

压力容器实用技术丛书

压力容器 设计知识

《压力容器实用技术丛书》编写委员会 编



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

压力容器实用技术丛书

压力容器设计知识

主编单位 兰州石油机械研究所

《压力容器实用技术丛书》编写委员会 编



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

内 容 提 要

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、球形储罐、非圆形截面容器、高压和超高压容器、常压容器、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/《压力容器实用技术丛书》编写
委员会编. —北京:化学工业出版社, 2005.7

(压力容器实用技术丛书)

ISBN 7-5025-7493-X

I. 压… II. 压… III. 压力容器-设计-基本知识
IV. TH490.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 086746 号

压力容器实用技术丛书

压力容器设计知识

《压力容器实用技术丛书》编写委员会 编

责任编辑:张兴辉

文字编辑:张燕文

责任校对:洪雅姝

封面设计:潘 峰

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行

工业装备与信息工程出版中心
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询:(010)64982530

(010)64918013

购书传真:(010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 34¼ 字数 845 千字

2005 年 10 月第 1 版 2005 年 10 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7493-X

定 价: 78.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

《压力容器实用技术丛书》编写委员会

主任委员 魏 锋

副主任委员 涂善东 刘福录 张延丰 寿比南

委 员 (按姓氏笔画排序)

马耀文	刘福录	姜国锋	寿比南	杨永福	李世玉
李志义	吴树雄	沈 钢	宋小江	宋继红	张 钢
张亚明	张延丰	张红光	张迎凯	张建荣	陈 钢
陈建玉	陈建俊	林树青	段 瑞	俞树荣	费继增
徐积源	秦晓钟	高继轩	涂善东	谢铁军	裴德余
潘家祯	魏 锋				

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、防腐、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的共同努力才能实现。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要出发,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。

本丛书共分六册,第一册《压力容器设计知识》,第二册《压力容器用材料及热处理》,第三册《压力容器制造和修理》,第四册《压力容器检验及无损检测》,第五册《压力容器安全监察与管理》,第六册《压力容器腐蚀与控制》,涉及容器的全过程和方方面面知识。这是我国第一套有关压力容器实用技术的综合性丛书。

本丛书力求重点突出实用性和全面性,对常用标准管辖下的设计、制造、材料、检验、防腐等内容进行简化处理,对不常用的和标准中不易查找的内容和背景知识做详细介绍,力求写细、写透、写全。

本丛书还力求突出新颖性和公正科学性,除介绍现有知识内容外,还介绍许多新技术、新材料、新方法、新工艺、新标准。站在全国全行业的立场,公正、科学地反映容器的先进技术水平。

本丛书力求体现国内最新技术和国外技术的发展,邀请了国内 50 多个单位的近百名知名专家和学者参加编审,遍及容器教学、研究、设计、制造、监督、检验、使用、防腐等各个方面,反映国内的最新技术内容和研究成果以及国外容器技术的发展和趋势。

本丛书从编写形式上还力求突出适应读者需求和便于查找的特点,对较深较难的理论性问题做通俗化处理,重点介绍相关知识和背景知识,提出相关数据,将国外技术内容与国内技术进行对比。

本丛书由兰州石油机械研究所主编,刘福录教授级高工负责全套丛书的策划和组织工作。各册的负责人为:第一册朱保国,第二册高守成,第三册王增新,第四册王纪兵,第五册陈长宏,第六册任凌波。慕瑞峰同志负责主要的文字编辑工作。

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,错误之处不可避免,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

2005 年 6 月

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, 谬之千里。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。压力容器结构形式比较多, 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。目前, 国内没有系统介绍压力容器设计知识的资料。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。本书的出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, 有效提高设计质量; 同时也适合从事压力容器制造、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 章刘福录、张延丰、李小平 (兰州石油机械研究所); 第 2 章王文江、党战伟 (兰州石油机械研究所); 第 3 章费继增 (中国石油工程设计大连分公司); 第 4 章段瑞 (中国石化工程建设公司); 第 5 章第 1、2、3、4、11 节由潘家桢、李英 (华东理工大学) 编写, 第 5、6、7、8、9、10 节由裴德余、王新京 (中国华陆工程公司) 编写; 第 6 章第 1、4 节由宋启祥 (兰州石油机械研究所)、胡传清 (中石化股份公司扬子石化股份有限公司炼油厂) 编写, 第 2、3 节由李先彪 (兰州石油机械研究所)、刘宁春 (中石化股份公司金陵分公司) 编写; 第 7 章由刘福录、冀峰 (兰州石油机械研究所) 编写; 第 8 章由俞树荣、梁瑞、张镜清 (甘肃工业大学) 编写; 第 9 章由吕超宽、李小平 (兰州石油机械研究所)、朱勇 (中石化股份公司金陵分公司) 编写; 第 10 章由朱保国 (兰州石油机械研究所) 编写; 第 11 章由武铜柱 (中国石化工程建设公司) 编写; 第 12 章由万网胜、张莼、周秀恒 (中国纺织设计院) 编写; 第 13 章由党战伟 (兰州石油机械研究所) 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 (甘肃工业大学) 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 (中国石化工程建设公司)、张延丰审定。在编写过程中, 得到了中国石化工程建设公司、中国石油工程设计大连分公司、华东理工大学、中国华陆工程公司、甘肃理工大学、中国纺织设计院、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

2005 年 6 月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 压力容器的设计进展	1
1.1.1 常规设计	1
1.1.2 分析设计	2
1.1.3 常规设计与分析设计的结合	2
1.1.4 压力容器设计未来的发展	3
1.2 压力容器的应用及分类	3
1.2.1 压力容器的应用	3
1.2.2 压力容器的分类	3
1.3 压力容器的失效形式	4
1.3.1 强度失效	4
1.3.2 刚度失效	4
1.3.3 稳定性失效	4
1.3.4 腐蚀失效	4
1.4 压力容器设计的基本要求	5
1.4.1 设计必须满足生产需要	5
1.4.2 设计必须使压力容器安全可靠	5
1.4.3 设计必须做到技术经济合理	6
1.5 压力容器标准及规范	6
1.5.1 国内压力容器标准	6
1.5.2 国外压力容器标准	10
1.6 压力容器软件介绍	11
1.6.1 SW6-98 过程设备强度计算软件包	12
1.6.2 LANSYS 压力容器强度设计软件	12
1.6.3 有限元程序自动生成系统 FEPG	13
1.6.4 ANSYS 分析设计软件	14
1.6.5 Pvelite & Code Calc 压力容器整体及零部件分析设计软件	14
第 2 章 设计要素	16
2.1 设计文件	16
2.2 设计单位、人员资格及职责	16
2.2.1 设计单位	16
2.2.2 设计单位技术负责人	16
2.2.3 设计技术负责人	16
2.2.4 审核（定）人员	17
2.2.5 校核人员	17

2.2.6 设计人员	17
2.3 设计压力	17
2.3.1 设计压力	17
2.3.2 设计压力的确定	17
2.4 设计温度	19
2.4.1 设计温度	19
2.4.2 设计温度的确定	19
2.5 介质特性	20
2.5.1 物理性质	20
2.5.2 腐蚀性	21
2.6 设计载荷	26
2.6.1 设计时应考虑的载荷	26
2.6.2 设计载荷的组合	27
2.7 厚度附加量	28
2.8 厚度	28
2.8.1 计算厚度	28
2.8.2 设计厚度	29
2.8.3 名义厚度	29
2.8.4 有效厚度	29
2.8.5 最小厚度	29
2.9 许用应力	29
2.10 焊接接头系数	31
2.11 压力试验	32
2.11.1 压力试验	32
2.11.2 液压试验	32
2.11.3 气压试验	33
2.12 致密性试验	33
2.12.1 致密性试验	33
2.12.2 气密性试验方法	33
2.12.3 煤油渗漏方法	33
2.13 无损检测方法及其选用	33
2.13.1 射线检测 (RT)	34
2.13.2 超声检测 (UT)	34
2.13.3 磁粉检测 (MT)	36
2.13.4 渗透检测 (PT)	36
2.14 技术要求	38
2.15 油漆、包装及装车	38
2.15.1 油漆	38
2.15.2 包装	39
2.15.3 装车	39

2.15.4 压力容器油漆、包装、装车设计	41
2.15.5 压力容器易损坏件包装要求	41
参考文献	42
第3章 主要受压元件	43
3.1 内压圆筒和内压球壳	43
3.1.1 强度理论	43
3.1.2 内压圆筒	43
3.1.3 内压球壳	45
3.1.4 内压圆筒和球壳中的温差应力	46
3.2 外压圆筒和外压球壳	47
3.2.1 外压容器的失效方式	47
3.2.2 外压圆筒稳定性计算	47
3.2.3 加强圈设计	49
3.2.4 外压圆筒的允许制造公差和试压要求	51
3.2.5 外压球壳的计算	52
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	52
3.3 封头	53
3.3.1 球形封头	53
3.3.2 椭圆形封头	54
3.3.3 碟形封头	54
3.3.4 无折边球形封头	55
3.3.5 锥形封头	56
3.3.6 平盖	58
3.4 法兰	59
3.4.1 法兰的分类及各自的特点	59
3.4.2 法兰连接的密封设计	60
3.4.3 螺栓设计	66
3.4.4 法兰设计	68
参考文献	70
第4章 开孔和开孔补强设计	71
4.1 开孔补强的理论基础	71
4.1.1 孔边的应力	71
4.1.2 容器开孔的强度问题及其补强准则	74
4.2 开孔补强计算方法	75
4.2.1 等面积补强法	75
4.2.2 压力面积法	78
4.2.3 开孔补强的另一方法	80
4.2.4 大开孔补强	81
4.2.5 平板及外压容器开孔补强	82
4.3 开孔补强结构	82

4.3.1	补强圈补强	82
4.3.2	厚壁管补强	83
4.3.3	整体锻件补强	83
4.4	开孔补强设计中的其他问题	84
4.4.1	不需另行补强的最大开孔直径	84
4.4.2	接管的壁厚要求	84
4.4.3	承受外载荷接管的补强	84
4.4.4	开孔位置	85
	参考文献	85
第5章	卧式容器	86
5.1	概述	87
5.2	卧式容器载荷分析	89
5.2.1	卧式容器的载荷	89
5.2.2	简化后的力学模型	91
5.2.3	内力计算	91
5.3	鞍座卧式容器强度计算	92
5.3.1	圆筒轴向应力	92
5.3.2	圆筒切向应力	94
5.3.3	圆筒周向应力	96
5.3.4	鞍座强度计算	99
5.4	圈座卧式容器强度计算	100
5.4.1	圆筒轴向应力	101
5.4.2	圆筒切向应力	101
5.4.3	圆筒周向应力	101
5.5	三角形支撑加强圈的设置及强度计算	102
5.5.1	支撑杆的内应力由系数 ξ 确定	102
5.5.2	支撑圈靠近鞍座平面时	103
5.6	有附加载荷作用时卧式容器的强度计算	103
5.6.1	符号说明	104
5.6.2	径向力引起的支座反力及圆筒弯矩的计算	105
5.6.3	轴向外力矩及其引起的弯矩、支座反力的计算	105
5.6.4	支座反力、圆筒轴向弯矩的组合	106
5.6.5	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	107
5.7	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	109
5.7.1	符号说明及应用范围	109
5.7.2	径向载荷引起圆筒上局部应力的计算	111
5.7.3	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	114
5.7.4	圆筒体上局部载荷引起最大应力的合成及强度校核	127
5.8	多鞍座卧式容器	134
5.8.1	鞍座处的圆筒体弯矩	134

5.8.2 鞍座处支反力	135
5.8.3 两支座跨度间的弯矩及极值	136
5.8.4 强度校核	136
5.8.5 基础不均匀沉降对轴向弯矩及支座支反力的影响	136
5.9 埋地卧式容器的设计计算	139
5.9.1 混凝土层或砂土层重力对圆筒体静压力的计算	139
5.9.2 混凝土层重力对圆筒体载荷的影响	140
5.10 制造、检验及验收	141
5.10.1 卧式容器分类	141
5.10.2 制造、检验及验收	141
5.10.3 焊接接头	142
5.10.4 整体消除应力热处理	143
5.10.5 压力试验和气密性试验	143
5.11 卧式容器设计的合理性分析	143
5.11.1 设计分析	143
5.11.2 合理设计	146
参考文献	147
第6章 直立容器	148
6.1 地震理论	148
6.1.1 水平地震作用	149
6.1.2 垂直地震作用	155
6.1.3 地震弯矩	156
6.2 风振理论	156
6.2.1 风	156
6.2.2 风载荷	157
6.2.3 直立设备的风振效应	160
6.2.4 直立设备顺风向下的弯曲响应	160
6.3 风诱发的振动	165
6.3.1 风诱发振动现象	165
6.3.2 雷诺数 (Re) 和斯特劳哈尔数 (Sr)	165
6.3.3 升力的计算	166
6.3.4 直立设备在共振时的强度计算	167
6.3.5 防止直立设备共振的措施	171
6.4 稳定理论	171
6.4.1 欧拉屈曲	172
6.4.2 外压失稳	177
6.4.3 局部失稳	180
6.4.4 塑性失稳	182
参考文献	182
第7章 球形储罐	184

7.1 概述	184
7.1.1 球罐发展概况	184
7.1.2 球罐的特点及应用	185
7.1.3 球罐的分类	186
7.1.4 球罐设计参数	187
7.1.5 标准规范介绍	188
7.2 材料	189
7.2.1 球罐选材基本原则	189
7.2.2 国内球罐用材料	190
7.2.3 国外球罐用材料	192
7.3 结构	193
7.3.1 球壳	193
7.3.2 支座	193
7.3.3 固定式拉杆与可调式拉杆的对比	194
7.3.4 人孔接管	195
7.3.5 梯子平台	195
7.3.6 喷淋装置	196
7.3.7 安全附件	197
7.3.8 绝热结构	199
7.4 制造与组焊技术要求	201
7.4.1 球壳板	201
7.4.2 主要零部件	202
7.4.3 油漆、包装、运输	203
7.4.4 组焊准备	204
7.4.5 组装	204
7.4.6 焊接	204
7.4.7 无损检测	205
7.4.8 焊接修补	206
7.4.9 焊后整体热处理	206
7.4.10 产品焊接试板	206
7.4.11 压力试验	207
7.4.12 气密性试验	207
7.4.13 特殊球罐的技术要求	208
7.4.14 竣工验收	209
参考文献	209
第8章 非圆形截面容器	210
8.1 椭圆形截面容器	210
8.1.1 受力分析	210
8.1.2 危险截面和综合应力	214
8.1.3 变形计算	214

8.1.4 实例	217
8.2 其他常见非圆形截面容器	219
8.2.1 带圆角的矩形容器	219
8.2.2 近似椭圆形截面的容器	221
8.2.3 长圆形容容器	222
8.2.4 无圆角的矩形容器	222
8.3 任意形状非圆形截面容器	223
8.3.1 受力分析	223
8.3.2 回转半径	225
8.3.3 计算公式及其应用	227
8.4 大曲率壳体中的弯曲应力	230
8.4.1 曲梁弯曲时的弯曲应力	231
8.4.2 矩形截面曲梁的中性层位置	232
8.4.3 弯曲应力的计算公式	233
8.5 带有加强筋的非圆形截面容器	235
8.5.1 外加强圈加强的非圆形截面容器	235
8.5.2 具有内加强筋板的长圆形柱壳	236
8.6 环形壳体	239
8.6.1 横截面为圆形的等壁厚环形壳体	239
8.6.2 弯管时壁厚变化的环形壳体	241
8.6.3 弯管时截面变化的环形壳体	242
参考文献	243
第9章 高压容器和超高压容器	244
9.1 在工业生产中的应用	244
9.2 结构特点	244
9.3 设计	245
9.3.1 现行各国设计规范	245
9.3.2 设计的基本要求	245
9.4 设计时需考虑的几个问题	246
9.4.1 安全系数	246
9.4.2 材料的选取	247
9.4.3 耐压试验	247
9.4.4 无损检测	248
9.5 筒体结构	248
9.5.1 高压容器	249
9.5.2 超高压容器	256
9.6 密封结构	265
9.6.1 高压容器	265
9.6.2 超高压容器	269
9.7 零部件设计	271

参考文献	271
第 10 章 常压容器	272
10.1 概述	272
10.2 材料	272
10.2.1 对材料的基本要求	272
10.2.2 许用应力的确定	273
10.2.3 常压容器用材料	273
10.3 结构设计	275
10.3.1 基本结构元件	275
10.3.2 立式圆筒形容器	277
10.3.3 矩形容器	282
10.4 制造、组焊、检验与验收要求	282
10.4.1 材料	282
10.4.2 加工成形	283
10.4.3 热处理	284
10.4.4 无损检测	285
10.4.5 试验	285
参考文献	285
第 11 章 立式圆筒形储罐	286
11.1 概述	286
11.1.1 储罐的发展状况	286
11.1.2 储罐的种类和特点	287
11.1.3 储罐的容量及经济尺寸选择	288
11.1.4 储罐设计参数(载荷)	288
11.1.5 国内外储罐标准简介	289
11.2 材料	289
11.2.1 储罐选材基本原则	289
11.2.2 国内储罐用材料及要求	290
11.2.3 国外储罐用材料	291
11.3 罐底的设计	292
11.3.1 罐底厚度	292
11.3.2 结构设计	295
11.4 罐壁的设计	296
11.4.1 强度计算	296
11.4.2 风力稳定计算	297
11.4.3 抗震计算	300
11.4.4 结构设计	302
11.5 罐顶设计	303
11.5.1 固定顶设计	303
11.5.2 外浮顶设计	309

11.5.3	内浮顶设计	324
11.6	油罐附件(或配件)及其选用	329
11.6.1	常用附件	329
11.6.2	附件的布置	331
11.6.3	搅拌设施	331
11.6.4	消防设施	334
11.6.5	伴热结构	335
11.6.6	排污结构	335
11.6.7	防腐蚀设计	336
11.7	制造与组焊的要求	341
11.7.1	材料及附件验收	341
11.7.2	预制	341
11.7.3	组装	343
11.7.4	焊接	343
11.7.5	检查及验收	344
11.8	储罐基础	347
11.8.1	基础的沉降	347
11.8.2	对基础的要求	348
11.8.3	基础沉降观测	350
11.9	国内外标准比较	350
11.9.1	范围	350
11.9.2	许用应力	351
11.9.3	罐壁强度计算	351
11.9.4	清扫孔的设置	354
	参考文献	355
第12章	固体料仓	356
12.1	概述	356
12.1.1	料仓发展概况和应用	356
12.1.2	料仓的设计分类和计算基础	357
12.1.3	料仓的设计和选用原则	358
12.2	材料	358
12.2.1	料仓的选材	358
12.2.2	料仓常用钢材、铝材	359
12.3	结构	359
12.3.1	仓顶结构	360
12.3.2	仓底结构	360
12.3.3	料仓筒体结构	361
12.3.4	料仓支座	361
12.3.5	料仓接管、法兰	363
12.3.6	料仓梯子平台	365

12.4 设计计算.....	365
12.4.1 物料对料仓筒壁的作用力.....	365
12.4.2 料仓筒体应力计算.....	366
12.4.3 料仓锥体部分应力计算.....	368
12.5 料仓的制造、检验与验收.....	370
12.5.1 材料检查和要求.....	370
12.5.2 预制和加工成形.....	370
12.5.3 组装.....	371
12.5.4 焊接.....	372
12.5.5 表面处理.....	374
12.5.6 试验、检验及验收.....	375
参考文献.....	376
第13章 低温压力容器	377
13.1 概述.....	377
13.1.1 压力容器的低温界限.....	377
13.1.2 低温低应力工况.....	377
13.2 材料.....	378
13.2.1 低应力脆性断裂现象.....	379
13.2.2 影响低温韧性的因素.....	379
13.2.3 防止低应力脆断的设计原则.....	380
13.2.4 钢材低温韧性的评定方法.....	381
13.2.5 低温压力容器用钢.....	382
13.2.6 低温压力容器用钢的焊接材料.....	387
13.2.7 常用低温压力容器用钢的焊接材料.....	388
13.3 结构设计.....	388
13.3.1 结构简介.....	388
13.3.2 焊接结构设计.....	389
13.3.3 低温容器的密封结构.....	390
13.3.4 低温绝热结构设计的目的及方法.....	390
13.3.5 低温容器的支撑系统设计.....	391
参考文献.....	391
第14章 高温压力容器	392
14.1 概述.....	392
14.1.1 高温的定义.....	392
14.1.2 高温结构设计的重要性.....	392
14.2 材料的高温强度性能试验.....	394
14.2.1 高温拉伸.....	394
14.2.2 蠕变试验曲线及变形机制.....	394
14.2.3 蠕变特性的描述.....	396
14.2.4 蠕变特性的外推.....	398

14.3	典型材料的高温强度	400
14.3.1	常用高温强度性能指标	400
14.3.2	低合金钢的高温强度	401
14.3.3	高合金钢的高温强度	402
14.4	压力容器的蠕变和应力松弛	406
14.4.1	多轴应力状态下的蠕变	406
14.4.2	承压容器的蠕变应力	407
14.4.3	松弛及其与蠕变的关系	409
14.5	蠕变-疲劳交互作用	412
14.5.1	高温疲劳	412
14.5.2	损伤法则	413
14.6	高温容器的设计方法	417
14.6.1	美国标准 ASME 规范 CC N-47	417
14.6.2	英国标准 R5	420
	参考文献	424
第 15 章	应力分析	427
15.1	概述	427
15.1.1	基本概念介绍	427
15.1.2	一点处的应力状态	428
15.1.3	圣维南原理	429
15.1.4	材料强度理论	429
15.2	弹塑性力学基础	429
15.2.1	弹性力学的基本概念	429
15.2.2	平面问题的基本理论	431
15.2.3	弹性力学解题方法举例	441
15.2.4	塑性力学简介	445
15.2.5	屈服条件	447
15.2.6	加载、卸载定理	450
15.3	有限元法基础	450
15.3.1	有限元的基本概念	451
15.3.2	有限元法的解题步骤	452
15.3.3	有限元软件介绍	453
15.3.4	ANSYS 入门简介	454
15.4	应力分析常用方法	455
15.4.1	解析法	455
15.4.2	数值求解法	455
15.4.3	实测法	455
15.5	应力分析设计方法	457
15.5.1	应力分类	458
15.5.2	各类应力的限制条件	459