



过程设备机械设计基础

---压力容器

主讲：付 尧

电话：64252096

email: fuyao@ecust.edu.cn

学习资料及论坛: www.chenjj.org

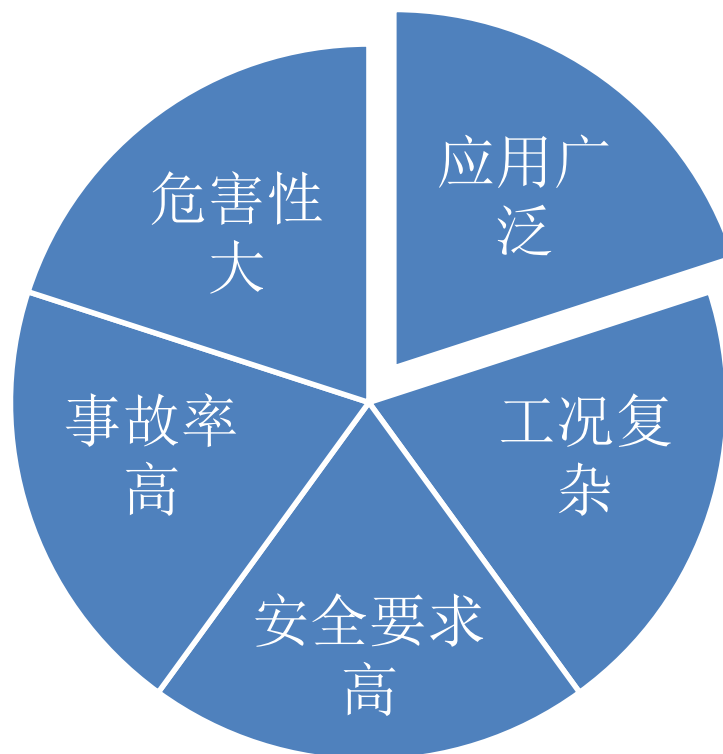
切尔诺贝利核电站的核泄漏

1986.4.26



31人死亡，20个国家4亿人受害。

压力容器的应用特点



压力容器应用特点

应用广泛

- 在石油、化工、轻工、医药、环保、冶金、食品、生物工程及国防等工业领域以及人们的日常生活中广泛应用。
- 化工厂中80%左右的设备都属于压力容器的范畴。

压力容器应用特点

工况复杂

- **压力**：高真空～高压、超高压；
石油加氢为10.5～21.0 MPa；
高压聚乙烯为100～200 MPa。
- **温度**：-253° C 的低温 ～ 1000 ° C以上的高温。
- **介质**：爆、燃、毒、辐(照)、腐(蚀)等数危险品种。

工作条件的复杂苛刻性使**压力容器**从设计、制造、安装到使用、维护都不同于一般设备，而成为一类**特殊设备**。

压力容器应用特点

安全要求高

- 压力容器承受**复杂载荷**；
- 压力容器极大多数系**焊接制造**，容易产生各种缺陷，一旦检验、操作失误容易发生爆炸破裂；
- 容器内多为压缩气体或饱和液体，且**易爆、易燃、有毒**，将向外泄漏，若容器破裂，导致**介质**突然卸压膨胀，瞬间释放出来的破坏能量极大，势必造成极具灾难性的后果。

本章内容

- ✦ 压力容器的结构与分类
- ✦ 压力容器常用零部件
- ✦ 内压薄壁容器的设计
- ✦ 外压薄壁容器的设计计算
- ✦ 压力容器的安全使用与管理

1. 压力容器的结构与分类

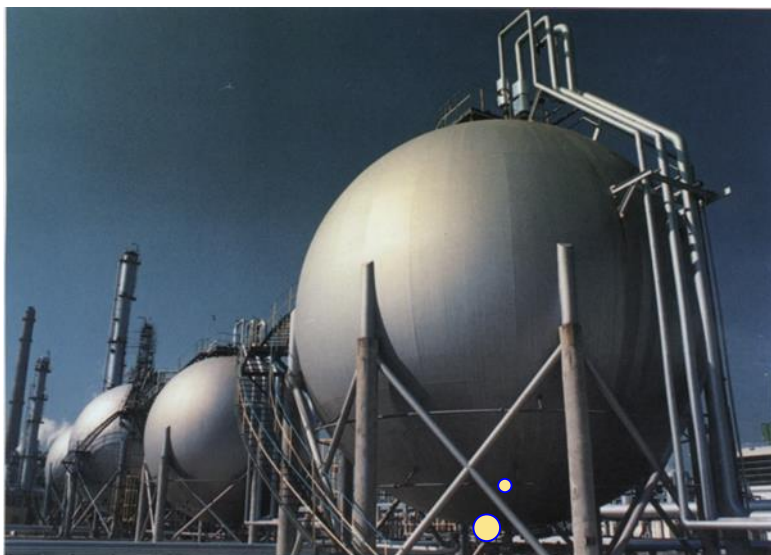


圆筒形
外壳

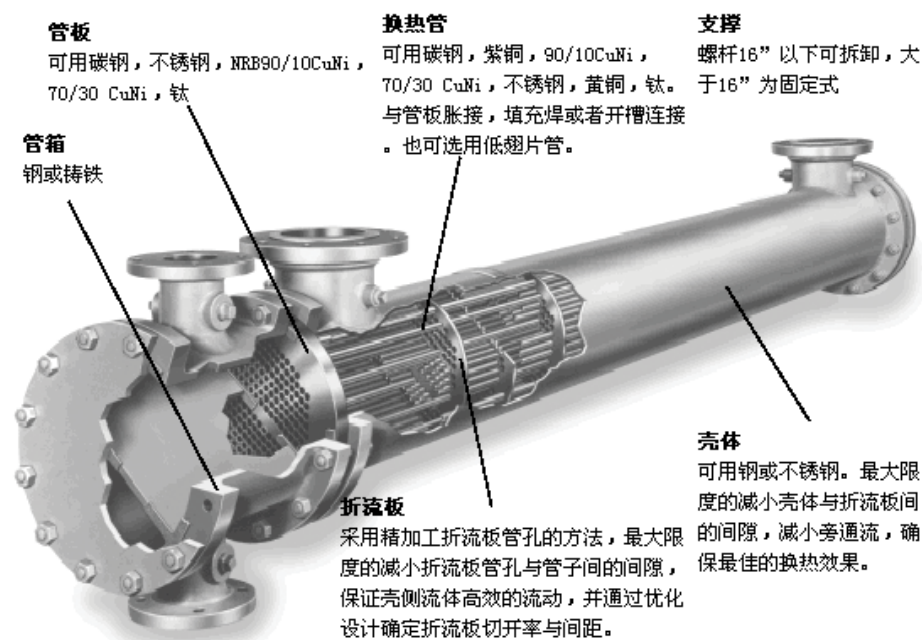
反应（传质等）
内件

1000吨加氢反应器/齐鲁石化

1. 压力容器的结构与分类



球罐型

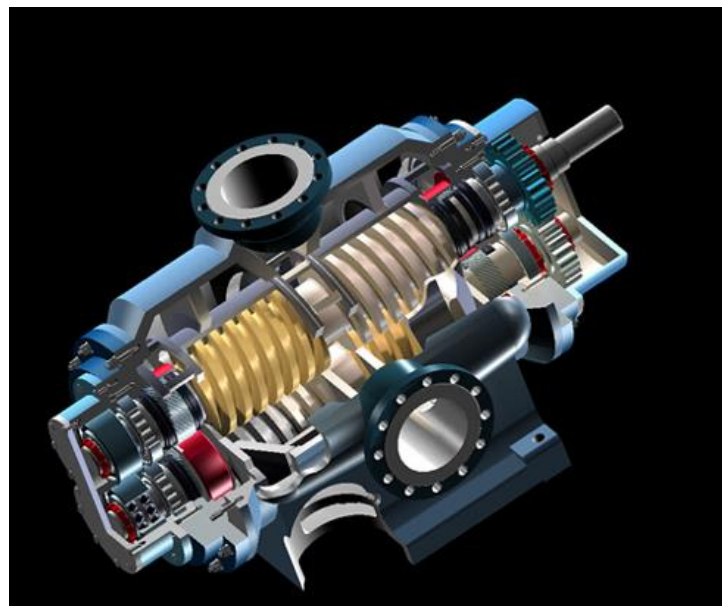
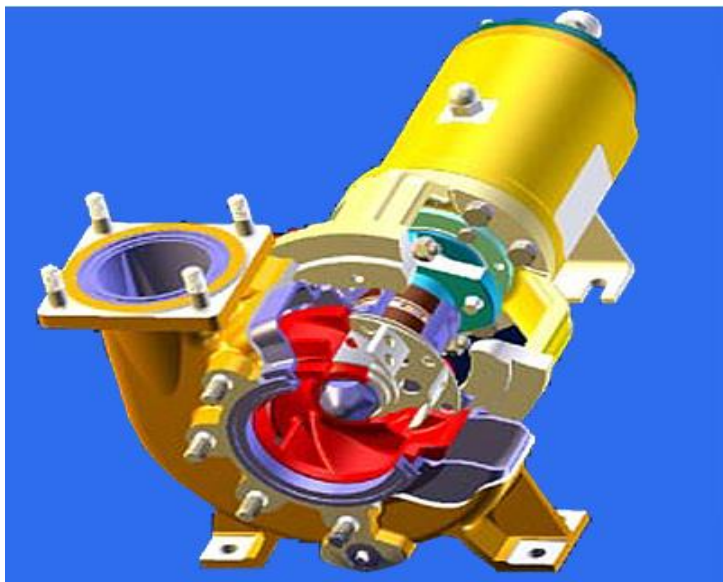


1. 压力容器的结构与分类



- 核反应堆 = 圆筒安全壳 + 核反应零部件

1. 压力容器的结构与分类



- 泵、透平机 = 蜗壳 + 叶轮

1. 压力容器的结构与分类



- 水下机器人= **圆筒外壳** + 探测、控制系统等

1. 压力容器的结构与分类

- 换热器、加热炉 = 圆筒外壳 + 传热管束
- 塔器 = 圆筒外壳 + 传质元件（浮阀、填料等）
- 反应釜 = 圆筒及夹套 + 搅拌器
- 核反应堆 = 圆筒安全壳 + 核反应零部件
- 透平机、泵 = 蜗壳 + 叶轮
- 压缩机 = 圆筒气缸 + 活塞
- 水下机器人 = 圆筒外壳 + 探测、控制系统等

1. 压力容器的结构与分类

过程设备 = 受压外壳 + 功能内件

- 国际上在压力容器、锅炉和压力管道方面提出了**承压设备**这新概念，压力容器将逐渐被**承压设备**所包括。

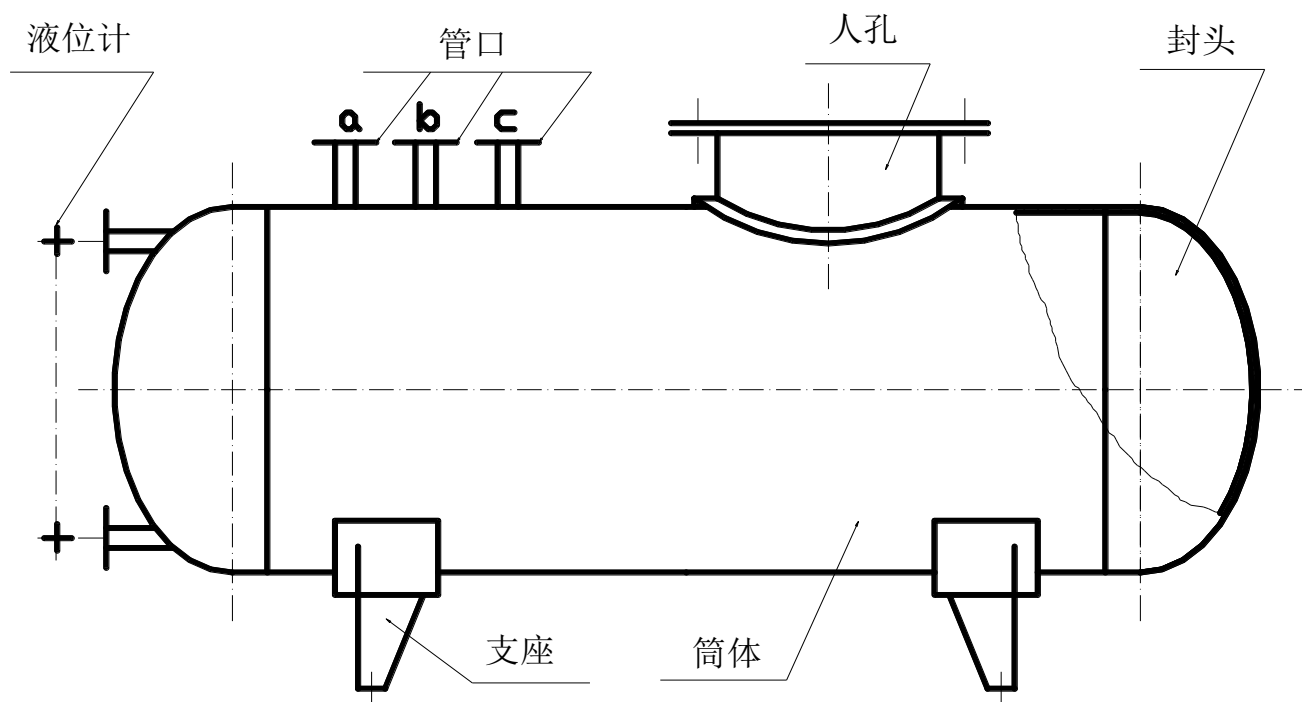
1. 压力容器的结构与分类

面向现代企业，我们应该：

- ◆ 掌握必要的压力容器基础知识。
- ◆ 熟悉相关标准、规范和法规，以及保证其实施的系统、完善、科学的管理监督体系。
- ◆ 具有高度的责任心、强烈的事业心从事相关工作。

1. 压力容器的结构与分类

- 什么是压力容器？



压力容器是带有通用零部件的承压壳体。

1. 压力容器的结构与分类

公称直径 (DN)

- 对于用钢板卷制的容器筒体而言，其公称直径的数值等于筒体内径。
- 当容器筒体直径较小时，可直接采用无缝钢管制作时，这时容器的公称直径等于钢管的外径。
- 管子的公称直径（通径）既不是管子的内径也不是管子的外径，而是一个略小于外径的数值。

1. 压力容器的结构与分类

公称压力 (PN)

国家标准**GB1048**将管路元件的公称压力分为以下十个等级：0.25MPa、0.6MPa、1.0MPa、1.6MPa、2.5MPa、4.0MPa、6.30MPa、10.0MPa、16.0MPa、25.0MPa

1. 压力容器的结构与分类

- 介质的危害性

按照HG20660《压力容器化学介质毒性危害和爆炸危险程度分类》的规定或按以下原则

GB5044《职业性接触毒物危害程度分级》

(1)极度危害 $<0.1\text{mg}/\text{m}^3$,氢氟酸、光气等

(2)高度危害 $0.1\sim1.0\text{mg}/\text{m}^3$,氟、氟化氢等

(3)中度危害 $1.0\sim10\text{mg}/\text{m}^3$,二氧化硫、一氧化碳

(4)轻度危害 $>10\text{mg}/\text{m}^3$,氢氧化钠、丙酮等

1. 压力容器的结构与分类

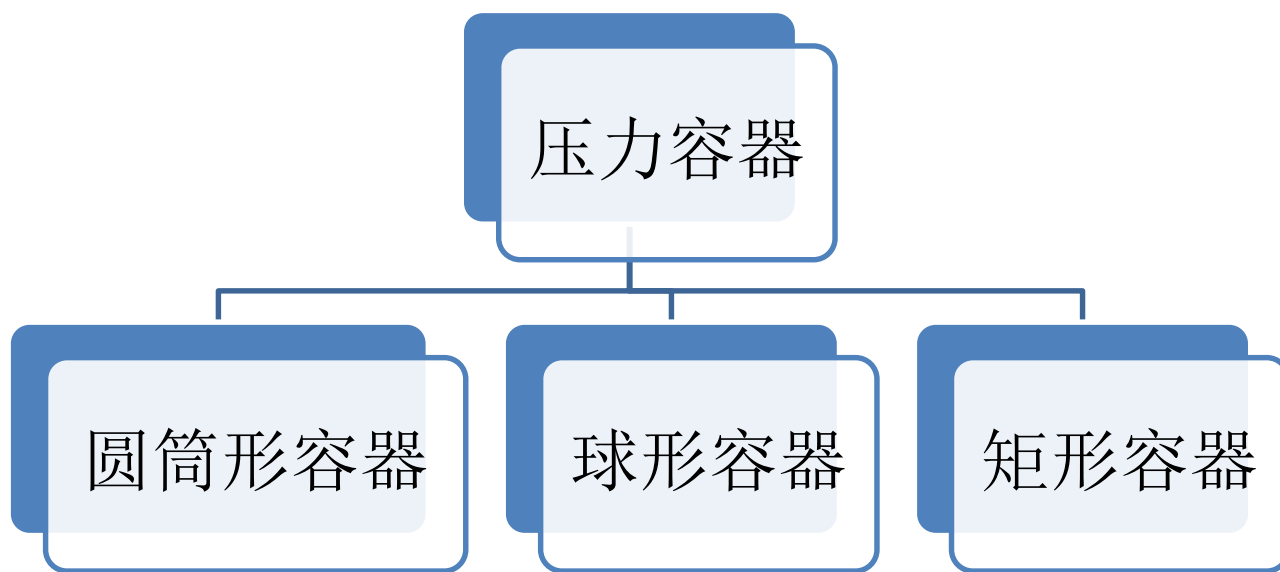
- 易燃性

介质与空气混合后发生燃烧或爆炸的难易程度。

易燃介质：一甲胺、乙烷、乙烯、氯甲烷、环氧乙烷、环丙烷氢气、丁烷、三甲胺、丁二烯

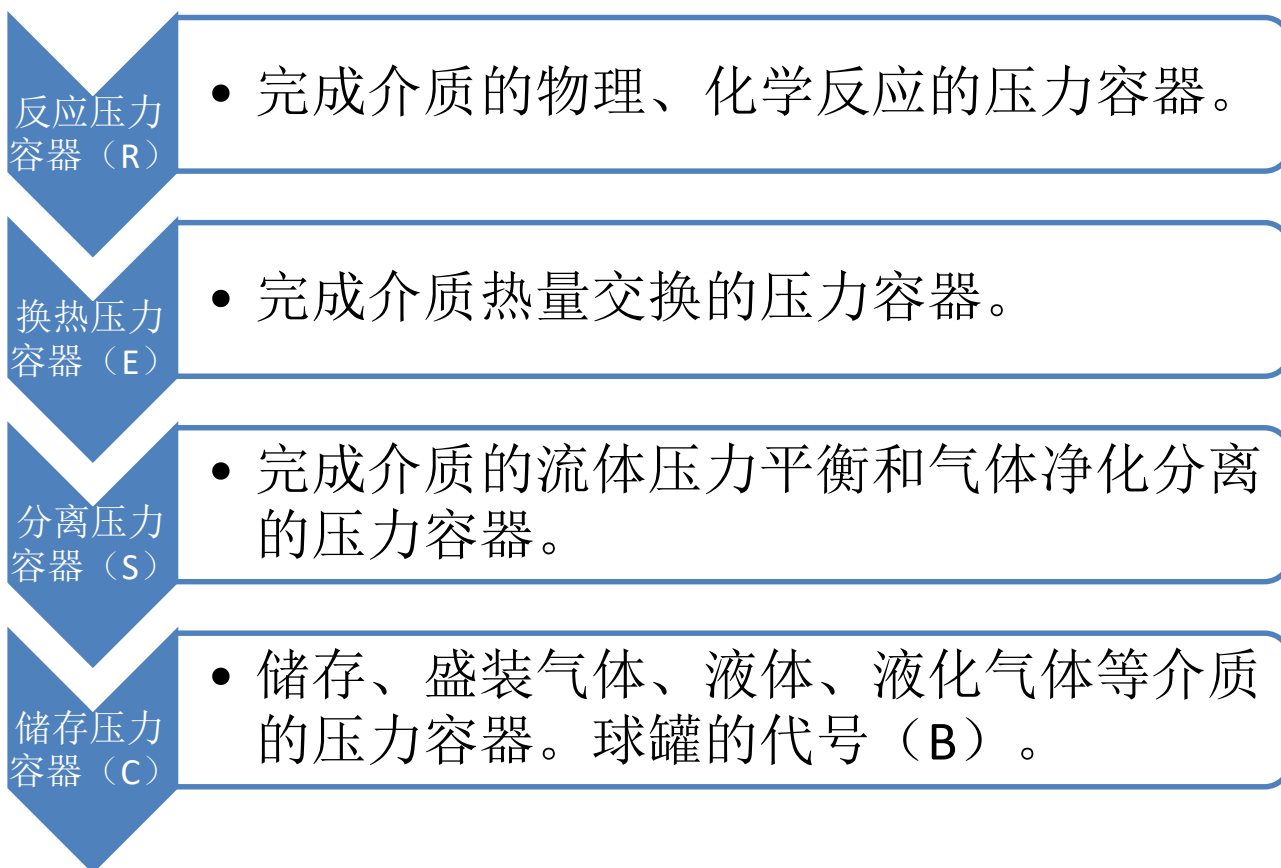
1. 压力容器的结构与分类

- 压力容器的分类-按形状



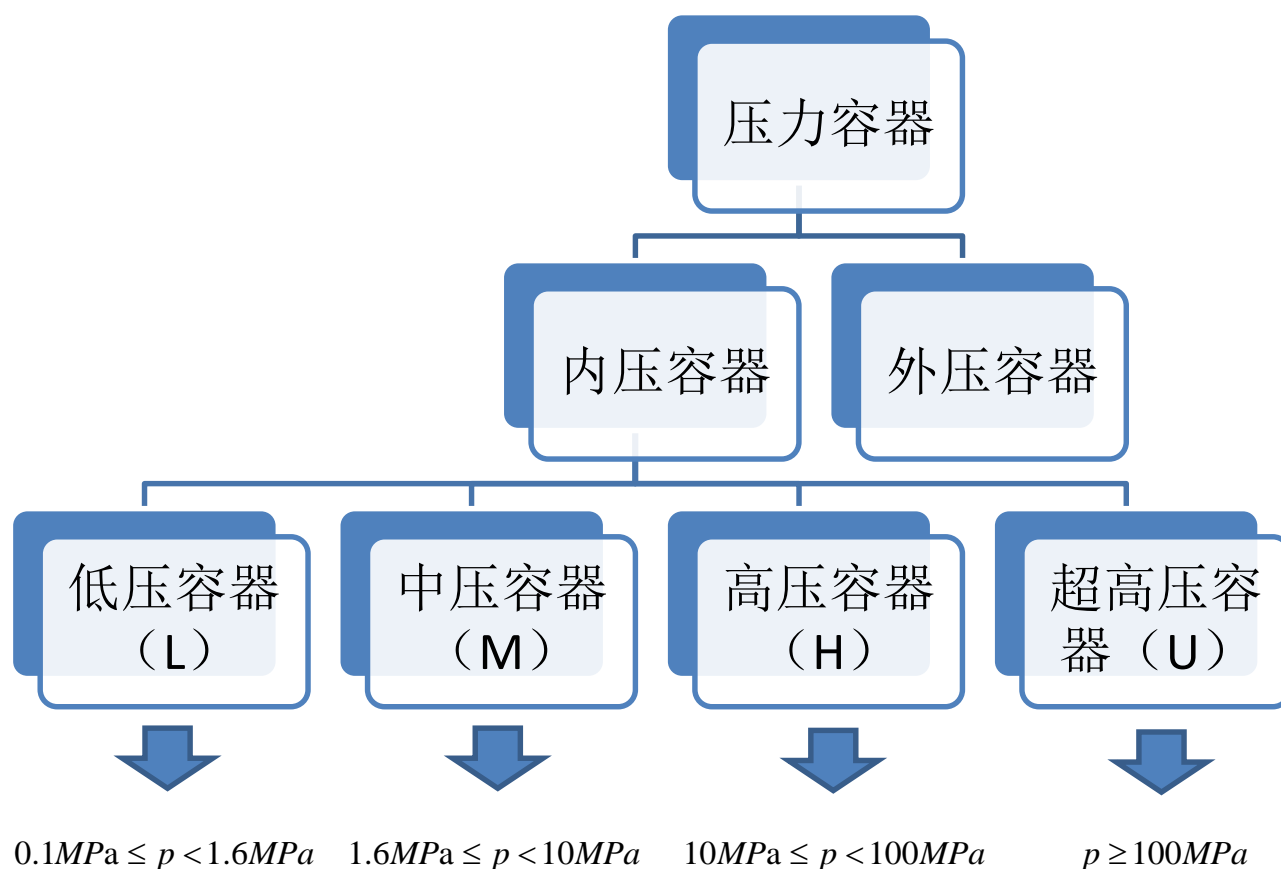
1. 压力容器的结构与分类

• 压力容器的分类-按容器的作用原理



1. 压力容器的结构与分类

- 压力容器的分类-按容器的承压方式



1. 压力容器的结构与分类

- 压力容器的分类-按容器的安装方式



移动式

固定式

1. 压力容器的结构与分类

• 压力容器的分类-按容器的类别



2. 压力容器常用零部件

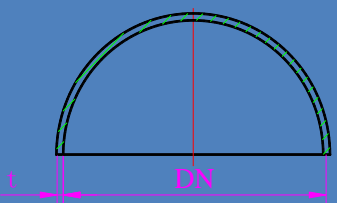
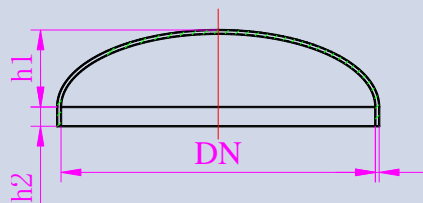
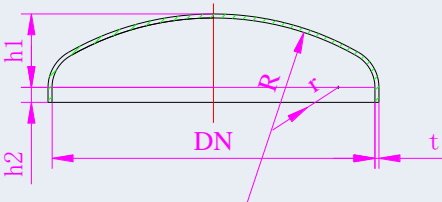
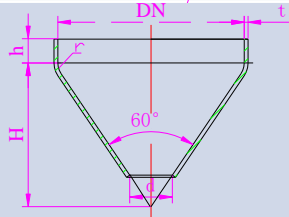
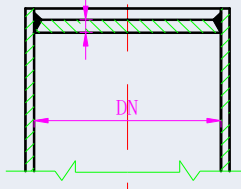


- 筒体通常由钢板卷焊而成或直接采用无缝钢管。
- 钢板卷焊而成的压力容器公称直径指的是内径；直接采用无缝钢管制作的容器公称直径指的是外径。



2. 压力容器常用零部件

封头

1	半球形封头		直径大或 压力高
2	椭圆形封头		中低压
3	蝶形封头		低压
4	锥形封头		低压且流体 分布均匀， 排料方便
5	平板封头		设置盲板 封闭的地方， 高压

2. 压力容器常用零部件

按照钢制压力容器封头标准JB/T4746-2002规定：

①②×③——④⑤

①：封头类型代号

②：公称直径，单位mm

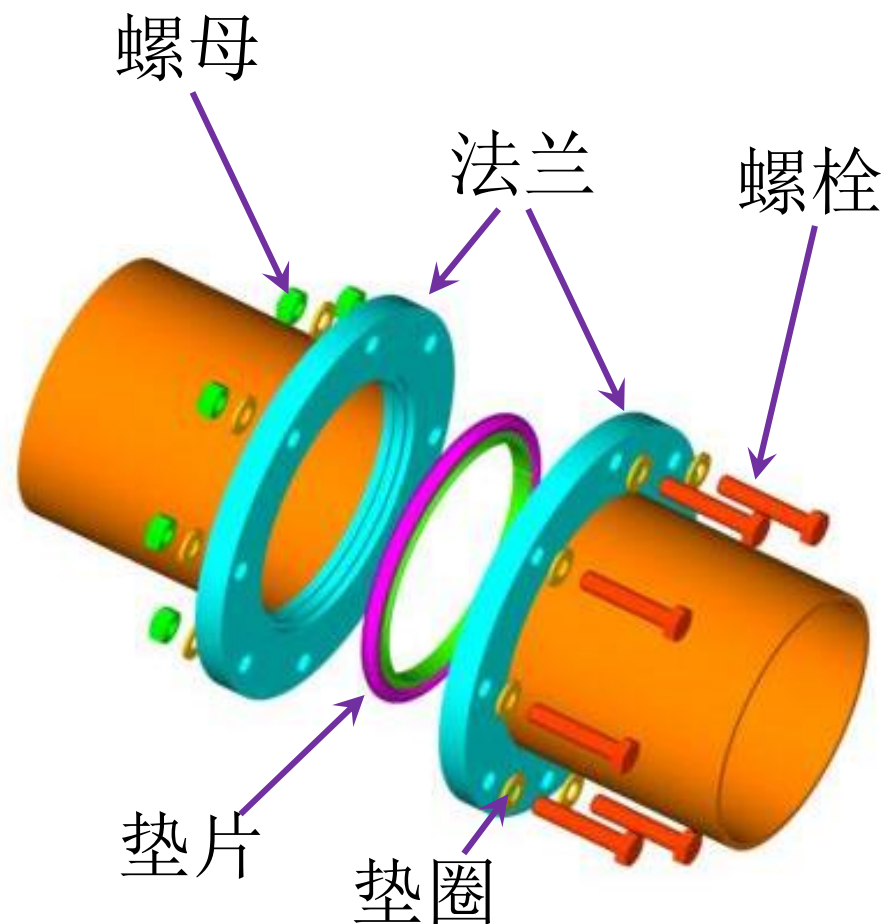
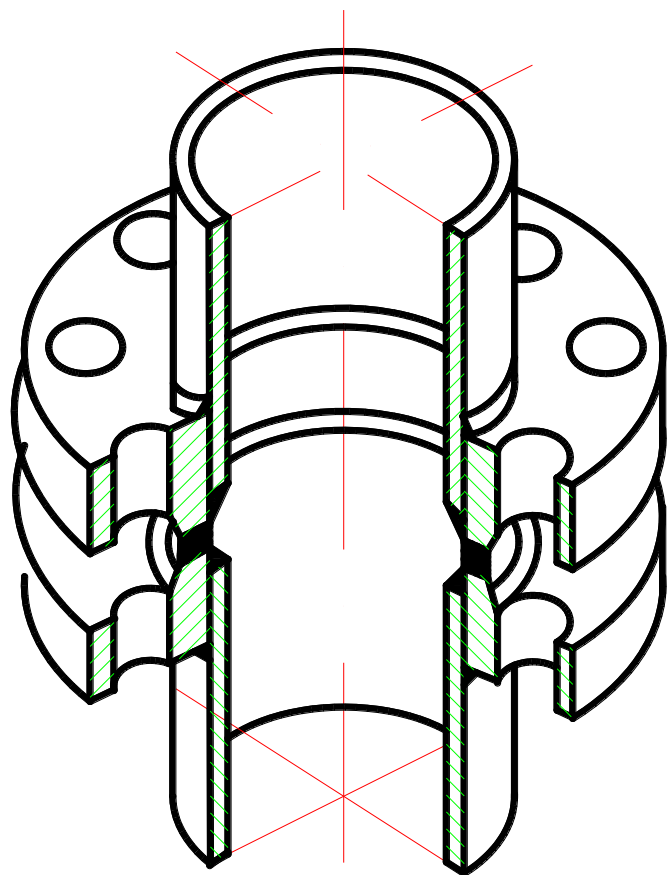
③：封头名义厚度，单位mm

④：封头材料牌号

⑤：标准号，JB/T4746

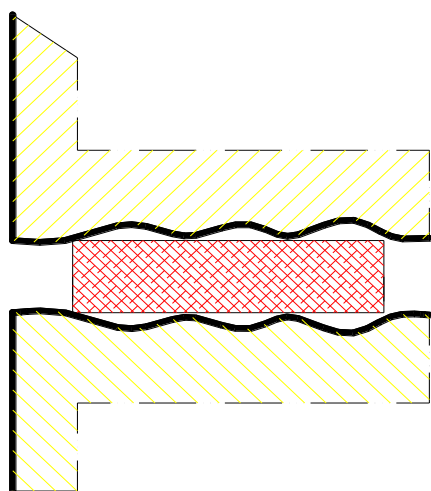
2. 压力容器常用零部件

● 法兰

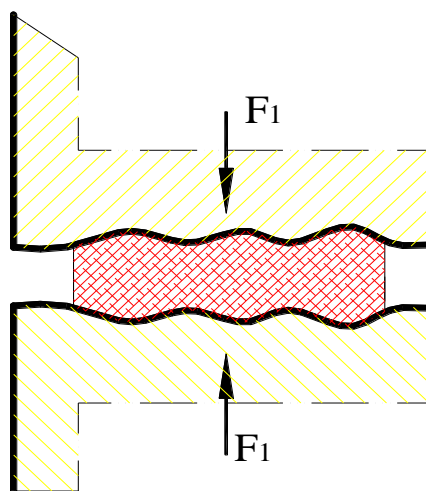


2. 压力容器常用零部件

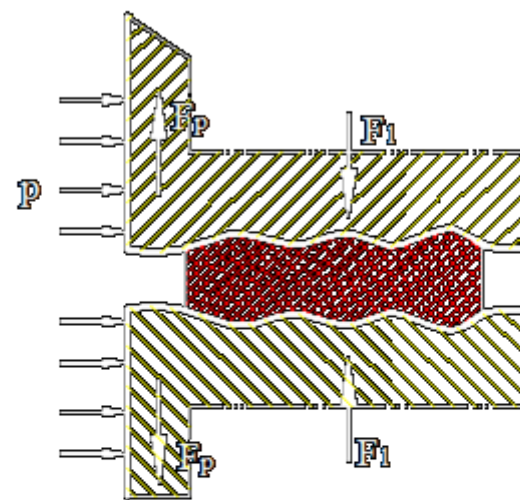
- 法兰连接的工作原理



(a) 初始状态



(b) 预紧状态



(c) 工作状态

2. 压力容器常用零部件

法兰联接的特点：

- 1、密封可靠：能保证紧密不漏；
- 2、强度高：附加法兰不削弱整体强度；
- 3、适用面广：设备和管道均可适用；
- 4、可拆联接：可多次重复装拆；
- 5、经济合理：可批量生产。

2. 压力容器常用零部件

- 垫片材料的选择

垫片材料分为：

- 1) 非金属：石棉、橡胶、合成树脂。
- 2) 金属：软铝、铜、软钢、铬钢。
- 3) 组合式：非金属外包金属、
薄钢带与石棉带绕制成。

P146 表 8-5 法兰垫片的选用

2. 压力容器常用零部件

- 影响法兰密封的主要因素：

螺栓预紧力

垫片性能

密封面特征

法兰刚度

操作条件

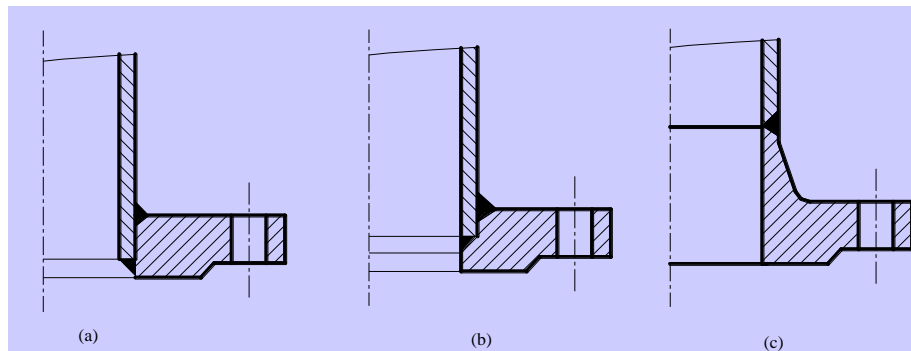
2. 压力容器常用零部件

• 法兰的分类

焊接法兰

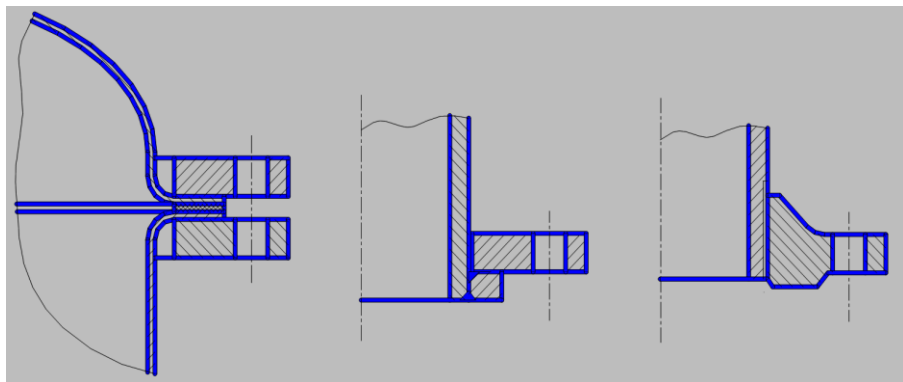
活套法兰

螺纹法兰



平焊法兰：
压力不高的场合

对焊法兰：压
力、温度较
高，直径大

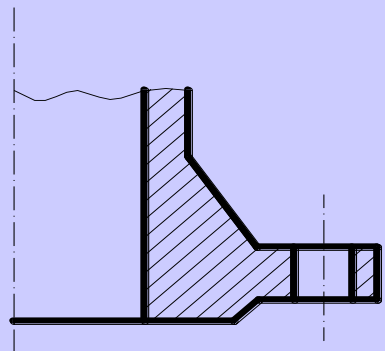


活套法兰

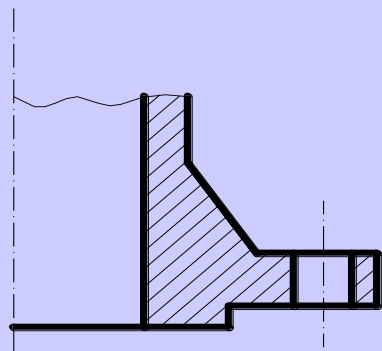
螺纹法兰

2. 压力容器常用零部件

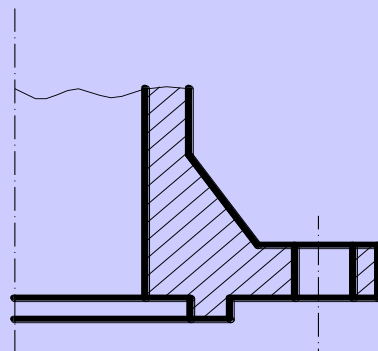
按密封面型式分



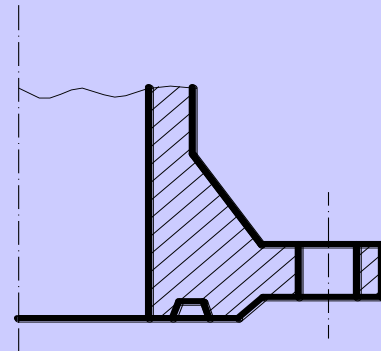
(a)



(b)



(c)



(d)

光滑面

凹凸面

榫槽面

环密封面

2. 压力容器常用零部件

● 支座

悬挂式支座

支腿式支座

支承式支座

裙式支座

鞍式支座

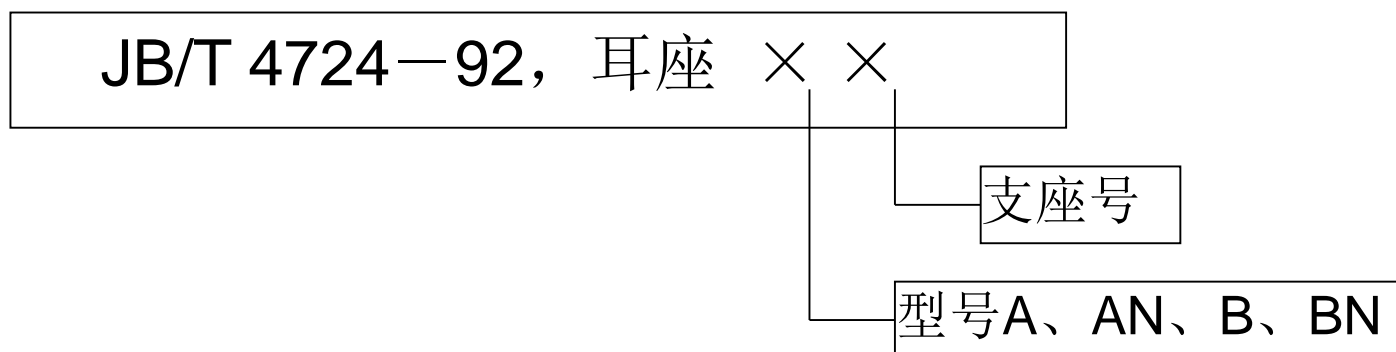
耳式支座

悬挂式支座：通常由两块筋板和一块底板焊接而成



耳式支座

JB/T4724标准规定了耳式支座的标记:

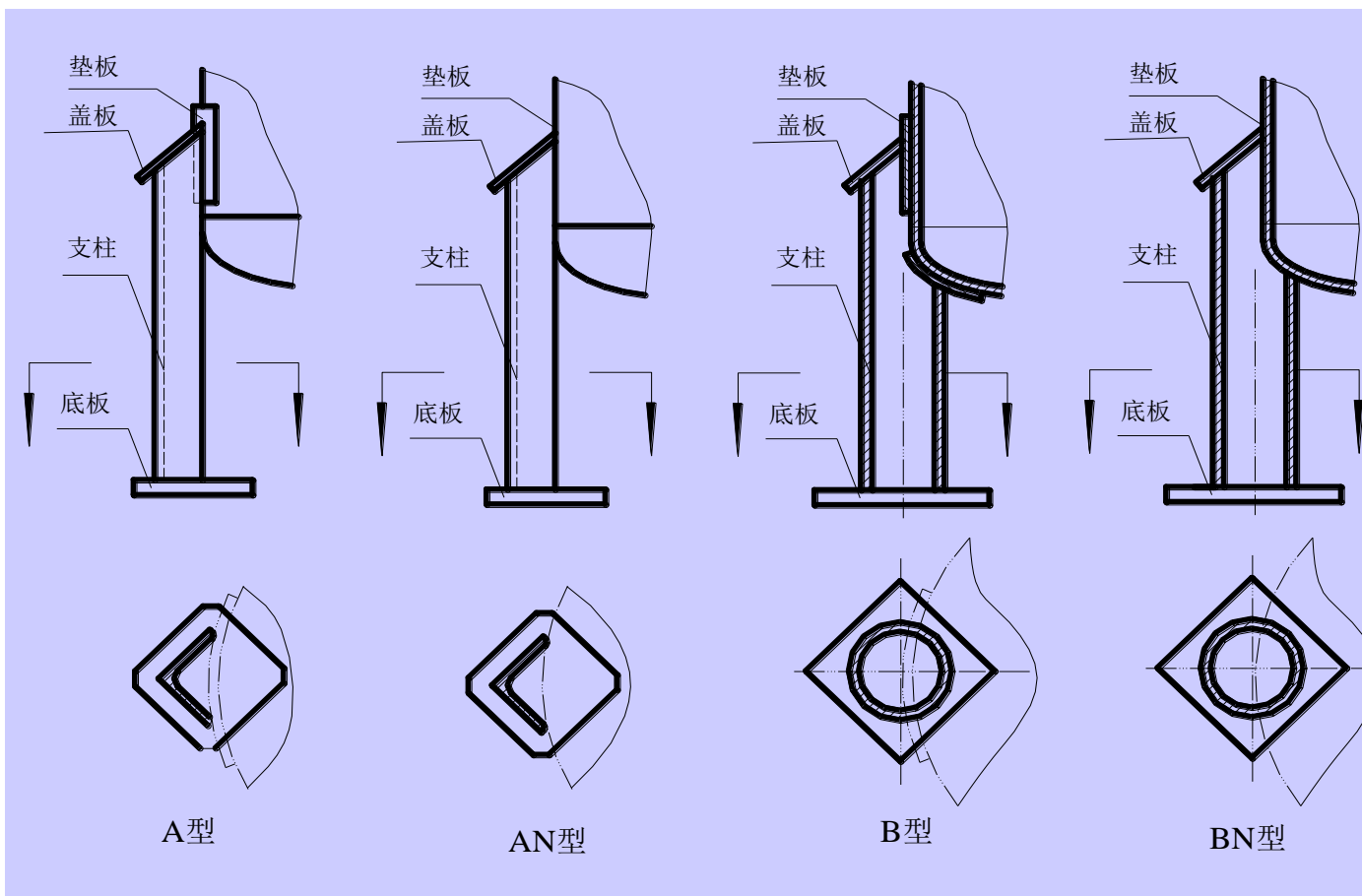


如A型、不带垫板, 3号耳式支座, 支座材料为Q235A.F

标记为: JB/T4724-92, 耳座AN3, Q235A.F

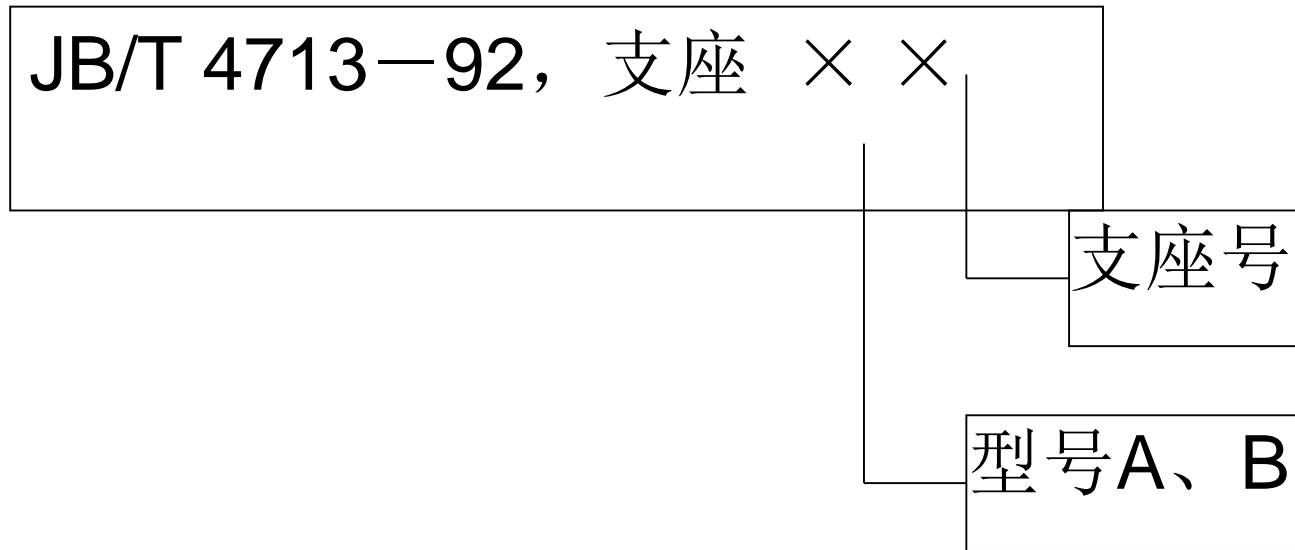
支腿式支座

支腿式支座：通常由一块底板、一块盖板、一个支柱焊接而成



支腿式支座

支腿式支座的标记为：



如容器公称直径DN800，角钢支柱支腿，不带垫板，材料为Q235-A.F，支承高度H=800mm。标记为：
JB/T 4713—92，支腿AN3—800

支腿式支座

使用范围

- (1) 公称直径DN400 ~ 1600;
- (2) 圆筒长度L与公称直径DN之比 $L/DN \leq 5$;
- (3) 容器的总高 $H \leq 5m$

支腿式支座刚性差，需安装在刚性基础上，不适用于与脉动管道相连的容器。

支承式支座

支承式支座由一块底板，两块支承板（钢管）和一块垫板焊接而成

使用范围

- （1）公称直径DN800~4000
- （2）圆筒长度L与公称直径DN之比 $L/DN \leq 5$
- （3）容器的总高 $H \leq 10\text{m}$



支承式支座

支承式支座的标记为：

JB/TB4724—92， 支座 × ×

支座号

型号A、B

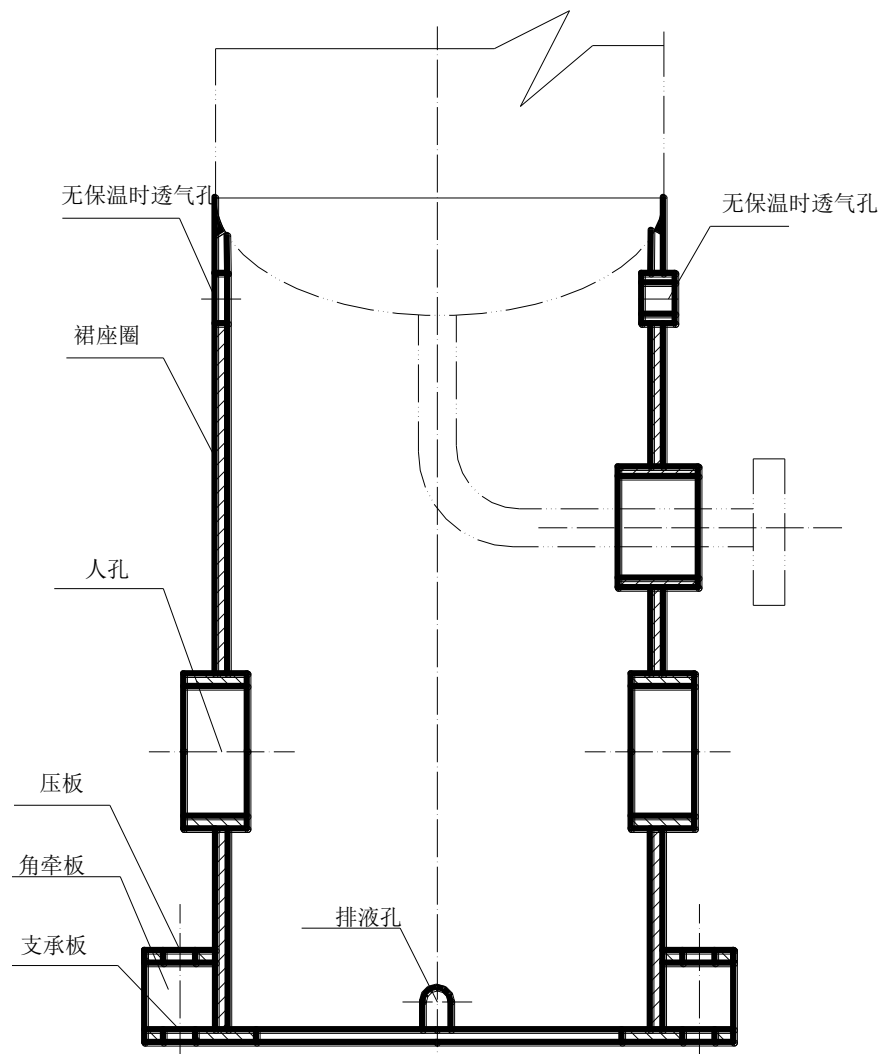
A： 由钢板焊制

B： 由钢管焊制

裙式支座

裙座的结构

裙座多用于高大直立设备



鞍式支座

鞍式支座常用于卧式设备。鞍座由一块底板、一块竖板和若干块肋板焊接而成。



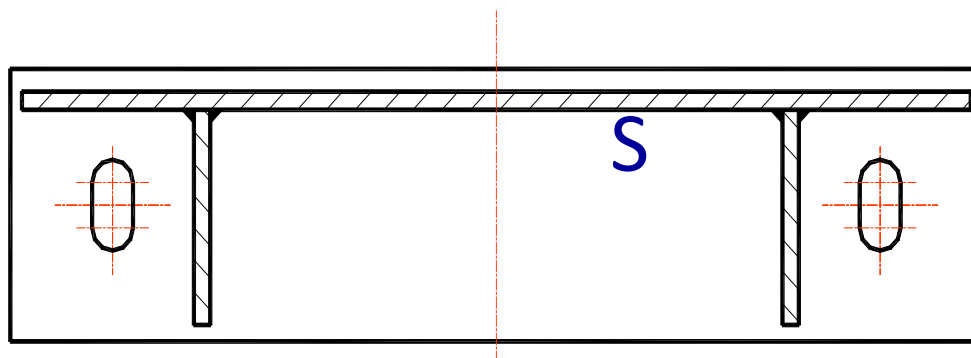
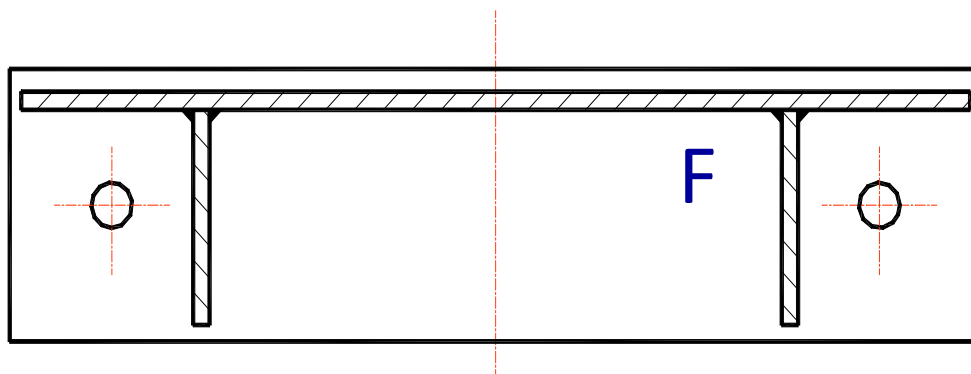
鞍式支座标准：
JB/T4712-1992

A型 轻型

B型 重型

鞍式支座

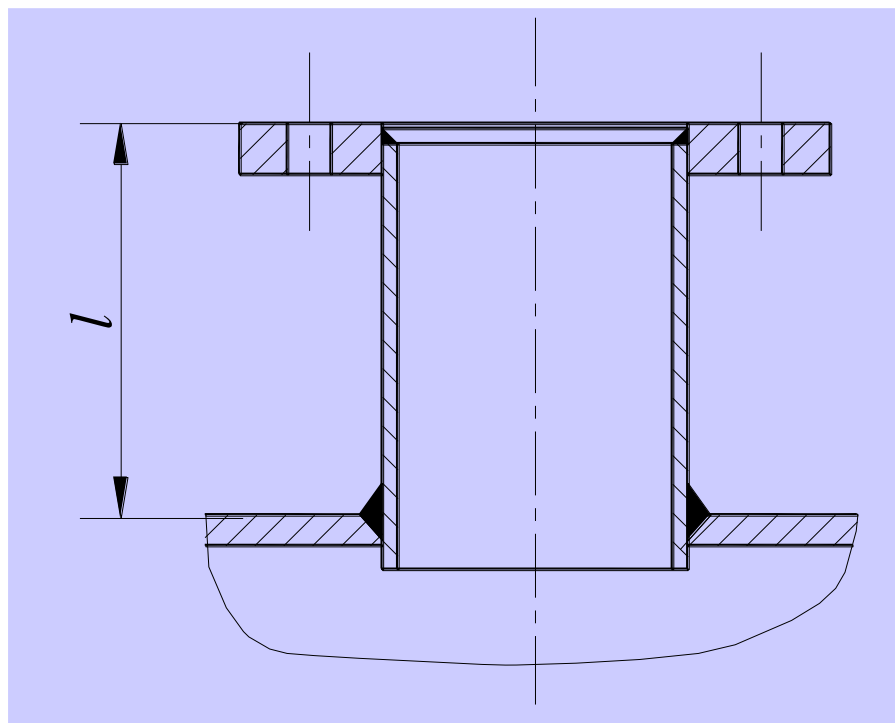
卧式设备一般采用双支座，一个F型，一个S型。



2. 压力容器常用零部件

● 设备开孔的装置

{ 设备的管口与凸缘
人孔
手孔及检查孔



2. 压力容器常用零部件

- 安全附件



安全阀



爆破片



压力表

2. 压力容器常用零部件

● 安全附件



作用：当压力超过正常工作压力，能自动打开，介质迅速排放，使设备内的压力保持在最高许用压力范围内，保证其处于安全状态。

安全阀

2. 压力容器常用零部件

● 安全附件

使用场合



爆破片

①容器内的介质易于结晶或聚合，或带有较多的粘性物质，容易堵塞安全阀，或使安全阀的阀芯和阀座粘在一起；

②容器的内压由化学反应或其他原因会迅速上升，安全阀难以及时排出所产生的大量气体，且无法及时降压。但不适用于压力剧增，反应速度达到爆轰时的压力容器；

③容器内的介质为剧毒或极为昂贵的气体，使用安全阀难以达到防漏要求。

2. 压力容器常用零部件

● 安全附件

压力表选用要求



压力表

- ①所选压力表必须与压力容器内的介质相适应；
- ②低压容器使用的压力精度不低于**2.5级**；中、高压容器使用的压力表精度不应低于**1.5级**；
- ③压力表盘刻度极限值为最高工作压力的**1.5~3.0倍**，最好选用**2倍**，表盘直径不应小于**100mm**。

3. 压力容器的设计

安全性

- 足够的强度
- 足够的刚度(或稳定性)
- 可靠的密封性能
- 一定的使用寿命

经济性

- 经济可靠的材料
- 经济的制造方法
- 低的操作和维护费用
- 长周期的安全运行
- 生产能力高，消耗系数低

原则：充分保证安全的前提下尽可能做到经济



3. 内压薄壁容器的设计

- 按容器的外径 R_o 和内径 R_i 的比值

厚壁压力容器

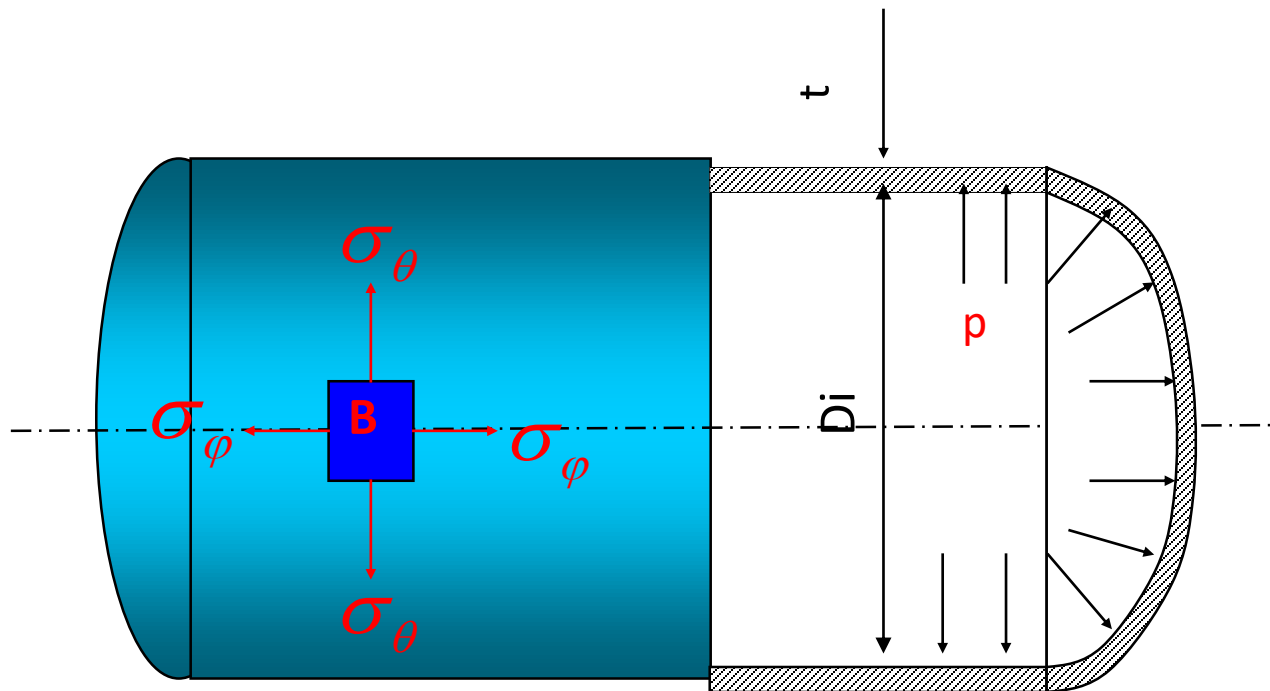
$$R_o/R_i = 1.2$$

薄壁压力容器

- 中低压容器使用
- 沿壁厚方向上的应力均匀分布
- 分析理论：薄膜理论

3. 内压薄壁容器的设计

薄壁壳体： $R_0 / R_i \leq 1.2$ 或 $t_n / D_i \leq 0.1$



二向应力状态： 经向应力 σ_φ 、周向应力 σ_θ

3. 内压薄壁容器的设计

- 径向应力 (轴向应力) σ_{φ}

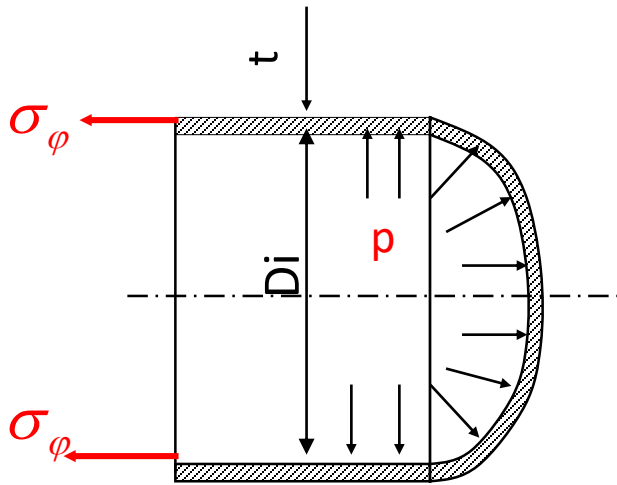
截面法

取右半部分受力分析：

列平衡方程：

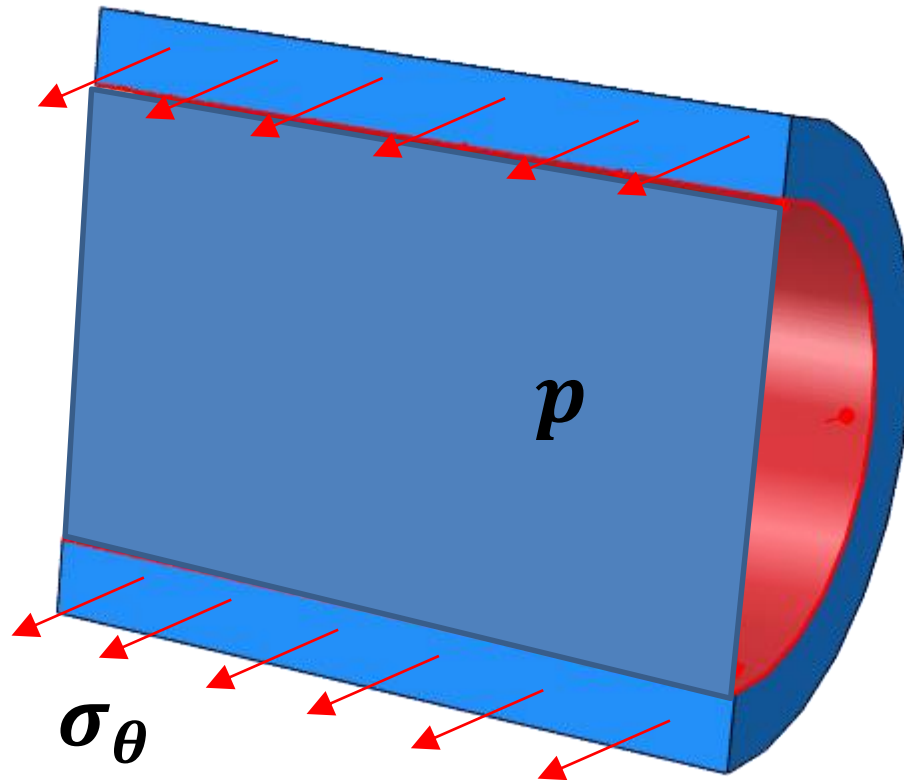
$$\sum F_x = 0 \quad \frac{\pi}{4} D^2 p = \pi D t \sigma_{\varphi}$$

$$\sigma_{\varphi} = \frac{pD}{4t}$$



3. 内压薄壁容器的设计

- 周向应力 (环向应力) σ_θ




$$pDL = 2\sigma_\theta Lt$$

$$\sigma_\theta = \frac{pD}{2t}$$


3. 内压薄壁容器的设计

• 薄壁容器：

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{\phi} = \frac{pD}{4t} \\ \sigma_{\theta} = \frac{pD}{2t} \end{array} \right.$$


周向应力是轴向应力的两倍

• 球形容器：

$$\sigma_{\phi} = \sigma_{\theta} = \frac{pD}{4t}$$


周向应力等于轴向应力

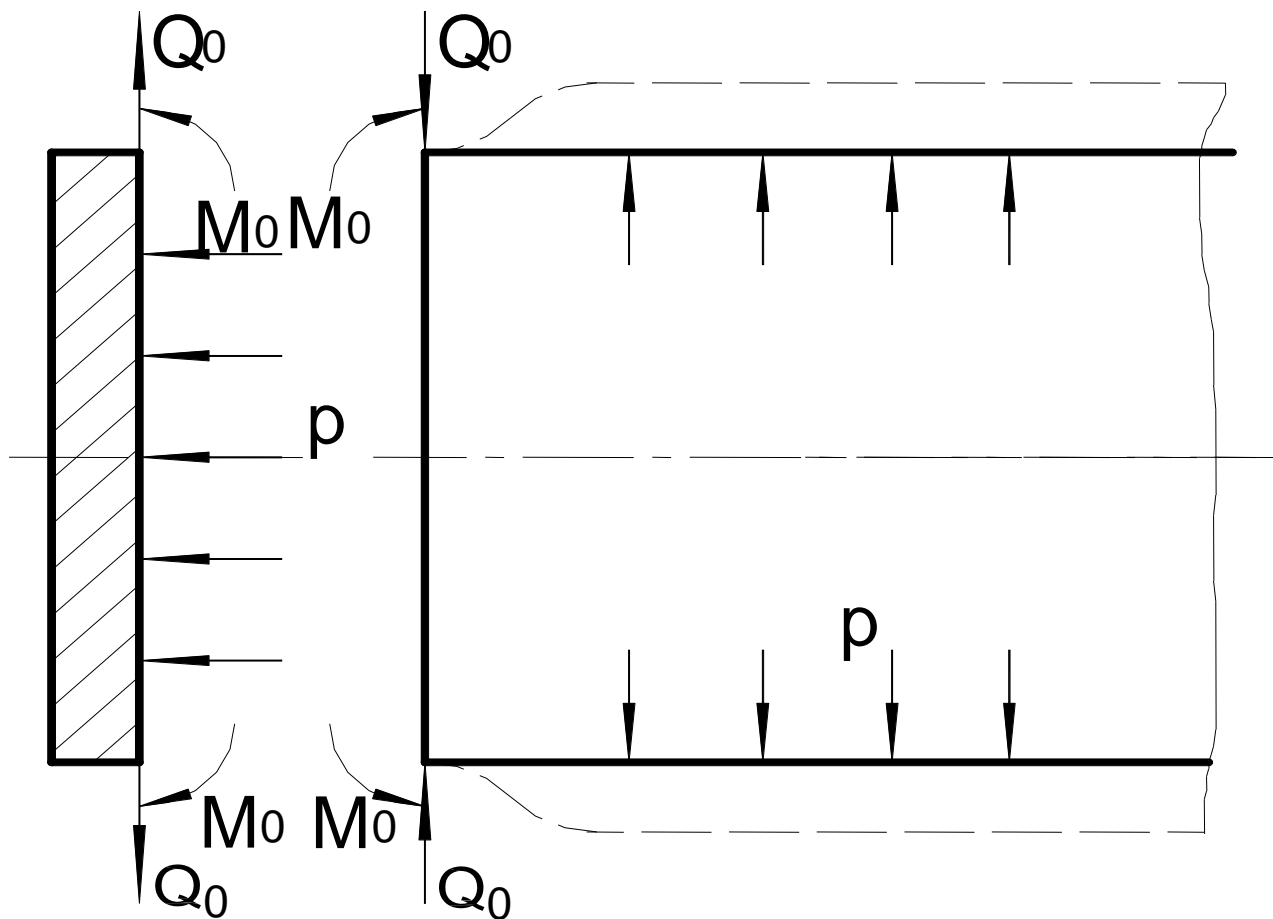
3. 内压薄壁容器的设计

- 边缘应力及其处理

产生原因

- 1 • 几何非线性
- 2 • 载荷非线性
- 3 • 约束非线性
- 4 • 材料非线性

3. 内压薄壁容器的设计



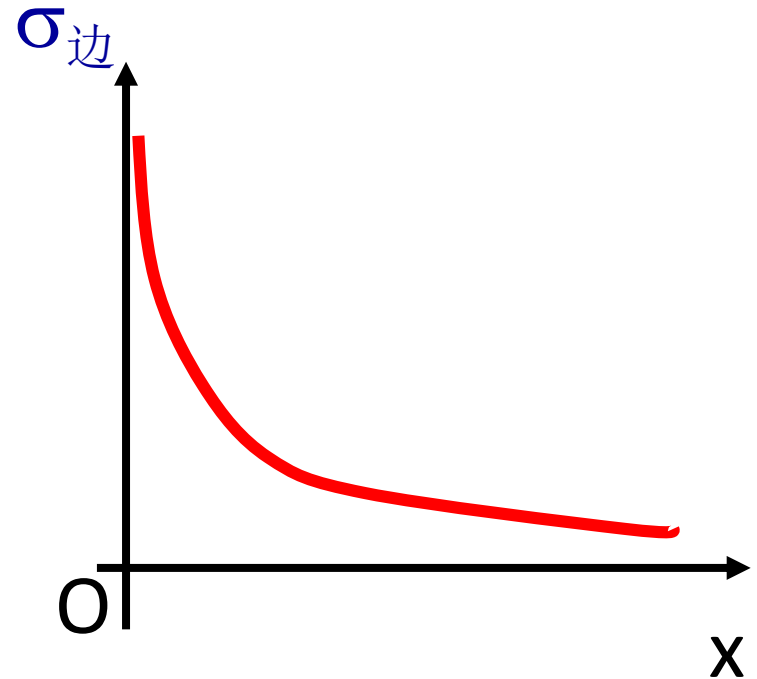
圆筒形容器的边缘效应

3. 内压薄壁容器的设计

边缘应力的特性

1) 局部性

——数值很大，
但作用范围很小。

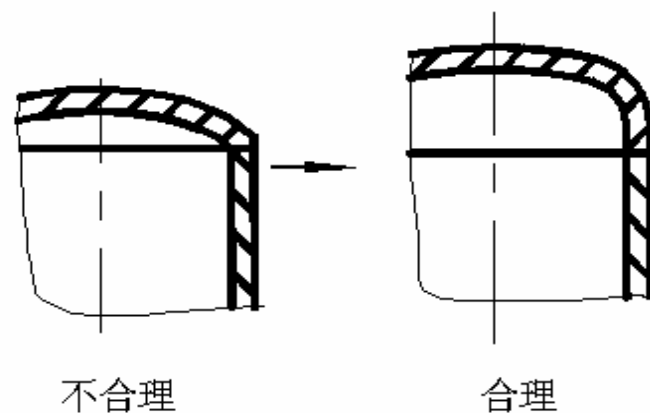
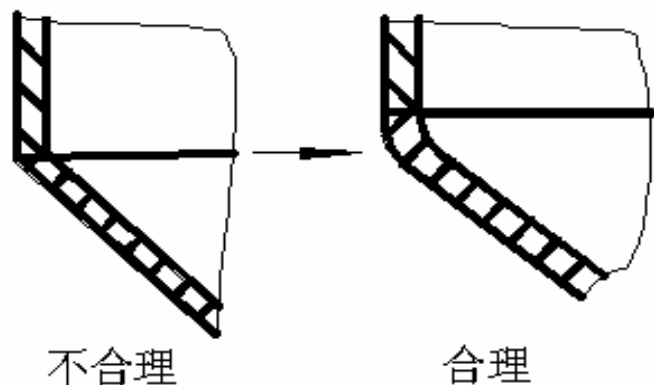
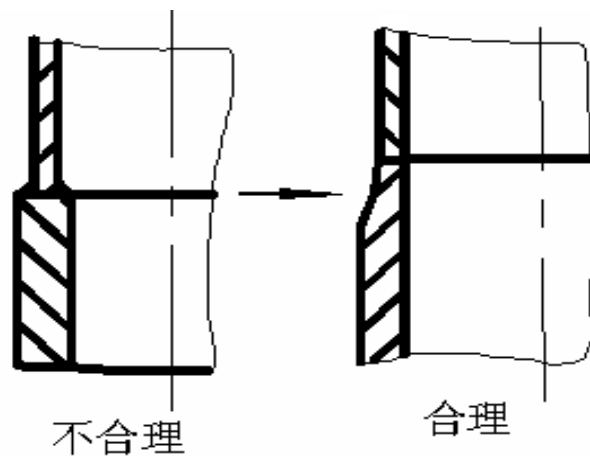
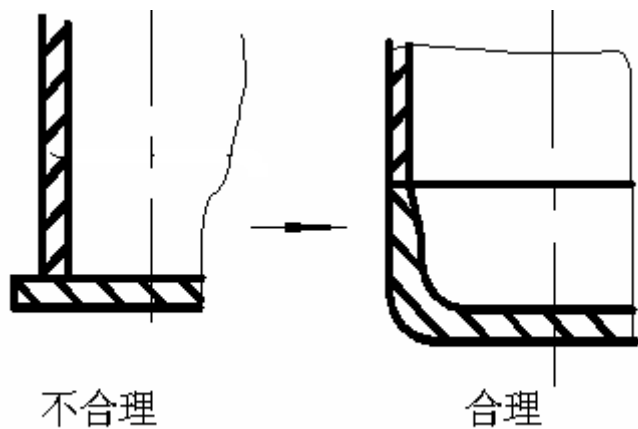


2) 自限性

——随塑性变形后，边缘应力得到缓解，
自动限制。

解决方法：结构上局部处理

3. 内压薄壁容器的设计



3. 内压薄壁容器的设计

• 内压薄壁容器的强度设计

前提条件:

➤ 不大于35MPa的内压容器的筒体和封头

设计准则为弹性失效

➤ 一般不考虑边缘应力，必要时以应力增强系数的形式引入设计计算。

➤ 依据：GB150-1999《钢制压力容器》

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{\phi} = \frac{pD}{4t} \\ \sigma_{\theta} = \frac{pD}{2t} \end{array} \right.$$

强度条件:

$$\frac{P(D_i + t)}{2t} \leq [\sigma]^t \phi$$

计算厚度:

$$t = \frac{PD_i}{2[\sigma]^t \phi - P}$$

最小理论计算壁厚

3. 内压薄壁容器的设计

- 设计厚度:

$$t_d = \frac{PD_i}{2[\sigma]^t\phi - P} + C_2$$



计算厚度



腐蚀裕度

- 名义厚度:

$$t_n = t_d + C_1 + \Delta = t + C_1 + C_2 + \Delta$$

3. 内压薄壁容器的设计

已知内径 D_i ，名义厚度 t_n 或者实测的最小壁厚 t_{min}

• 有效厚度： $t_e = t_n - C_1 - C_2$

• 强度校核条件

$$\sigma^t = \frac{p(D_i + t_e)}{2t_e} \leq [\sigma]^t \varphi$$

或者

$$[p_w] = \frac{2t_e [\sigma]^t \varphi}{D_i + t_e} \leq p$$

3. 内压薄壁容器的设计

- 设计参数的确定

设计压力和温度

焊接接头系数

厚度附加量

许用应力

3. 内压薄壁容器的设计

设计压力

- 通常： $P = (1.0 \sim 1.1)PW$
- 安全阀： $P = (1.05 \sim 1.1)PW$. 且不低于安全阀开启压力。
- 爆破片： $(1.15 \sim 1.75)PW$. 爆破压力 + 制造偏差
- 介质为液化气： T_{MAX} 时液化气饱和蒸汽压
- 介质为液体：当液柱静压大于 $0.05P$ 时，应计入液体静压力。

3. 内压薄壁容器的设计

设计温度

指容器正常工作时，在相应的设计压力下，器壁金属可能达到的最高和最低温度（低于0℃）

焊接接头系数


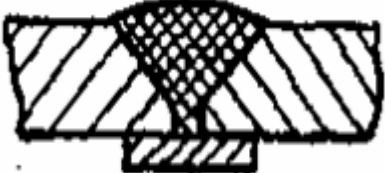
焊缝的结构形式

- 双面焊对接接头
- 单面焊对接接头

无损探伤水平

- 射线探伤或超声波探伤
- 《压力容器安全技术监察规程》

3. 内压薄壁容器的设计

焊接接头形式	无损检测要求	焊缝系数
<p>双面对接焊</p> 	100%	1.0
	局部	0.85
<p>单面对接焊</p> 	100%	0.9
	局部	0.8

3. 内压薄壁容器的设计

厚度附加量



➤ 厚度负偏差：表8-9

➤ 腐蚀裕量：

碳素钢和低合金钢：不小于3mm。

高合金钢：不小于2mm。

不锈钢：介质的腐蚀性极微，可取0mm。

3. 内压薄壁容器的设计

许用应力

- 许用应力由材料的机械性能 (σ_b 、 σ_s) 除以相应的安全系数而得。
- 强度极限根据材料的失效类型确定。
- 安全系数则受工况、材料、制造质量和计算方法的影响。

影响许用应力的因素：

- 1、使用温度
- 2、钢板厚度

3. 内压薄壁容器的设计

• 压力和气密性实验

目的： 检验容器在超工作压力下的宏观强度，包括检查容器材料的缺陷、容器各部分是否发生过大的变形、焊接强度和容器法兰联结的泄漏检查。

水压实验

试验压力： $P_T = 1.25P \frac{[\sigma]}{[\sigma]^t}$ 且不小于 $P + 0.1MPa$

气压实验

试验压力： $P_T = 1.15P \frac{[\sigma]}{[\sigma]^t}$ 且不小于 $P + 0.1MPa$

3. 内压薄壁容器的设计

压力实验时的应力校核

液压试验

$$\sigma_T = \frac{p_T (D_i + t_e)}{2t_e \varphi} \leq 0.9\sigma_s$$

气压试验

$$\sigma_T = \frac{p_T (D_i + t_e)}{2t_e \varphi} \leq 0.8\sigma_s$$

3. 内压薄壁容器的设计

气密性实验

- 气密性试验应在液压试验合格后进行，以检查压力容器的整体密封性能。
- 实验压力为容器的设计压力。
- 介质：干净空气或氮气、惰性气体
- 温度：碳钢、低合金钢等，不低于15℃
- 保压：30min，升压缓慢，稳定。

3. 内压薄壁容器的设计

设计

计算厚度

$$t = \frac{p D_i}{2[\sigma]^t \phi - p}$$

↑ 设计压力

设计厚度

$$t_d = \frac{P D_i}{2[\sigma]^t \phi - P} + C_2$$

名义厚度

$$t_n = t_d + C_1 + \Delta = t + C_1 + C_2 + \Delta$$

水压试验

有效厚度:

$$t_e = t_n - C_1 - C_2 = t + \Delta = t_{min} - C_2$$

试验压力:

$$P_T = 1.25 P \frac{[\sigma]}{[\sigma]^t} \quad \text{且不小于 } P + 0.1 \text{ MPa}$$

↑ 试验温度
↑ 设计温度

压力试验下的强度校核

$$\sigma_T = \frac{p_T (D_i + t_e)}{2 t_e} \leq 0.9 \phi \sigma_s$$

3. 内压薄壁容器的设计

设计

计算厚度

设计压力

$$t = \frac{p D_i}{2[\sigma]^t \phi - p}$$

设计厚度

$$t_d = \frac{P D_i}{2[\sigma]^t \phi - P} + C_2$$

名义厚度

$$t_n = t_d + C_1 + \Delta = t + C_1 + C_2 + \Delta$$

气压试验

有效厚度:

$$t_e = t_n - C_1 - C_2 = t + \Delta = t_{min} - C_2$$

试验压力:

试验温度

$$P_T = 1.15 P \frac{[\sigma]}{[\sigma]^t} \quad \text{且不小于 } P + 0.1 \text{ MPa}$$

设计温度

压力试验下的强度校核

$$\sigma_T = \frac{p_T (D_i + t_e)}{2 t_e} \leq 0.8 \phi \sigma_s$$

3. 内压薄壁容器的设计

- 例：一台卧式液氨储罐的设计压力为2.5MPa，操作温度为-5~44℃，储罐内径为1200mm，试选用储罐的材料并确定筒体壁厚。

解：第一方案，使用16MnR，估计厚度约6~16mm

确定 $[\sigma]^t=170$ MPa （附录Ⅱ）

确定 $[\sigma_s]=345$ MPa （附录Ⅱ）

确定焊接接头系数 ϕ —— （表8-8） 0.85

确定钢板负偏差 C_1 —— （表8-9） 0.80

确定腐蚀裕量 C_2 —— 1.0

3. 内压薄壁容器的设计

将上述数据代入下式：

设计厚度 = 计算厚度 + 腐蚀裕度

$$\begin{aligned} t_d &= \frac{pD_i}{2[\sigma]^t \phi - P} + C_2 \\ &= \frac{2.5 \times 1200}{2 \times 170 \times 0.85 - 2.5} + 1.0 = 11.47 mm \end{aligned}$$

3. 内压薄壁容器的设计

名义厚度 = 设计厚度 + 钢板厚度负偏差 + 圆整值

$$\begin{aligned} t_n &= t_d + C_1 + \Delta = 11.47 + 0.8 + \Delta \\ &= 12.27 + \Delta = 14mm \end{aligned}$$

该厚度同时满足最小壁厚要求。

储罐的水压实验压力：

$$P_T = 1.25P \frac{[\sigma]}{[\sigma]^t} = 1.25 \times 2.5 = 3.125 MPa$$

取 $p_T = 3.13 \text{ MPa}$

3. 内压薄壁容器的设计

有效厚度 = 名义厚度 - 钢板厚度负偏差 - 腐蚀裕量

$$t_e = t_n - C_1 - C_2 = 14 - 0.8 - 1 = 12.2mm$$

储罐试验压力下的应力校核：

$$\sigma_T = \frac{P_T(D_i + t_e)}{2t_e} \leq 0.9\phi\sigma_s$$

$$\sigma_T = \frac{3.13(1200 + 12.2)}{2 \times 12.2} = 155.5MPa$$

$$< 0.9 \times 0.85 \times 345 = 264MPa$$

用16MnR材料，满足水压试验时的强度要求。

3. 内压薄壁容器的设计

第二方案，使用20R，估计厚度约6~16mm

确定 $[\sigma]^t = 133 \text{ MPa}$ （附录 II）

确定 $[\sigma_s] = 245 \text{ MPa}$ （附录 II）

确定焊接接头系数 ϕ —— （表8-8） 0.85

确定钢板负偏差 C_1 —— （表8-9） 0.80

确定腐蚀裕量 C_2 —— 1.0

3. 内压薄壁容器的设计

将上述数据代入下式：

设计厚度 = 计算厚度 + 腐蚀裕度

$$\begin{aligned} t_d &= \frac{pD_i}{2[\sigma]^t \phi - p} + C_2 \\ &= \frac{2.5 \times 1200}{2 \times 133 \times 0.85 - 2.5} + 1.0 = 14.4mm \end{aligned}$$

3. 内压薄壁容器的设计

名义厚度 = 设计厚度 + 钢板厚度负偏差 + 圆整值

$$\begin{aligned} t_n &= t_d + C_1 + \Delta = 14.4 + 0.8 + \Delta \\ &= 15.2 + \Delta = 16mm \end{aligned}$$

储罐的水压试验压力：

$$p_T = 1.25 p \frac{[\sigma]}{[\sigma]^t} = 1.25 \times 2.5 = 3.125 MPa$$

取 $p_T = 3.13 \text{ MPa}$

3. 内压薄壁容器的设计

有效厚度 = 名义厚度 - 钢板厚度负偏差 - 腐蚀裕量

$$t_e = t_n - C_1 - C_2 = 16 - 0.8 - 1 = 14.2mm$$

储罐试验压力下的应力校核：

$$\sigma_T = \frac{P_T (D_i + t_e)}{2t_e} \leq 0.9\phi\sigma_s$$

$$\sigma_T = \frac{3.13 \times (1200 + 14.2)}{2 \times 14.2} = 133.6MPa$$

$$< 0.9 \times 0.85 \times 245 = 187.43MPa$$

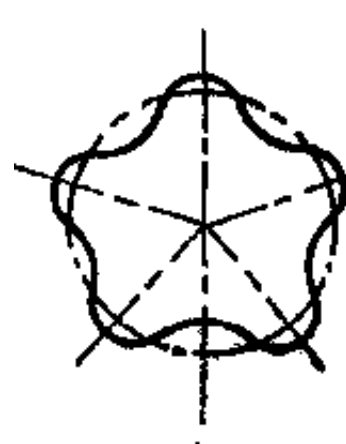
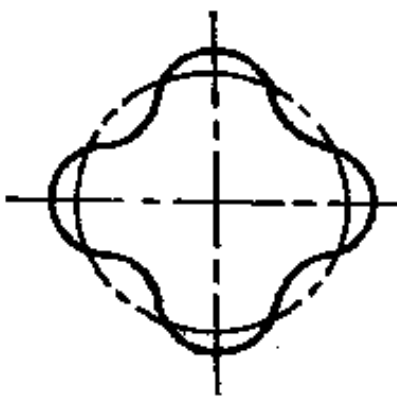
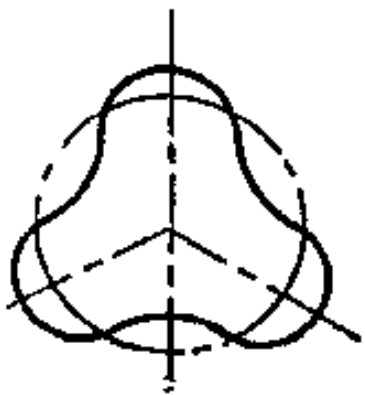
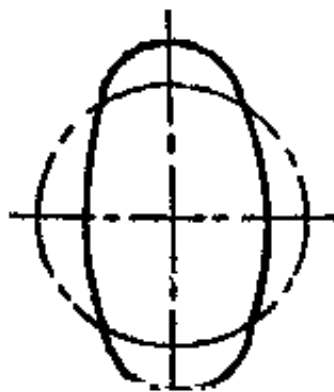
用20R材料，满足水压试验时的强度要求。

4. 外压薄壁容器的设计

- 外压容器的失稳

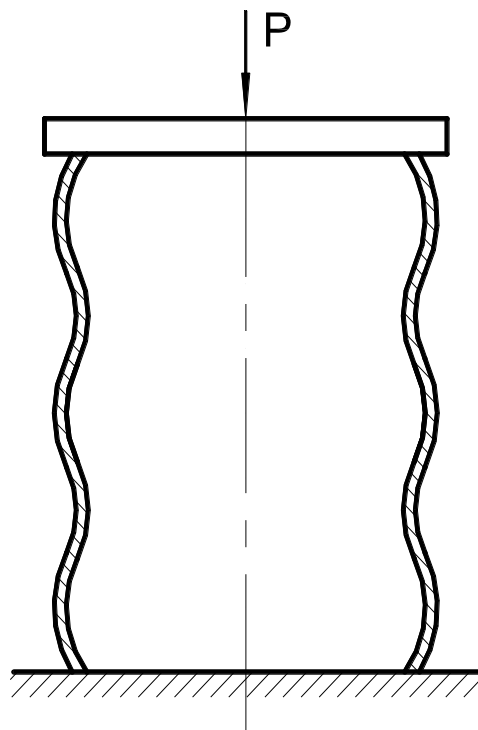
- 外压容器的定义：外压大于内压的容器。
- 失效的主要形式为失稳。其后果是造成容器几何形状偏离原形状。
- 常见外压容器：减压蒸馏塔；真空冷凝器；结晶器；带蒸汽加热夹套。

4. 外压薄壁容器的设计



侧向外压的失稳

4. 外压薄壁容器的设计



轴向外压的失稳

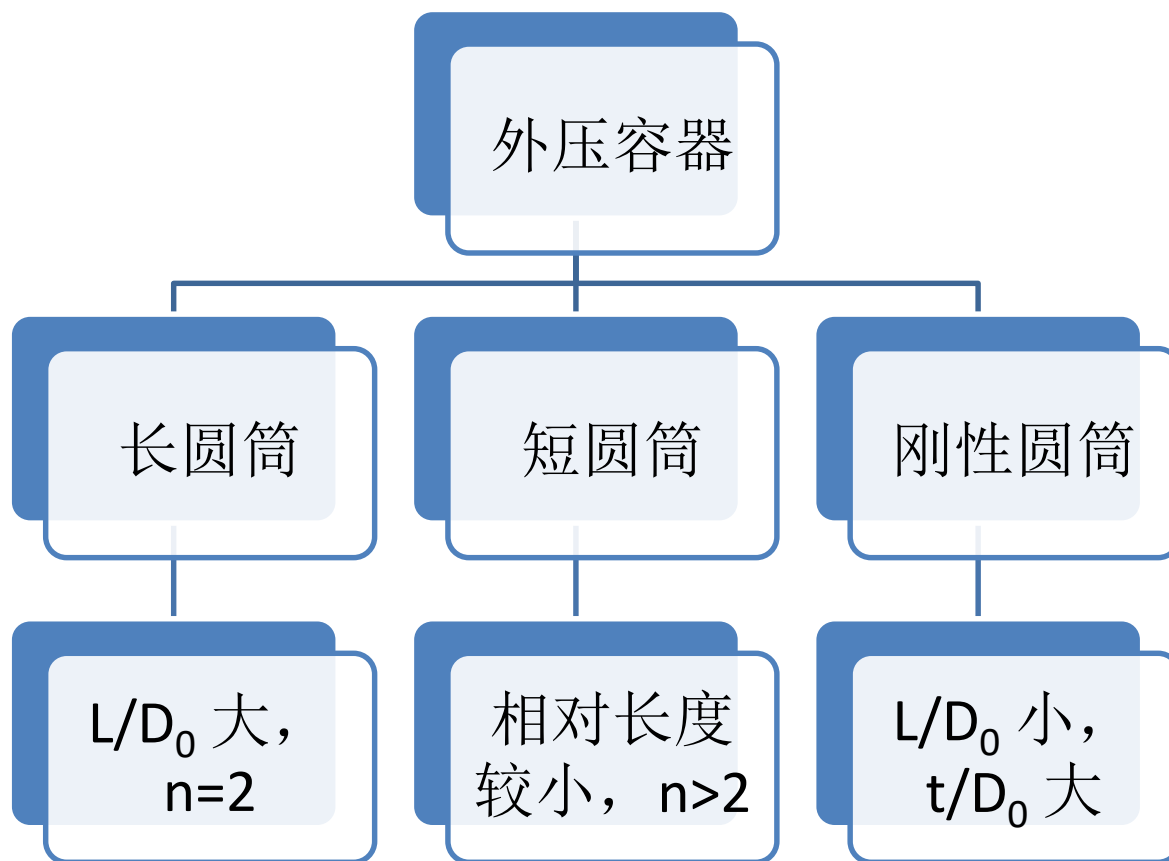
4. 外压薄壁容器的设计

- 压杆失稳的主要因素：
 - 1) 外载大小
 - 2) 压杆柔度(细长比)
 - 3) 材料的力学性能。
- 容器失稳与压杆失稳类似，取决于：
 - 1) 圆筒外径与有效壁厚之比 D_o/t_e ;
 - 2) 圆筒长度与外径的比值 L/D_o 。
 - 3) 材料的力学性能 (E , μ)

其他：形状偏差，圆度

4. 外压薄壁容器的设计

- 外压容器的分类



4. 外压薄壁容器的设计

- 临界压力的计算

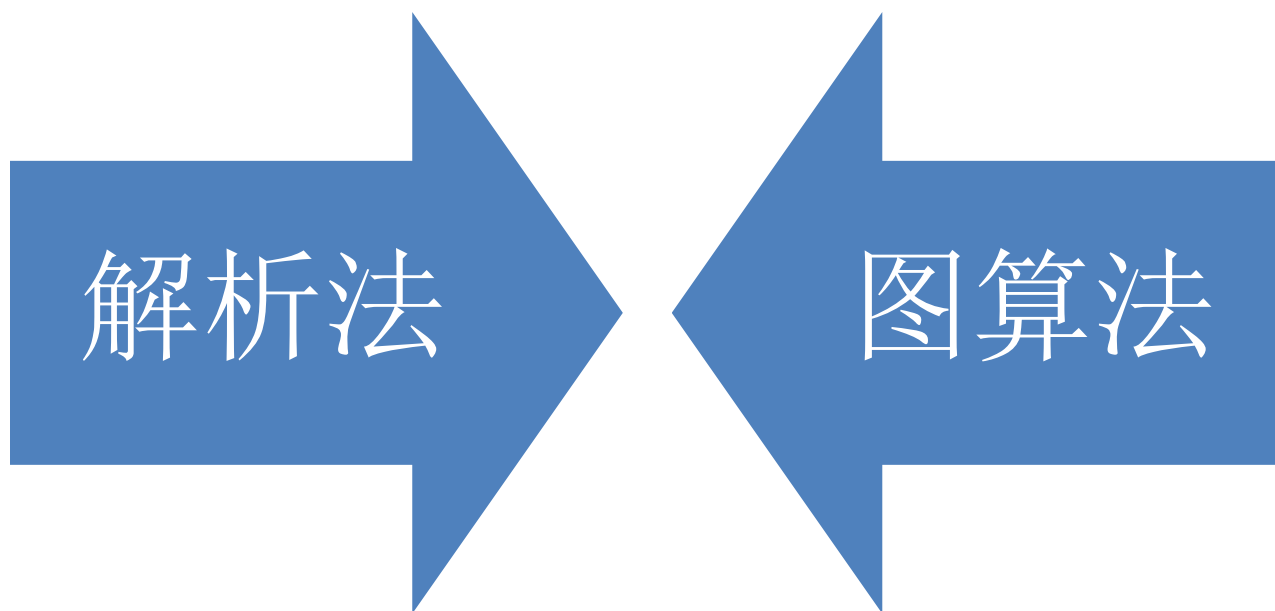
	长圆筒	短圆筒
临界压力	$P_{cr} = 2.2E\left(\frac{t}{D_o}\right)^3$	$P_{cr} = \frac{2.59E}{L/D_o}\left(\frac{t}{D_o}\right)^{2.5}$
临界应力	$\sigma_{cr} = 1.1E\left(\frac{t}{D_o}\right)^2$	$\sigma_{cr} = \frac{1.30E}{L/D_o}\left(\frac{t}{D_o}\right)^{1.5}$

临界长度

$$L_{cr} = 1.17D_o \cdot \sqrt{\frac{D_o}{t}}$$

4. 外压薄壁容器的设计

- 外压容器的设计计算



4. 外压薄壁容器的设计

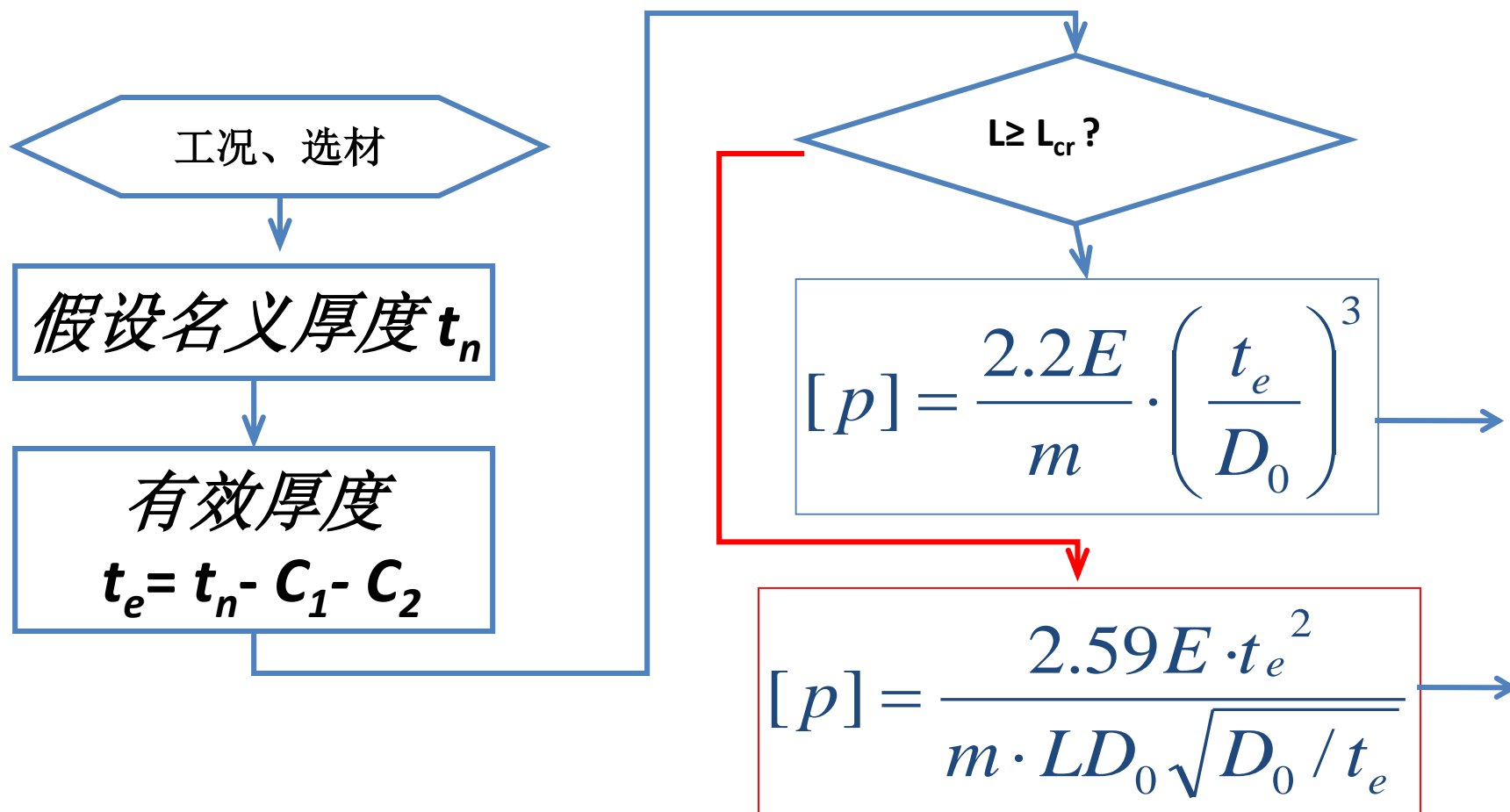
1. 解析法

长圆筒 ($L \geq L_{cr}$) :
$$p_{cr} = \frac{2E}{1 - \mu^2} \left(\frac{t}{D_0} \right)^3$$

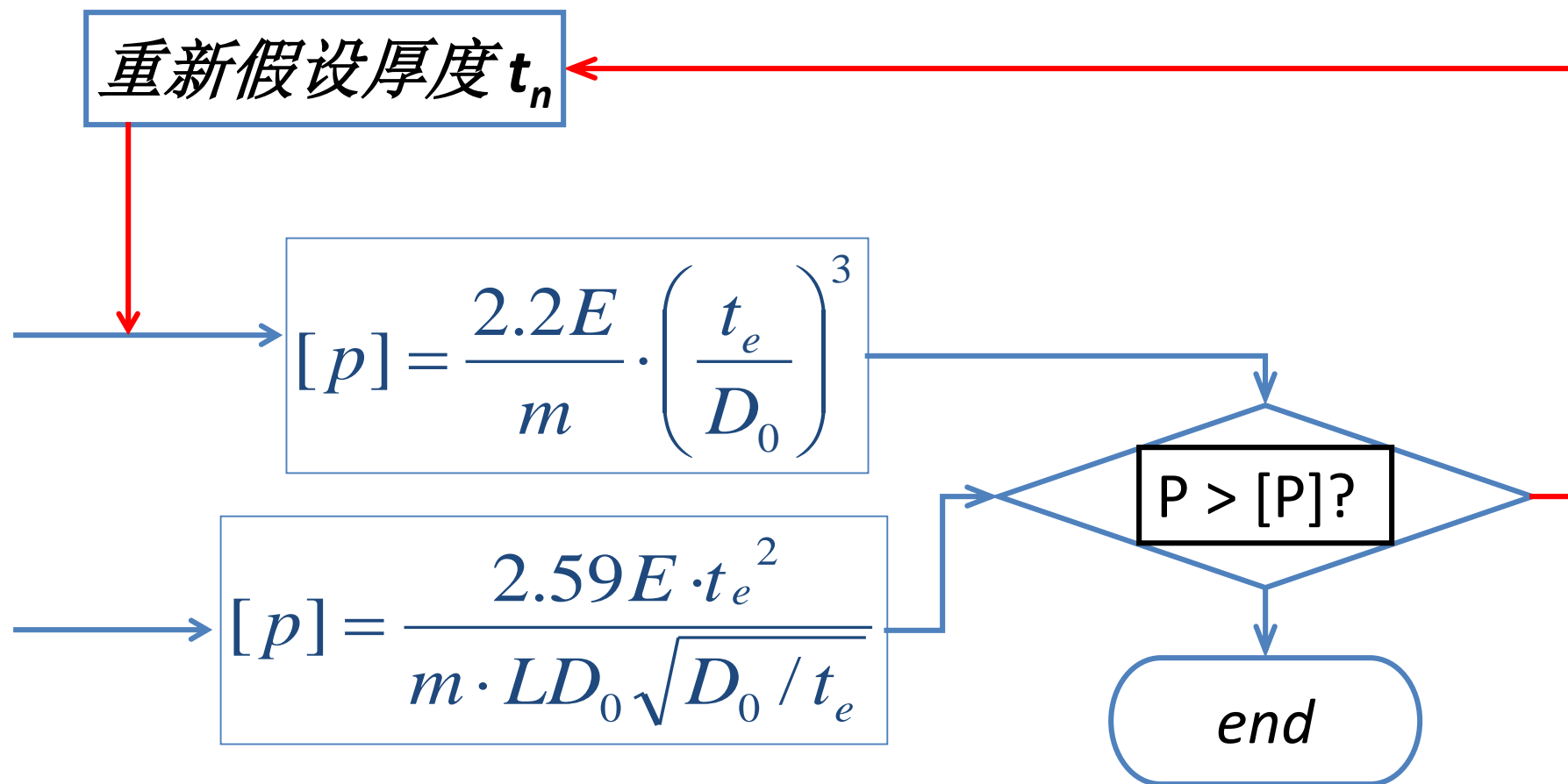
短圆筒 ($L < L_{cr}$) :
$$p_{cr} = \frac{2.59E}{L/D_0} \left(\frac{t}{D_0} \right)^{2.5}$$

$$[p] = \frac{p_{cr}}{m}$$

4. 外压薄壁容器的设计



4. 外压薄壁容器的设计



注意：本计算方法适用于弹性失稳， $\sigma_{cr} = p_{cr} D / 2t_e \leq \sigma_s$

4. 外压薄壁容器的设计

2. 图算法

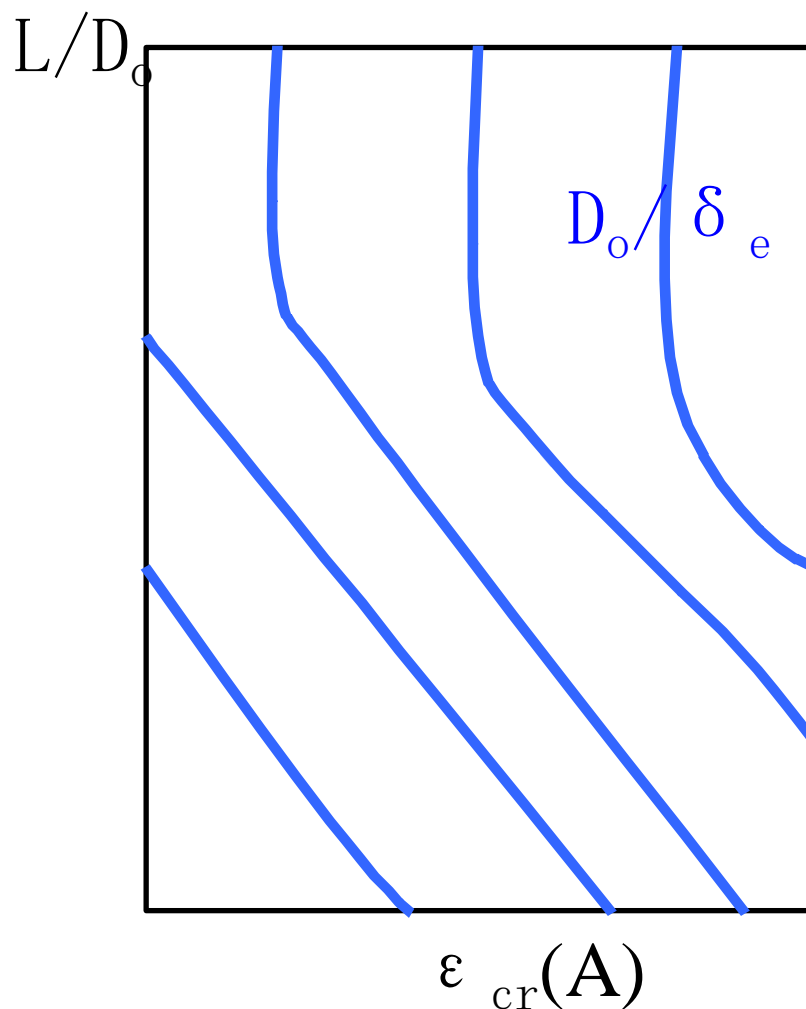
图算法来源:

外压圆筒几何参数计算图

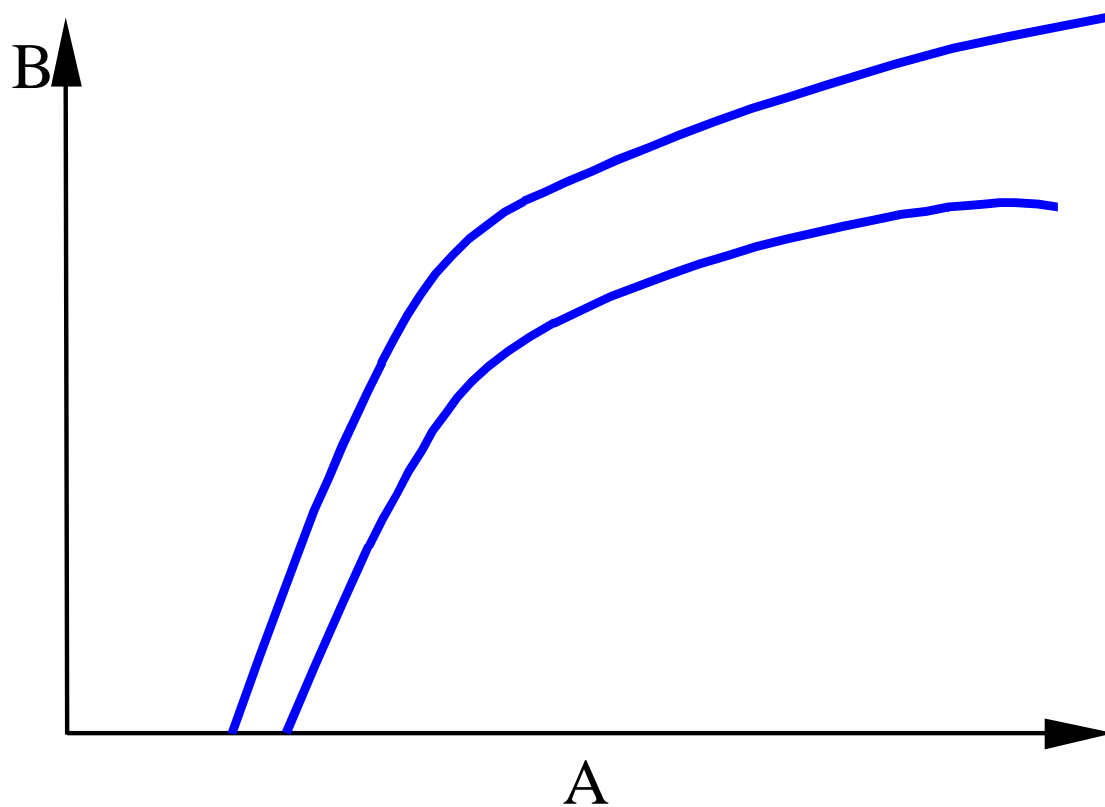
应变A与材料无关

外压圆筒厚度计算图

不同材料应变A与 P_{cr} 的关系



4. 外压薄壁容器的设计



外压圆筒厚度计算图 (B—A图)

4. 外压薄壁容器的设计

A表示圆筒失稳时临界应力所对应的**周向应变**:

$$A = \varepsilon_{cr} = \frac{\sigma_{cr}}{E} \quad \text{而:} \quad \sigma_{cr} = \frac{p_{cr} D_0}{2t_e}$$

即可得到**许用设计外压力**与系数**A**的关系:

$$[p] = \frac{p_{cr}}{m} = \frac{2t_e \sigma_{cr}}{m D_0} = \frac{2AE}{m(D_0/t_e)} = \frac{2AE}{3 \cdot (D_0/t_e)}$$

令: $B = \frac{[p] \cdot D_0}{t_e}$ 可得**B与A**间的关系式:

$$B = \frac{2}{3} AE = \frac{2}{3} \sigma_{cr} \quad \text{而:} \quad [p] = \frac{B}{(D_0/t_e)}$$

4. 外压薄壁容器的设计

- 设计方法和计算步骤

- 1 假设 t_n , 计算 t_e

- 2 确定比值: L/D_0 和 D_0/t_e

- 3 查几何参数计算图8-21, 确定A值

- 4 根据不同材料查厚度计算图8-22,23,24确定B值,
求得许用设计外压[P]:

当A在温度线的右方: $[p] = \frac{B}{(D_0/t_e)}$

当A在温度线的左方, 属弹性失稳 $[p] = \frac{2AE}{3 \cdot (D_0/t_e)}$

- 5 比较P与[P], 以P小于且接近于[P]为原则

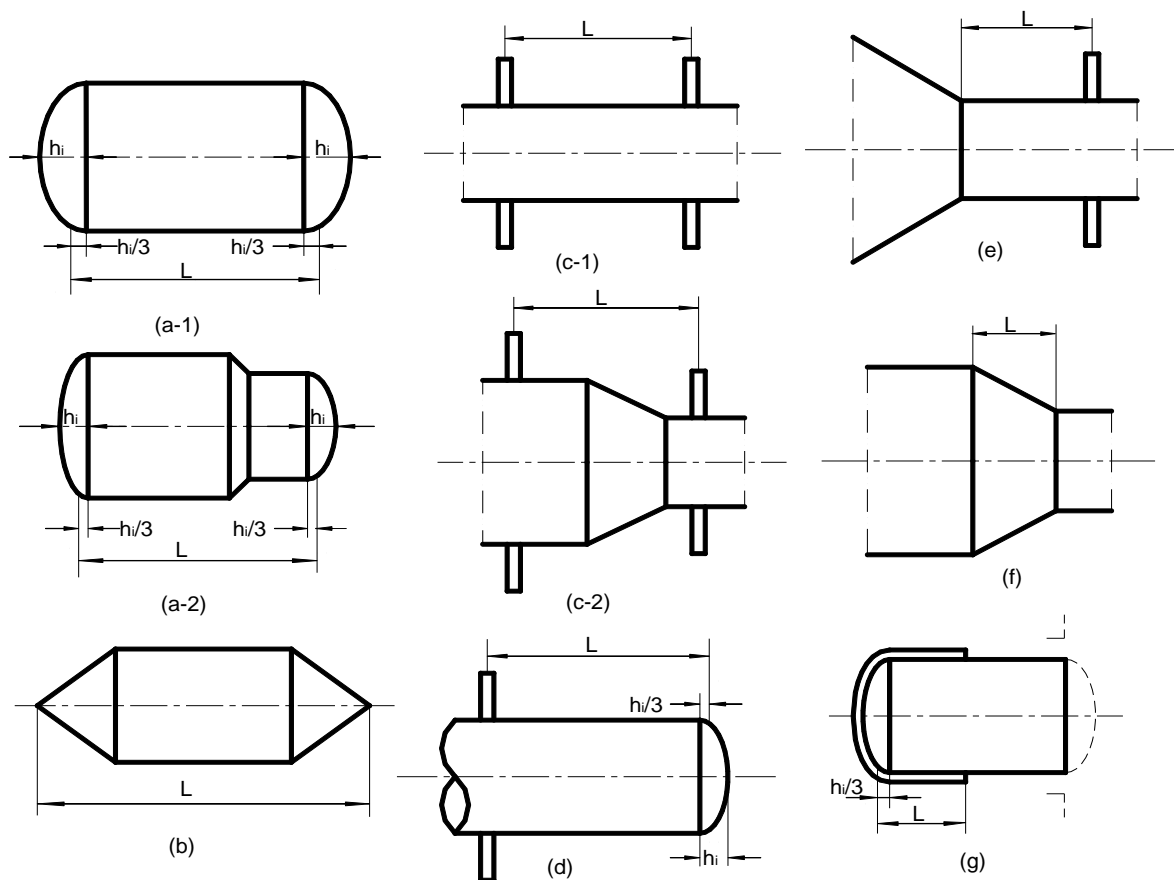
4. 外压薄壁容器的设计

设计参数:

- 设计外压力 p : GB150-1998
- 圆筒计算长度 L : 两个刚性构件之间的最大距离
- 稳定系数 m : 《JB741-80钢制焊接压力容器技术条件》
- 试验压力 p_T : 液压试验 $p_T = 1.25p$
气压试验 $p_T = 1.15p$

4. 外压薄壁容器的设计

- 圆筒计算长度 L



4. 外压薄壁容器的设计

• 加强圈的作用和结构

作用： 设置加强圈的目的是给筒体增加一刚性支承，以减少筒体计算长度。

计算步骤：

1. 初步选定加强圈的数目和间距
2. 选择加强圈材料和截面尺寸，计算加强圈的横截面面积 A_S 和综合惯矩 J_S
3. 用 $B-A$ 图求 A 值
4. 求加强圈所需惯矩
5. 比较 J 与 J_S ，要求 $J_S > J$

5 压力容器的安全使用与管理

• 压力容器的安全技术监察

1.依据: 《压力容器安全技术监察规程》

2.压力容器的设计监察:

设计单位具有设计类别、品种范围、设计资格的批准书, 设计资格印章, 对设计质量负责

3.压力容器的制造监察:

制造单位具有制造许可证, 检验单位的监检

5 压力容器的安全使用与管理

1.管理体系与职责

2.建立压力容器计算档案

3.压力容器的使用登记

- 核定压力容器安全状况等级：5级, 表8-4, 检规
- 登记使用:
- 变更与判废

4.制定压力容器的安全操作规程

5.正确操作容器

5 压力容器的安全使用与管理

- 检查目的
- 检查内容
外部检查, 内外部检查, 耐压试验
- 检查程序
- 检查报告
<在用压力容器检验报告书>, 包括检验结论报告和各检验项目的分项报告

Thank you !

8-2 某厂需要设计一台液氨贮槽。其内径为1600mm，总容积为12m³，最大工作压力1.7MPa，工作温度-10°C~40°C。确定类别和选择材料，确定筒体壁厚。

解：1) $p = 1.7\text{MPa}$ \therefore 为中压容器

$pV = 1.7 \times 12 = 20.4 \text{ MPa} \cdot \text{m}^3$, 低温液体储存容器, V 大于5m³
 \therefore 该容器为第三类压力容器。

2) 如采用16MnR钢, $\sigma_s = 345\text{MPa}$, $[\sigma]^t = 170\text{MPa}$,
 $\phi = 1$, $C_1 = 0.8\text{mm}$, $C_2 = 1\text{mm}$, $p = 1.87\text{MPa}$

$$t_d = \frac{pD_i}{2[\sigma]^t \phi - p} + C_2 = \frac{1.1 \times 1.7 \times 1600}{2 \times 170 \times 0.85 - 1.1 \times 1.7} + 1 = 11.42 \text{ mm}$$

$$\therefore t_n = 11.42 + 0.8 + \Delta = 14 \text{ mm}$$

3) 水压试验

$$[\sigma]^t = [\sigma] = 170 \text{ MPa}$$

$$p_T = 1.25 p \frac{[\sigma]}{[\sigma]^t} = 1.25 \times 1.1 \times 1.7 = 2.34 \text{ MPa}$$

$$t_e = t_n - C_1 - C_2 = 14 - 0.8 - 1 = 12.2 \text{ mm}$$

$$\sigma_T = \frac{p_T (D_i + t_e)}{2t_e} = \frac{2.34(1600 + 12.2)}{2 \times 12.2} = 154.61 \text{ MPa}$$

$$0.9\sigma_s \varphi = 0.9 \times 345 \times 0.85 = 263.93 \text{ MPa} > \sigma_T$$

∴ 水压试验可以通过。取 $t_n = 14 \text{ mm}$ 。

8-4 一材质为**20R**的反应釜，其内径为**1400mm**，安全阀开启压力**1.4MPa**，工作温度**200°C**，取腐蚀裕量**0.4mm/a**，焊缝系数 **$\phi=0.85$** ，最小厚度**12mm**。**问能否使用到3年后下一检查周期。**

解：1) 查表 $\sigma_s=245 \text{ Mpa}$, $[\sigma]^t=123 \text{ MPa}$, $\phi=0.85$, $p=1.4 \text{ Mpa}$
三年后 $t_e = 12 - 0.4 \times 3 = 10.8 \text{ mm}$

$$\sigma^t = \frac{p(D_i + t_e)}{2t_e} = \frac{1.4(1400 + 10.8)}{2 \times 10.8} = 91.44 \text{ MPa}$$

$$[\sigma]^t \phi = 123 \times 0.85 = 104.55 > \sigma^t = 91.44 \text{ MPa}$$

\therefore 三年后强度能够满足。

2) 水压试验

$$[\sigma]^t=123 \text{ Mpa}, \quad [\sigma]=133 \text{ Mpa}, \quad \sigma_s=245 \text{ Mpa}$$

$$p_T = 1.25 p \frac{[\sigma]}{[\sigma]^t} = 1.25 \times 1.4 \times \frac{133}{123} = 1.89 \text{ MPa}$$

$$t_e = 10.8 \text{ mm}$$

$$\sigma_T = \frac{p_T (D_i + t_e)}{2t_e} = \frac{1.89(1400 + 10.8)}{2 \times 10.8} = 122.42 \text{ MPa}$$

$$0.9\sigma_s\varphi = 0.9 \times 245 \times 0.85 = 187.43 \text{ MPa} > \sigma_T$$

∴ 三年后水压试验也可以通过。

8-5 某化肥厂一水塔内径为800mm，厚度12mm，材料为20R钢，塔的工作压力为1.2 MPa，工作温度60°C，取焊缝系数 $\phi=0.80$ ，设计年限要求15年，因受硫化氢严重腐蚀，使用9年后突然爆炸，问此时塔体厚度仅存多少？介质材料的腐蚀速率为多少？

解：1) 查表 $\sigma_s=245$ Mpa, $[\sigma]^t=133$ MPa
取 $C_1 = 0.8$ mm

爆炸说明强度不足：
$$\frac{P(D_i + t_e)}{2t_e} > \phi[\sigma]^t$$

$$t_e < \frac{pD_i}{2[\sigma]^t \phi - p} = \frac{1.1 \times 1.2 \times 800}{2 \times 133 \times 0.8 - 1.1 \times 1.2} = 4.99 \text{ mm}$$

$$4.99 + 0.8 + C_2 > 12 \text{ mm} \quad \therefore C_2 > 12 - 5.79 = 6.21 \text{ mm}$$

当 $a = 9$ 年

$$\therefore \text{腐蚀速率} = \frac{C_2}{a} = \frac{6.21}{9} = 0.69 \text{ mm} / a$$