



全国锅炉压力容器标准化技术委员会 编

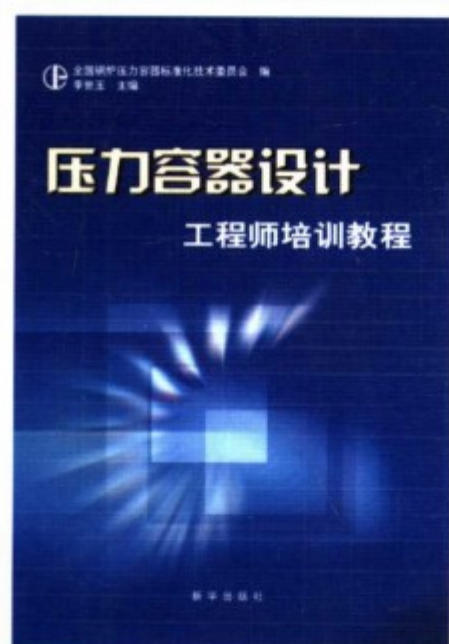
李世玉 主编

# 压力容器设计

## 工程师培训教程

新华出版社

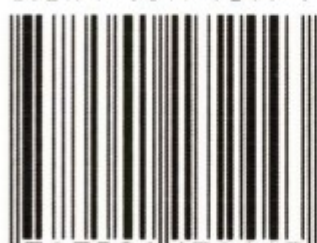
责任编辑：刘广军  
封面设计：李 波



# 压力容器设计 工程师培训教程

全国锅炉压力容器标准化技术委员会 编  
李世玉 主编

ISBN 7-5011-7244-7



9 787501 172443 >

ISBN 7-5011-7244-7

定价：196.00 元



# 压力容器设计工程师培训教程

全国锅炉压力容器标准化技术委员会 编

主编 李世玉

新华出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

压力容器设计工程师培训教程/全国锅炉压力容器标准化技术委员会编.—北京:新华出版社,2005.10

ISBN 7-5011-7244-7

I.压... II.全... III.压力容器—设计—技术培训—教材 IV.TH490.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 115979 号

**压力容器设计工程师培训教程**  
全国锅炉压力容器标准化技术委员会 编  
李世玉 主编

\*

新华出版社出版发行  
(北京石景山区京原路 8 号 邮编:100043)  
新华书店经销  
北京兰星球彩色印刷有限公司印刷

\*

开本 880×1230 1/16 印张 34 字数 103 千字  
2005 年 10 月第 1 版 2005 年 10 月第 1 次印刷  
ISBN 7-5011-7244-7 定价:196.00 元

## 本书编写人员

第1章	压力容器概念	李世玉		
第2章	压力容器设计工作	李世玉		
第3章	压力容器法规和标准	高继轩	寿比南	
第4章	压力容器设计基础	寿比南		
第5章	材料基础知识	张勇	秦晓钟	
第6章	压力容器用材料	张勇	秦晓钟	
第7章	工程力学基础知识	陈罕		
第8章	内压元件——圆筒和球壳	桑如芭		
第9章	外压元件——圆筒、球壳和锥壳	张康达		
第10章	受压元件——封头	桑如芭		
第11章	开孔和开孔补强	桑如芭		
第12章	法兰连接	桑如芭		
第13章	波形膨胀节	李建国		
第14章	超压泄放装置	杨秀霞		
第15章	压力容器制造——下料、成形	李景辰		
第16章	压力容器制造——焊接	戈兆文	李景辰	
第17章	压力容器制造——热处理	李景辰	戈兆文	
第18章	压力容器制造——无损检测	袁榕	李景辰	
第19章	压力容器制造——试验、验收	李景辰		
第20章	低温压力容器	李世玉		
第21章	铬钼钢制压力容器	苟家福	仇恩沧	
第22章	卧式容器	裴德余		
第23章	塔式容器	王者相		
第24章	球形储罐	黄光耀	刘福录	
第25章	管壳式换热器	朱巨贤		
第26章	换热器管板强度计算	李世玉	桑如芭	薛明德
附录A	立式圆筒形储罐	斯新中	仇恩沧	

## 本书编写人员所在单位

单 位	编写人员
国家质检总局特种设备安全监察局	高继轩
全国锅炉压力容器标准化技术委员会	寿比南
	李建国
中国石化工程建设公司	李世玉
	仇恩沧
	桑如苞
	斯新中
	苟家福
中国通用机械工程总公司	秦晓钟
安徽省特种设备检测院	张 勇
清华大学	薛明德
北京化工大学	陈 罕
浙江工业大学	张康达
华东理工大学	杨秀霞
合肥通用机械研究院	李景辰
	戈兆文
	袁 榕
华陆工程科技有限责任公司	裴德余
扬子石化设计院	黄光耀
兰州石油机械研究所	朱巨贤
	刘福录
中国石化宁波工程公司	王者相

# 前 言

压力容器是涉及国家财产和人民生命安全的特种设备,为此国家授权专门机构国家质量监督检验检疫总局特种设备安全监察局(简称“特种设备局”)对容器的设计、制造、安装、使用等各个方面进行安全监察。

设计是产品质量的最基本保障,“质量的第一步开始于设计”。为了确保容器的质量和安全,并不断提高容器的设计人员的技术素质和设计水平,特种设备局要求对全国容器的设计人员(包括设计审批人员)定期组织培训和进行考核。根据这一要求,原全国容器标准化技术委员会设计分会承担了《容器设计工程师培训教程》(简称《教程》)的编写工作,机构调整后由全国锅炉容器标准化技术委员会(简称“锅容标委”)直接组织实施。

容器设计是一个专业,要求设计人员具有广泛而深入的多方面知识。容器工程师的培训不同于一般的标准宣贯,正确理解和运用国家法令法规、技术标准规范仅仅是设计工程师应具备的基本知识和技能之一。除此之外还应通过学习和工程实践牢固地掌握和灵活运用一系列的相关知识,如力学、材料、设计计算、焊接、无损检测、压力试验、安装、使用和维修等。

本《教程》不仅全面阐述了容器设计专业所需要的专业知识和相关基础,而且介绍了有关技术领域的最新进展,充分体现了基础理论与技术实践相结合、标准法规与工程经验相结合的原则。本《教程》既是容器设计人员的学习培训教材,同时也可供从事容器工作的工程技术人员和高校过程装备专业师生作为参考书。

应当指出,本《教程》虽然包含了对容器法规和标准的分析、解释和说明,但并不意味着本教程是这些法规和标准的正式权威解释。也不意味着本《教程》提供了容器设计审批人员考核的标准答案。只有容器法规和标准的正式文本及相关正式文件才能作为容器设计的基本准则以及容器设计审批人员考核和有关争议仲裁的依据。

为确保本《教程》质量,特聘请国内容器行业相关领域内的专家参加编写工作,具体编写分章列后。本教程由李世玉主编并负责全书的统稿工作。在统稿过程中,寿比南、秦晓钟、陈罕、李世玉、仇恩沧、陈建俊、李平瑾、戈兆文等对全书中就其相关专业的内容进行了审阅,并提出了许多中肯的意见。

王平、金伟娅分别在制造技术的校审和外压元件的编写工作中协助了部分工作;梁之洵、林上富在本《教程》的编辑、校订等文字工作中付出了辛勤劳动。

特种设备局的高继轩处长、张建荣副处长和“锅容标委”的寿比南秘书长、王为国副秘书长长期以来对容器设计审核人员的培训和考核工作给予了极大关注和具体指导,对于本《教程》的编写和出版同样也给予了有力支持。《教程》编写、出版全过程中,“锅容标委”的陈朝晖同志做了大量的汇稿、编辑以及组织等具体工作。

虽经努力,书中不当甚至错误之处在所难免,敬请指正。

编 者  
2005年10月

# 目 录

<b>第1章 压力容器概念</b>	
1.1 压力容器的划定范围	1
1.1.1 受压元件	1
1.1.2 非受压元件	1
1.1.3 划定范围	2
1.2 GB 150 的适用范围	2
1.2.1 GB 150 适用范围	2
1.2.2 GB 150 容器	2
1.2.3 GB 150 不适用的各类容器	3
1.3 《压力容器安全技术监察规程》 的管辖范围	3
1.3.1 容规容器	3
1.3.2 《容规》的管辖范围	3
1.3.3 《容规》不适用的各类容器	4
1.3.4 《容规》与 GB 150 的适用情况比较	4
1.4 压力容器的分类	5
1.4.1 根据生产装置中（化工）工艺 单元过程分类	5
1.4.2 根据生产过程中的作用原理分类	5
1.4.3 根据压力等级分类	6
1.4.4 根据温度分类	6
1.4.5 根据《容规》分类	6
1.4.6 根据“压力容器压力管道设计 许可证”分类	7
1.4.7 根据“压力容器制造许可证”分类	8
1.4.8 压力容器的其他分类方法	8
1.5 压力容器的工作条件及特点	8
1.5.1 温度条件	8
1.5.2 压力条件	9
1.5.3 介质腐蚀条件	9
1.5.4 介质的危害性	9
1.5.5 其他载荷条件	10
1.5.6 装置的大型化	10
1.5.7 结构多样性	11
1.5.8 主要结构组成	11
1.6 对容器的基本要求	11
1.6.1 满足使用要求	11
1.6.2 安全可靠	11
1.6.3 合理的经济成本	12
<b>第2章 压力容器设计工作</b>	
2.1 设计工作的性质和责任	13
2.2 压力容器设计单位和各级设计人员	14
2.2.1 设计单位基本条件	14
2.2.2 不能申请设计资格的单位	14
2.2.3 各级设计人员基本条件	15
2.2.4 各级设计人员的岗位职责	15
2.3 设计任务书	17
2.3.1 容器标识	17
2.3.2 结构形状	17
2.3.3 物料介质的性质	17
2.3.4 管口表及其示意图（包括其他开孔 和封闭件）	17
2.3.5 操作条件	17
2.3.6 设计条件	18
2.3.7 容器设计寿命	18
2.3.8 主要受压元件的材料	18
2.3.9 载荷条件	18
2.3.10 其他附加说明和要求	18
2.4 设计文件	18
2.4.1 规格书（设计任务书）	19
2.4.2 计算书	19
2.4.3 图样	19
2.4.4 说明书	20
2.4.5 图面技术要求	20



2.4.6 图面其他内容 .....	21	3.4.1 各国主要压力容器标准的性质和地位 .....	40
2.5 法规、标准、工程规定 .....	22	3.4.2 世界各国压力容器分类的原则 .....	41
2.5.1 法规 .....	22	3.4.3 各国主要标准的压力适用范围 .....	41
2.5.2 技术标准——国家标准、行业标准 .....	22	3.5 我国压力容器标准化工作现状 .....	42
2.5.3 技术标准——企业标准 .....	23	3.6 我国主要压力容器建造标准简介 .....	44
2.5.4 项目设计规定 .....	24		
2.5.5 压力容器设计任务书 .....	24	<b>第4章 压力容器设计基础</b>	
2.6 压力容器图样设计工作流程 .....	24	4.1 压力容器的失效模式 .....	47
2.7 压力容器设计管理制度 .....	25	4.2 GB 150—1998《钢制压力容器》 的适用范围 .....	47
2.8 正确使用法规、标准规范 .....	26	4.2.1 适用范围 .....	48
2.8.1 法规与标准规范的关系 .....	26	4.2.2 不适用范围 .....	48
2.8.2 正确使用标准规范 .....	26	4.3 超出标准规定范围的设计问题 .....	48
<b>第3章 压力容器法规和标准</b>		4.4 设计载荷条件 .....	49
3.1 压力容器的安全监察 .....	28	4.4.1 设计时应该考虑的载荷 .....	49
3.1.1 我国压力容器的基本状况 .....	28	4.4.2 载荷的组合原则 .....	49
3.1.2 我国压力容器安全监察体制 .....	28	4.5 压力容器设计寿命 .....	49
3.1.3 工业发达国家压力容器制度 .....	30	4.6 压力 .....	50
3.2 现行压力容器安全监察法规、 规范介绍 .....	30	4.6.1 基本概念 .....	50
3.2.1 《特种设备安全监察条例》 .....	30	4.6.2 工作压力 .....	51
3.2.2 《锅炉压力容器制造监督管 理办法》(国家质量监督检 验检疫总局第22号令) .....	31	4.6.3 设计压力 .....	51
3.2.3 《锅炉压力容器制造许可条件》 .....	33	4.6.4 计算压力 .....	51
3.2.4 《锅炉压力容器制造许可工作程序》 .....	34	4.6.5 试验压力 .....	51
3.2.5 《锅炉压力容器产品安全性能 监督检验规则》 .....	34	4.6.6 最大允许工作压力 .....	51
3.2.6 《压力容器压力管道设计单位 资格许可与管理规则》 .....	35	4.6.7 安全泄放装置的动作压力 .....	52
3.2.7 《压力容器安全技术监察规程》 .....	35	4.7 温度 .....	52
3.2.8 《超高压容器安全监察规程》(试行) .....	36	4.7.1 金属温度 .....	52
3.2.9 《医用氧舱安全管理规定》 .....	36	4.7.2 工作温度 .....	53
3.2.10 《气瓶安全监察规定》 .....	36	4.7.3 设计温度 .....	53
3.2.11 《气瓶安全监察规程》 .....	36	4.7.4 试验温度 .....	53
3.2.12 《溶解乙炔气瓶安全监察规程》 .....	37	4.8 厚度 .....	53
3.2.13 《液化气体汽车罐车安全监察规程》 .....	37	4.8.1 计算厚度 .....	53
3.3 压力容器建造标准规范 .....	37	4.8.2 设计厚度 .....	53
3.3.1 压力容器建造标准的基本内容 .....	38	4.8.3 名义厚度 .....	53
3.3.2 压力容器标准化体系 .....	39	4.8.4 有效厚度 .....	53
3.3.3 加入WTO对我国标准化工作的影响 .....	40	4.8.5 钢材厚度 .....	53
3.4 压力容器国内外标准简介 .....	40	4.8.6 最小成形厚度 .....	54
		4.8.7 壳体加工成形后不包括腐蚀 裕量的最小厚度 .....	54
		4.9 厚度附加量 .....	54
		4.9.1 腐蚀裕量 .....	55
		4.9.2 钢材厚度负偏差 .....	55

4.9.3 加工裕量 .....	55	5.6.2 典型钢号的金相组织 .....	77
4.10 许用应力 .....	56	5.6.3 焊接接头的金相组织 .....	77
4.10.1 确定许用应力的系数 .....	56	5.6.4 晶粒度及夹杂物 .....	79
4.10.2 许用应力的规定 .....	56	5.7 金属材料的腐蚀类型及其试验方法 .....	80
4.11 焊接接头系数 .....	57	5.7.1 均匀腐蚀 .....	80
4.11.1 焊接接头系数的基本规定 .....	57	5.7.2 点腐蚀 .....	80
4.11.2 焊接接头系数选取的基本要求 .....	57	5.7.3 晶间腐蚀 .....	80
4.12 压力试验 .....	58	5.7.4 缝隙腐蚀 .....	81
4.12.1 耐压试验 .....	58	5.7.5 应力腐蚀 .....	81
4.12.2 气密性试验 .....	60	5.7.6 其他腐蚀 .....	82
4.13 耐压试验免除问题 .....	60		
4.14 材料代用问题 .....	60	<b>第6章 压力容器用材料</b>	
<b>第5章 材料基础知识</b>		6.1 压力容器用钢板 .....	83
5.1 钢材生产基本知识 .....	62	6.1.1 碳素结构钢板 .....	83
5.1.1 炼钢炉 .....	62	6.1.2 低合金高强度钢板 .....	84
5.1.2 炉外精炼 .....	62	6.1.3 低温钢板 .....	85
5.1.3 脱氧工艺 .....	63	6.1.4 中温抗氢钢板 .....	86
5.1.4 几个基本术语 .....	64	6.1.5 不锈钢板 .....	87
5.1.5 钢材分类 .....	64	6.1.6 不锈钢复合钢板 .....	88
5.1.6 钢材的热处理 .....	65	6.2 压力容器用钢管 .....	89
5.2 钢材的常用合金元素及其主要作用 .....	66	6.2.1 碳素结构钢和低合金高强度钢管 .....	89
5.3 钢材的物理性能及其试验方法 .....	67	6.2.2 低温钢管 .....	89
5.3.1 密度 .....	67	6.2.3 中温抗氢钢管 .....	90
5.3.2 线膨胀系数 .....	67	6.2.4 不锈钢管 .....	91
5.3.3 弹性模量 .....	68	6.3 压力容器用锻件 .....	91
5.3.4 泊松比 .....	68	6.3.1 碳素钢和低合金钢锻件 .....	91
5.3.5 临界点 .....	68	6.3.2 低温钢锻件 .....	93
5.4 力学性能及其试验方法 .....	68	6.3.3 不锈钢锻件 .....	93
5.4.1 拉伸试验 .....	69	6.3.4 锻件的质量级别和公称厚度 .....	94
5.4.2 蠕变及持久试验 .....	69	6.4 压力容器用棒钢 .....	95
5.4.3 硬度试验 .....	70	6.4.1 螺柱用碳素钢和低合金钢棒钢 .....	95
5.4.4 冲击试验 .....	71	6.4.2 螺柱用低温钢棒钢 .....	96
5.4.5 落锤试验 .....	73	6.4.3 螺柱用不锈钢棒钢 .....	96
5.4.6 裂纹尖端张开位移 (CTOD) 试验 .....	73	6.4.4 螺母用棒钢 .....	96
5.4.7 J 积分试验 .....	73	6.5 压力容器用焊接材料及其选择 .....	96
5.5 工艺性能及其试验方法 .....	74	6.5.1 压力容器用焊接材料 .....	96
5.5.1 压力加工工艺简介 .....	74	6.5.2 焊接材料选择原则 .....	97
5.5.2 冷加工工艺性能及其试验方法 .....	75	6.6 压力容器用有色金属及其合金 .....	97
5.5.3 焊接性能 .....	75	6.6.1 铝及其合金 .....	97
5.6 金相组织及其试验方法 .....	76	6.6.2 钛及其合金 .....	98
5.6.1 钢中常见的金相组织 .....	76	6.6.3 铜及其合金 .....	100
		6.6.4 镍及其合金 .....	100

6.7 高性能压力容器用钢简介 .....	101	7.6.2 圆平板 .....	128
6.7.1 调质高强度钢 .....	101	7.6.3 圆环板(环形平板) .....	130
6.7.2 0.5Ni 低温钢 .....	102	7.6.4 圆环 .....	131
6.7.3 中温抗氢钢 .....	102	7.7 回转壳体的无力矩理论 .....	131
<b>第7章 工程力学基础知识</b>		7.7.1 回转薄壁壳体的几何特性 .....	131
7.1 拉伸、压缩和材料的几个		7.7.2 无力矩理论的基本方程和计算实例 .....	132
<b>基本力学性质</b> .....	105	7.7.3 无力矩理论应用条件 .....	135
7.1.1 拉伸、压缩应力 .....	105	7.8 回转壳的有力矩理论和边缘问题 .....	136
7.1.2 应变、虎克定律、泊松比 .....	106	7.8.1 受轴对称载荷的薄圆柱壳 .....	136
7.1.3 材料拉伸时的力学性能 .....	106	7.8.2 壳体的变形和内力 .....	137
7.1.4 拉、压下材料的强度条件 .....	107	7.8.3 求解不连续回转壳体 .....	138
7.2 <b>直梁的弯曲</b> .....	107	7.8.4 计算实例 .....	139
7.2.1 弯曲的概念、剪力、弯矩 .....	107	7.9 <b>应力分析概念</b> .....	141
7.2.2 梁弯曲时的正应力、截面惯性矩、		7.9.1 理想弹塑性体 .....	141
抗弯截面模量 .....	109	7.9.2 名义应力(虚拟应力) .....	141
7.2.3 梁变形曲线的近似微分方程 .....	110	7.9.3 热应力 .....	142
7.2.4 梁弯曲的强度条件 .....	110	7.9.4 弹性失效设计准则和塑性失效	
7.3 <b>剪切、挤压和扭转</b> .....	113	设计准则, 极限设计 .....	143
7.3.1 剪切的基本概念 .....	113	7.9.5 自限性与非自限性 .....	144
7.3.2 挤压的概念 .....	114	7.9.6 安定性概念 .....	144
7.3.3 剪切虎克定律 .....	114	7.9.7 常规设计 .....	145
7.3.4 圆轴扭转时的强度条件 .....	114	7.9.8 分析设计 .....	145
7.4 <b>压杆和受外压壳体的稳定性</b> .....	115	7.9.9 断裂力学在压力容器领域的应用 .....	146
7.4.1 细长压杆稳定问题 .....	115	7.9.10 容器中的热应力棘轮作用 .....	146
7.4.2 侧向外压和轴向载荷下薄壁圆筒		7.10 <b>分析设计</b> .....	147
的稳定问题 .....	116	7.10.1 基本概念和应力分类根据 .....	147
7.4.3 受外压薄壁球壳的稳定性 .....	117	7.10.2 应力分类 .....	148
7.4.4 非弹性失稳 .....	118	7.10.3 对各类应力的限制 .....	150
7.5 <b>弹性力学和有限单元法基本知识</b> .....	118	7.11 <b>疲劳设计的概念</b> .....	150
7.5.1 三向应力状态下应力分量 .....	118	7.11.1 有关交变应力的基本概念 .....	151
7.5.2 三向应力状态下应变分量 .....	119	7.11.2 低循环疲劳曲线 .....	151
7.5.3 主应力与主应变 .....	120	7.11.3 平均应力的影响及修正 .....	152
7.5.4 弹性力学三类基本方程 .....	120	7.11.4 安全系数 .....	152
7.5.5 强度条件 .....	121	7.11.5 累积损伤问题 .....	153
7.5.6 平面问题 .....	122	7.11.6 疲劳强度减弱系数 .....	153
7.5.7 轴对称条件下圆柱坐标的表达式 .....	123	7.12 <b>机械振动</b> .....	153
7.5.8 有限单元法基本知识 .....	124	7.12.1 单自由度系统振动 .....	154
7.5.9 厚壁圆筒和厚壁球壳的弹性应力 .....	125	7.12.2 多自由度系统振动 .....	156
7.5.10 应力集中 .....	126	7.12.3 分布系统的振动 .....	158
7.6 <b>圆平板、圆环板、圆环</b> .....	128	7.12.4 单转子轴的临界转速 .....	161
7.6.1 薄板与厚板 .....	128	<b>第8章 内压元件——圆筒和球壳</b>	

8.1 厚度计算公式	163	面积的校核	186
8.1.1 圆筒计算公式及适用范围	163	9.7.3 锥壳与圆筒壳连接处惯性矩校核	187
8.1.2 球壳计算公式及适用范围	163	9.8 带有夹套结构容器的设计计算	191
8.2 中径公式的导出	164	<b>第 10 章 受压元件——封头</b>	
8.2.1 圆筒中径公式	164	10.1 封头的种类和型式	193
8.2.2 球壳中径公式	165	10.2 椭圆形封头	194
8.2.3 以外径表示的中径公式	165	10.2.1 薄膜应力	194
8.3 内压圆筒及球壳应力公式比较	166	10.2.2 边缘应力	194
8.4 厚度公式依据的强度理论	166	10.2.3 厚度计算公式	195
8.5 焊接接头系数	166	10.2.4 压力作用下的稳定性	195
8.5.1 圆筒厚度计算公式中的焊接 接头系数	166	10.3 碟形封头	196
8.5.2 球壳厚度计算公式中的焊接 接头系数	167	10.3.1 薄膜应力	196
8.6 薄壁容器与厚壁容器的区分及 其设计理论基础	167	10.3.2 边缘应力	197
8.7 组合式壳体结构的壁厚计算	167	10.3.3 厚度计算公式	198
8.7.1 复合钢板壳体	167	10.3.4 压力作用下的稳定性	198
8.7.2 多层包扎、热套壳体	167	10.4 球冠形封头	198
8.7.3 衬里壳体	167	10.4.1 球冠形封头的受力概况	198
8.8 圆筒与球壳的连接结构	168	10.4.2 厚度计算公式	199
<b>第 9 章 外压元件——圆筒、球壳和锥壳</b>		10.4.3 圆筒加强段	199
9.1 外压容器的稳定性问题	169	10.4.4 球冠形封头的外压设计	199
9.2 $\frac{D_o}{\delta} \geq 20$ 外压圆筒的失稳	169	10.5 锥形封头	199
9.2.1 弹性失稳的理论计算方法	169	10.5.1 锥壳	200
9.2.2 工程计算方法	171	10.5.2 锥壳加强段	200
9.2.3 工程计算方法中若干问题的说明	173	10.5.3 折边锥壳	201
9.3 $\frac{D_o}{\delta_c} < 20$ 的外压圆筒的失稳	177	10.5.4 锥形封头的外压稳定	202
9.3.1 GB 150 计算方法	177	10.6 圆平盖	202
9.3.2 国外标准计算方法及其比较	178	10.6.1 圆平板受力特点	202
9.4 外压圆筒加强圈	180	10.6.2 厚度计算公式	202
9.4.1 加强圈所需惯性矩	180	10.6.3 螺栓垫片联连的圆平盖	203
9.4.2 组合惯性矩计算	180	10.6.4 中心开孔的圆平盖	204
9.4.3 加强圈的结构要求	182	10.7 带法兰球冠形封头	204
9.5 轴向受压圆筒失稳计算	182	10.7.1 球冠	204
9.6 外压球壳失稳计算	183	10.7.2 法兰环	204
9.7 外压锥形壳体失稳计算	184	<b>第 11 章 开孔和开孔补强</b>	
9.7.1 圆锥壳的外压失稳	184	11.1 GB 150 规定的开孔及其 补强的适用范围	206
9.7.2 锥壳与圆筒壳连接处承载		11.1.1 适用开孔形状	206
		11.1.2 适用开孔范围	206
		11.2 开孔补强的结构型式及适用条件	206
		11.2.1 补强圈补强	206

11.2.2	整体补强	206
11.3	壳体开孔边缘的应力及补强准则	207
11.3.1	壳体开孔边缘的应力	207
11.3.2	GB 150 壳体开孔补强准则	207
11.4	内压壳体的开孔补强—— 等面积补强法	207
11.4.1	等面积补强法的补强原理	207
11.4.2	等面积补强法所需补强面积	208
11.4.3	开孔计算直径与壳体计算厚度	208
11.4.4	有效补强范围	209
11.5	外压壳体的开孔补强	210
11.5.1	外压壳体开孔补强的所需补强面积	210
11.5.2	开孔计算直径与壳体计算厚度	210
11.5.3	有效补强范围	210
11.6	平盖开孔补强	210
11.6.1	开孔率小于或等于 0.5 的开孔补强	210
11.6.2	开孔率大于 0.5 的开孔	211
11.7	等面积补强法与压力面积 补强法的比较	211

## 第 12 章 法兰连接

12.1	螺栓法兰连接的工作原理和密封性能	213
12.1.1	工作原理	213
12.1.2	法兰密封的影响因素	214
12.2	螺栓法兰连接的设计内容	214
12.3	法兰分类	214
12.3.1	总体结构分类	215
12.3.2	按垫片布置情况分类	215
12.3.3	按整体性程度分类	215
12.3.4	按法兰环与筒体的连接结构分类	215
12.4	法兰密封面型式	216
12.5	垫片设计	217
12.5.1	垫片种类	217
12.5.2	垫片宽度	218
12.5.3	垫片参数	218
12.5.4	垫片压紧力的确定	219
12.6	螺栓设计	219
12.6.1	螺栓面积的确定	219
12.6.2	螺栓的配置	220
12.6.3	螺栓设计载荷	220
12.7	法兰设计	220
12.7.1	法兰力矩	220

12.7.2	法兰应力及强度校核条件	221
12.8	法兰连接的合理设计	224
12.9	法兰结构尺寸对法兰应力的影响	224
12.9.1	法兰环厚度对法兰应力的影响	224
12.9.2	锥颈尺寸对法兰应力的影响	224
12.10	法兰尺寸的调整	224
12.11	外压法兰与宽面法兰	225
12.11.1	外压法兰	225
12.11.2	宽面法兰	225
12.12	筒体端部	225

## 第 13 章 波形膨胀节

13.1	压力容器用膨胀节的型式	227
13.2	单层与多层波纹管	228
13.3	波纹管的材料选用原则	228
13.4	波纹管的应力状况	229
13.5	膨胀节设计计算	230
13.5.1	应力计算及其校核	230
13.5.2	波纹管刚度	232
13.5.3	平面失稳概念	232
13.5.4	膨胀节几何参数的调整	233
13.6	膨胀节的疲劳寿命	233
13.7	累积损伤	235
13.8	膨胀节的成形方法	235
13.9	膨胀节的制造质量控制	236
13.9.1	管坯的质量控制	236
13.9.2	U 形波纹管的质量控制	237
13.9.3	膨胀节的质量控制	237
13.10	压力试验与致密性试验	238
13.11	膨胀节性能试验	238
13.11.1	一般规定	238
13.11.2	刚度试验	238
13.11.3	稳定性试验	239
13.11.4	疲劳试验	239
13.12	检验	240
13.12.1	出厂检验	240
13.12.2	型式检验	240
13.13	系数 $C_p$ 、 $C_f$ 、 $C_d$	240

## 第 14 章 超压泄放装置

14.1	超压泄放装置设计概述	245
14.1.1	超压泄放装置的作用及基本要求	245

14.1.2 压力容器设置超压泄放装置 的有关规定 .....	245	15.1.3 典型压力容器制造工艺简介 .....	268
14.1.3 压力容器超压过程行为分析 .....	246	15.1.4 我国压力容器制造行业的发展 .....	268
14.1.4 超压泄放装置设计内容及步骤 .....	247	15.1.5 压力容器设计与制造 .....	269
14.2 安全阀和爆破片装置的选用 .....	247	15.2 压力容器用材料的验收与存放 .....	270
14.2.1 安全阀的结构及性能特点 .....	247	15.2.1 材料质量证明书 .....	270
14.2.2 爆破片装置的结构及性能特点 .....	248	15.2.2 主要受压元件用材料的复验 .....	271
14.2.3 安全阀和爆破片装置的适用条件 .....	249	15.2.3 材料的保存与发放使用 .....	271
14.2.4 安全阀和爆破片装置的组合结构 .....	249	15.2.4 材料标记及标记移植 .....	272
14.3 泄压装置动作压力和容器 设计压力的确定 .....	252	15.3 材料代用 .....	272
14.3.1 定义 .....	252	15.4 划线、下料 .....	273
14.3.2 安全阀的动作性能及制造要求 .....	253	15.4.1 钢材的净化与矫形 .....	273
14.3.3 爆破片的动作性能及制造要求 .....	254	15.4.2 划线 .....	274
14.3.4 泄压装置动作压力与容器 工作压力的比值关系 .....	254	15.4.3 下料 .....	274
14.3.5 泄压装置动作压力和容器 设计压力的确定 .....	255	15.4.4 边缘准备 .....	275
14.4 泄压装置泄放能力及排放 面积的设计计算 .....	258	15.5 圆筒、锥壳的成形 .....	277
14.4.1 泄压装置泄放能力设计 计算的基本要求 .....	258	15.5.1 单层卷焊式筒节的成形 .....	277
14.4.2 发生物理超压过程容器的 安全泄放量 .....	258	15.5.2 锻造筒节的成形 .....	283
14.4.3 发生化学反应超压过程容器 的安全泄放量 .....	259	15.5.3 多层包扎筒节的成形 .....	283
14.4.4 泄压装置理论泄放量计算方法简述 .....	259	15.5.4 热套筒节的成形 .....	286
14.4.5 泄压装置泄放能力及排放 面积设计计算 .....	260	15.6 凸形封头的成形 .....	287
14.5 泄压装置的安装和使用 .....	262	15.6.1 封头成形时的工艺减薄 .....	287
14.5.1 泄压装置的安装位置和安装方向 .....	262	15.6.2 凸形封头的成形 .....	288
14.5.2 泄压装置的进出口管路系统 .....	262	15.6.3 封头成型的主要质量要求 .....	289
14.5.3 截止阀的有关规定 .....	263	15.6.4 关于封头拼焊的规定 .....	291
14.5.4 介质排放口 .....	263	15.6.5 封头的直边高度和直边 部分的纵向皱折 .....	292
14.5.5 管道附加力的影响 .....	263	15.7 焊接接头的分类 .....	292
14.5.6 安全阀的定期检验 .....	263	15.7.1 ASME 关于焊接接头的分类 .....	292
14.5.7 爆破片的定期更换 .....	263	15.7.2 GB 150 关于焊接接头的分类 .....	293
<b>第 15 章 压力容器制造——下料、成形</b>		<b>第 16 章 压力容器制造——焊接</b>	
15.1 压力容器制造概论 .....	265	16.1 压力容器焊接的基本概念 .....	295
15.1.1 压力容器制造的主要特点 .....	265	16.1.1 焊缝形式与接头形式 .....	295
15.1.2 各类零部件的主要制造方法 .....	266	16.1.2 焊缝区、熔合区和热影响区 .....	295
		16.1.3 焊接性能、焊接工艺评定和 焊接工艺规程 .....	298
		16.1.4 焊工考试 .....	300
		16.2 压力容器常用焊接方法及特点 .....	300
		16.2.1 焊条电弧焊 .....	300
		16.2.2 埋弧焊 .....	301
		16.2.3 钨极气体保护焊 .....	301
		16.2.4 熔化极气体保护焊 .....	301

16.2.5 等离子弧焊 .....302

16.2.6 电渣焊 .....302

16.2.7 摩擦焊 .....302

16.2.8 螺柱焊 .....302

16.3 压力容器用材的焊接性能试验 .....303

16.3.1 使用焊接性能试验 .....303

16.3.2 工艺焊接性能试验 .....304

16.4 压力容器用焊接材料 .....304

16.4.1 焊条 .....305

16.4.2 焊丝 .....308

16.4.3 焊剂 .....310

16.4.4 气体 .....311

16.5 压力容器焊接设计 .....311

16.5.1 焊接方法选用 .....311

16.5.2 焊接材料选用 .....311

16.5.3 焊接坡口设计和接头设计 .....312

16.5.4 预热、层间温度和后热 .....313

16.6 焊接施工 .....313

16.6.1 焊接电流、电弧电压与焊接速度 .....313

16.6.2 焊透 .....314

16.6.3 单面焊双面成形 .....314

16.7 压力容器焊后热处理 .....314

16.8 压力容器焊接检验 .....314

16.8.1 焊接质量主要问题 .....314

16.8.2 焊接检验特点 .....315

16.8.3 焊接缺陷及危害 .....315

16.8.4 焊接检验主要方面 .....315

16.9 容器建造标准对焊接的有关要求 .....318

16.9.1 产品焊接试板 .....319

16.9.2 余高 .....320

16.9.3 咬边 .....321

16.9.4 焊接返修的要求 .....322

16.9.5 B类焊接接头鉴证环 .....323

**第 17 章 压力容器制造——热处理**

17.1 焊后（消除应力）热处理 .....325

17.1.1 压力容器焊后热处理的目的 .....325

17.1.2 焊接应力的产生、特点及危害 .....326

17.1.3 需进行焊后热处理的条件 .....326

17.1.4 焊后热处理的方法 .....328

17.1.5 焊后热处理工艺与操作 .....329

17.2 恢复材料力学性能热处理 .....330

17.2.1 加工硬化产生的原因及危害 .....330

17.2.2 需恢复力学性能热处理的条件 .....330

17.2.3 冷成形封头的热处理 .....331

17.3 消氢处理 .....331

17.4 改善材料力学性能热处理 .....331

**第 18 章 压力容器制造——无损检测**

18.1 无损检测（NDT/NDE）基本概念 .....333

18.1.1 无损检测的主要目的 .....333

18.1.2 无损检测方法的选择 .....333

18.2 目视检测 .....333

18.2.1 按检测范围划分 .....334

18.2.2 按制造工艺过程划分 .....334

18.3 射线检测 .....334

18.3.1 射线检测原理和特点 .....334

18.3.2 射线透照检测技术 .....335

18.3.3 射线透照方式 .....336

18.3.4 压力容器焊接接头的射线检测质量等级 .....337

18.4 超声检测 .....338

18.4.1 超声检测原理和特点 .....338

18.4.2 超声检测灵敏度 .....339

18.4.3 各类型工件的超声检测 .....340

18.4.4 压力容器焊接接头超声检测 .....341

18.5 磁粉检测 .....342

18.5.1 磁粉检测原理和特点 .....342

18.5.2 磁粉检测方法 .....342

18.5.3 检测灵敏度 .....342

18.5.4 压力容器焊接接头磁粉检测 .....342

18.6 渗透检测 .....343

18.6.1 渗透检测原理和特点 .....343

18.6.2 渗透检测基本程序 .....343

18.6.3 表面准备 .....343

18.6.4 压力容器焊接接头渗透检测 .....343

18.7 涡流检测 .....344

18.7.1 涡流检测原理和特点 .....344

18.7.2 检测系统 .....344

18.7.3 对比试样 .....344

18.7.4 质量等级评定 .....344

18.8 声发射检测 .....344

18.8.1 声发射检测原理 .....344

18.8.2 声发射检测的特点 .....345

18.8.3 声发射检测的主要用途 .....	345	19.4.3 分片、分段出厂容器运输包装 的特殊要求 .....	360
18.9 泄漏检测 .....	345	19.4.4 有特殊要求容器的运输包装 .....	360
18.9.1 泄漏检测 .....	345	19.4.5 法兰接口、待焊坡口及螺纹 接口的运输包装 .....	360
18.9.2 气密性试验 .....	345	19.4.6 运输方式及超限运输 .....	361
18.9.3 氨渗透试验 .....	346		
18.9.4 卤素检漏试验 .....	346	<b>第 20 章 低温压力容器</b>	
18.9.5 氦检漏试验 .....	346	20.1 低温脆性断裂 .....	362
18.9.6 其他方法 .....	346	20.1.1 低温脆性断裂的基本特征 .....	362
18.10 容器建造标准对无损检测 的有关要求 .....	346	20.1.2 低温脆性断裂机理 .....	363
18.10.1 何时进行无损检测 .....	346	20.2 钢材的低温韧性 .....	363
18.10.2 无损检测方法的选择 .....	347	20.2.1 夏比 V 型缺口冲击试验 .....	364
18.10.3 A、B 类焊接接头无损检 测率的选择 .....	347	20.2.2 落锤试验 .....	365
18.10.4 不同无损检测方法的相互复查 .....	348	20.2.3 其他试验方法 .....	365
18.10.5 正确执行局部(射线或超声)检测 .....	349	20.3 影响钢材低温韧性的因素 .....	365
18.10.6 表面无损检测的有关要求 .....	349	20.3.1 化学成分 .....	365
18.10.7 设计对无损检测的特殊要求 .....	350	20.3.2 冶炼方法 .....	366
		20.3.3 轧制工艺 .....	366
<b>第 19 章 压力容器制造——试验、验收</b>		20.3.4 钢板厚度 .....	366
19.1 压力试验 .....	352	20.3.5 冶金缺陷 .....	366
19.1.1 试验目的 .....	352	20.3.6 其他 .....	366
19.1.2 压力试验的分类 .....	352	20.4 低温压力容器的设计温度 .....	367
19.1.3 对试验介质及试验用压力表的要求 .....	353	20.4.1 受压元件的金属温度 .....	367
19.1.4 试验温度 .....	353	20.4.2 低温压力容器的设计温度 .....	367
19.1.5 压力试验的操作 .....	354	20.4.3 盛装液化气体的压力容器 .....	368
19.1.6 压力试验的检查、合格标准以及 试验后的无损检测 .....	354	20.5 低温冲击试验要求 .....	369
19.1.7 某些容器压力试验时的特殊要求 .....	355	20.5.1 冲击试验温度和冲击功指标 .....	369
19.1.8 无法进行压力试验的容器 .....	355	20.5.2 低温低应力工况 .....	370
19.2 气密性试验 .....	355	20.6 低温压力容器用材料 .....	370
19.2.1 试验目的及进行气密性试验的条件 .....	355	20.6.1 常用 GB 150 低温钢材 .....	370
19.2.2 气密性试验的操作 .....	356	20.6.2 常用 ASME 低温钢材 .....	371
19.2.3 气密性试验有关问题的说明 .....	357	20.6.3 选用低温钢材的原则要求 .....	373
19.3 压力容器的表面处理 .....	357	20.7 低温压力容器的结构设计特点 .....	374
19.3.1 焊接接头的外形修磨 .....	357	20.8 低温压力容器制造检验特点 .....	375
19.3.2 表面除锈 .....	358	20.8.1 对原材料要求 .....	375
19.3.3 涂敷防腐涂料 .....	359	20.8.2 加工成型 .....	375
19.3.4 不锈钢容器表面处理的特殊要求 .....	359	20.8.3 焊接 .....	375
19.4 压力容器的运输包装 .....	359	20.8.4 产品焊接试板 .....	376
19.4.1 容器的包装形式 .....	360	20.8.5 检验 .....	376
19.4.2 整体出厂容器的运输包装 .....	360	20.9 低温压力容器实例 .....	376



## 第 21 章 铬钼钢制压力容器

21.1 铬钼钢应用	381
21.1.1 耐热钢	381
21.1.2 抗氢钢	381
21.2 铬钼钢品种	382
21.2.1 铬钼钢的主要化学成分和力学性能	382
21.2.2 常用 ASME 铬钼钢	383
21.3 铬钼钢的主要特性	383
21.3.1 耐热性	383
21.3.2 抗氢腐蚀	384
21.3.3 回火脆性	387
21.4 铬钼钢制压力容器结构设计	390
21.4.1 开口与接管	390
21.4.2 附件连接	390
21.4.3 裙座(支座)与器壁的连接	391
21.4.4 保温支撑	391
21.5 铬钼钢制压力容器制造中的特殊要求	391
21.5.1 热处理	391
21.5.2 延迟裂纹敏感性及其防止措施	392
21.5.3 回火参数对铬钼钢性能的影响	392
21.5.4 制造过程中的检测	393
21.6 铬钼钢制压力容器使用注意事项	394
21.7 压力容器用铬钼钢最近进展	394
21.7.1 改进型铬钼钢	394
21.7.2 外国规范和标准对铬钼钢的附加要求	395
21.8 工程实例	395

## 第 22 章 卧式容器

22.1 支座形式及设置	398
22.2 设计载荷	399
22.3 载荷分析和内力分析	399
22.3.1 均布载荷 $q$ 和支座反力 $F$	399
22.3.2 竖直剪力 $V$ 和力偶 $M$	399
22.3.3 弯矩和剪力	401
22.4 卧式容器壳体应力计算	402
22.4.1 计算步骤	402
22.4.2 圆筒体的轴向应力及其位置	402
22.4.3 筒体切向剪应力	403
22.4.4 封头应力校核	404

22.4.5 支座处圆筒体的周向应力	405
22.5 鞍座设计	407
22.5.1 腹板有效截面内水平平均拉应力	408
22.5.2 容器轴向载荷引起的鞍座压应力	408
22.5.3 强度校核	409
22.6 鞍座卧式容器的合理化设计	409
22.6.1 鞍座轴向位置	409
22.6.2 鞍座结构尺寸	409
22.6.3 加强圈的设置	410
22.7 有附加载荷作用时卧式容器的强度校核	410
22.8 三支座卧式容器的强度校核	410
22.8.1 截面弯矩	410
22.8.2 支座反力	411
22.8.3 圆筒体的应力校核	412
22.9 支座高度偏差或基础不均匀沉降	412
22.9.1 支点高度位移的三弯矩方程	412
22.9.2 三支座卧式容器附加弯矩	413
22.9.3 强度校核	414
22.10 圈座支承的卧式容器	414
22.11 有三角支承加强圈的圆筒体	414
22.12 埋地卧式容器的设计计算	415
22.12.1 混凝土层对圆筒体静压力	415
22.12.2 混凝土层对圆筒体的附加载荷	416

## 第 23 章 塔式容器

23.1 设计基础	418
23.1.1 适用范围	418
23.1.2 设计压力及设计温度	419
23.1.3 设计载荷与计算工况	419
23.1.4 腐蚀裕量与最小厚度	419
23.1.5 材料和许用应力	420
23.1.6 载荷组合系数 $K$	420
23.2 裙座结构	420
23.2.1 裙座壳形式及选用原则	421
23.2.2 裙座与塔体的连接型式	421
23.2.3 检查孔、引出孔和隔气圈	422
23.3 自振周期	422
23.3.1 计算模型	422
23.3.2 分段及质量集中	422
23.3.3 影响自振周期的因素	423
23.4 地震载荷	423