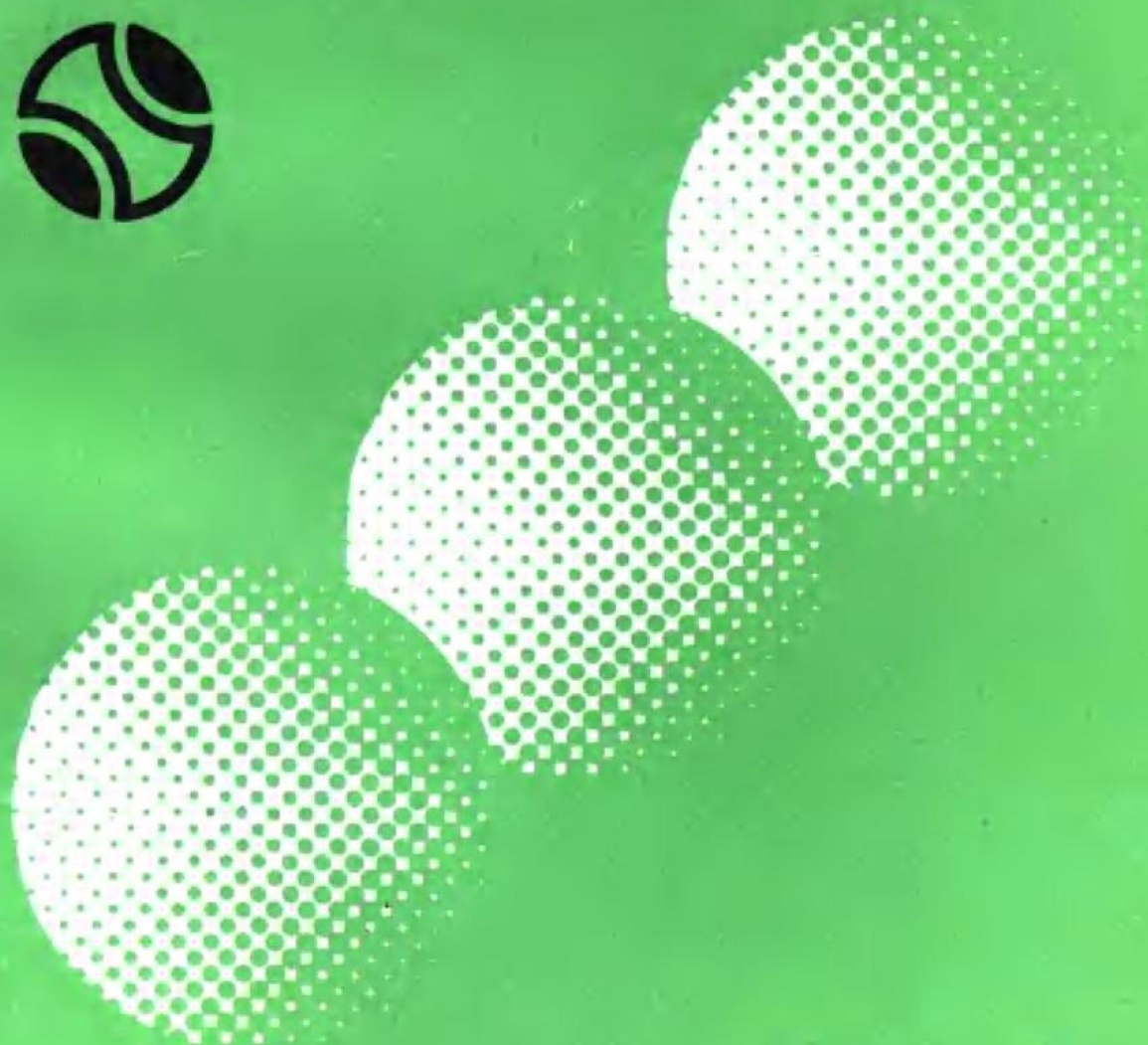


压力容器安全技术基础

钱逸 吕忠良 主编



中国劳动出版社

57

内 容 提 要

本书编入了压力容器安全技术的有关内容, 主要包括压力容器的应用、分类、结构、应力分析与强度、制造与安全技术要求、安全泄压装置、安全管理、气瓶安全技术、爆炸及危害分析、容器整体试验、断裂疲劳与安全评定、破断分析等。内容较完整、系统、实用, 可作为压力容器安全监察人员、检验人员的学习材料, 也可供设计、制造、使用维护工程技术人员及大专院校有关专业师生参考。

本书由钱逸、吕忠良主编; 陈龙根、吴更安、白洪球、章成志参加编写; 张康达教授主审。

压力容器安全技术基础

钱逸 吕忠良 主编

责任编辑 张伟

中国劳动出版社出版

(北京市和平里中街12号)

顺义兴华印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行

787×1092毫米 16开本 22.75印张 566千字

1990年11月北京第1版 1990年11月北京第1次印刷

印数: 7000册

ISBN 7-5045-0594-3/TH·043 定价: 10.00元

目 录

| | |
|----------------------|-----|
| 第一章 绪言 | 1 |
| 第一节 概述 | 1 |
| 第二节 压力容器在国民经济中的地位与作用 | 2 |
| 第三节 压力容器的分类 | 3 |
| 第四节 容器的安全要求 | 6 |
| 第二章 压力容器的构造与零部件 | 8 |
| 第一节 薄壁容器构造 | 8 |
| 第二节 压力容器主要零部件 | 14 |
| 第三节 厚壁容器构造与密封 | 73 |
| 第三章 压力容器的应力分析 | 92 |
| 第一节 旋转薄壳的应力分析 | 92 |
| 第二节 无力矩理论的具体应用 | 98 |
| 第三节 压力容器边缘问题的基本概念 | 102 |
| 第四节 厚壁圆筒的应力分析 | 108 |
| 第五节 平板应力分析 | 114 |
| 第六节 应力分类 | 126 |
| 第四章 压力容器设计与制造的安全技术要求 | 134 |
| 第一节 容器的安全设计 | 134 |
| 第二节 压力容器制造的安全技术要求 | 169 |
| 第五章 容器的安全附件 | 184 |
| 第一节 安全附件与安全泄放量 | 184 |
| 第二节 压力表 | 187 |
| 第三节 安全阀 | 190 |
| 第四节 爆破片 | 201 |
| 第六章 容器的安全管理 | 213 |
| 第一节 容器安全监察 | 213 |
| 第二节 容器制造管理 | 216 |
| 第三节 在役容器的管理与检验 | 222 |
| 第七章 气瓶安全技术 | 233 |
| 第一节 气瓶的安全设计 | 233 |
| 第二节 气瓶的最高工作压力与气体充装量 | 241 |
| 第三节 气瓶的定期检验 | 245 |
| 第八章 容器爆破危害及防止 | 248 |
| 第一节 爆破能量 | 248 |

| | | |
|--------|-----------------|-----|
| 第二节 | 压力容器爆破的危害 | 252 |
| 第三节 | 防止容器爆炸事故的措施 | 256 |
| 第九章 | 压力容器整体试验 | 260 |
| 第一节 | 耐压试验及气密性试验 | 260 |
| 第二节 | 残余变形测定 | 265 |
| 第三节 | 压力容器爆破试验 | 270 |
| 第十章 | 压力容器疲劳设计基础 | 275 |
| 第一节 | 压力容器的低循环疲劳 | 276 |
| 第二节 | 疲劳曲线 | 278 |
| 第三节 | 平均应力的影响 | 282 |
| 第四节 | 累积损伤问题 | 285 |
| 第五节 | 疲劳强度减弱系数 | 286 |
| 第十一章 | 以疲劳分析为基础的设计方法 | 288 |
| 第一节 | 容器是否需作疲劳分析的规定 | 288 |
| 第二节 | 疲劳分析设计 | 290 |
| 第三节 | 疲劳试验分析的规定 | 293 |
| 第十二章 | 压力容器的断裂与疲劳及安全评定 | 297 |
| 第一节 | 线弹性断裂力学 | 297 |
| 第二节 | 弹塑性断裂力学 | 310 |
| 第三节 | 裂纹的亚临界疲劳扩展 | 317 |
| 第四节 | 在役压力容器缺陷安全评定 | 324 |
| 第十三章 | 压力容器的破坏分析 | 336 |
| 第一节 | 事故统计与破坏类型 | 336 |
| 第二节 | 压力容器破裂的分析方法 | 337 |
| 第三节 | 压力容器典型破坏的特征 | 343 |
| 第四节 | 压力容器破坏实例分析 | 354 |
| 主要参考文献 | | 358 |

第一章 绪 言

第一节 概 述

容器是指贮存设备和各种化工设备的外壳。

在石油、化工等行业中，绝大多数生产过程是在化工设备内进行的。在这些设备中，有的用以贮存物料，如乙烯、原油、液氨、液氯贮罐等；有的进行物理过程，如换热器、蒸馏塔、沉降器等；有的用以进行化学反应，如合成塔、聚合釜、反应器等。尽管这些设备尺寸大小不一，形状结构不同，内部构件形式繁多，但是，它们都有一个外壳。从广义上说，这些外壳也是容器。因此，对容器的结构设计和强度计算方法，同样适用于这些设备外壳的设计计算。

容器按其所承受的压力高低又可分为常压容器和压力容器两大类。因为压力容器的壁厚是根据强度计算确定的，当压力很低时，按强度计算的壁厚就很薄。容器在制造、运输和吊装过程中，往往因刚性不足而产生过大的变形，故常压容器的壁厚应按制造、运输中的刚度要求，由结构设计确定。因此我国《钢制石油化工压力容器设计规定》中规定：设计压力低于 $\frac{980 \times 10^4}{(D_g + 10)^2}$ Pa 或真空度低于 $\frac{310}{D_g} + 8.2 \text{mmH}_2\text{O}$ (D_g ——公称直径, m) 的称为常压容器；设计压力或真空度分别等于或高于上述两个数值的称为压力容器。国务院颁发的《锅炉压力容器安全监察暂行条例》规定，压力为 0.1MPa 表压以上的容器为压力容器。

蒸汽锅炉也属压力容器，但它是一种直接用燃烧热生产蒸汽的特种压力容器，一般称为用直接火焰加热的容器。其设计、选材、运行维护另有特殊要求，通常不包括在一般压力容器的范畴之内。

近 30 年来，发达的工业国家核能容器获得了迅速的发展。核能容器的出现，标志着压力容器的设计、制造技术达到了一个新的、更高的水平。核能容器不仅是同时承受高压、高温的超厚壁容器（如压力堆容器，其工作压力一般为 14~16MPa，个别的高达 20MPa，工作温度 250~330℃，某些部位壁厚达 400~500mm，而且容器本身还要承受核裂变时产生的强烈中子流和 γ 射线辐照，导致材料冲击韧性与塑性的显著下降，使容器发生脆性破坏的可能性增加。此外，为防止容器内放射性物质泄漏污染环境，对密封结构的安全可靠性也提出了更为苛刻的要求。因此，核能容器和一般压力容器相比，无论在设计、制造，还是在检验、运行维护方面，均提出更高要求。由于我国的核能工业尚处于技术准备阶段，因此，国内现行的压力容器规程均明确规定不包括核能容器。

综上所述，本书主要介绍一般的非直接火焰加热、不受核辐照的压力容器。

压力容器是一种比较容易发生事故的特殊设备。压力容器发生事故时不仅使容器本身遭到破坏，往往还会诱发一连串恶性事故，如破坏其他设备和建筑物，危及人员生命安全，污染环境等，给国民经济造成重大损失。

压力容器的这种潜在的危险性的大小是和容器的操作工况及内部介质的特性密切相关

的。

容器在压力条件下工作，不少压力容器工作时不仅承受较高的压力，同时还经常处于高温或低温状态。在这样严苛的工况下，要保证容器长期安全运行，就必须在设计、选材、制造、检验和使用管理上有一整套严格的要求。否则容器一旦发生爆破，瞬间猛烈地释放出巨大的能量，其摧毁力是惊人的。压力容器爆破时所释放能量的大小是和容器的操作工况（压力、温度）、容器的容积及内部介质的状态（液态或气态）直接相关的。

内部介质的特性对容器的运行安全和使用寿命影响较大。尤其是化工容器，其内部介质常常具有强烈的腐蚀性（如氢腐蚀、硫化氢腐蚀、各种浓度的酸、碱、盐腐蚀等），从而对容器材料的选择提出严格的要求。

近年来，随着石油化学工业的发展，压力容器的规格越来越大，操作条件日趋苛刻。容器的大型化不仅给制造、运输、安装带来一系列困难，更重要的是由于厚钢板的质量和深厚焊缝的存在，增加了容器发生脆性破坏的危险性。

影响压力容器安全运行的因素是多方面的。它涉及到应力分析、强度计算、材料研究、制造工艺、无损检测以及破坏机理等多种技术领域。本书就是试图以压力容器安全分析为中心，较系统地介绍上述几个方面有关影响压力容器安全性的技术问题。

第二节 压力容器在国民经济中的地位与作用

压力容器的用途极为广泛。在工业、民用及军工等许多部门，在科学研究的许多领域都起着重要作用。其中，以石油化学工业中应用最为普遍，约占压力容器总使用量的50%左右。石油是重要能源，在当今世界的能源中占有相当的比例。石油化学工业主要包括化肥、农药、医药、炼油、无机化工和有机合成等行业。其产品与农业生产、人民生活以及轻工市场紧密相关。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。

压力容器在其他工业部门也获得广泛应用。例如各城市、企业所用的煤气或液化气贮槽；工程机械所用的各种蓄能器；各种动力机械的辅机，如空气压缩机的冷却器、油水分离器及贮气罐等；制糖、造纸所用的各种蒸煮釜、大型工程管道等。

随着石油加工工业的发展，目前还有数以百万计的液化石油气钢瓶，分布在饮食、旅馆业及居民家庭中。

随着世界性的能源危机，许多国家正在大力开发新的能源，一方面加紧开发煤气和天然气，另一方面积极发展核能发电，这些能源装置均需要大量的压力容器。预计在不久的将来，这些新能源将取代原有石油化工产品而成为压力容器的主要用户。

煤的气化及液化装置，目前除少数生产性设备已正式投入运行外，一般尚处于实验或生产性试验阶段。美国、苏联、澳大利亚等国由于煤的蕴藏量很大，正在积极开展研究，预计在1990年左右将正式投产。这些装置中的压力容器大多在高温、高压、氢介质条件下运行，其设计压力为17.5~25MPa，温度为450~550℃，这些容器不仅工况十分苛刻，其规格之大也十分惊人，它的内直径约3000~5000mm，壁厚约200~400mm，重量达400~2600吨。

核电站的核动力装置中的反应堆，当由燃料元件、堆芯结构、压力容器和控制棒、驱动机

构等几个主要部分组成。反应堆压力容器是在长期核辐照条件下工作的大型厚壁高温高压容器。如生产能力为 1500kW 的反应堆，其规格（直径×长度×壁厚）约 7800×8000×317 mm，其重量约为 650 吨。

综上所述，压力容器的应用范围是相当广泛的。仅就我国而言，压力容器的制造、使用、设计研究及安全监察就涉及到机械、核能、电子、航空、航天、交通、采掘、海洋、石油化工、轻工、纺织、冶金、国防、医药、劳动等二十多个行业与部门。

第三节 压力容器的分类

压力容器包括所有承受流体压力的密闭容器，它由专门机构进行安全监察，按规定的技术规范进行设计、制造和使用。按我国《压力容器安全监察规程》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（指在一个大气压力下的沸点）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 25 升，且最高工作压力与容积的乘积不小于 20 升·兆帕的容器。

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 25 升，容积与压力乘积小于 20 升·兆帕的容器，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。

压力容器的形式很多，根据不同的要求，有许多种分类的方法。

为便于设计计算，按壁厚和承压方式分类。按容器壁厚（以外直径与内直径比值表示的相对壁厚）分为薄壁容器与厚壁容器两类；按承压方式分为内压容器和外压容器两类。

为便于制造，可按制造方法和构造材料分类：如焊接容器、锻造容器、铸造容器等；以及钢制容器、铸铁容器、有色金属容器和非金属容器等。

由于高温条件下材料的机械性能会显著降低，弹性模量、延伸率、线膨胀系数和抗腐蚀性等也会发生明显变化；在低温（ $t \leq -20^\circ\text{C}$ ）条件下，材料的冲击韧性降低会引起容器低应力脆断破坏，所以按容器的工作壁温分类有高温容器、常温容器和低温容器。

从压力容器的使用特点和安全管理方面考虑，可分为固定式容器和移动式容器两大类。这两类容器由于使用情况不同，对它们的技术管理要求也不完全一样。我国和其他许多国家一样，对这两类容器分别制订不同的管理章程和技术规范。

一、固定式容器

固定式容器的特点是：具有固定的安装和使用地点，工艺操作条件和操作人员都比较固定。固定容器还可以按它的用途和它的工作压力进行分类。

（一）按用途分类：固定式压力容器绝大多数是作为石油、化工生产过程的工艺装置。根据容器在生产工艺过程中所起的主要作用不同，可以归纳为四大类，即反应容器、盛装（贮运）容器、换热容器和分离容器。

1. 反应容器 即主要用来完成介质化学反应的设备，如反应器、聚合釜、变换炉和氨合成塔等。考虑到反应容器操作条件复杂，压力往往不易控制，发生爆破的危险性大，因而对其设计、制造、使用等方面提出较严格的管理要求。

2. 盛装（贮运）容器 主要用以储备工作介质，以保持工艺操作压力稳定，保证生产的连续进行。介质在容器内一般不发生化学的或物理的变化。常见的压缩气体或液化气体贮罐、压力缓冲器都属于这一类。大型的多做成球形容器，小型的则常为卧式圆筒形容器。

这类容器的操作条件远没有反应容器那样复杂，但是由于容积往往比较大，储存的介质多，即使在操作压力比较低的条件下，其爆炸的潜在能量也往往是很大的，且往往不为设计、制造、使用部门所重视。因而将这类容器划归为贮运容器，对其提出较严的管理要求。

3. 换热容器 主要是用来使介质在容器内实现热交换，以达到生产工艺过程中所需要的将介质加热或冷却的目的。如热交换器、冷却器、蒸发器、废热锅炉等。

4. 分离容器 主要作用是让介质通入容器内，利用降低流速、改变流向或用其他物料吸收等方法来分离气体中的混合物，以达到净化介质或提取其中有用物料的目的。在分离容器中，主要介质不参与化学反应。如分馏塔、吸收塔和分离器等。

按工艺用途分为以上四类容器，即可从分类上了解容器在生产中的主要作用、工艺条件的稳定情况、压力及温度控制的难易程度及万一发生爆破时可能的危害严重性等。这对于压力容器的安全管理与技术监督都是比较便利的。

（二）按压力分类：压力是压力容器最主要的一个工作参数，从安全角度讲，压力越高，爆炸能量越大。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压力级别，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 $P \geq 98.07 \text{MPa}$

二、移动式容器

移动式容器属于贮运容器。它的主要用途是盛装和运输压缩气体、液化气体和溶解气体。这类容器流动范围大，环境变化大而又往往没有固定的熟练操作人员，管理比较复杂。另外，由于流动性至使它更容易受到外界能量（如机械碰撞、火灾）的危害，因而也更容易发生事故。事故的危害性也可能更严重。

移动式容器分气瓶、槽车两类。

三、按管理与安全监察权限划分的压力容器类别

为了严格控制重要压力容器的产品质量，有必要在压力容器的设计制造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、介质的危害性以及在使用中的重要作用，将压力容器分为以下三类：

1. 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。

2. 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米的低压废热锅炉。

3. 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196.1升·兆帕的低压容器 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490.3升·兆帕的中压反应容器，或压力与容积的乘积等于或大于4903.3升·兆帕的中压贮运容器。
 - (4) 中压废热锅炉或内径大于1米的低压废热锅炉。
- 根据以上分类条文的分类见表1-1。

表 1-1 压力容器的分类

| 类别 | 压力 | 根据压力 P 、压力乘容积 $P \times V$ 、介质、用途综合分类 |
|--------|-----------------------|---|
| 一 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 |
| 二 类 | 低 压 | $P \times V < 196.11 \cdot \text{MPa}$ 的剧毒容器 |
| | | 易燃或有毒反应容器 |
| | | 易燃或有毒的贮运容器 |
| | | 内径小于1m的废热锅炉 |
| | 中 压 | 反应容器 |
| | | 换热容器 |
| | | 分离容器 |
| | | 贮运容器 |
| 三 类 | 低 压 | $P \times V \geq 196.11 \cdot \text{MPa}$ 的剧毒容器 |
| | | 内径 $\geq 1\text{m}$ 的废热锅炉 |
| | 中 压 | 废热锅炉 |
| | | $P \times V > 4903.31 \cdot \text{MPa}$ 的易燃或有毒的贮运容器 |
| | | 剧毒容器 |
| | | 易燃或有毒且 $P \times V > 490.31 \cdot \text{MPa}$ 的反应容器 |
| | 高 压 超 高 压 | 反应容器 |
| | | 换热容器 |
| 分离容器 | | |
| 贮运容器 | | |

剧毒介质是指进入人体量小于 50 克即会引起肌体严重损伤或致死的介质。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 克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。

在《压力容器安全监察规程》中，对不同类别的压力容器，在设计和制造的资格审批权限上以及在选材、设计、制造、检验、使用、管理和安全附件等方面都有着不同的要求和明确的规定，必须严格遵照执行。

第四节 压力容器的安全要求

由于压力容器的使用条件比较苛刻，它承受大小不同的压力载荷（有时还是脉动的）和其他附加载荷（如重力、地震、风载等），而且有些容器还在高温或低温的条件下运行。工作介质又往往具有腐蚀性。容器内的压力会因操作失误或反应异常而迅速升高，往往在尚未被发现的情况下容器即被破坏。容器局部区域受力情况比较复杂。例如在容器开孔周围及其他结构不连续处，常常因过高的局部应力和反复的加压卸压而造成破坏事故。焊接容器常常隐藏一些难以发现的缺陷。例如容器制造时留下的微小裂纹会在运行中不断扩展，或在合适的条件下（如使用温度、工作介质等）突然发生破坏。因此压力容器的事故率往往较高，而且事故的危害性又往往特别严重。如在历史上曾因 Sultana 号蒸汽船锅炉发生爆炸事件，致使 1547 人丧生。1976 年 4 月我国某县化肥厂的高压容器（ $\phi 274\text{mm}$ ）发生爆炸，容器成碎片飞出，飞出距离 400~500m，致使周围职工被碎片击死，还祸及行人，造成重大的人身伤亡。如果介质是有毒液化气体，容器爆破后介质外流会造成大面积的毒害区。如 1979 年 7 月，某电化厂一个容器为 415 升的液氯钢瓶发生爆炸，碎片击穿周围 10 个液氯钢瓶，并引起其中 4 个装满液氯的钢瓶接连爆炸，约有 10 吨液氯外流，中毒范围波及 7.35 平方公里。更严重的是容器内介质为可燃液化气体，容器爆破后，可燃介质流出与空气混合后产生二次爆炸，并酿成火灾。如 1979 年 12 月，我国北方某液化气站的一个直径为 9.2m，容积 400m³ 的贮罐发生脆裂爆炸，引起燃烧，并使附近的三个同样球罐和一个 50m³ 的卧式贮罐及 5000 只气瓶爆炸，约有 600 吨液化气流燃烧，大火持续 20 余小时。

另外，压力容器即使是较小的故障，如泄漏或局部变形，尽管这不会导致灾难性事故，但这时要求工厂停车检查或检修。这种停机的直接损失或间接损失有时也是很大的。

压力容器的事故率较高，事故危害性很大，所以世界各国都无一例外地设置专门机构，负责压力容器的安全监督工作。

我国政府于 1958 年在劳动部设立了锅炉安全检查总局。此后于 1963 年经国务院批示，成立了锅炉压力容器安全监察局。各省、市、自治区和地区也都设置了锅炉和压力容器安全监察机构和检验单位，各县还设有专职监察人员，从事锅炉和压力容器的安全监察和技术检验工作。锅炉压力容器安全监察局在压力容器方面还制订了《压力容器安全监察规程》、《气瓶安全监察规程》和《液化石油气汽车槽车安全管理规定》等，并由劳动部颁布执行。为了搞

好锅炉、压力容器的安全监察工作，确保安全运行，国务院还于1982年颁布了《锅炉压力容器安全监察暂行条例》，进一步明确了有关这种有爆炸危险的承压设备的监督检查机构和职权等重大问题。

为保证压力容器的安全运行，压力容器的设计单位与制造单位，都必须经主管部门批准，同级劳动部门审查同意，发给许可证后方可设计、制造压力容器。设计、材料、制造、检验等都必须按照压力容器的质量保证要求进行，必须有有效的质量保证系统。

为了提高压力容器的可靠性，除在制造中要保证压力容器的质量外，使用中也需要对压力容器进行定期的在役检查。定期的在役检查的重要性已越来越被人们所认识。认真、严肃的对压力容器进行在役检查，能够减少和避免事故的发生。如：某厂2号氨合成塔，内壁腐蚀凹坑67处，最长达230mm，深3mm；某厂一滤油器，内径 $\phi 600\text{mm}$ ，由于氨水腐蚀、冲刷，1959年至1973年检查，内径增大到 $\phi 608\text{mm}$ ，1973年至1975年检查增大到 $\phi 616\text{mm}$ ；某厂一氨合成塔，有三分之一周长，深3mm的环状腐蚀带；某氮肥厂六台进口高压容器发现多处焊缝裂纹等等。上述这些严重缺陷都是在役定期检查中发现的，不然后果是不堪设想。

第二章 压力容器的构造与零部件

压力容器广泛应用于工业生产中的传热、传质、化学反应、物料贮存等各个方面，常见的形式有换热器、塔器、反应器、贮槽等设备的外壳，这些壳体虽然服务对象不同、操作条件各异、结构形式不一，但从设计角度分析，都属于容器范畴。压力容器的设计有其共同的特点，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使用特点来进行。但需注意，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，还需作一些必要的校核计算，以保证容器的安全运行。本章主要介绍压力容器本体和主要零部件的结构、强度或稳定性要求，以及主要零部件对压力容器本体安全的影响等内容。

第一节 薄壁容器构造

所谓薄壁容器是指外径 D_0 与内径 D_i 的比值 (D_0/D_i) 不大于 1.2 的容器。这种分类方法纯粹是为了简化工程计算而提出的。对于薄壁容器可以近似的按两向应力状态和应力沿壁厚均匀分布的假设来进行设计，并能满足工程上所需的精度要求。石油、化工生产中大量采用的中、低压容器，均属薄壁容器。内压薄壁容器的外形结构形式较多，除最常用的球形和圆筒形容器外，还有在个别情况下才使用的矩形、串接球形、椭圆形、扁圆形等特殊形状的容器，通常称作为异形容器。

一、球形容器

球形容器的本体就是一个球壳。由于球形容器的直径一般都比较大大，所以它大多是由许多块按一定的尺寸预先压制成形的球面板组焊而成，如图 2-1 所示。球壳的分带分片数、支柱数及各带的球中心角，可按 JB1117—82《球形储罐基本参数》选用。系列之外的，需自行设计。球面板的形状不完全相同，但板厚一般都是是一样的。只有一些特大型、用以贮装液化气体的球形贮罐，球体下部的壳板才比上部稍为厚一些。球形贮罐的设计及制造与验收可分别按机械部、石油部、化工部《球形贮罐设计规定》和 JB1127—82《钢制焊接球形贮罐技术条件》进行。

从所有壳体受力的情况来看，球形是最适宜的形状。球形壳体与圆筒形壳体相比较，当压力和直径相同时，球形壳体中的最大应力只有相同壁厚的圆筒形壳体的一半，因而其壁厚较圆筒形壳体为薄。此外，从壳体的表面积来看，球形壳体的表面积要比容积相同的圆筒形壳体小 10~30%（视圆筒形壳体的高度与直径之比而定）。由于表面积小，所使用的板材也少，再加上需要的壁厚较薄，因而制造容积相同的容器，球形容器要比圆筒形容器节省约 30~40% 的材料。

但是，球形容器的制造、安装和热处理都具有一定的困难。特别是由于它的焊缝长，焊接工作量大，焊接质量和探伤要求也较高。而且作为反应或传质、传热用容器，它既不便于

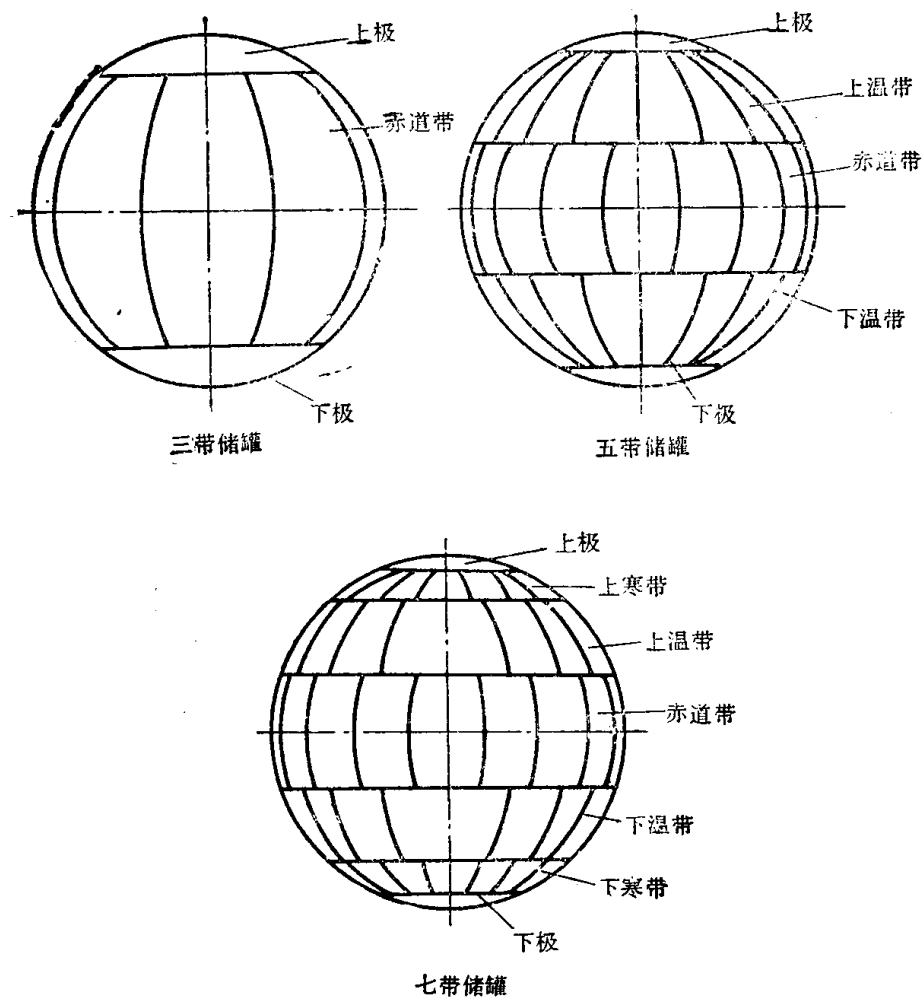


图 2-1 球壳结构形式

在内部安装附件装量，也不便于内部相互作用的介质的流动。因此球形容器一般只广泛用作贮装容器。近年来，由于各种高强钢的相继问世，以及机械制造水平的不断提高，大容量的球形容器已广泛地应用于化工、石油、航空等工业部门。如用于石油化学工业中的各种大型液化气球罐；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辐射区和无辐射区。目前，我国部颁的球形容器系列，其公称容积为 50 至 2000m³，公称压力为 0.44 至 2.94MPa。

球形容器表面积小，除节省制造钢板外，对于用作需要与周围环境隔热的容器也是有利的。因为它可以节省隔热材料或减少热的传导，所以它最适宜于作液化气体贮罐。此外，有些用蒸汽直接加热的容器，为了减少热损失，有时也采用球体，如造纸工业中用于蒸煮纸浆的“蒸球”等。

二、圆筒形容器

在压力容器中，圆筒形容器是使用得最为普遍的一种。它比球形容器易于制造，又便于在内部装设工艺附件并便于工作介质在内部相互作用，因此被广泛用作反应、换热和分离容器。

圆筒形容器由一个圆形的筒体和两端的封头（端盖）组成，常用的薄壁圆筒形容器如图

2-2. 圆形筒体的结构比较简单, 但封头的结构形式较多, 现分述如下。

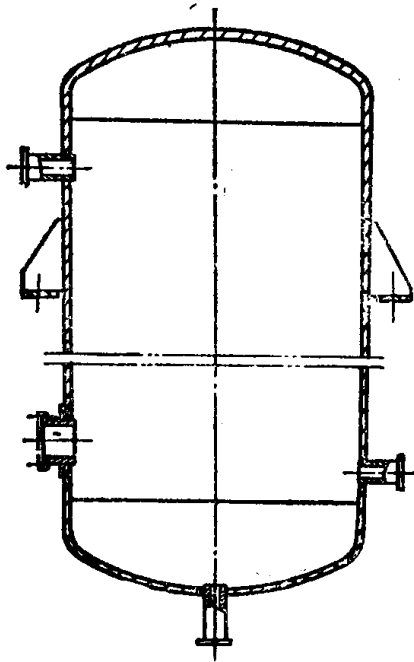


图 2-2 薄壁圆筒形容器

(一) 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进行焊接而成。小直径的圆筒体可采用一条纵焊缝, 而大直径的圆筒体因受钢板尺寸的限制, 需采用二条以上的纵焊缝。同样, 长度较短的圆筒体只有两条环焊缝, 长的则有多条环焊缝。焊缝由于可能存在夹渣、未焊透、裂纹、气孔、咬边等缺陷致使焊缝本身的强度削弱; 同时在焊缝的热影响区还会产生金相组织的变化, 使晶粒长大, 这也使得该区域的机械性能有所降低。实践说明, 许多事故常常发生在焊缝或热影响区, 所以结构设计中应尽量减少焊缝的数量和长度。

圆筒体是一个连续的轴对称曲面, 应力分布比较均匀, 不会由于形状突变而产生较大的附加应力。虽然受力情况不如球体, 但它比其他形状要好得多。由于圆筒形壳体中周向 (环向) 应力是轴向应力的两倍, 因此在制造圆筒形容器时, 纵向焊缝的质量要求要比环向焊缝的高, 以保证安全; 在开设椭圆形人孔或手孔时, 必须使短轴在纵向, 长轴在环向, 以尽量减少开孔对壳体强度的削弱程度。

容器的直径和操作压力是由工艺生产的需要确定的。但为了提高制造质量, 并降低制造费用, 增加零部件的互换性, 使容器及其零部件的制造趋于标准化, 所以容器设计时应尽量采用标准的系列参数——公称直径和公称压力。

容器的公称直径通常是指容器的内径, 用符号 D_g 表示。对于直径自 300 至 4000mm 的焊接及铸造设备的公称直径系列见表2-1。

| 公 称 直 径 | | | | | | | | | |
|---------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|------|
| 300 | (350) | 400 | (450) | 500 | (550) | 600 | (650) | 700 | 800 |
| 900 | 1000 | (1100) | 1200 | (1300) | 1400 | (1500) | 1600 | (1700) | 1800 |
| (1900) | 2000 | (2100) | 2200 | (2300) | 2400 | 2600 | 2800 | 3000 | 3200 |
| 3400 | 3600 | 3800 | 4000 | | | | | | |

注: 表内括号中的数值尽量不用。

容器的公称压力 P_g 是指在规定温度下的最大操作压力。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, 即温度高于规定温度时, 容器的最大操作压力应低于公称压力。化工、石油设备及管道的公称压力系列见表2-2。

从节省容器制造材料的观点来看, 圆筒体的长度与直径之比应选用得适当大一些, 因为

表 2-2

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 | | |

同样容积的容器，长径比越大，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器内的流速时，长径比就不宜过大。圆筒体的长径比，一般根据容器的用途及制造方法来定。

(二) 封头

封头或端盖是圆筒形容器的的重要组成部分，常见的形式有半球形、椭圆形、碟形、锥形及平板形。这些封头在强度及制造上各有其特点。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。

在实际生产中，中低压容器大多采用椭圆形封头；常压和高压容器以及压力容器中的入孔和手孔则常用平盖。

1. 半球形封头

半球形封头实际上就是一个半球体，它的优点和球形容器相同。过去由于其制造难度较大而较少选用，近年来随着制造水平的逐步提高，采用半球形封头也越来越多。如常用成型钢板拼焊压力不高但直径较大 ($D > 2500\text{mm}$) 的半球形封头 (图 2-3)。半球形封头壁厚约为圆筒体壁厚的二分之一，但是为了焊接方便，以及考虑到封头冲压过程中的减薄量，封头和筒体通常还是取同一厚度。

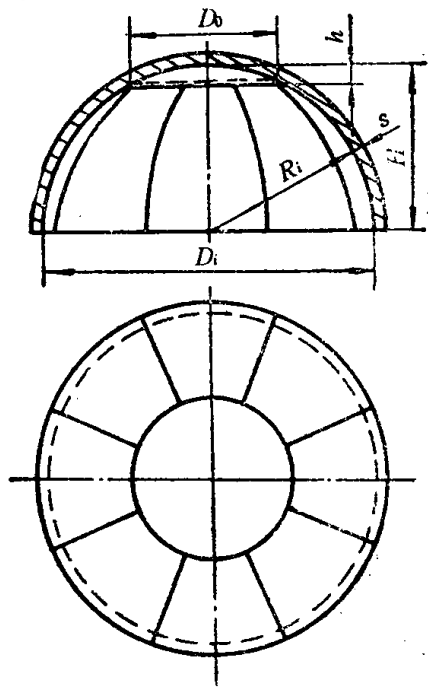


图 2-3 半球形封头

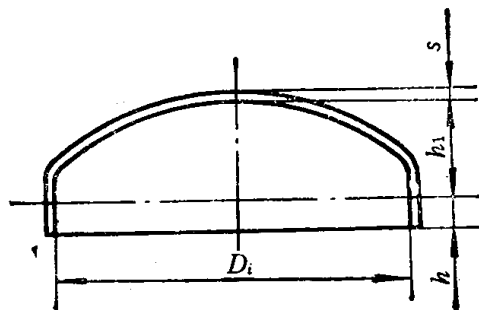


图 2-4 椭圆形封头

2. 椭圆形封头

椭圆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 2-4 所示。由于

椭圆曲线的曲率半径变化是连续的，所以封头中的应力分布也比较均匀，其受力情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，长短轴之比为 2 的椭圆形封头称为标准椭圆形封头，即封头深度（不包括直边部分）为其直径的 1/4。

由于椭圆形封头深度较浅，因而比半球形制造方便，但为了保证椭球壳形状的准确则必须用模压，相比于碟形封头则难度较大。

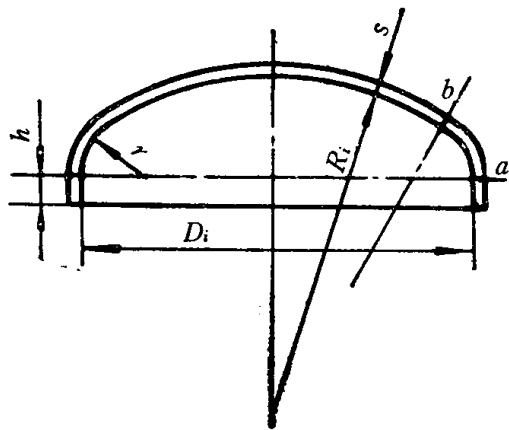


图 2-5 碟形封头

3. 碟形封头

碟形封头又称带折边球形封头，它由几何形状不同的三部分组成，如图 2-5 所示。第一部分是以 R_i 为半径的部分球面；第二部分是高度为 h 的圆筒形部分；第三部分是连接以上两部分的过渡部分，其曲率半径为 r 。 R_i 与 r 均以内表面作为圆基准。

从几何形状来看，碟形封头为一不连续曲面。在三部分的连接处，即 a 、 b 点，经线曲率半径有突变，以致使 a 、 b 处及其附近区域产生较大的边缘应力，故应力分布不象椭圆形封头那样均匀，因此在工程使用中不是很理想。但当椭圆形封头的模具加工有困难时，一般则以碟形封头来代替。

碟形封头不连续处边缘应力的大小和球面半径 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。对碟形封头的调查分析表明，这类封头有不少在折边区内表面都能观察到周向微裂纹。而且发生的事故中有 5% 是从折边区破裂的，因此在计算中就不得不考虑应力增强系数使整个封头增厚，而其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形封头，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。

此外，还需指出，椭圆形封头的赤道区附近和碟形封头的过渡区一样，都存在着较高的周向压应力，特别是在 $D_i/2h_i$ 比值较大、封头厚度非常薄的情况下，往往由于此压应力的作用使封头在周边上不能保持圆形，或因此而导致失稳破坏。所以，对于 $(D_i/2h_i) > 2.6$ 的椭圆封头，工程上一般不推荐采用。

椭圆形封头和碟形封头的圆筒部分，又称直边部分，其目的是为了使边缘应力不直接作用在封头与筒体相连接的焊缝上。直边高度一般为 25~50mm。

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 2-6 所示。它结构简单、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，角焊缝采用全焊透结构。封头的球面内半径 R_i 一般不大于筒体内直径 D_i 。由于球面部分与筒体连接处，两壳体无公切线，且曲率半径有突变，因而其边缘应力相当大。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

①

三号机

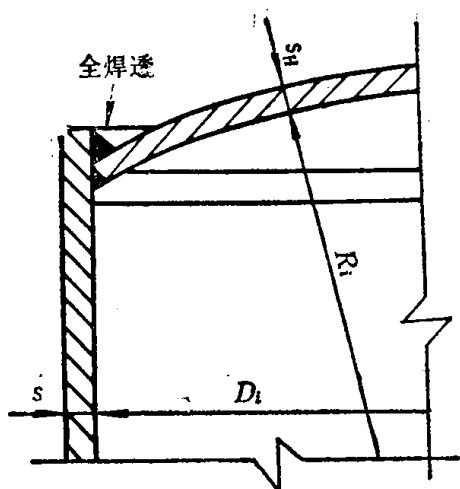


图 2-6 无折边球形封头

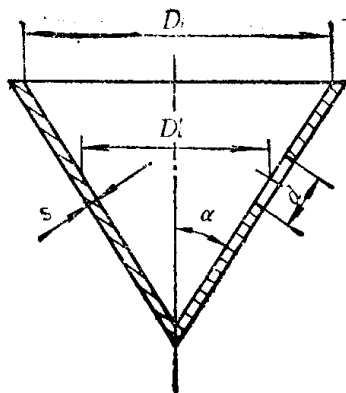


图 2-7 无折边锥形封头

锥形封头有两种结构形式，一种是无折边的锥形封头，如图 2-7 所示，它一般应用于半锥角 $\alpha \leq 30^\circ$ ，且内压不大的场合。由于锥体与圆筒体直接连接，壳体形状突然不连续，在连接处附近产生较大的边缘应力。为了提高连接处的稳定性，常采用加强圈以增强连接处的刚性，如图 2-8 所示。另一种为带折边的锥形封头（图 2-9），它与圆筒体连接处有过渡圆弧

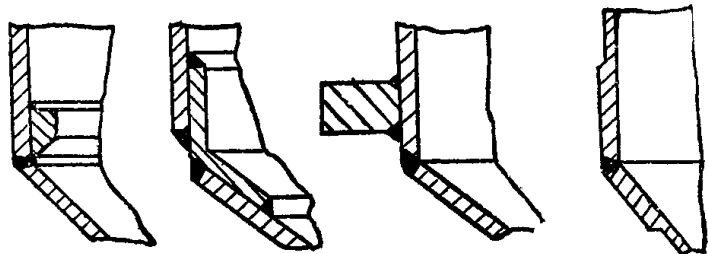


图 2-8 无折边锥形封头的加强结构

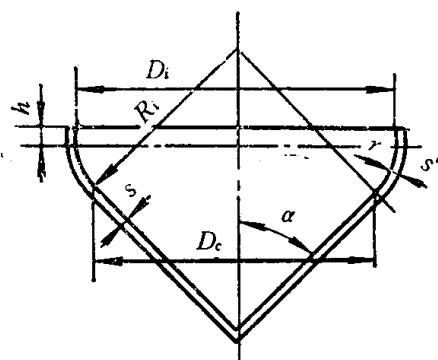


图 2-9 带折边锥形封头

r 和高度为 h 的圆筒形部分，这样可以降低连接处的边缘应力，一般用于半锥角 $\alpha > 30^\circ$ 的场合。常用带折边锥形封头的半锥角 α 为 30° 和 45° ，过渡圆弧曲率半径 r 与直径 D_i 的比值常取 0.15，直边高 h 为 25~40mm。

锥形封头的受力情况比半球形、椭圆形和碟形封头差，采用其结构形式的目的是当容器内的工作介质含有颗粒状或粉末状的物料，或者是粘稠的液体时，有利于汇集和卸下这些物料。锥形封头也有利于流体的均匀分布。此外，锥角较小的锥形封头还常用来改变流体的流速。

6. 平盖

平盖的几何形状包括圆形、椭圆形、长圆形、矩形及方形等几种。

平盖与其他封头比较，结构最简单，制造方便，但受力状况最差，在相同的受压条件下，平盖要比其他形式的封头厚得多，所以它一般用于直径较小和压力较低的场合。