

丁伯民 编著

# 钢制压力容器

— 设计 制造与检验

GANGZHI YALI RONGQI



华东化工学院出版社

# 钢制压力容器

—设计、制造和检验

丁伯民 编著

华东化工学院出版社

(沪)新登字 208 号

**钢制压力容器**

——设计、制造和检验

Gangzhi Yali Rongqi

丁伯民 编著

华东化工学院出版社出版

(上海市梅陇路 130 号)

新华书店上海发行所发行

浙江上虞科技外文印刷厂排版

江苏省大丰县印刷二厂印刷

开本 850×1168 1/32 印张 17.625 字数 472 千字

1992年 6 月第 1 版 1992 年 6 月第 1 次印刷

印数: 1-5000册

---

ISBN7·5628·0197·5/TH·8 定价: 13.50元

## 内 容 提 要

本书为压力容器方面的专著。在介绍必要的基础理论之后,针对国内外压力容器标准中设计、制造和检验的公式和规定,分析其基本前提、制订依据、适用范围和安全裕度,阐述设计公式和制造、检验规定的相互关系,并对现行压力容器规范进行讨论、比较,帮助压力容器设计、制造、检测检验人员从总体上加深对压力容器选材、结构、计算、制造和检验各环节的理解,以确保压力容器的安全可靠。

本书可供从事压力容器设计、制造、检测、检验和安全监察的人员全面理解压力容器构造的各个方面;也可作为压力容器设计、制造、检测检验人员或化工机械及相关专业师生技术进修的参考教材。

## 前 言

为确保压力容器的安全使用,必须在钢材选用、结构、强(刚)度计算、制造工艺和尺寸误差、检验、试验甚至使用等所有环节上相互配合,丝丝入扣,层层把关。在这些方面,我国已经制订并颁布了相应的安全监察法规、规程及标准,逐步完善了从设计、制造到检测、检验的一整套质量管理和安全监察体系。

正因为压力容器的安全性和诸多环节有关,而这些环节往往由不同的部门或单位分段实施,所以工程技术人员在实施有关法规、规程和标准时就更需要深入理解有关计算公式和规定条文的基本前提、制订依据、适用范围和条件、近似程度和安全裕度,以及设计公式和制造、检验规定间的相互关系,以便更全面地分析和思考问题,从总体上保证压力容器所必须具有的安全性能。

本书系根据本人近几年来在有关压力容器设计、制造和检测检验的工程技术人员技术进修班上的讲解心得以及对国内外有关规范进行剖析后的理解材料整理编写。本书以读者已经熟悉压力容器及其零部件的结构类型为基础,通过对国内外规范、标准中有关设计公式、结构规定、制造允差、检验试验要求的分析,从理论角度把这些因素和压力容器的应力分析、强(刚)度失效建立直接或间接的联系,目的在于树立保证压力容器安全性能的总体思想。

本书承化工部设备设计技术中心站站站长洪德晓高级工程师审阅,华东化工学院化工机械研究所曹桂馨副教授审阅了其中的部分章节。华东化工学院化学工程研究所涂晋林教授、上海市机械工程学会压力容器专业委员会在本书的编写和出版过程中均对作者以大力支持和帮助,并提出不少宝贵意见,在此一并表示衷心感谢。

由于本人主要从事压力容器设计的教学工作,虽与从事压力容器工作的工程技术人员广有接触,从中了解一些实际问题,但在实践经验上终究和长期从事压力容器设计、制造、检测、检验第一

线的广大工程技术人员有所差距,所以本书难免存在不当之处,恳切希望同行专家和广大读者批评指正。

丁伯民

分类号: TH49/2-4  
编号: 338

## 序

压力容器在工业领域中被广泛应用,在化工及石油化工行业中更不可或缺。压力容器与人民生命财产的安全休戚相关。因此各个部门对容器的安全性特别重视。

压力容器构造,即从提出设计参数,选材,结构选型,强度、刚度计算到制造、检验的各个阶段,都受相应的标准、规程、技术条件的制约,以确保容器的安全运行。但是这些标准、规程及技术条件只能起到宏观控制,并对主要方面作出一些确保安全的最低要求,不可能包罗万象,面面俱到。如何使从事压力容器构造各个阶段工作的工程技术人员对这些标准、规程、技术条件有一全面的理解,从而达到正确合理地应用,是保证容器安全运行的更高一个层次。本书的编写即着眼于这个方面。

本书先从压力容器有关的基本理论出发,尽可能深入浅出地阐明容器各个元件强、刚度计算公式的来源,使读者能知其所以然;再进一步介绍了容器构造的各个方面,即设计、选材、结构、制造、检验间的相互关系,使得这些要求的应用成为有机的联系;最后对各国现行容器规范的主要差异作了阐述,使读者能掌握容器构造的全貌,确保容器的安全运行。

由于作者长期从事化工机械与设备的教学工作,多年来对容器规范的进展比较重视,了解工程技术人员对容器构造各个领域的要求,且对本书编写有明确的目标,因此本书一定能得到广大从事容器构造的工程技术人员欢迎。

洪德晓

# 目 录

## 第一篇 理论基础

<b>1 弹塑性力学基础</b> .....	( 1 )
1.1 轴对称平面问题的基本方程 .....	( 3 )
1.1.1 轴对称问题的基本方程 .....	( 3 )
1.1.2 平面问题 .....	( 7 )
1.1.3 轴对称平面问题的基本方程 .....	( 9 )
1.2 球对称问题的基本方程 .....	(11)
1.3 弹性力学的解法举例 .....	(12)
1.3.1 轴对称平面问题的求解 .....	(12)
1.3.2 球对称问题的求解 .....	(24)
1.3.3 圆柱壳和球壳分别在轴对称和球对称温度 场中的温差应力 .....	(25)
1.3.4 矩形截面圆环由沿其中心线均布的力偶而 引起的扭转 .....	(30)
1.4 塑性力学概述 .....	(33)
1.4.1 金属材料的应力-应变曲线 .....	(34)
1.4.2 应力-应变曲线的简化模型 .....	(36)
1.4.3 屈服条件 .....	(39)
1.4.4 加载定理与卸载定理 .....	(43)
<b>2 板壳理论基础</b> .....	(45)
2.1 平板理论 .....	(45)
2.1.1 基本假设 .....	(46)
2.1.2 受轴对称载荷圆形薄板的弯曲微分方程及其 求解 .....	(47)
2.1.3 受轴对称载荷的环板 .....	(57)
2.1.4 矩形薄板 .....	(63)
2.2 回转薄壳理论 .....	(64)



2.2.1	概述	( 64 )
2.2.2	薄壁回转壳体的无力矩理论	( 66 )
2.2.3	无力矩理论在几种典型薄壁回转壳体中的应用	( 73 )
2.2.4	薄壁圆柱壳的有力矩理论和边缘问题	( 83 )

**第二篇 钢制压力容器设计公式来源和制造、  
检验规定的制订依据**

<b>3</b>	<b>压力容器设计中的一般问题</b>	( 108 )
3.1	压力容器的应力分类简述	( 109 )
3.1.1	一次应力	( 111 )
3.1.2	二次应力(符号 $Q$ )	( 112 )
3.1.3	峰值应力(符号 $F$ )	( 112 )
3.2	压力容器的失效准则和破坏方式	( 113 )
3.2.1	失效准则	( 113 )
3.2.2	破坏方式	( 117 )
3.3	压力容器设计综述及某些设计参数的确定	( 119 )
3.3.1	设计压力、设计温度及试验压力	( 121 )
3.3.2	厚度及厚度附加量	( 126 )
3.3.3	许用应力与安全系数	( 127 )
3.3.4	焊缝分类和焊缝系数	( 129 )
3.4	应力分析对压力容器结构设计及制造要求的启示	( 137 )
<b>4</b>	<b>内压圆筒和封头设计</b>	( 141 )
4.1	内压圆筒和内压球壳设计	( 141 )
4.1.1	内压圆筒	( 141 )
4.1.2	内压球壳	( 145 )
4.1.3	内压圆筒和球壳设计中温差应力的考虑	( 146 )
4.2	内压封头设计	( 151 )
4.2.1	椭圆形封头	( 152 )
4.2.2	碟形封头	( 154 )

4.2.3	无拆边球形封头 .....	(156)
4.2.4	锥形封头 .....	(159)
4.2.5	平盖 .....	(174)
<b>5</b>	<b>外压圆筒和封头设计 .....</b>	<b>(180)</b>
5.1	外压容器的失效和受载方式 .....	(180)
5.2	薄壁壳体的稳定性计算 .....	(182)
5.2.1	薄壁圆筒的周向稳定性计算 .....	(182)
5.2.2	薄壁球壳在外压作用时的稳定性计算 .....	(184)
5.2.3	薄壁圆筒在承受轴向压缩载荷时的稳定性 计算 .....	(184)
5.3	外压圆筒设计 .....	(185)
5.3.1	外压圆筒的周向失稳 .....	(186)
5.3.2	圆筒许用轴向压缩应力 .....	(191)
5.4	外压封头设计 .....	(192)
5.4.1	凸形封头(包括半球形、椭圆形、碟形、无折 边球形封头) .....	(192)
5.4.2	锥形封头 .....	(194)
5.5	加强圈设计 .....	(195)
5.5.1	设置加强圈的作用和所需要考虑的问题 .....	(195)
5.5.2	圆筒上的加强圈设计 .....	(196)
5.5.3	锥体与圆筒连接处的加强圈设计 .....	(199)
5.5.4	加强圈结构 .....	(209)
5.6	厚壁外压圆筒设计 .....	(210)
5.6.1	稳定性分析 .....	(210)
5.6.2	强度分析 .....	(212)
5.7	外压圆筒的允许制造公差和试压要求 .....	(213)
5.8	总结 .....	(215)
5.9	外压容器设计中的其他问题 .....	(218)
5.9.1	关于外压容器算图和由此而引起的圆筒形容器 轴向许用压缩应力以及加强圈设计的偏差 .....	(218)

5.9.2	关于作用有附加轴向压缩载荷时的外压 容器设计 .....	(221)
5.9.3	关于外压容器设计中焊缝系数的选取和焊 缝质量的检查 .....	(223)
<b>6</b>	<b>开孔和开孔补强设计 .....</b>	<b>(226)</b>
6.1	开孔及其补强的理论依据 .....	(226)
6.1.1	孔边的应力集中现象 .....	(226)
6.1.2	补强设计准则 .....	(228)
6.2	等面积补强设计 .....	(231)
6.2.1	限制条件 .....	(231)
6.2.2	等面积补强计算 .....	(234)
6.3	开孔补强设计的另一方法——弹塑性失效 补强法 .....	(243)
6.3.1	限制条件 .....	(243)
6.3.2	弹塑性失效补强计算 .....	(245)
6.4	开孔补强结构的合理形式 .....	(247)
6.5	开孔补强设计中的其他问题 .....	(249)
6.5.1	关于应力校正系数 $F$ .....	(249)
6.5.2	关于椭圆孔或长圆孔的补强设计方法 .....	(252)
6.5.3	关于在椭圆形和碟形封头上采用等面积补 强设计时开孔位置的限制 .....	(252)
6.5.4	关于计算由于开孔而削弱的承载截面积 $A$ 和 计算在壳体上除承受载荷所必需之外的多余 截面积 $A_1$ 时对壳体焊缝系数 $\phi$ 的考虑 .....	(254)
6.5.5	圆筒和封头上装有非径向接管时的补强 计算 .....	(255)
6.5.6	关于在焊缝及其附近的开孔以及相应 措施 .....	(256)
<b>7</b>	<b>法兰设计 .....</b>	<b>(257)</b>
7.1	密封设计 .....	(257)

7.1.1	密封原理 .....	(257)
7.1.2	法兰结构 .....	(260)
7.1.3	垫片选择 .....	(264)
7.1.4	密封计算 .....	(264)
7.2	法兰设计计算 .....	(274)
7.2.1	铁木辛柯法 .....	(275)
7.2.2	华脱尔斯法 .....	(281)
7.2.3	宽面法兰计算 .....	(296)
7.3	带法兰的凸形封头设计 .....	(298)
7.3.1	类型 a .....	(300)
7.3.2	类型 b .....	(300)
7.3.3	类型 c .....	(302)
7.3.4	类型 d .....	(305)
7.4	反向法兰和平盖中心开孔直径 $d > \frac{1}{2} D_1$ 时的 平盖设计 .....	(310)
7.4.1	反向法兰 .....	(310)
7.4.2	平盖中心开孔直径 $d > \frac{1}{2} D_1$ 时的平盖设计 .....	(320)
7.4.3	关于反向法兰和中央无接管开大孔平盖之 间相互关系的分析 .....	(331)
8	<b>卧式容器和立式容器设计</b> .....	(336)
8.1	卧式容器及鞍式支座设计 .....	(336)
8.1.1	结构分析 .....	(337)
8.1.2	载荷分析 .....	(337)
8.1.3	各处应力计算及强度校核 .....	(341)
8.1.4	用座圈支承的卧式容器 .....	(363)
8.1.5	双鞍座卧式容器上各项应力的汇总 .....	(365)
8.2	立式容器及裙式支座设计 .....	(365)
8.2.1	结构分析 .....	(370)

8.2.2	载荷分析 .....	(370)
8.2.3	直立容器自振周期和振型介绍 .....	(372)
8.2.4	直立容器所受各项载荷的计算 .....	(374)
8.2.5	不同工况时各种载荷的组合和容器的应力 校核条件 .....	(381)
8.2.6	不同工况下裙座的应力校核及裙座设计 ..	(382)
8.3	有关卧式容器和立式容器设计中的其他问题 ..	(392)
8.3.1	三鞍座卧式容器的设计 .....	(392)
8.3.2	有关直立容器设计的一些问题 .....	(393)
<b>9</b>	<b>非圆形截面容器设计</b> .....	(395)
9.1	非圆形截面容器的结构分析 .....	(395)
9.1.1	结构类型 .....	(395)
9.1.2	焊缝 .....	(399)
9.1.3	开孔和对开孔后引起削弱的考虑 .....	(400)
9.1.4	载荷 .....	(401)
9.2	非圆形截面容器的设计原理 .....	(401)
9.2.1	两端封头对侧板的加强作用 .....	(403)
9.2.2	设置加强件的有关问题 .....	(405)
9.2.3	应力校核条件 .....	(410)
9.2.4	焊缝系数 $\phi$ 和开孔削弱系数 $\eta$ .....	(411)
9.3	非圆形截面容器的设计公式 .....	(412)
9.3.1	无过渡圆弧、无加强件和拉撑的对称矩形 截面容器 .....	(412)
9.3.2	无过渡圆弧、有外加强件的对称矩形截面 容器 .....	(418)
9.4	非圆形截面容器设计中的其他问题 .....	(421)
<b>10</b>	<b>U形膨胀节设计</b> .....	(422)
10.1	要否设置膨胀节的判断 .....	(423)
10.2	U形膨胀节的应力计算 .....	(425)
10.2.1	U形膨胀节结构 .....	(425)

10.2.2	应力计算与校核	(425)
10.2.3	膨胀节的稳定性校核	(437)
10.3	ASME Ⅷ—1 对膨胀节设计的有关规定	(440)
10.3.1	未经加强的膨胀节设计	(440)
10.3.2	经加强的膨胀节设计	(441)
10.4	对膨胀节设计中有关问题的讨论	(443)
<b>11</b>	<b>高压密封设计</b>	<b>(446)</b>
11.1	平垫密封	(446)
11.2	双锥密封	(450)
11.2.1	主螺栓设计	(452)
11.2.2	平盖设计	(456)
11.2.3	筒体端部	(456)
11.3	伍德密封	(457)
11.3.1	密封计算	(458)
11.3.2	元件的强度校核	(459)
11.4	卡扎里密封	(470)
11.4.1	载荷分析	(471)
11.4.2	元件的强度校核	(473)
11.5	八角垫和椭圆垫密封	(481)
11.6	卡箍紧固结构	(482)
11.6.1	密封计算	(482)
11.6.2	元件的强度校核	(483)
11.7	ASME Ⅷ—1 对卡箍连接件的设计	(491)
11.7.1	卡箍连接件的受载分析	(491)
11.7.2	高颈和卡箍的应力分析和强度校核	(498)
<b>12</b>	<b>制造、检验和某些结构规定的有关问题</b>	<b>(503)</b>
12.1	压力容器用钢的基本出发点	(503)
12.2	制造要求及某些结构规定的依据	(504)
12.2.1	焊缝的咬边和余高值控制	(504)
12.2.2	对接焊缝中心线偏移或错边量的控制	(506)

12.2.3	冷热加工成形后的热处理要求·····	(507)
12.2.4	在钢板上截取试样和由钢板制造受压元件 时的取向问题·····	(509)
12.2.5	对低温压力容器选材、结构设计和制造的 特殊考虑·····	(510)
12.2.6	焊缝分类·····	(513)
12.2.7	不同厚度板材对接焊时削薄过渡斜度要求 的制订依据·····	(513)
12.3	压力容器的某些检验和试验要求的制订依据··	(516)
12.3.1	多层容器层板的贴合要求·····	(516)
12.3.2	关于内外压力容器筒体的不圆度、筒体实际 形状与正圆形之间的最大正负偏差值的测 量与控制·····	(524)
12.3.3	关于内压和外压封头有关偏差值的测量与 控制·····	(534)
12.3.4	容器的压力试验·····	(536)
12.3.5	冲击试验和对冲击功的要求·····	(538)
<b>参考文献</b>	·····	<b>(545)</b>

# 第一篇 理论基础

压力容器的强度和刚度计算，虽然建立在材料力学基本理论的基础上，但材料力学和压力容器由于两者所研究的对象不同和材料力学的局限性，使压力容器问题难以用材料力学方法直接求解，压力容器的绝大部分元件都由板壳构成，必须采用弹性力学和板壳理论求解。本篇针对压力容器设计中用到的弹性力学求解结果，如厚壁圆筒和厚壁球壳在内压或外压作用下的应力分析，受拉伸载荷平板上小圆孔周边的应力分析，圆筒和球壳的温差应力分析。矩形截面圆环的扭转分析等，以介绍弹塑性力学基础的形式分析其求解结果；对于压力容器设计中用到的板壳理论求解结果，如圆形薄板和环板的轴对称弯曲，回转薄壁壳体的无力矩和有力矩理论等以介绍板壳理论基础的形式分析其求解结果。本篇的内容仅作为压力容器强度和刚度计算所需要的力学基础，以达到对压力容器各元件的设计公式来源及其使用限制、近似性等有比较透彻的理解，并非系统地介绍弹塑性力学及板壳理论。

## 1 弹塑性力学基础<sup>[1,2,4]</sup>

弹性力学是研究弹性物体在外载(包括力和温度)作用下产生应力、应变和位移的一门科学。弹性力学和材料力学相比，在研究对象、基本假设、研究方法等方面有相同的地方，也有不同的地方。

材料力学基本上只研究杆状构件在拉、压、剪切、弯曲、扭转作用下的应力和应变；而对非杆状构件，例如板壳以及其他实体构件



在外载作用下的应力和应变,或对杆状构件需作进一步的、精确的分析,只能应用弹性力学理论。

弹性力学和材料力学的基本假设相同,即物体的连续性假设、匀质和各向同性假设、完全弹性假设和小变形假设。

采用材料力学求解物体中的应力时,常采用截面法。即假设将物体截开,取截开的一部分物体作为截离体,利用静力平衡条件求取截面上的应力。在弹性力学中,对于一般任意形状的物体,假设其内部由无数个微单元六面体而表面为无数个微单元四面体所组成;对于轴对称形状的物体,则假设由无数个扇形单元体所组成。按这些单元体的静力平衡条件可以列出一组平衡微分方程;按单元体的变形条件可以列出一组几何方程;由于物体在变形后仍保持连续而可列出变形协调或应变连续方程;并可用广义虎克定律表示应力和应变之间的关系,即物理方程;在物体表面上还需考虑内部应力和外部载荷的平衡,即边界条件,这样,就有足够的微分方程来求解未知的应力、应变和位移值。从原则上讲,由弹性力学可以求解任意形状、任意载荷、任意支承条件下物体中任意一点的应力、应变和位移,但是实际上,由于数学上的原因而只能求解某些特定形状、且在特定载荷和特定支承条件下的问题。对于比较复杂的实际问题,则往往把实际物体划分成有限个单元体并根据上述弹性力学的同样原理建立有限个单元体之间的上述各关系,即用有限元等近似方法求解。

由于压力容器的绝大部分元件由圆形板、壳构成,其几何形状、载荷和支承条件都对称于旋转中心轴,从弹性力学角度,属于轴对称问题。对于这类问题,采用圆柱坐标系( $R, \Theta, Z$ )并相应采用扇形微元体远比采用直角坐标系( $X, Y, Z$ )并用平行六面微元体为之方便。本章主要介绍压力容器元件中经常遇到的轴对称平面问题。