

压力容器安全工程学

彭蔚华

熊大彬

编

航空工业出版社

压力容器安全工程学

彭蔚华 熊大彬 编

江苏工业学院图书馆
藏书章

(京)新登字161号

内 容 提 要

压力容器广泛应用于各行各业,它的安全运行不仅影响企业的经营生产,而且也影响人民生命、财产的危险。本书全面系统地论述了压力容器的各种破坏机理、安全运行规律、强度计算方法,并理论联系实际对其缺陷和事故作出评定和分析,以及采取相应的防护措施。

本书内容包括:压力容器概论、压力分析、设计与制造的安全技术要求、安全泄压装置、运行中检查维护及安全管理、断裂力学的应用以及缺陷评定和事故分析。

本书可作为大专院校工程技术专业师生参考用书,也可作为压力容器安全监察人员、检验人员的学习参考书;对设计、制造、使用维护工程技术人员,也具有重要的参考价值。

压力容器安全工程学

彭蔚华 熊大彬 编

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里14号)

一邮政编码:100029—

全国各地新华书店经售

航空工业出版社印刷厂印刷

1993年11月第1版

1993年11月第1次印刷

开本: 787×1092 1/16

印张: 12.375

印数: 1—2 000

字数: 308千字

ISBN 7-80046-570-5/G·093

定价 6.10 元

编 者 说 明

本书针对压力容器的设计、制造、运行和安全管理,全面系统地论述其各种破坏机理、安全运行规律、强度计算方法、防止事故发生的措施及安全使用与管理。并对压力容器的危险性评价、安全工程、设备的安全防范措施、事故发生的预测和人机的安全等作了介绍,为压力容器的安全工程提供重要的理论依据和切实可行的科学方法。可作为大专院校有关专业师生参考用书,也可作为压力容器安全监察人员、检验人员的学习材料,对设计、制造、使用维护工程技术人员也具有重要的参考价值。

本书由彭蔚华编写第一章、第三章、第四章、第五章和第八章,熊大彬编写第二章、第六章和第七章。魏玉霖教授在百忙中进行了审稿,在此深表谢意。

编 者

1992年12月

目 录

第一章 压力容器概论	(1)
1.1 压力容器在国民经济中的地位与作用	(1)
1.2 压力容器安全技术的重要意义	(1)
1.3 压力容器的分类	(3)
1.4 压力容器的构造	(6)
第二章 压力容器的应力分析	(17)
2.1 容器的薄膜应力	(17)
2.2 壳体的不连续应力	(25)
2.3 圆平板的应力分析	(36)
2.4 厚壁圆筒应力分析	(44)
2.5 温差应力	(51)
第三章 压力容器的安全设计与制造的安全技术要求	(56)
3.1 材料选用	(56)
3.2 结构安全设计	(62)
3.3 容器强度设计	(67)
第四章 压力容器安全泄压装置	(80)
4.1 安全泄压装置与安全泄放量	(80)
4.2 安全阀	(84)
4.3 爆破片	(96)
第五章 压力容器的安全管理与定期检验	(105)
5.1 压力容器的使用管理	(105)
5.2 气瓶的使用管理	(107)
5.3 压力容器的定期检验	(112)
第六章 断裂力学在压力容器上的应用	(119)
6.1 断裂力学概述	(119)
6.2 断裂力学的基本判据	(120)
6.3 断裂力学在疲劳裂纹扩展问题中的应用	(131)
6.4 断裂力学在应力腐蚀问题中的应用	(135)
第七章 压力容器的缺陷评定	(139)
7.1 安全评定概述	(139)
7.2 缺陷和缺陷尺寸	(140)
7.3 应力和应变值的确定	(148)
7.4 材料性能数据的确定	(151)
7.5 脆断评定	(153)
7.6 疲劳评定	(155)
7.7 其他失效形式的评定	(157)

7.8 应用实例..... (159)

第八章 压力容器的爆炸危害及其事故分析..... (170)

8.1 压力容器的爆炸能量及其事故危害..... (170)

8.2 压力容器爆炸事故..... (175)

8.3 事故分析方法..... (177)

8.4 防止事故的措施..... (185)

8.5 事故分析方法应用举例..... (188)

主要参考文献..... (192)

第一章 压力容器概论

1.1 压力容器在国民经济中的地位与应用

一个密闭的压力容器，可以是内部承受压力，也可以是外部承受压力。前者是内压力容器，后者是外压力容器。除负压容器外，外压容器的外部必须有一个压力高于大气压的容器，所以这种受外压的壳体往往是内压容器的一个承压部件（例如夹套容器中的内筒），而不单独构成一个容器。压力容器被广泛地应用在工业生产中，几乎没有一个行业能够离开这种设备。它作为一种用于有压流体的贮运装置，或是传热传质的密闭容器，具有各种结构和形式，以满足工业生产的需要。例如：

换热设备——主要用于实现介质的热量交换的设备，如热交换器、蒸发器和废热锅炉等；

反应设备——主要用来完成介质的化学反应的设备。如反应器、聚合釜和合成塔等；

分离设备——主要用于对混合物料进行分离的设备。如分馏塔、吸收塔、稳定塔和分离器等；

贮运设备——即盛装物料的容器。常用的有卧式圆筒形容器，球形贮罐及槽车等。

从几何形状和受力特点看，上述设备都是含有压力介质的容器，所以又统称为压力容器。而所有压力容器都是在一定的压力、温度和不同特性的介质条件下进行工作的。压力容器被广泛地应用于石油、化工、冶金、航空航天、医药、制冷、机械制造、建筑、采矿和交通运输等工业生产中。它们在发展国民经济、巩固国防，解决人民的衣食住行等方面都起着极为重要的作用。

1.2 压力容器安全技术的重要意义

压力容器的安全性是一个重要而又亟待解决的工程问题。实际上，影响压力容器安全性的因素甚多，技术也比较复杂。多年来，压力容器发生的灾难性事故已给国家财产及人民生命安全带来了严重危害，这不能不引起人们的高度重视。

压力容器虽然不像一般转动机械那样容易磨损，也不像高速发动机那样承受着高周疲劳载荷。但是，这类设备一旦发生爆炸，就具有极强的破坏力。因为压力容器内贮有有压力的液体或气体，加之某些介质还具有高温、易烧、易爆、有毒的特点。当爆炸时，容器内介质瞬间释放出大量的能量，这些能量除将整个压力容器或其碎块以很高的速度抛出外，大部分将产生冲击波，直接破坏周围的设施和建筑物，造成人身伤亡。如果压力容器内的介质是可燃物，那么，容器破裂时可燃物大量外溢，可能会导致危害更大的器外二次爆炸，二次爆炸生成的气体（水蒸气、二氧化碳等）继续升温膨胀，形成体积巨大的高温燃气区，其后果就更加严重。

历年来，世界各国因压力容器爆炸而引起的灾害性事故为数已不少，例如：

1964年6月,日本川崎市化工厂发生一次环氧丙烷贮罐爆炸事故,伤亡136人。由于容器直径为1.98m,容积14m³,贮罐内的环氧丙烷发生聚合,产生大量的热,致使器内介质温度升高,压力增大,贮罐破裂。贮罐开裂后,罐内液体迅速蒸发膨胀,罐体进一步破裂,碎片四处飞出,造成重大伤亡事故。

1969年日本福岛县伊达町二氧化碳贮罐爆炸,罐体碎成7片以上的碎片,最远的飞出30m。由于爆炸产生冲击波,使3名工作人员死亡,38人负伤,半径为1km区域内的建筑物受到不同程度的破坏。

1974年英国纳波罗有限公司己内酰胺制造厂,发生环己烷空气氧化反应罐的蒸汽爆炸,爆炸发生后,工厂被大火包围,火灾长达50h,升入高空的黑烟,在约30km处也可看到,距工厂1.5km以内,房顶墙壁受损害的住房有44栋,在约5km以内有300栋以上房屋的窗玻璃均被损坏。

1978年美国田纳西州休比市,一辆液化石油槽车大爆炸,街市发生大火,造成25人死亡,150余人烧伤的严重事故。

近年来,国内也连续多次发生重大的压力容器爆炸事故,例如:

1976年4月,河北省某化肥厂发生高压容器爆炸事故。五个小容器全部成碎片飞出,碎片最远飞出1500m,一般飞出400~500m,致使周围职工被碎片击死,还祸及行人,造成重大伤亡。

1979年3月,河南省某厂职工浴室的热水箱发生爆炸事故,水箱的一个封头飞出,剩下的筒体和另一个封头向相反方向飞去,打穿两道墙,又将锅炉房的后墙撞了个大窟窿,跌落在距离原地17m处。水箱爆炸后产生的冲击波把浴室的墙全部冲倒,大梁折断,七间浴室134m²的屋顶全部塌下,同时整个浴室及其附近全被蒸汽所笼罩,致使44人死亡,37人重伤。

1979年9月,浙江某电化厂发生液氯钢瓶爆炸事故,除了产生冲击波将400m²的厂房冲倒,并使附近的楼房及280多间民房遭到程度不同的破坏以外,约有10t的液氯外溢扩散,波及7.35km²的市区,死亡59人,中毒住院779人,直接经济损失达63万元。

综上所述国内外压力容器发生爆炸的惨痛事例,说明压力容器事故造成的破坏,不仅使工厂停产,影响社会安定,而且给国家和人民的生命财产造成难以估量的损失。

需要指出的是,就“安全”概念而言,它包括产品安全与工业安全。前者研究产品安全,包括产品设计、制造等内容;后者研究工业安全,包括设备(设施)的各个环节及环境对其影响等内容。尤为重要的是如何事先预测压力容器发生恶性事故的可能性,掌握事故发生的规律,以便在设计、制造、运行和管理中向有关人员预先警告事故的危险性。这是多年来安全工作者渴望找到的一种方法。由于本世纪50年代的新兴科学——系统工程问世,并很快应用于安全工作,形成了安全系统工程,从而使事先预报事故、掌握事故发生规律,预报警告事故的危险性成为可能。这一崭新的学科若用于压力容器这样一种重要设备,无疑对杜绝恶性事故,或将事故降低至最大程度将起到十分重要的作用。

虽然同一般设备比较起来,压力容器的事故率较高,但这并不是说其发生事故是不可避免的。压力容器安全运行有其客观规律。要防止事故发生,保证安全运行,就必须掌握它的客观规律,从而了解破坏是怎样发生和如何防止破坏的措施。压力容器安全工程学就是研究压力容器的各种破坏型式及其产生的原因,研究可能造成各种型式破坏的不安全因素,以

及防止产生这些不安全因素的具体措施和检验方法，以保证设备的安全可靠性能。

我国的工矿企业中，使用着数以万计的压力容器，其中有许多长期在经济安全地运行，积累了许多经验，如果把这些经验加以总结和提高，就可以逐步摸索出压力容器的安全运行规律。另一方面，在实际生产过程中所发生过的一些事故，也是难得的反面经验，这对于研究压力容器的破坏机理，摸索它的安全运行规律都是十分有价值的。因此，压力容器一旦发生破坏事故，就必须认真进行调查研究的，彻底查明造成事故的原因，以便从中吸取教训，探求防止事故的措施。当然，仅仅依靠现役中的压力容器来研究其安全问题是远远不够的，许多有关安全的理论问题和实际问题不宜也不可能都通过生产实践来摸索，而必须通过一些专门的科学试验来进行研究，反复摸索才能解决。因此，国内外许多专家、学者从引起压力容器失效的原因入手，对其各种破坏机理、安全运行规律、防止事故发生的措施、提高安全可靠性等进行了大量的研究和探讨。从而，从材料、设计、制造、质量控制系统和无损检测等各个方面，探索提高压力容器安全可靠性能的措施和方法。

1.3 压力容器的分类

压力容器又称受压容器。从字面上看，凡承受流体压力的密闭容器均可称为受压容器。但实际上，许多国家只是将比较容易发生事故，且事故危害较大的压力容器作为一种特殊设备。它要由专门的机构进行监督，并按规定的技术管理规范进行设计、制造、安装、使用、改造、检验和修理。

我国原国家劳动总局颁发的《压力容器安全监察规程》规定，实行安全监察的管辖范围即压力容器可以定义为：工作介质为气体、液化气体和最高工作温度高于标准沸点（指在一个大气压下的沸点）的液体；最高工作压力大于或等于 0.1MPa （不包括液体静压力，下同）；容积大于或等于 25l ，且最高工作压力与容积的乘积不小于 $20\text{l} \cdot \text{MPa}$ 的容器。

以上定义范围以外的压力容器，如盛装常温水、油的容器，由于这些液体的可压缩性很小，在卸压时介质的膨胀功很小，即容器爆破时，爆炸能量很小；或者工作压力低于 0.1MPa ，容积小于 25l ，容积与压力的乘积小于 $20\text{l} \cdot \text{MPa}$ 的容器，爆破时爆炸能量较低，不致对附近人员造成较大伤害，因此不列入由专门机构进行安全监察的范围。

压力容器的型式很多，在设计、计算中，压力容器分为薄壁容器和厚壁容器；根据承压方式，分为内压容器和外压容器；根据压力容器制造方法的不同，将压力容器分为铆接容器，焊接容器，铸造容器和锻造容器；根据压力容器的外形，将其分为球形容器，圆筒形容器，椭球形容器，锥形容器和组合形容器；从压力容器的安全以及事故造成的危害程度，又可以将压力容器分为低压、中压、高压和超高压容器等等。

一、按工艺用途分类

虽然压力容器在各种工业生产中的具体用途非常繁杂，但是根据它在生产工艺过程中所起的作用（用途）可以归纳为下列四种：即盛装容器，反应容器，换热容器和分离容器。

（一）盛装容器

盛装容器主要用来贮备足够数量的工作介质，保持介质压力的稳定，保证生产的持续进行。由于工作介质在器内一般不发生化学的或物理的性质变化，不需要装设内件，所以这类

容器结构比较简单，一般只有一个壳体和接管以及外部一些必要的附件构成。如大型球罐、煤气贮罐等等。

（二）反应容器

反应容器主要是为工作介质提供一个进行化学反应的密闭空间。从器外产生压力的反应容器，其工艺过程一般是连续性的，压力比较稳定，没有频繁的压力或温度的周期性变动。而压力是在器内产生的反应容器，器内压力和温度都有较频繁的周期性变动。许多反应容器内工作介质发生化学反应的过程，往往又是放热或吸热的过程，为了保持一定的反应温度，常需装设一些附属装置。常用的反应锅、合成塔等都属于反应容器。

（三）换热容器

这一类容器主要用来使物料被加热与冷却，使两种不同温度的物料经过一定的传热表面（间壁式或混合式）实现热量的交换。主要用于加热的，称为加热器；主要用于冷却的，称为冷却器。

（四）分离容器

这类容器主要是从混合物中分离出某一种所需要的组分，或除去其中某些有害的杂质，对于液—液、液—气、气—气分离一般采用塔式容器，对于液体悬浮着的固体微粒，可采用沉降或过滤容器，对于气体悬浮着的固体微粒或液体微粒，可采用旋风分离器及除沫器来分离。

二、按压力分类

压力容器最主要的一个参数就是工作压力。从安全角度分析，在容器的容积、温度等参数一定的条件下，压力越高，爆炸能量就越大。为了便于对压力容器进行分级管理和安全监督，我国《压力容器安全监察规程》将压力容器分为四个级别，即

低压容器 $0.1 \leq P < 1.57 \text{ MPa}$

中压容器 $1.57 \leq P < 9.807 \text{ MPa}$

高压容器 $9.807 \leq P < 98.07 \text{ MPa}$

超高压容器 $P \geq 98.07 \text{ MPa}$

三、按管理与安全监察权限分类

为严格控制关键压力容器的产品质量，有必要在压力容器的设计、制造及使用等主要环节上实行分级分类监察与管理。我国《压力容器安全监察规程》根据容器压力的高低，介质的危害程度及在生产过程中的重要作用，将压力容器分为三类：

（一）属于下列情况之一者为一类容器：

1. 非易燃或无毒介质的低压容器；
2. 易燃或有毒介质的低压分离容器和换热容器。

（二）属于下列情况之一者为二类容器：

1. 中压容器；
2. 剧毒介质的低压容器；
3. 易燃或有毒介质的低压反应容器和贮运容器；
4. 内径小于 1 m 的低压废热锅炉。

(三) 属于下列情况之一者为三类容器:

1. 高压、超高压容器;
2. 剧毒介质且压力与容积的乘积等于或大于 $196.11 \cdot \text{MPa}$ 的低压容器或剧毒介质的中压容器;
3. 易燃或有毒介质且压力与容积的乘积等于或大于 $490.31 \cdot \text{MPa}$ 的中压反应容器, 或压力与容积的乘积等于或大于 $4903.31 \cdot \text{MPa}$ 的中压贮运容器;
4. 中压废热锅炉或内径大于 1 m 的低压废热锅炉。

剧毒介质是指进入人体量小于 50 g 即会引起机体严重损失或致死的介质。如氟、氢氟酸、光气、氟化氢、碳酰氟等。

有毒介质是指进入人体量大于或等于 50 g 即会引起人体正常功能损伤的介质。如二氧化硫、氨、一氧化碳、氯乙烯、甲醇、氧化乙烯、硫化乙烯、二硫化碳、乙炔、硫化氢等。

易燃介质是指与空气混合的爆炸下限小于 10% , 或爆炸上限与下限之差值大于 20% 的气体。如一甲胺、乙烷、乙烯、氯甲烷、环氧乙烷、环丙烷、氢、丁烷、三甲胺、丁二烯、丁烯、丙烷、丙烯、甲烷等。

根据压力容器管理与安全监察权限, 按压力、介质的危害程度及在生产过程中的重要作用分类见表 1-1。

表 1-1 压力容器分类

		一 类	二 类	三 类	
根据 $P \cdot V$ 介质、用途 综合分类	低 压	非易燃或无毒的反应容器; 易燃或有毒的换热容器; 易燃或有毒的分离容器; 非易燃或无毒的贮运容器	低 压 剧毒容器; 易燃或有毒反应容器; 易燃或有毒的贮运容器; 内径小于 1 m 的废热锅炉	低 压	$P \cdot V \geq 196.11 \cdot \text{MPa}$ 的剧毒容器; 内径 $\geq 1 \text{ m}$ 的废热锅炉
				中 压	废热锅炉; $P \cdot V > 4903.31 \cdot \text{MPa}$ 的易燃或有毒的贮运容器; 剧毒容器; 易燃或有毒且 $P \cdot V > 490.31 \cdot \text{MPa}$ 的反应容器
	中 压		中 压 反应容器 换热容器 分离容器 贮运容器	高 压 超 高 压	反应容器 换热容器 分离容器 贮运容器

1.4 压力容器的构造

压力容器的结构,一般说来是比较简单的。它的主要作用或是储装压缩气体或液化气体,或是为这些介质提供一个传热、传质或化学反应的密闭空间。其主要部件是一个能承受压力的壳体及必要的连接件和密封件。根据不同的工艺过程、操作条件,压力容器的结构形式也不相同。但从设计角度分析,都有其共同的特点,都可以将它分解为筒体、端盖、法兰、开孔与接管、支座等几种元件,按常规的方法,各种元件的设计可根据其工艺参数来进行。但值得注意的是,某些元件组合后,在局部区域会出现强度或稳定性不足的问题,因此,还需作进一步的必要的校核计算,以保证容器的合理设计和安全运行。本节只介绍压力容器的承压部件,包括本体、封头及其主要附件以及厚壁容器的结构型式。

一、薄壁容器构造

一般说来,中、低压容器通常为薄壁容器,高压与超高压容器则称之为厚壁容器。区分厚壁与薄壁的指标是径比,即 $k = D_o/D_i$;(它实质上相当于容器厚度对直径的比值), D_o 和 D_i 分别表示容器的外直径和内直径。当 $k > 1.2$ 时为厚壁容器, $k \leq 1.2$ 时为薄壁容器。对于承受内压的薄壁容器,可只考虑其经向应力和环向应力,故为两向应力状态。至于径向应力一般相对较小,可忽略不计。而厚壁容器则不能忽略,故为三向应力状态。之所以要区分薄壁容器与厚壁容器,主要是为了简化容器的设计计算,尽可能避免一些不必要的繁复计算过程。

(一) 球形容器

所谓球形容器,就是容器的本体是一个球壳。一般应用于工业生产中的球形容器直径都比较大,所以它大多是由许多块按一定尺寸预先压制成形的球面板组焊而成,如图1-1所示。这些球面板的形状不完全相同,但板厚一般都是一样的。只有一些特大型、用以储存液化气体的球罐,球体下部的壳体才比上部壳体要稍为厚一些。

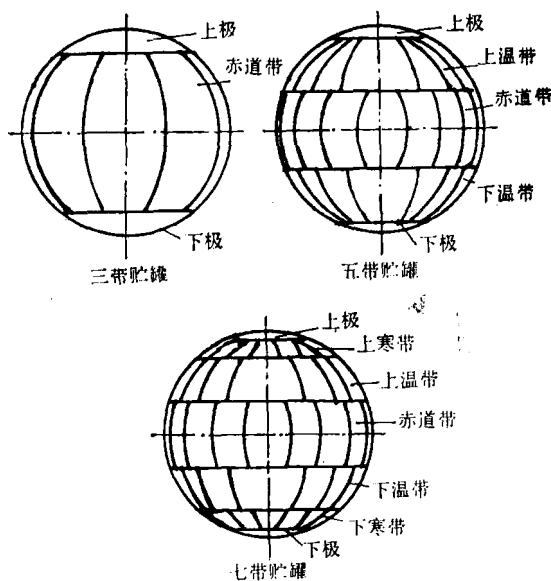


图 1-1 球形容器

从应力分析的角度来看,球壳是最适宜的形状。球形容器与圆筒形容器相比较,在相同的容积和压力下,球体的应力只有圆筒体应力的一半,所以球体的表面积最小,较容积相同的筒体小10%~30%。由于表面积小,加工容器所需板材也用得少,再加上壁厚较薄,因而制造同样体积的容器,球形容器要比圆筒形容器节约30%~40%的材料。

但是,从加工制造方面来看,球形容器的加工、制造、热处理以及安装等都具有一定的困

难。特别是它的焊缝长，焊接工作量大，焊接质量和探伤要求也较高，这样就增加了球形容器的工时成本。而且作为反应或传质，传热用容器，它既不便于在内部安装附件装置，也不便于内部相互作用介质的流动。因此球形容器一般只广泛用作贮装容器。目前国外大型液化气体贮罐有很多是采用球形。随着各种高强钢的相继问世以及机械制造水平的不断提高，在我国的化工、石油、航空航天、冶金等工业部门已广泛地采用大容量的球形容器。如用于石油化学工业中的各种大型液化气体球罐；冶金工业中用作压缩氧气和氮气的贮罐；原子能工业中还用大型球壳作为安全壳来分隔有、无辐射区。目前，我国部颁球形容器系列，其公称容积为50至2 000m³，公称压力为0.44~2.94MPa。

球形容器除了用以贮存氧气、石油液化气、乙稀、液氨、天然气等外，还可用作需要与周围环境隔热的容器。因为它可以节省隔热材料或减少热的传导。

（二）圆筒形容器

工业生产中使用得最普遍的压力容器是圆筒形容器。它比球形容器易于制造，又便于在内部装设工艺附件装置和便于相互作用的工作介质的内部流动。因而被广泛地用作反应、传热和分离容器。

圆筒形容器是由筒体、封头（端盖）、法兰，密封元件、开孔接管及支座六大部分构成。常用的薄壁圆筒形容器如图1-2。

圆筒形容器的主要受压元件为筒体和封头，但封头的结构形式较多，现分述如下。

1. 圆筒体

薄壁圆筒体除了直径较小者可以采用无缝钢管外，一般都是焊接结构，即用钢板卷成圆筒形后再焊接而成。直径小的可以采用一条纵焊缝，而直径大的圆筒因受钢板尺寸的限制，需采用两条以上的纵焊缝。同样，长度较短的圆筒体中只有两条环焊缝，长的则有多条。由于圆筒体的周向（环向）应力比轴向应力大一倍，所以制造时一般都尽量使纵焊缝减至最少。而且在加工过程中，可能会使焊缝产生夹渣、未焊透、裂纹、气孔、咬边等缺陷而降低焊缝本身的强度；在焊缝的热影响区还会产生金相组织的变化，使晶粒长大，这也会削弱该区域的机械性能。从国内外大量的破坏事故来看，其中大部分破坏源发生在焊缝或热影响区。因此，结构设计中应尽量减少焊缝的数量、长度和厚度。

为了便于生产且又能满足容器由工艺生产需要确定的直径和操作压力，同时又能提高制造质量，降低制造成本，增加容器及其零部件的互换性，使其制造趋于标准化，我国已规定了容器设计时应尽量采用的标准系列参数——公称直径和公称压力。

容器（焊接圆筒体）的公称直径(D_g)是指它的内径。而用无缝钢管制作的圆筒体，容器的公称直径则是指它的外径。现将压力容器的公称直径和用无缝钢管作圆筒形容器的公称直径分别列于表1-2和表1-3。

压力容器的公称压力是指在规定温度下的最大操作压力，用符号 P_g 表示。当工作温度升高时，由于材料强度指标下降，因此其最大操作压力也应相应降低。换句话说，当温度高于规定值时，容器内的最大操作压力应低于公称压力。现将容器的公称压力列于表1-4。

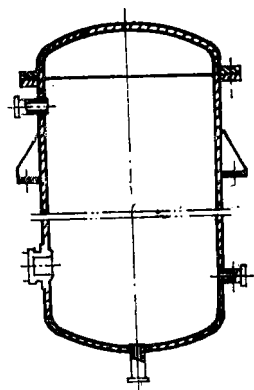


图 1-2 薄壁圆筒形容器

表 1-2 压力容器的公称直径

mm

300	(350)	400	(450)	500	(550)	600	(650)	700	800
900	1 000	(1 100)	1 200	(1 300)	1 400	(1 500)	1 600	(1 700)	1 800
(1 900)	2 000	(2 100)	2 200	(2 300)	2 400	2 600	2 800	3 000	3 200
3 400	3 600	3 800	4 000						

注：表内括号中的数据尽量不采用

表 1-3 用无缝钢管作筒体时容器的公称直径

mm

容器公称直径	159	219	273	325	377	426
所用无缝钢管的公称直径	150	200	250	300	350	400

表 1-4 压力容器的公称压力

MPa

0.1	0.25	0.4	0.6	1.0	1.6	2.5
4.0	6.4	10	16	20	25	32
40	50	60	80	100		

设计压力容器时，圆筒体的长度与直径之比，从节省材料的观点出发，可选用大一些较为合适。因为同样容积的容器，长度与直径之比越大，用料越省。但并不是所有的容器都适宜于选用较大的长径比。例如需要限制介质在容器内的流速时，长径比就不宜过大。况且小而长的薄壁容器制造也比较困难，安装和使用都不方便。一般说来，容器的长径比是根据其用途、工艺要求和制造方法决定的。

2. 封头

封头或端盖（凡是与筒体焊接连接而不可拆的，称为封头；与筒体以法兰等连接而可拆的，称为端盖）是压力容器的重要组成部分，常见的形式有半球形、椭球形、碟形、锥形及平板形。在实际生产中，中低压容器大多采用椭球形封头，平板封头在压力容器除用作人孔及手孔的盖板以外，一般很少采用。半球形封头受力状况最佳，但最难制造。封头形式的选择不单决定于强度与制造，在某些情况下则决定于容器的使用要求。

（1）半球形封头

半球形封头实际上就是一个半球体，它的特点和球形容器相同。由于它的深度太大（与半径相同），整体压制成形较为困难，所以直径较大的半球形封头一般都是由几块大小相同的梯形球面板和顶部中心的一块圆形球面板组焊而成，如图 1-3。半球形封头由于制造难度较大而较少选用。近年来，随着制造水平的

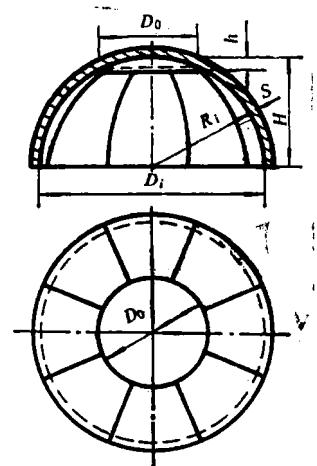


图 1-3 半球形封头

逐步提高,采用半球形封头也越来越多。虽然在相同的直径和工作压力下,球形封头所需厚度最小,而且容积相同时,它的表面积也最小。但是由于它与筒体连接,考虑到焊接方便以及避免焊缝处因结构不连续而引起的附加应力,在实用中常取它的厚度与圆筒体壁厚相同。

(2) 椭球形封头

椭球形封头是由半个椭球壳和一段高度为 h 的直边部分所组成,如图1-4。由于椭圆曲线的曲率变化是连续的,没有形状突变处,所以封头壳体中的应力分布也比较均匀,其受力状况仅次于半球形封头。它是目前压力容器中最广泛应用的封头形式。椭球形封头的深度决定于其长短轴之比。封头深度越小,也就是长短轴之比越大,封头的应力也越大,所需壁厚也越大。长短轴之比为2的椭球形封头称为标准椭球形封头,即封头深度(不包括直边部分)为其直径的1/4。

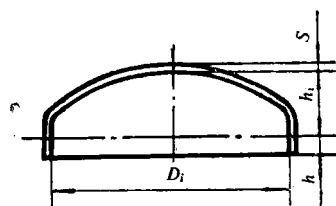


图 1-4 椭球形封头

(3) 碟形封头

碟形封头又称带折边的球形封头,它由几何形状不同的三部分组成,如图1-5。第一部分是半径为 R_i 的部分球面;第二部分是高度为 h 的圆筒体;第三部分是连接以上两部分的过渡圆弧。

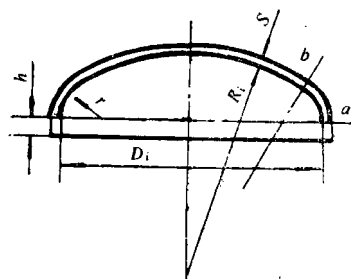


图 1-5 碟形封头

由于碟形封头的几何形状为一不连续曲面,在三部分的连接处经线曲率半径有突变,以致使该处及其附近区域产生较大的边缘应力,故应力分布不像椭球形封头那样均匀,因此,在工程使用中不是很理想。只有在椭球形封头的模具加工有困难时,才用碟形封头来代替。碟形封头的成型可以用模压,也可以用人工锻打。由于人工锻打费时,氧化皮脱落严重,并且经过几次锻打减薄量大,故设计上较少采用。

碟形封头由几何形状不连续而产生的边缘应力的和球面半径 R_i 与过渡区半径 r 的比值有关。 r/R_i 的比值越小,即曲率半径突变值越大,边缘应力也越大,因而有可能发生周向裂纹,亦可能出现周向折皱。因此在计算中就不考虑应力增加系数来增加整个封头的厚度。结果将比筒体的壁厚增大40%以上。当 $r = 0$ 时,即无过渡区时,碟形封头就变成无折边球封头,此时边缘应力达到最大值。所以碟形封头的过渡区,就是为了降低边缘应力而设置的,而且小折边的碟形封头实际上并不适用于压力容器。常用的碟形封头球面半径 R_i 与筒体直径 D_i 相等, r/R_i 的比值为0.15。

(4) 无折边球形封头

无折边球形封头是一块深度较小的球面体,如图1-6。它结构比较简单、制造方便,常用作容器中两个独立受压室的中间分隔封头。为保证连接处的焊接质量,应使封头和与其相连的筒体厚度相近,角焊缝采用全

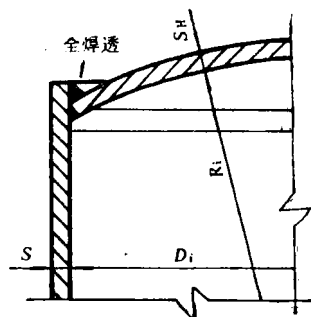


图 1-6 无折边球形封头

焊透结构。封头的球面用半径 R_i 一般不大于筒体内直径 D_i 。由于球面部分与筒体联接处附近存在着很高的局部应力，所以这种封头一般只用于直径较小、压力较低的压力容器上。

(5) 锥形封头

锥形封头有两种结构形式。一是无折边锥形封头，如图1-7所示。这种结构一般只适用于半锥角 $\alpha \leq 30^\circ$ ，且内压不大的容器。由于锥体与筒体直接连接，两壳体无公切线，且曲率半径有突变，因而在连接处附近产生较大的边缘应力。为了增强连接处的强度，常采用加强圈结构。另一种则是带折边的锥形封头。它与圆筒体连接处有过渡圆弧和有一定高度的圆筒形部分。一般用于半锥角 $\alpha > 30^\circ$ 的场合。

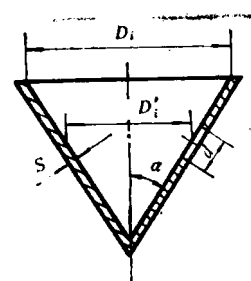


图 1-7 无折边锥形封头

以强度而论，在同样的条件下，锥形封头与球形、椭球形和碟形封头相比其受力情况较差。但是由于它制造简单，且锥体形状有利于流体的均匀分布和排料以及便于流体流速的改变，故当半锥角 α 不大时，可用于低压容器中。

(6) 平板盖

平板盖的几何形状包括圆形、椭圆形、长圆形、矩形及方形等几种。

平板盖结构简单，制造方便。但在相同的受压条件下，平板盖与其他封头比较所产生的应力较大，故设计时要选用较厚的板材。在压力与直径较大时，用平板盖就显得很笨重，所以在大直径的高压容器中多采用半球封头来代替平板盖。一般说来平板盖只适用于直径较小和压力较低的容器。但是低压容器的端盖，特别是容器的手孔盖、人孔盖，用平板盖还是比较普遍的。

二、厚壁容器构造

厚壁容器也称高压容器，它是高压技术中的关键设备之一。随着科学技术的迅速发展，高压技术也越来越趋于完善。现在高压技术已经广泛应用于无机工业、石油化学工业、气体的深冷分离以及原子能等工业。最近发展起来的材料挤压成型和深海探测装置也大量应用高压技术。所以高压容器广泛应用于化工、石油、重型机械及国防军工等工业部门。诸如合成氨、合成尿素、合成甲醇、聚乙烯加氢裂化，以及原子能反应堆壳体和大型水位机蓄能器等，都需要高压容器，其操作压力范围为 $10 \sim 200 \text{ MPa}$ 。

(一) 厚壁容器的总体结构及其特点

厚壁容器虽然与中低压容器一样，也由圆筒（或球壳）、筒体法兰、凸形盖（平板盖）、封头、密封结构以及一些附件所组成，却因其在高压下工作，故强度问题显得更为突出，同时密封结构也更加复杂，如图1-8。

多年来，探求高压容器的合理结构，尤其确保它的安全使用，是压力容器科学长远发展的重大课题。目前，厚壁容器在结构方面的发展趋势和特点是：

1. 向大型化方向发展

大型化带来的经济效益是显著的，它降低了投资，有利于自动化、有利于采用更为先进的工艺过程，而产品的成本也大幅度地降低。50年代一般厚壁容器的内径大多在 1200 mm 以下，容器的高度 H 与内径 D_i 的比，即 H/D_i 一般在 $12 \sim 28$ 左右，故显得细而长，这主要是

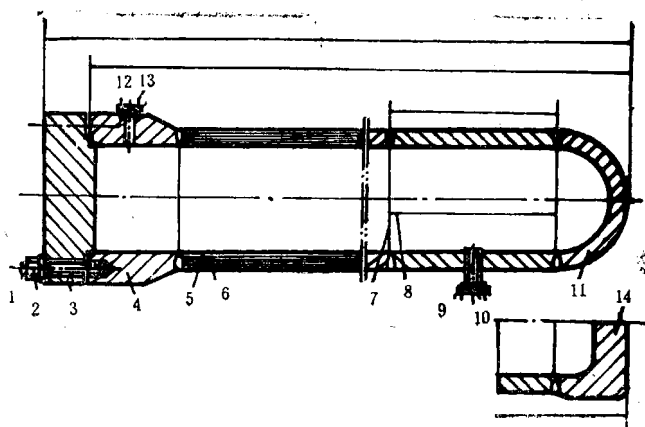


图 1-8 厚壁容器的结构

- 1—主螺栓；2—主螺母；3—平盖（顶盖或底盖）；4—筒体端部（筒体顶部或筒体底部）；5—内筒；6—一层板层（或扁平钢带层）；7—环焊缝；8—纵焊缝；9—管法兰；10—接管；11—球形封头；12—管道螺栓；13—管道螺母；14—平封头

受到机械加工等方面的限制。从60年代开始，尤其是近年来，由于工厂向大型化方向发展，取得了显著的经济效果，而且机械加工的能力也日益提高，故相应的装置，包括容器也向大型化发展。目前一般日产1000t的合成氨厂，合成塔内径已达3000mm左右，空塔重量超过300t，而 H/D 仅为6左右；直径更大的厚壁容器，其 H/D 值还要小。

2. 各种新型结构的厚壁容器正不断出现

以前，厚壁容器的主要结构形式以锻造、厚板卷焊、多层包扎、锻焊及绕带等为主。后来由于现代工业的迅速发展，热套式容器、绕板式容器已在大型厚壁容器中占有重要的地位。过去厚壁容器封头习惯用平底或紧缩口，现在随着机械制造工业的发展，大型容器基本上用半球形封头，端盖也由平盖改用凸形盖了，大型厚壁容器也越来越多采用球形。

3. 高压密封结构及紧固装置不断更新

虽然过去常用的高压密封结构如平垫密封结构简单，但在高压或直径大的情况下，密封性能不好；而伍德式密封、氮气式密封、卡扎里密封等虽然密封性能较好，但显得比较笨重。近年来，用得比较广的有B形环、三角垫、金属O形环及C形环密封。这些新型的高压密封结构比较简单而且密封性能也好。

4. 广泛采用高强度钢，安全系数逐步下降

过去厚壁容器大多采用屈服极限为200MPa的高延性低碳钢，安全系数也取得高。而目前广泛应用300~500MPa的低合金高强度钢来制造厚壁容器，由于各个方面技术的提高使得安全系数也相应降低。

（二）厚壁容器结构类型

厚壁容器的结构形式随制造方法的不同而异，它与一般中、低压薄壁容器的制造有很大区别。国内外厚壁容器的主要结构形式可归纳成两大类：

1. 整体锻造式 将大型的钢料毛坯经加热锻压成所需形状，再经一系列的加工后制成筒体。由于加工设备大、笨，而且材料利用率也不高，故目前已很少采用。

2. 单层厚板卷焊式 由于近年来出现了高强度调质可焊钢和重型轧钢设备以及大型卷