R_{el} ——材料的屈服强度,MPa。

用许用应力 $[\sigma]^t$ 代替式(1-1)中的材料屈服强度,得到相应的设计准则

$$\sigma \leq [\sigma]^t \quad (1-2)$$

压力容器设计中,常用最大拉应力 σ_1 来代替式(1-2)中的应力 σ ,建立设计准则,即

$$\sigma_1 \leq [\sigma]^t \quad (1-3)$$

式(1-3)为基于最大拉应力的弹性失效设计准则,简称为最大拉应力准则。

处于任意应力状态的韧性材料,工程上常采用的屈服失效判据主要有 Tresca 屈服失效

判据和 Mises 屈服失效判据。

Tresca 屈服失效判据又称为最大切应力屈服失效判据或第三强度理论,这一判据认为材料屈服的条件是最大切应力达到某个极限值,其数学表达式为

$$\sigma_1 - \sigma_3 = R_{el}$$

相应的设计准则为

$$\sigma_1 - \sigma_3 \leq [\sigma]^t \quad (1-4)$$

式(1-4)为最大切应力屈服失效设计准则,简称为最大切应力准则。

Mises 屈服失效判据被称为形状改变比能屈服失效判据或第四强度理论,这一判据认为引起材料屈服是与应力偏量有关的形状改变比能,其数学表达式为

$$\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} = R_{el}$$

相应的设计准则为

$$\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \leq [\sigma]^t \quad (1-5)$$

式(1-5)为形状改变比能屈服失效设计准则,简称为形状改变比能准则。

(2) 塑性失效设计准则

弹性失效设计准则是以危险点的应力强度达到许用应力为依据的。对于各处应力相等的构件,如内压薄壁圆筒,这种设计准则是合理的;但是对于应力分布不均匀的构件,如内压厚壁圆筒,由于材料韧性较好,当危险点(内壁)发生屈服时,其余各点仍处于弹性状态,故不会导致整个截面的屈服,因而构件仍能继续承载。在这种情况下,弹性失效(一点强度)设计准则就显得有些保守。

假设材料是理想弹塑性的,以整个危险截面屈服作为失效状态的设计准则,称为塑性失效准则,对于内压厚壁圆筒,整个界面屈服时的压力就是全屈服压力 p_{so} ,塑性失效判据可表示为

$$p = p_{so} \quad (1-6)$$

式中 p ——设计压力。

引入全屈服安全系数 n_{so} ,得相应的塑性失效设计准则为

$$p \leq \frac{p_{so}}{n_{so}} \quad (1-7)$$

(3) 爆破失效设计准则

压力容器用韧性材料一般具有应变硬化现象,爆破压力大于全屈服压力。爆破失效设计准则以容器爆破作为失效状态,相应的设计准则为

$$p = \frac{p_b}{n_b} \quad (1-8)$$

式中 p_b ——爆破压力;

n_b ——爆破安全系数。

(4) 弹塑性失效设计准则

弹塑性失效设计准则又称为安定性准则,适用于各种载荷不按同一比例递增、载荷大小反复变化的场合。当压力容器内最大应力点进入塑性时相对应的载荷称为初始屈服载荷。当容器承受稍大于初始屈服载荷的载荷时,容器内将产生少量的局部塑性变形。因局

部塑性区周围的广大区域仍处于弹性状态,会制约塑性变形,当载荷卸除后就形成残余应力场。若容器所受的载荷较小,即载荷引起的应力和残余应力叠加后总是小于屈服强度,则容器在载荷的反复作用下,始终保持弹性行为,不会产生新的塑性变形,处于“安定”状态。随着载荷的继续增大,卸载时的残余应力可能超过屈服强度而导致反向屈服,或者加载时的应力与残余应力之和也可能超过屈服强度,从而导致塑性变形的累积,于是容器就会丧失安定,出现渐增塑性变形。与安定和不安定的临界状态相对应的载荷变化范围称为安定载荷。

弹塑性失效准则认为只要载荷变化范围达到安定载荷,容器就失效。由于超过安定载荷后容器并不立即破坏,因而危险性较小。工程上一般取安定载荷的安全系数为 1.0,即压力容器承受的最大载荷变化范围不大于安定载荷。

(5) 疲劳失效设计准则

压力容器疲劳一般属于低周疲劳,循环次数一般在 10^5 次以下。低周疲劳时,每次循环中材料都将产生一定的塑性应变。根据试验研究和理论分析结果,可以得到虚拟应力幅与许用循环次数之间的关系曲线,即低周疲劳设计曲线。由容器应力集中部位的最大虚拟应力幅,按低周疲劳设计曲线可以确定许用循环次数,只要该循环次数不小于容器所需的循环次数,容器就不会发生疲劳失效,这就是疲劳失效设计准则。

此外,按照断裂力学理论可以建立另一种带裂纹的压力容器疲劳设计准则,即按照疲劳裂纹扩展与断裂的规律对循环载荷作用下的容器做出安全评定。

(6) 蠕变失效设计准则

将应力限制在由蠕变极限和持久强度确定的许用应力以内,便可防止容器在使用寿命内发生蠕变失效,这就是蠕变失效设计准则。

(7) 脆性断裂失效设计准则

传统强度设计准则假设材料是无缺陷的均匀连续体,因而难以解释脆性断裂现象,脆性断裂属于断裂力学的研究领域。

断裂力学认为材料中存在缺陷,其目的是研究缺陷在载荷和环境作用下的破坏规律,建立缺陷几何参数、材料韧性和结构承载能力之间的定量关系。研究表明,压力容器是否发生脆性断裂主要取决于材料韧性、缺陷处的应力水平和缺陷的几何参数。因此,防止压力容器发生脆性破坏也应从这三个方面着手。

在材料方面,通常根据受压元件的厚度、应力水平、最低金属温度、载荷性质、介质对材料韧性的影响等因素,提出材料夏比 V 形缺口冲击吸收功或断裂韧性验收指标。对于相同材料,薄钢板或钢带的性能(特别是韧性)比厚钢板和大型锻件好,因而采用多层结构可以提高抗脆断性能。

在缺陷方面,一是尽量减少焊接接头,二是提高无损检测技术,使之能发现更小的缺陷,不但使缺陷存在的可能性减少,而且使缺陷的尺寸减小。

在设计方面,根据无损检测水平,假设压力容器高应力区存在裂纹,利用断裂力学方法进行裂纹安全性评估,确保容器不发生低应力脆性破坏。

需要指出的是,采用防脆断设计方法,并不意味着容器在制造时允许存在假设中所说的裂纹,而是指容器万一有裂纹时(漏检或在使用中产生)要确保不发生脆性断裂事故,其实质是要求材料在使用环境下必须有足够的断裂韧性。

2. 刚度失效设计准则

在载荷作用下,要求构件的弹性位移和转角不超过规定的数值。于是,刚度设计准则为

$$\left. \begin{aligned} w &\leq [w] \\ \theta &\leq [\theta] \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

式中 w ——载荷作用下产生的位移;

$[w]$ ——许用位移;

θ ——载荷作用下产生的转角;

$[\theta]$ ——许用转角。

3. 屈曲失效设计准则

压力容器设计中,应防止屈曲发生。例如,仅受均布外压的圆筒,外压应小于周向临界压力,由弯矩或弯矩和压力共同引起的轴向压缩,压应力应小于轴向临界应力。

4. 泄漏失效设计准则

上述提及的强度、刚度和屈曲失效设计准则都是基于压力容器结构完整性范畴内的失效形式而选定的设计准则。而泄漏失效不仅是由于压力容器遭受机械性损伤,也是容器本身或附件连接部件失去密封功能发生的失效形式,它是直接引发设备燃烧、爆炸、中毒和环境污染等事故的必要条件。

压力容器泄漏失效设计准则是指容器发生的泄漏率 L 不超过允许泄漏率 $[L]$,即 $L \leq [L]$ 。一般根据容器内介质的价值、对人员和设备的危害性以及环境保护的要求,确定允许泄漏率。介质危害性越大,环保要求越高,要求的紧密性等级越高,密封设计的要求也越严格。

由于泄漏是一个受众多因素,包括安装、设计、制造和检验、运行和维护等影响的复杂问题,现有的设计规范中有关密封装置或连接部件的设计多数没有与泄漏发生定量的关系,而是用强度或刚度失效设计准则替代泄漏失效设计准则,并结合使用经验,以满足设备接头的密封要求,如 Waters 的法兰设计方法。而欧盟 EN13445 容器设计规范则从应力分析和密封分析两方面保证法兰组合件的使用和安全要求。

压力容器失效模式与结构、材料、载荷、制造、环境等因素有关。除上述单因素导致的失效模式外,有的是多种因素共同作用的结果,如高温和交变载荷联合作用引起的蠕变疲劳、腐蚀介质与交变载荷交互作用引起的腐蚀疲劳等。压力容器标准不可能囊括所有失效模式。因此在设计压力容器时,除考虑标准涵盖的失效模式外,还应当充分考虑容器可能出现的其他失效模式。

总之,在压力容器的建造和使用过程中,在压力容器的选材、结构设计、制造检验、安全附件、使用等各个环节,就应全面考虑压力容器的风险评估与控制,根据其可能出现的失效模式采取相应的防护措施,保障在使用过程中的安全。各环节的主要内容在本书各章中会一一讲述。

本书第 1 章介绍了我国压力容器安全技术规范以及主要压力容器设计标准,还有压力容器主要失效模式和相关设计准则。第 2 章在分析压力容器基本结构与组成的基础上,阐述了压力容器分类的方法,并进一步按照压力容器技术规范及设计标准,分析了压力容器设计的基本要求。第 3 章在介绍了压力容器常用材料以及选材原则基础上,介绍了材料的化学成分、性能、防腐蚀措施以及热处理要求等。第 4 章介绍了薄壁容器的应力分析方法以及压力容器常用回转壳体,并进一步分析了压力容器分析设计的方法与思路。第 5 章按常规设计标

准,介绍了压力容器设计参数确定,以及常用受压元件,如筒体、封头等的设计方法。第6章介绍了外压容器失稳的概念,以及用图解法设计外压容器。第7章为压力容器零部件,介绍了压力容器密封系统(法兰、螺栓、垫片)、开孔补强以及容器支座的设计方法。第8章介绍了压力容器的安全附件及仪表,以及压力容器安全泄放量的计算方法。第9章介绍了压力容器的制造工艺、焊接工艺以及无损检测方法。

习 题 一

1. 我国有哪些压力容器主要安全技术规范?
2. 国内外压力容器有哪些主要设计标准?
3. 压力容器的主要失效模式与设计准则是什么?