



压力容器实用技术丛书

压力容器 设计知识

第二版

The Second Edition

《压力容器实用技术丛书》编写委员会 组织编写

朱保国 主编



化学工业出版社

压力容器实用技术丛书

压力容器 设计知识

第二版

The Second Edition

《压力容器实用技术丛书》编写委员会 组织编写

朱保国 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是《压力容器实用技术丛书》之一。全面阐述了各种压力容器设计的理论知识、基本计算方法、材料选择、制造和验收以及设计实例等。典型的压力容器包括卧式容器、直立容器、球形储罐、非圆形截面容器、高压和超高压容器、立式圆筒形储罐、固体料仓、低温压力容器、高温压力容器等。内容上注重工程设计实际，融入了作者多年的设计工作经验，有很强的实用性。

本书适用于压力容器设计、制造、使用工程技术人员查阅和参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

压力容器设计知识/朱保国主编. —2版. —北京: 化学工业出版社, 2015.6

(压力容器实用技术丛书)

ISBN 978-7-122-23785-9

I. ①压… II. ①朱… III. ①压力容器-设计 IV. ①TH490.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 086420 号

责任编辑: 张兴辉 韩亚南

文字编辑: 张燕文

责任校对: 宋 玮 王 静

装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 34 字数 790 千字 2016 年 6 月北京第 2 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 138.00 元

版权所有 违者必究

丛书序

随着科学技术的进步和工业生产的发展,特别是国民经济持续稳定的发展,压力容器已经广泛应用于化工、石油化工、冶金、国防等诸多工业领域及人们的日常生活中,且数量在不断增加,高参数大容积的设备也越来越多。这就对容器的设计、材料、制造、现场组焊、检验、监督、使用、维护、修理、管理等诸多环节提出了越来越高的要求。压力容器又是一种多学科、跨学科、综合性很强的学科,一台压力容器从参数确定到投入正常使用要通过上述各环节及相关各部门的各类工程技术人员共同努力才能实现。要使各类工程技术人员和管理使用者全面掌握容器的各种知识是非常困难的。《压力容器实用技术丛书》就是从这一客观实际需求出发,将容器的各种实用技术做一全面介绍,以满足不同岗位、不同部门的工程技术人员和管理者、使用者对其相关知识,特别是非本职、非本岗位的其他相关知识的了解和掌握,以不断提高我国容器的建造和应用水平。

《压力容器实用技术丛书》共分六册,第一册《压力容器设计知识》,第二册《压力容器材料及选用》,第三册《压力容器制造和修理》,第四册《压力容器检验检测》,第五册《压力容器安全与管理》,第六册《压力容器腐蚀控制》,涉及容器的全过程和方方面面的知识。这是我国第一套有关压力容器实用技术的丛书,本书为第一版成功发行和使用10年后的第二次出版。邀请了国内多个单位的上百名知名专家和学者参加编审。

《压力容器实用技术丛书》修订的基本原则是与现行法律法规和国家标准统一,符合现行法律法规和压力容器常用标准(主要是《固定式压力容器安全技术监察规程》、GB 150),侧重一些标准之外的新知识、新理念和新的设计思想,公平、公正、科学地反映容器的先进技术水平;体现国内最新技术和国外压力容器技术的发展趋势;将国内外技术内容进行对比,以满足国际国内技术交流与合作的需要;突出写些关于在容器这方面比较权威的心得体会经验,坚持原创风格。

《压力容器实用技术丛书》重点突出实用性和全面性,对一些容器制造和使用现场出现的一些小故障等能提供一些解决方案,突出现场实用性的要求。例如,《压力容器安全与管理》和《压力容器腐蚀控制》突出现场使用、维护、管理、维修等实用性的内容。本丛书遍及容器教学、研究、设计、制造、监督、检验、使用等各个方面,反映国内的最新技术内容和研究成果以及国外压力容器技术的发展和趋势。本次修订内容将更全面、更深入,突出查阅和应用的功能,而不仅仅是指导书。

《压力容器实用技术丛书》由甘肃蓝科石化高新装备股份有限公司牵头组织,《压力容器实用技术丛书》编写委员会组织编写,丛书责任主编刘福录。各分册主编为:第一册朱保国,第二册程真喜,第三册王增新,第四册王纪兵,第五册陈长宏、吴恭平,第六册郭志军。雒淑娟负责丛书的文秘工作。

由于本丛书篇幅浩大,编者甚多,各册和各章节内容的协调和取舍等方面难免有不妥之处,而且限于编者的水平,不足之处不可避免,恳请广大读者批评指正。

《压力容器实用技术丛书》编写委员会

前 言

众所周知,压力容器的失效往往使国家和人民的生命财产遭受巨大损失,而压力容器的失效除了制造和使用方面的因素外,设计质量起着决定性的作用。“差之毫厘,失之千里”,设计文件中任何微小的错误都可能导致压力容器发生灾难性的事故。压力容器结构形式较多,压力容器的设计涉及材料、焊接、无损检测、热处理等多学科、多专业的知识;计算方法包括理论计算(材料力学、弹塑性力学、断裂力学等)、数值分析、实验应力分析等。本书既包括了理论知识和相关的背景知识,又加入了作者多年设计经验的总结,是系统地介绍压力容器设计知识的资料,本书第一版于2005年10月正式出版发行,获得了广大使用者的好评和认可。本书的再版正是为了满足广大设计工作者的需求,使设计工作者不再局限于自己的专业知识,能够博采众家之长,有效地提高设计质量;同时也可使从事压力容器制造、使用、管理的人员对压力容器的相关设计知识有一个系统的了解。

参加本书各章节的编写人员分别是:第1章由刘福录、张延丰(甘肃蓝科石化高新装备股份有限公司)编写;第2章由王文江(甘肃蓝科石化高新装备股份有限公司)编写;第3章由费继增(中国石油工程建设公司大连设计分公司)编写;第4章由段瑞(中国石化工程建设有限公司)编写;第5章5.1~5.3、5.10由潘家祯(华东理工大学)编写,5.4~5.9由曹岩、黄军让、陈仓社(华陆工程科技有限责任公司)编写;第6章6.1、6.4由宋启祥(甘肃蓝科石化高新装备股份有限公司)、李斌(中石油塔里木油田塔西南勘探开发公司石化厂)编写,6.2、6.3由谢培军、李志玉(甘肃蓝科石化高新装备股份有限公司)编写;第7章由刘福录、安林林(甘肃蓝科石化高新装备股份有限公司)编写;第8章由俞树荣、梁瑞、张镜清(兰州理工大学)编写;第9章由高中稳(甘肃蓝科石化高新装备股份有限公司)编写;第10章由朱保国(甘肃蓝科石化高新装备股份有限公司)编写;第11章由武铜柱(中国石化工程建设有限公司)编写;第12章由万网胜、李梦强、郑宝山(中国昆仑工程公司)编写;第13章由党战伟(甘肃蓝科石化高新装备股份有限公司)编写;第14章由涂善东(南京化工大学)编写;第15章由姜峰、梁瑞、俞树荣(兰州理工大学)编写;第16章由李志义(大连理工大学)编写。

本书由朱保国主编,刘福录、张迎恺(中国石化工程建设有限公司)、张延丰审定。在编写过程中,得到了中国石化工程建设有限公司、中国石油工程建设公司大连设计分公司、华东理工大学、华陆工程科技有限责任公司、兰州理工大学、中国昆仑工程公司、南京化工大学、大连理工大学等单位的大力支持和协助,在此一并感谢。

编者

目 录

第 1 章 概述	1	2.2.2 设计单位技术负责人	16
1.1 压力容器的设计进展	1	2.2.3 压力容器设计批准人	16
1.1.1 规则设计	1	2.2.4 审核人员	16
1.1.2 分析设计	2	2.2.5 校核人员	17
1.1.3 规则设计与分析设计的结合	2	2.2.6 设计人员	17
1.1.4 压力容器设计未来的发展	3	2.2.7 SAD 各级人员	18
1.2 压力容器的应用及分类	3	2.3 设计压力	18
1.2.1 压力容器的应用	3	2.3.1 设计压力	18
1.2.2 压力容器的分类	3	2.3.2 设计压力的确定	18
1.3 压力容器的失效形式	4	2.4 设计温度	19
1.3.1 强度失效	4	2.4.1 设计温度	19
1.3.2 刚度失效	4	2.4.2 设计温度的确定	19
1.3.3 稳定性失效	4	2.5 介质特性	20
1.3.4 腐蚀失效	4	2.5.1 介质的一些物理性质	20
1.4 压力容器设计的基本要求	5	2.5.2 介质的腐蚀性	22
1.4.1 满足生产需要	5	2.6 设计载荷	26
1.4.2 满足压力容器的安全可靠	5	2.6.1 设计时应考虑的载荷	26
1.4.3 满足技术经济合理	6	2.6.2 设计载荷的组合	27
1.5 压力容器标准及规范	6	2.7 厚度附加量	28
1.5.1 国内压力容器标准简介	6	2.8 设计寿命	29
1.5.2 国外压力容器标准简介	9	2.8.1 设计寿命	29
1.6 压力容器软件介绍	11	2.8.2 容器设计寿命的确定	29
1.6.1 SW6-2011 过程设备强度计算软件包	12	2.8.3 疲劳分析设计容器的设计寿命	30
1.6.2 LANSYS 压力容器强度设计软件	12	2.9 厚度	30
1.6.3 有限元程序自动生成系统 FEPG	13	2.10 许用应力	31
1.6.4 ANSYS 分析设计软件	14	2.11 焊接接头系数	33
1.6.5 ABQUS 分析设计软件	14	2.12 耐压试验	33
1.6.6 Pvelite & Code Calc 压力容器整体及零部件分析设计软件	14	2.12.1 耐压试验	33
第 2 章 设计要素	15	2.12.2 液压试验	33
2.1 设计文件	15	2.12.3 气压试验和气液组合试验	34
2.2 设计单位、人员条件及职责	15	2.13 泄漏试验	34
2.2.1 设计单位	15	2.13.1 泄漏试验	34
		2.13.2 气密性试验	34
		2.13.3 氨检漏试验	35
		2.13.4 卤素检漏试验	35
		2.13.5 氦检漏试验	35
		2.14 无损检测方法及应用	35

2.14.1	射线检测 (RT)	35	3.4.2	法兰连接的密封设计	61
2.14.2	超声检测 (UT)	36	3.4.3	螺栓设计	67
2.14.3	衍射时差法超声检测 (TOFD)	37	3.4.4	法兰设计	69
2.14.4	磁粉检测 (MT)	38	参考文献		71
2.14.5	渗透检测 (PT)	38	第4章 开孔和开孔补强设计		72
2.15	技术要求	40	4.1	开孔补强的理论基础	72
2.16	油漆、包装及装车	40	4.1.1	孔边的应力	72
2.16.1	油漆	40	4.1.2	容器开孔的强度问题及其补 强准则	75
2.16.2	包装	41	4.2	开孔补强计算方法	76
2.16.3	装车	41	4.2.1	等面积法	76
2.16.4	压力容器油漆、包装、装车 设计	43	4.2.2	压力面积法	79
2.16.5	压力容器易损件包装 要求	43	4.2.3	分析法	80
参考文献		44	4.2.4	大开孔补强	81
第3章 主要受压元件		45	4.2.5	平板及外压容器开孔 补强	82
3.1	内压圆筒和内压球壳	45	4.3	开孔补强结构	82
3.1.1	强度理论	45	4.3.1	补强圈补强	82
3.1.2	内压圆筒	45	4.3.2	厚壁管补强	82
3.1.3	内压球壳	47	4.3.3	整体锻件补强	83
3.1.4	内压圆筒和球壳中的温差 应力	48	4.4	开孔补强设计中的其他问题	83
3.2	外压圆筒和外压球壳	49	4.4.1	不需另行补强的条件	83
3.2.1	外压容器的失效方式	49	4.4.2	接管的壁厚要求	84
3.2.2	外压圆筒稳定性计算	49	4.4.3	承受外载荷接管的补强	84
3.2.3	加强圈设计	51	4.4.4	开孔位置	84
3.2.4	外压圆筒的允许制造公差和 试压要求	53	参考文献		84
3.2.5	外压球壳的计算	54	第5章 卧式容器		85
3.2.6	关于外压容器设计中焊缝 系数的选取和焊缝质量的 检查	54	符号总说明		85
3.3	封头	55	5.1	卧式容器简介	86
3.3.1	球形封头	55	5.2	卧式容器载荷分析	88
3.3.2	椭圆形封头	55	5.2.1	卧式容器的载荷	88
3.3.3	碟形封头	56	5.2.2	简化后的力学模型	90
3.3.4	无折边球形封头	57	5.2.3	内力计算	90
3.3.5	锥形封头	57	5.3	鞍座卧式容器强度计算	91
3.3.6	平盖	59	5.3.1	圆筒轴向应力	91
3.4	法兰	60	5.3.2	切向剪切应力	93
3.4.1	法兰的分类及各自的 特点	60	5.3.3	圆筒周向应力	95
			5.3.4	鞍座强度计算	98
			5.4	三角形支承加强圈的设置及强度 计算	99
			5.4.1	支承圈在鞍座平面内时加强圈 的应力计算	100
			5.4.2	支承圈靠近鞍座平面时加强圈	

的应力计算	101	5.10.1 设计分析	141
5.5 有附加载荷作用时卧式容器的强度 计算	101	5.10.2 合理设计	143
5.5.1 符号说明	102	参考文献	145
5.5.2 径向力引起的支座反力及圆筒 弯矩的计算	102	第6章 直立容器	146
5.5.3 轴向外力矩及其引起的支座反 力、弯矩的计算	103	6.1 地震理论	146
5.5.4 支座反力、圆筒轴向弯矩的 组合	104	6.1.1 水平地震作用	147
5.5.5 集中载荷与均布载荷引起的剪 力、轴向弯矩的合成及强度 校核	104	6.1.2 竖向地震作用	152
5.6 附属设备上载荷在卧式容器圆筒中 引起的局部应力计算方法	107	6.1.3 地震弯矩	154
5.6.1 符号说明与应用范围	107	6.2 风振理论	154
5.6.2 径向载荷引起圆筒上局部应力 的计算	109	6.2.1 风的定义及我国的风气候 形式	154
5.6.3 附属设备上外加力矩 M_L 、 M_C 引起筒体上局部应力的 计算	111	6.2.2 风载荷	155
5.6.4 圆筒体上局部载荷引起最大应 力的合成及强度校核	124	6.2.3 直立容器的风振效应	157
5.7 多鞍座卧式容器	132	6.2.4 直立容器顺风向下的弯曲 响应	158
5.7.1 鞍座处的圆筒体弯矩	132	6.3 风诱发的振动	162
5.7.2 鞍座处支反力	133	6.3.1 风诱发的振动现象	162
5.7.3 两支座跨度间的弯矩及 极值	134	6.3.2 雷诺数 (Re) 和斯特罗哈数 (St)	163
5.7.4 强度校核	134	6.3.3 升力的计算	163
5.7.5 基础不均匀沉降对轴向弯矩及 支座反力的影响	135	6.3.4 直立容器在共振时的强度 计算	164
5.8 埋地卧式容器的设计计算	137	6.3.5 防止直立容器共振的 措施	168
5.8.1 混凝土或砂土层质量对圆筒体 静压力的计算	137	6.4 稳定理论	168
5.8.2 混凝土质量对圆筒体载荷的 影响	138	6.4.1 欧拉屈曲	169
5.9 制造、检验及验收	139	6.4.2 外压失稳	174
5.9.1 卧式容器分类	139	6.4.3 局部失稳	177
5.9.2 制造、检验及验收	139	6.4.4 塑性失稳	178
5.9.3 焊接接头	141	参考文献	179
5.9.4 整体消除应力热处理	141	第7章 球形储罐	180
5.9.5 耐压试验和泄漏试验	141	7.1 球罐简介	180
5.10 卧式容器设计的合理性 分析	141	7.1.1 球罐的特点及应用	180
		7.1.2 球罐的分类	181
		7.1.3 球罐设计参数	182
		7.1.4 标准规范介绍	183
		7.2 材料	183
		7.2.1 球罐选材基本原则	183
		7.2.2 国内球罐用材料	185
		7.2.3 国外球罐用材料	187
		7.3 结构	187
		7.3.1 球壳	187
		7.3.2 支座	188

7.3.3 拉杆	190	容器	228
7.3.4 人孔接管	190	8.5.1 外加强圈加强的非圆形截面 容器	228
7.3.5 梯子平台	190	8.5.2 具有内加强筋板的长圆形 柱壳	229
7.3.6 喷淋装置	191	8.6 环形壳体	232
7.3.7 安全附件	192	8.6.1 横截面为圆形的等壁厚环形 壳体	232
7.3.8 绝热结构	194	8.6.2 弯管时壁厚变化的环形 壳体	234
7.4 制造与组焊技术要求	195	8.6.3 弯管时截面变化的环形 壳体	235
7.4.1 球壳板	195	参考文献	236
7.4.2 主要零部件	197	第9章 高压容器和超高压容器	237
7.4.3 油漆、包装、运输	198	9.1 高压容器和超高压容器在工业生产 中的应用	237
7.4.4 组焊准备	198	9.2 高压容器和超高压容器的结构 特点	237
7.4.5 组装	199	9.3 高压容器和超高压容器的 设计	238
7.4.6 焊接	199	9.3.1 现行各国设计规范概况 ..	238
7.4.7 无损检测	200	9.3.2 高压容器和超高压容器设计的 基本要求	239
7.4.8 焊接修补	200	9.4 高压容器和超高压容器设计时需考 虑的几个问题	239
7.4.9 焊后整体热处理	201	9.4.1 安全系数	239
7.4.10 产品焊接试件	201	9.4.2 材料的选取	240
7.4.11 耐压试验	201	9.4.3 耐压试验	240
7.4.12 泄漏试验	202	9.4.4 无损检测	241
7.4.13 特殊球罐的技术要求	202	9.5 高压容器和超高压容器的筒体结构 形式	242
7.4.14 竣工验收	203	9.5.1 高压容器的筒体结构 形式	242
参考文献	203	9.5.2 超高压容器的筒体结构 形式	249
第8章 非圆形截面容器	204	9.6 高压容器和超高压容器的密封 结构	256
8.1 椭圆形截面容器	204	9.6.1 高压容器的密封结构	257
8.1.1 受力分析	204	9.6.2 超高压容器的密封结构 ..	260
8.1.2 危险截面和综合应力	207	参考文献	262
8.1.3 变形计算	208	第10章 常压容器	263
8.1.4 实例	211	10.1 常压容器简介	263
8.2 其他常见非圆形截面容器	212	10.2 材料	263
8.2.1 带圆角的矩形容器	212		
8.2.2 近似椭圆形截面的容器 ..	215		
8.2.3 长圆形容器	216		
8.2.4 无圆角的矩形容器	216		
8.3 任意形状的非圆形截面容器 ..	217		
8.3.1 受力分析	217		
8.3.2 回转半径	218		
8.3.3 计算公式及其应用	220		
8.4 大曲率壳体中的弯曲应力	223		
8.4.1 曲梁弯曲时的弯曲应力 ..	223		
8.4.2 矩形截面曲梁的中性层 位置	225		
8.4.3 弯曲应力的计算公式	226		
8.5 带有加强筋的非圆形截面			

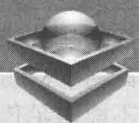
10.2.1	对材料的基本要求	263	11.6.3	搅拌设施	320
10.2.2	许用应力的确定	264	11.6.4	消防设施设置	322
10.2.3	常压容器用材料	264	11.6.5	伴热结构	323
10.3	结构设计	266	11.6.6	排污结构	324
10.3.1	基本结构元件	266	11.6.7	防腐蚀设计	324
10.3.2	立式圆筒形容器	269	11.7	制造与组焊的要求	329
10.3.3	矩形容器	273	11.7.1	材料及附件验收	329
10.4	制造、组焊、检验与验收		11.7.2	预制	329
	要求	273	11.7.3	组装	331
10.4.1	材料	274	11.7.4	焊接	331
10.4.2	加工成形	274	11.7.5	检查及验收	332
10.4.3	焊接	275	11.8	储罐基础	335
10.4.4	热处理	275	11.8.1	基础的沉降	335
10.4.5	无损检测	275	11.8.2	对基础的要求	336
10.4.6	试验	275	11.8.3	基础沉降观测	338
参考文献		276	11.9	国内外标准比较	338
11.9.1	范围	338	11.9.2	许用应力	339
11.9.2	许用应力	339	11.9.3	罐壁强度计算	340
11.9.3	罐壁强度计算	340	11.9.4	清扫孔的设置	342
11.9.4	清扫孔的设置	342			
第 11 章	立式圆筒形储罐	277	第 12 章	固体料仓	343
11.1	立式圆筒形储罐简介	277	12.1	固体料仓简介	343
11.1.1	储罐的种类和特点	277	12.1.1	料仓发展概况和应用	343
11.1.2	储罐的容量及经济尺寸		12.1.2	料仓的设计分类和计算	
	选择	278		基础	345
11.1.3	储罐设计参数(载荷)	278	12.1.3	料仓的结构选择和设计	
11.1.4	国内外储罐标准简介	278		原则	348
11.2	储罐用材料	279	12.2	材料	349
11.2.1	储罐选材基本原则	279	12.2.1	料仓的材料	349
11.2.2	国内储罐用材料及要求	280	12.2.2	板式焊接料仓的选材	
11.2.3	国外储罐用材料	281		分析	349
11.3	罐底的设计	282	12.2.3	板式焊接料仓的常用	
11.3.1	罐底厚度	282		材料	350
11.3.2	结构设计	284	12.3	设计计算	352
11.4	罐壁的设计	285	12.3.1	赖姆伯特理论	352
11.4.1	罐壁的强度计算	285	12.3.2	仓壳圆筒应力计算	357
11.4.2	罐壁的风力稳定计算	286	12.3.3	仓壳锥体应力计算	359
11.4.3	罐壁的抗震计算	289	12.4	结构	360
11.4.4	罐壁的结构设计	291	12.4.1	仓壳的高径比分析	361
11.5	罐顶设计	292	12.4.2	仓顶结构	362
11.5.1	固定顶设计	292	12.4.3	仓底结构	363
11.5.2	外浮顶设计	298	12.4.4	料仓筒体结构	363
11.5.3	内浮顶设计	312	12.4.5	料仓支座	364
11.6	油罐附件(或配件)及其				
	选用	317			
11.6.1	常用附件	317			
11.6.2	附件的布置	319			

12.4.6	料仓防堵结构	366	机制	388	
12.4.7	料仓梯子和平台	366	14.2.3	蠕变特性的描述	389
12.5	料仓的制造、检验与验收	366	14.2.4	蠕变特性的外推	391
12.5.1	材料检查和要求	367	14.3	典型材料的高温强度	393
12.5.2	预制和加工成形	367	14.3.1	常用高温强度性能指标	393
12.5.3	组装	368	14.3.2	低合金钢的高温强度	394
12.5.4	焊接	369	14.3.3	高合金钢的高温强度	396
12.5.5	表面处理	371	14.4	压力容器的蠕变和应力松弛	400
12.5.6	试验、检验及验收	372	14.4.1	多轴应力状态下的蠕变	400
参考文献		373	14.4.2	承压容器的蠕变应力	401
第13章	低温压力容器	374	14.4.3	松弛及其与蠕变的关系	403
13.1	低温压力容器简介	374	14.5	蠕变-疲劳交互作用	406
13.1.1	压力容器的低温界限	374	14.5.1	高温疲劳	406
13.1.2	低温低应力工况	374	14.5.2	损伤法则	407
13.2	材料	376	14.6	高温容器的设计方法	411
13.2.1	低应力脆性断裂现象	376	14.6.1	美国标准 ASME 规范 III NH	411
13.2.2	影响低温韧性的因素	376	14.6.2	英国标准 R5	415
13.2.3	防止低应力脆断的设计原则	378	参考文献		419
13.2.4	钢材低温韧性的评定方法	378	第15章	应力分析	421
13.2.5	低温压力容器用钢	379	15.1	应力分析的常用方法与结果的评定	421
13.2.6	低温压力容器用钢的焊接材料	381	15.1.1	应力分析的常用方法	421
13.2.7	常用低温压力容器用钢的焊接材料	382	15.1.2	应力分析结果的评定	423
13.3	结构设计	382	15.2	弹性力学基础	424
13.3.1	结构简介	383	15.2.1	弹性力学的基本假设	424
13.3.2	焊接结构设计	383	15.2.2	圣维南原理	424
13.3.3	低温容器的密封结构	384	15.2.3	直角坐标系下一般问题的基本方程	425
13.3.4	低温绝热结构设计的目的及方法	384	15.2.4	平面问题的基本理论	426
13.3.5	低温容器的支承系统设计	385	15.2.5	弹性力学解题方法举例	435
参考文献		385	15.3	塑性力学基础	444
第14章	高温压力容器	386	15.3.1	金属材料的应力-应变曲线	444
14.1	高温压力容器简介	386	15.3.2	应力-应变曲线的简化模型	445
14.1.1	高温的定义	386	15.3.3	屈服条件	446
14.1.2	高温结构设计的重要性	386	15.3.4	加载、卸载定理	448
14.2	材料的高温强度性能试验	388			
14.2.1	高温拉伸	388			
14.2.2	蠕变试验曲线及变形				

15.3.5 单层厚壁筒体的塑性应力分析.....	449	第 16 章 超压泄放装置	487
15.4 有限元法基础.....	451	16.1 压力容器的超压及安全泄放.....	487
15.4.1 有限元的基本概念.....	452	16.1.1 压力容器的超压.....	487
15.4.2 有限元法的解题步骤.....	452	16.1.2 防超压安全泄放.....	488
15.4.3 有限元软件介绍.....	453	16.1.3 超压泄放装置的设置.....	490
15.4.4 ANSYS 入门简介	454	16.2 爆破片安全装置的选用与设计计算.....	492
15.5 压力容器分析设计方法.....	457	16.2.1 爆破片安全装置的种类及基本特性.....	492
15.5.1 简介.....	457	16.2.2 爆破片安全装置的选用.....	496
15.5.2 应力分类设计.....	458	16.3 安全阀的选用与设计计算.....	509
15.6 疲劳设计.....	470	16.3.1 安全阀的种类及基本特性.....	509
15.6.1 低循环疲劳曲线.....	471	16.3.2 安全阀的选用.....	513
15.6.2 平均应力影响下疲劳曲线的修正.....	471	16.4 容器的安全泄放量.....	521
15.6.3 疲劳损伤积累.....	472	16.4.1 储存压缩空气或蒸汽时容器的安全泄放量.....	521
15.6.4 疲劳设计.....	473	16.4.2 储存液化气体时容器的安全泄放量.....	522
15.6.5 疲劳分析的其他问题.....	476	16.5 超压泄放技术现状.....	523
15.6.6 典型产品的疲劳分析设计案例.....	476	16.5.1 爆破片安全装置技术.....	523
15.7 压力容器应力分析设计——直接法简介.....	477	16.5.2 安全阀技术.....	525
15.7.1 直接法的术语.....	478	16.5.3 超压泄放设计技术.....	526
15.7.2 直接法设计校核的步骤.....	481	参考文献.....	527
15.7.3 直接法设计校核的原理和应用规则.....	483		
参考文献.....	486		

第1章 概述

CHAPTER 1



随着经济的发展,工业的进步,压力容器已经广泛应用于炼油、化工等工业部门及日常生活中。在炼化行业中,越来越多的新型的、高效节能的设备得到应用,许多装置对压力容器的要求非常高,其操作介质多为高温(或低温)、高压、易燃、易爆、有毒、强腐蚀等,具有相当大的危险性。随着世界各国对海洋资源的开发,为了适应海洋气候、恶劣的环境和石油加工深度不断增加、操作条件也越来越苛刻,对压力容器的要求越来越高、越来越严。世界能源危机的出现和军事装备的竞争、核能的开发应用对压力容器提出了新的要求。航天工业更是要求压力容器为其提供坚实的基础。

在压力容器的使用中,小到不足 1m^3 的气瓶,大到成千上万甚至几十万、几百万立方米的大型压力容器,都与人们的生活息息相关,稍有不慎,就有可能给人民的生命财产带来灾难性后果。如核泄漏,它不仅使人们的生命受到威胁,而且对周围环境造成毁灭性的污染,并且这些危害还会影响到今后几十年、几百年。这就要求对压力容器的设计、制造、检验、安装、使用、维修、退役等方面都必须提出严格的要求。于是作为龙头的压力容器设计就显得尤为重要了。设计的质量将直接影响到容器的质量。因此,本书就各类容器的设计知识进行简要介绍。

1.1 容器的设计进展

容器设计是综合性很强的专业,要求设计者通晓国家法令,设计标准、规范,以及设计方法,同时还必须对容器选用的材料性能等有较为详细的了解,对容器的使用范围、环境等有清楚的认识,甚至还应具备丰富的设计、制造、使用和维护等方面的经验。正是因为如此,不论是国家法令和设计标准、规范的变更,还是新材料的使用及制造水平的提高等,都可能引起设计方法的进步和发展。

1.1.1 规则设计

1949年中华人民共和国成立后,随着工业的逐步发展,容器的设计走上了历史发展的舞台。与英国、美国及其他国家一样,我国的容器设计最初也是基于弹性失效准则。当时认为,容器的失效主要是由强度、刚度问题或者腐蚀使容器强度、刚度发生变化而引起的。但随着工业的进步,许多容器的失效事故已经无法用弹性失效理论来解释,而且在设计过程中发现,这种设计方法已越来越难以满足工业发展的需要。但是限于当时我国的材料、加工业水平及对设计理论的认识等原因,在1990年以前,我国容器仍然采用这种设计方法。

现在,设计人员通常把以材料力学及板壳薄膜理论的简化计算公式为基础,加上一些经验系数进行设计的方法称为“规则设计”。规则设计基于弹性失效准则,确定许用应力的安全系数较大,设计时只考虑单一的“最大载荷”,按一次施加的静载荷处理,不考虑交变载荷和容器的疲劳寿命问题。规则设计对容器重要区域的实际应力未进行严格详细的计算,而工程结构中应力的分布大多数是不均匀的,随着试验技术与计算技术的发展,对于局部几何不连续处按精确的弹性理论或有限元法所得到的应力集中系数可达 $3 \sim 10$,此时若按最大

应力点进入塑性就视为失效就显得保守,结构还有很大的承载潜力,但若不考虑应力集中只按简化公式进行设计,应力集中区将可能出现裂纹而埋藏安全隐患。同时规则设计无法解决高温、高压容器中当热应力与内压应力之和已超出传统的允许值时,无论加厚或减薄壁厚均不能满足传统标准要求的矛盾,也无法解决弹性元件(如膨胀节等)对壁厚要求的问题(强度与柔性的矛盾)。另外,规则设计无法对在实际运行的设备中出现疲劳裂纹等压力容器失效做出合理的评定与预测。由于规则设计没有对各类应力进行正确的评价,随着工业化程度的加深,其局限性也越来越明显。

在国外,20世纪60年代以前,ASME规范主要采用“规则设计”,即以压力容器主要部位的最大主应力不超过弹性范围为设计的安全准则,根据材料的许用应力对压力容器的结构与尺寸做出具体的规定和计算。英国、日本等国家在20世纪70年代以前也都采用规则设计方法。

1.1.2 分析设计

由于工业的快速发展,生产规模的不断扩大,压力容器承受循环载荷的情况日益增多,规则设计已远远不能满足工业发展的需要,为了解决规则设计无法解决的矛盾,另一种压力容器的设计方法——“分析设计”得到了应用与发展。分析设计采用极限载荷、安定载荷和疲劳寿命为界限的“塑性失效”与“弹塑性失效”准则,允许结构出现可控制的局部塑性区,允许对峰值应力部位进行有限寿命设计。确定设计应力强度的安全系数相对较低,设计应力强度相对提高,也解决了规则设计中出现的一些矛盾。

分析设计是以详尽的应力分析为依据,对各类应力根据其对压力容器失效的不同影响分别加以限定。分析设计是压力容器设计理论和方法上的一次飞跃,反映了近代压力容器设计的先进水平,但它对材料、制造、工艺、检验、计算程序(软件)、设计制造资格等的要求比较严格。例如,选用的材料为延性好、力学性能稳定的优质材料并需对各种缺陷进行严格的检验;在无损检测方面则要求一律进行100%的RT(射线)检测。因此,在进行压力容器设计时,人们总是根据经济核算,从规则设计和分析设计中选择一种较为经济的设计方法。

另外,由于计算机的应用及发展,大量的设计工作已经由计算机程序和一些优秀的软件系统来完成。它不但能完成对压力容器结构的设计、校核,而且能够通过优化设计得到符合优化目标的最优结果,而优秀的专家系统更是在设计决策、运行管理、故障分析等方面发挥着特殊的作用。

在国外,ASME锅炉及压力容器委员会于1955年设立了“评述规范应力基准特别委员会”,对当时设计规范的许用应力基准进行了研究。1965年,在ASME规范的第Ⅷ卷中提出了“应力分类”的设计新观点,即对压力容器各危险部位的应力先进行详细的分析,然后根据各类应力对压力容器失效的不同影响对应力进行分类,再根据不同的设计准则加以限制。这种设计方法就是“以应力分析为基础的”设计方法(即分析设计)。1968年,ASME规范第Ⅷ卷“压力容器”正式分为两册,一册为传统的规则设计规范,另一册为分析设计规范。英国1976年开始在BS 5500规范中列入了压力容器分析设计的内容。日本1983年正式实施JIS 8250规范(即“压力容器构造另一标准”)。此后,各国对其设计方法重新进行了调整编制。

1.1.3 规则设计与分析设计的结合

有时,压力容器采用分析设计在经济上不合算,但采用规则设计又不能满足某些零部件的设计要求或者采用规则设计的这些零部件造价太高。为了解决这一问题,又出现了以规则

设计为基础,局部元件采用分析设计的设计方法。这种设计方法兼顾了规则设计与分析设计的特点,并基本能满足现代压力容器设计的一些要求,因此这种设计方法已引起人们的重视。尽管这样,规则设计与分析设计结合仍然存在许多问题,两者结合的深度也常为人们所争论。

1.1.4 压力容器设计未来的发展

随着压力容器的广泛使用,压力容器设计方法也在向前发展。目前,人们对压力容器失效的认识还不完全清楚,理论还不完善,随着人们在实践中加深了对压力容器失效的认识,并在理论上有新的突破,人们将会采用更为有效、经济合理的设计方法。而且新科技的发展,新材料的应用,也会为设计提供发展的基础。另外,计算机的发展和应用,各种软件的开发与应用,将使设计更加方便、准确;同时,计算机软件的成熟将会使模拟实际工况环境的实验更加快速、准确,而实验结果又会为设计提供可靠的指导。因此,可以想象,压力容器的设计将会与计算机(包括计算机软件)的发展紧密结合在一起,向更准确、更安全、更经济合理的方向发展。

1.2 压力容器的应用及分类

1.2.1 压力容器的应用

压力容器最初主要用于石油炼制、化学工业,如用于化工厂的各种储罐、合成炉、聚合釜、裂解炉、反应器等。如今,作为炼油化工中重要设备的压力容器,已经远远突破了原来的应用局限,被广泛用于现代的工业、民用及军工等部门,在科学研究的许多领域也起着重要的作用。

压力容器在工业中使用最为广泛。它不仅大量地用于炼油化工行业,如炼油、化肥、医药、农药、无机化工和有机合成等,还大量用于航空、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。压力容器还广泛用于农业,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、储气罐、蒸煮釜、烘烤器及大型工程管道等被大量用于实际生产中。随着石油加工工业的发展,数以万计的液化石油气钢瓶更是深入到饮食业、旅游业和人们的日常生活中。世界能源危机的出现,许多国家正加紧开发煤气和天然气,抓紧发展核能发电,甚至有的国家正在研究开发海洋的能源。而随着各国军备上的竞争,火箭、导弹技术的发展,以及航天事业的飞跃,各种航天器相继升空,都需要大量满足各种要求的压力容器。

因此,压力容器在社会各行各业的生产、储存、运输等方面具有不可取代的地位,在发展国民经济、巩固国防、解决人们衣食住行等方面起着极为重要的作用。

1.2.2 压力容器的分类

压力容器的用途广泛,规格品种繁多,操作条件各异,结构更是五花八门,从不同的角度可以有不同的分类方法。

按照国家《固定式压力容器安全技术监察规程》(简称《固容规》)的划分方法,将适用于《固容规》的压力容器分为三类:即第Ⅰ、第Ⅱ和第Ⅲ类压力容器。

《固容规》按照压力容器的压力等级划分为低压、中压、高压和超高压四个等级。

《固容规》按照压力容器在生产过程中的作用原理划分为反应压力容器(如反应器、反应釜、聚合釜、合成塔、变换炉、煤气发生炉等)、换热压力容器(如管壳式余热锅炉、热

换热器、冷却器、冷凝器、蒸发器等)、分离压力容器(如分离器、过滤器、集油器、洗涤器、吸收塔、铜洗塔、干燥塔、汽提塔、分气缸、除氧器等)、储存压力容器(如各种储罐、液化石油气球罐等)。

根据盛装介质的毒性,将其分为轻度危害、中度危害、高度危害和极度危害。

另外压力容器还有许多分类方法:按压力容器的外形分为圆筒形容器、球形容器和矩形容器;按压力容器的受力情况分为内压容器和外压容器;按压力容器中心线的方向分为卧式容器和直立容器;按压力容器筒体外直径与内直径的比值(K)分为薄壁容器($K < 1.10$)和厚壁容器($K \geq 1.10$);按压力容器的设计温度分为低温容器、常温容器和高温容器。

按压力容器安装和使用地点分为固定式容器和移动式容器。

1.3 压力容器的失效形式

通常,产品丧失规定功能的现象被称为失效,而压力容器失效则是由于压力或其他载荷超过许用极限而丧失正常工作的能力。各类压力容器的操作条件复杂多样,而且越来越苛刻,因此压力容器失效的形态也是多种多样的,主要是以强度、刚度、稳定性和腐蚀失效四种方式表现出来。由于压力容器的失效带来的一般都是数万元或上百万元的经济损失,严重时甚至造成人员伤亡的灾难性后果,因此如何预测和解决压力容器的失效问题已受到了人们广泛的关注。要预测和解决压力容器的失效,首先应熟悉、了解压力容器的失效形式。下面就介绍几种常见的失效形式。

1.3.1 强度失效

容器中某最大应力点超过屈服点后就会出现不可恢复的变形,此时由弹性状态进入塑性状态,随着载荷的增大,容器的塑性区不断地扩大,当载荷大到某一极限时,塑性区就会扩展到一定的范围,容器便失去了承载的能力。

1.3.2 刚度失效

容器或容器上的零部件不是因为强度不足,而是由于过大的弹性变形使部件等失去了正常的工作能力。这种失效形式通常出现在密封结构、换热设备等地方。

1.3.3 稳定性失效

容器在外压或其他外部载荷的作用下,由稳定的平衡状态变至另一个不稳定的状态,形状发生突然改变而丧失正常的工作能力。

1.3.4 腐蚀失效

腐蚀失效是压力容器失效的重要类型之一,金属腐蚀的形式是多种多样的,按金属与周围介质作用的性质分为化学腐蚀和电化学腐蚀两大类,但都是由于其工作环境所引起,包括应力腐蚀、氢脆、蒸汽腐蚀、碱脆、硫腐蚀、钒腐蚀、辐照脆化和液态金属脆化等类型。

应力腐蚀失效是指在拉应力作用下,一定材料与一定的介质环境发生应力腐蚀,而最终导致压力容器失效,是一种延迟破坏,造成的后果也比较严重。由于近代工业技术的发展,材料的工作环境条件越来越苛刻,零部件和材料的应力腐蚀问题也日益突出,解决应力腐蚀问题成为了当今的重要课题。应力腐蚀的必要条件是存在拉应力,而且所用材料与介质环境能发生应力腐蚀。因此,为了解决应力腐蚀问题,设计上通常采用仔细选择应力腐蚀敏感性低的材料、加缓蚀剂或保护层、阳极保护和避免或减小应力集中、改善危险截面的受力状况

及避免工件表面层残余应力存在等措施；另外，生产工艺上通常采用适当的热处理工艺来降低材料对应力腐蚀的敏感性和减小工件的残余应力或避免应力集中。

金属的氢脆是指由于金属中存在氢而导致材料的塑性大为降低，从而使压力容器失效。氢脆的表现形式一般分为不可逆氢脆和可逆氢脆两类，前者是指氢造成的永久性损伤（如低合金钢在石油化工设备中或酸洗处理后因吸氢而出现氢鼓包等），后者是指排除氢后力学性能可以恢复的氢脆现象（如钢及一些合金钢中的氢致延迟破坏等）。氢脆产生的主要原因是氢在材料中来不及扩散或逸出而形成局部偏聚（偏析），材料中氢浓度越高越容易发生局部偏聚，材料表现为低应力下的延迟破坏。因此，为了解决氢脆问题，设计上通常采用选择氢脆敏感性小的材料、减小或消除拉应力、杜绝或减少氢的环境（如加缓蚀剂、保护层等）和改变应力状态等措施；另外工艺上也可通过表面处理（如滚压、喷丸等）使表面产生残余压应力。

蒸汽腐蚀实际上是由于高温下水蒸气的分解而造成金属的氧化和氢脆，为了防止蒸汽腐蚀，设计上通常选用高抗蒸汽腐蚀的材料。

碱脆是指由于碱的浓度达到一定程度而导致的应力腐蚀。

硫腐蚀是指由于硫的存在而在不同条件下产生不同形式的腐蚀现象，如高温硫腐蚀、含镍合金钢的硫腐蚀和低温硫腐蚀等。为防止硫腐蚀，通常采用钢材表面渗铝、含镍合金钢中加铬元素等措施。

钎腐蚀是指由于油等燃烧后产生的钎氧化物与高温金属接触时能破坏金属表面的氧化膜，加速腐蚀过程的发展。目前常采用的防止措施是加入添加剂。

辐照脆化是指在核技术的设备中，零部件处于高能电子、中子等粒子流的辐射下，结构材料发生脆化，通常表现为几何尺寸变化，体积膨胀，密度变小，强度、硬度上升和塑性下降以及物理性能的变化。

液态金属脆化是指固态金属与液态金属接触时造成的固态金属的塑性或强度的下降。防止液态金属脆化的方法很多，如选用敏感性低的材料，在固态金属上增加保护层等。

1.4 压力容器设计的基本要求

设计实际上就是将物质资源转变成产品等的一种媒介形式，是一种创造性活动，压力容器的设计也不例外。设计人员在接到设计任务时，需要收集相关数据资料等，以便保证满足不可变因素（如材料性能、政府法令、标准规范等）、可变因素与现代技术、科技发明、人力、资金等的有机结合，形成一个最佳方案。

由于压力容器在国民经济发展中扮演的角色越来越重要，与国家、人民的财产、生命紧密相关，所以要求压力容器设计不但要满足生产实际的需要，而且安全可靠，技术经济合理。

1.4.1 满足生产需要

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和场地条件进行。

1.4.2 满足压力容器的安全可靠

一般来说，压力容器的失效，不仅仅是容器和设备本身遭到破坏，而往往会破坏周围的其他设备及建筑，甚至造成人身伤亡事故，而由于内部介质的向外扩散带来的化学爆炸、着火燃烧或恶性中毒等连锁反应更是不可估量的、灾难性破坏。因此，根据压力容器可能的失