

第四章 压力容器设计

CHAPTER IV

Design of Pressure Vessels

4.2 设计准则

4.1 概述

4.2 设计准则

4.3 常规设计

4.4 分析设计

4.5 疲劳分析

4.6 压力容器设计技术进展

4.2 设计准则

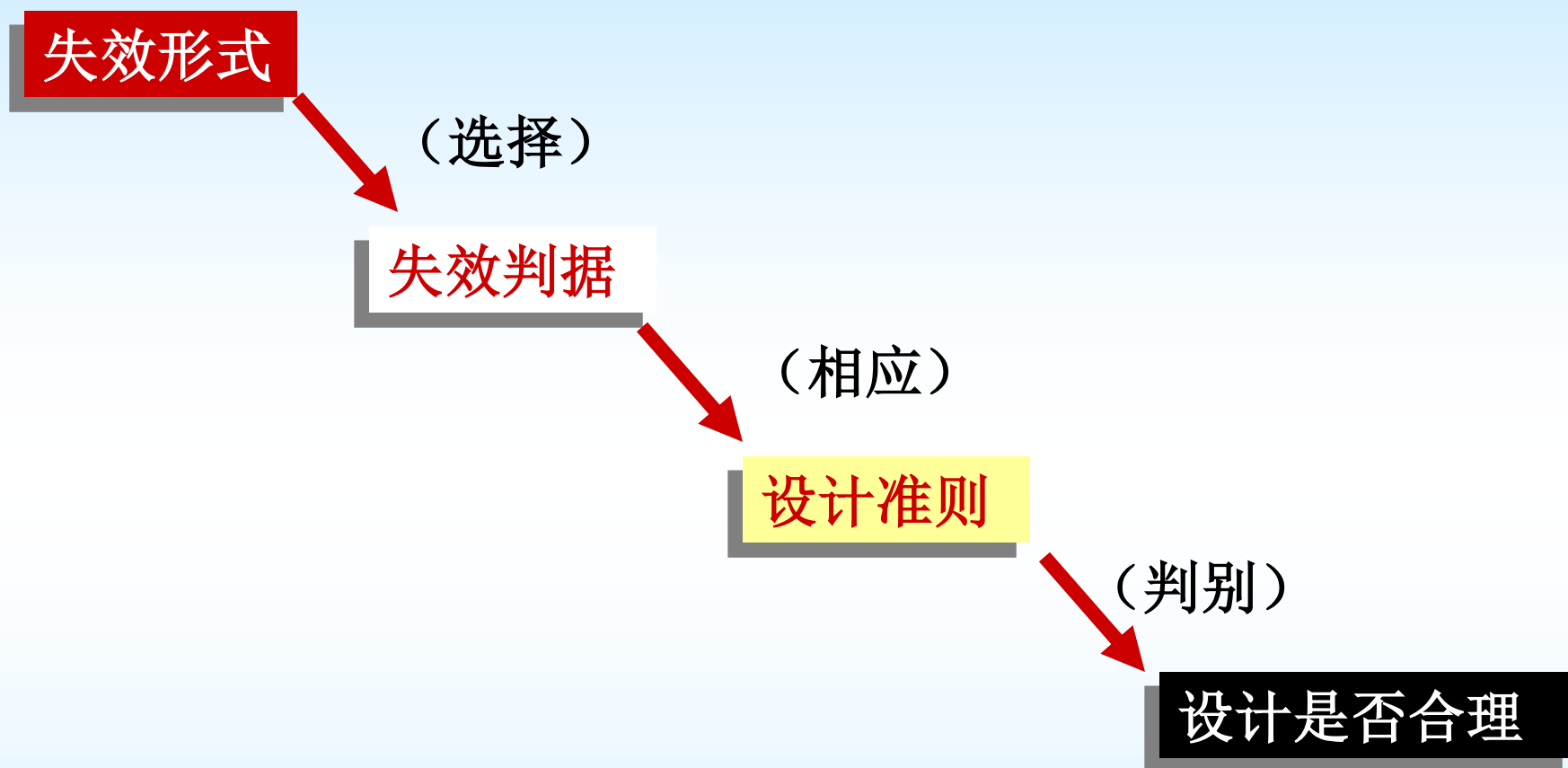
教学重点：

强度失效设计准则。

教学难点：

弹塑性失效设计准则。

4.2 设计准则



4.2.1 压力容器失效

定义——压力容器在规定的
使用环境和时间内，
因尺寸、形状或者材
料性能变化而危及安
全或者丧失正常功能
的现象，称为压力容
器失效。

失效原因多种多样

失效表现形式——

过度变形
断裂
泄漏

4.2.1 压力容器失效

一、压力容器失效形式

失效形式有多种分类方法

根据失效时间
压力容器失效

```
graph TD; A[根据失效时间 压力容器失效] --> B[突发型失效 (catastrophic failure)]; A --> C[退化型失效 (degradation failure)];
```

突发型失效
(catastrophic failure)

又称短期失效，是指容器在丧失功能之前保持或基本保持所需功能，但由于某种原因在某个时刻突然失效，如塑性垮塌（韧性断裂）、脆性断裂、接头泄漏、局部过度应变等。

退化型失效
(degradation failure)

指随着工作时间的增加，容器性能逐渐下降，直到超过某一临界值而导致的失效，如腐蚀、蠕变、疲劳等。

4.2.1 压力容器失效

一、压力容器失效形式（续）

退化型
失效

长期载荷引起：如，蠕变、腐蚀、氢致后开裂

交变载荷引起：如，疲劳、棘轮

4.2.1 压力容器失效

一、压力容器失效形式（续）

失效原因

- 
- (1) 强度失效
 - (2) 刚度失效
 - (3) 屈曲失效
 - (4) 泄漏失效

4.2.1 压力容器失效

(1) 强度失效——因材料屈服或断裂引起的压力容器失效，包括：

- (a) 塑性垮塌
- (b) 局部过度应变
- (c) 脆性断裂
- (d) 疲劳
- (e) 棘轮
- (f) 蠕变
- (g) 腐蚀等。

a. 塑性垮塌——指在单调加载条件下压力容器因过量总体塑性变形而不能继续承载导致的破坏。

塑性垮塌 特征

课本第1
页彩图3

断后有肉眼可见的宏观变形，如整体鼓胀，周长伸长率可达**10~50%**，破口处壁厚显著减薄；没有碎片，或偶尔有少量碎片；按实测厚度计算的爆破压力与实际爆破压力相当接近。

原因

壁厚过薄和超压

壁厚未经设计计算和壁厚因腐蚀、冲蚀而减薄

操作失误、液体受热膨胀、化学反应失控等。



图3 薄壁容器韧性断裂外观

4.2.1 压力容器失效

课本第1
页彩图3



图3 薄壁容器韧性断裂外观

4.2.1 压力容器失效

严格按照规范设计、制造，
并配备相应的超压释放装置，
且运输、安装、使用、检验和检测遵循有关的规定



塑性垮塌可以避免

4.2.1 压力容器失效

b. 局部过度应变——指压力容器结构不连续处因材料延性耗尽而产生的裂纹或者撕裂。

在三向拉应力作用下，材料韧性（断裂应变）会下降

在压力容器结构不连续区，如螺纹根部，有可能在容器没有塑性垮塌前，就因为材料延性耗尽产生裂纹而失效。

4.2.1 压力容器失效

c.脆性断裂——指变形量很小、且在壳壁中的应力值远低于材料强度极限时发生的断裂。这种断裂是在较低应力状态下发生，故又称为低应力脆断。

脆性断裂特征

断裂时容器没有明显的鼓胀；

断口齐平，并与最大主应力方向垂直；

断裂的速度极快，易形成碎片。

由于脆性断裂时容器往往没有超压，爆破片、安全阀等超压释放装置不会动作，其危险性要比塑性垮塌大得多。



图2 厚壁容器脆性断裂外观

4.2.1 压力容器失效

脆性断裂原因

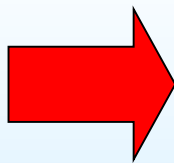
- ★ 材料脆性和缺陷。
- ★ 材料选用不当、焊接与热处理工艺不合理导致材料脆化外，低温、高压氢环境、中子辐射等也会使材料脆化；
- ★ 压力容器用钢一般韧性较好，但若存在严重的原始缺陷（如原材料的夹渣、分层、折叠等）、制造缺陷（如焊接引起的未熔透、裂纹等）或使用中产生的缺陷，也会导致脆性断裂发生。

4.2.1 压力容器失效

d.疲劳——指在交变载荷作用下，容器在应力集中部位产生局部的永久性损伤，并在一定载荷循环次数后形成裂纹或者裂纹进一步扩展至完全断裂。

特征：每次载荷循环的前半周和后半周在容器的同一部位相继产生方向相反的应变等。

交变载荷——指大小和（或）方向都随时间周期性（或无规则）变化的载荷。



包括压力波动、开车停车；加热或冷却时温度变化引起的热应力变化；振动或容器接管引起的附加载荷的交变而形成的交变载荷。

4.2.1 压力容器失效

疲劳破坏——包括裂纹萌生、扩展和最后断裂三个阶段。

疲劳断口——裂纹源、裂纹扩展区和最终断裂区组成。

裂纹源——往往位于高应力区或有缺陷的部位。

裂纹扩展区——是疲劳断口最重要的特征区域。在裂纹扩展前沿形成疲劳弧线或海滩花样。

最终断裂区——裂纹扩展到一定程度时的快速断裂区，它是由于剩余截面不足以承受外载荷造成的。

4.2.1 压力容器失效

e.棘轮——压力容器由于同时承受恒定载荷和交变载荷作用而产生且按逐个循环渐增的累积塑性变形。

- 特征:
- 每次加载循环的前半周和后半周在容器的不同部位（两个不同部位的范围有部分重叠）轮流产生方向相同的塑性变形。
 - 各个循环产生的塑性变形将逐个累积，直至因产生过量塑性变形而失效。

4.2.1 压力容器失效

f. 蠕变——指在保持应力不变的条件下，应变随时间延长而不断缓慢增加的现象。

从变形看—
具有韧性断裂特征

从应力看—
具有脆性断裂特征

4.2.1 压力容器失效

g. 腐蚀——指金属与其周围介质发生化学或者电化学反应而产生的破坏现象。

均匀腐蚀的减薄和
局部腐蚀的凹坑
引起的断裂

晶间腐蚀和应力腐蚀
引起的断裂

4.2.1 压力容器失效

(2) 刚度失效——由于压力容器的变形大到足以影响其正常工作而引起的失效。

如塔受风载荷，产生过大弯曲变形。

(3) 屈曲失效——在压应力作用下，压力容器突然失去其原有规则几何形状所引起的失效。

其特征？

(4) 泄漏失效——压力容器本体或者连接件失去密封功能。

危害——可能引起中毒、燃烧和爆炸等事故，造成环境污染等。

交互失效——实际中可能同时发生多种形式的失效。

4.2.1 压力容器失效

二、失效判据与设计准则

- (1) 失效判据——描述极限状态的方程，称为失效判据。
每一种失效模式都有与其对应的极限状态。

极限状态

终极极限状态

指超过它后安全要求就不再满足的结构状态，与安全有关，如塑性垮塌、屈曲、剧毒介质泄漏等

可用极限状态

指超过它后规定功能要求就不再满足的结构状态，与功能有关，如过度变形、无危害介质泄漏等

4.2.1 压力容器失效

二、失效判据与设计准则（续）

（2）设计准则——根据失效判据，再考虑各种不确定因素，引入安全系数，得到与失效判据相对应的设计准则。

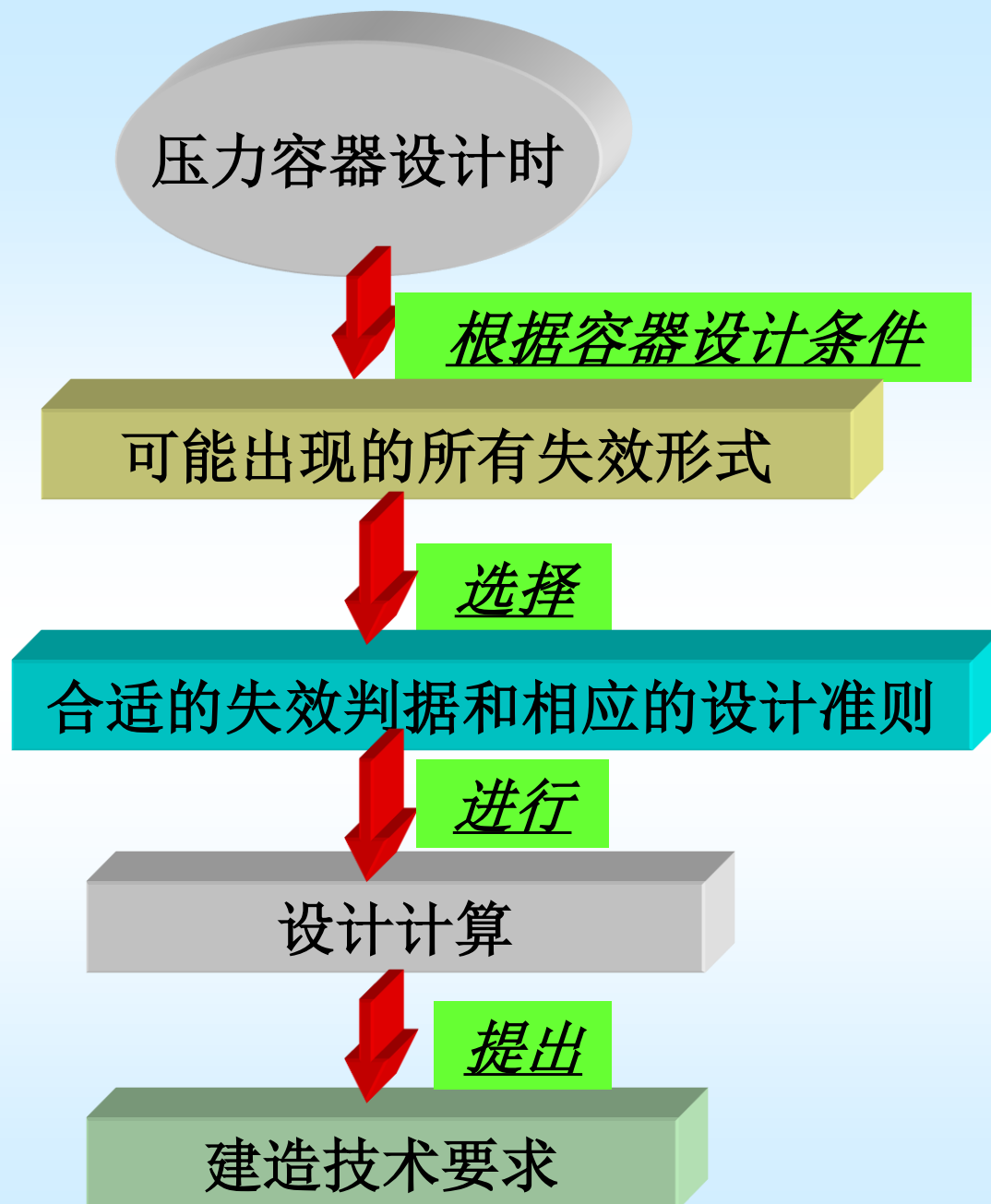
分类

强度失效设计准则

刚度失效设计准则

屈曲失效设计准则

泄漏失效设计准则



4.2.2 强度失效设计准则

强度失效两种主要形式

屈服

(在常温、静载作用下)

断裂

常用强度失效设计准则

弹性失效设计准则

塑性失效设计准则

爆破失效设计准则

弹塑性失效设计准则

疲劳失效设计准则

蠕变失效设计准则

脆性断裂失效设计准则

4.2.2 强度失效设计准则

一、弹性失效设计准则（韧性材料）

弹性失效设计准则——将容器总体部位的初始屈服视为失效。

1. 单向拉伸——最大拉应力准则

$$\sigma = R_{eL}$$

屈服失效的
数学表达试

$$\sigma \leq [\sigma]^t$$

相应的
设计准则

$$\sigma_1 \leq [\sigma]^t$$

(4-3)

最大拉应力
准则

R_{eL} ——屈服应力

$[\sigma]^t$ ——许用应力

σ_1 ——最大拉应力

4.2.2 强度失效设计准则

2. 任意应力状态

(1) 最大切应力准则

- Tresca屈服失效判据
- 最大切应力屈服失效判据
- 第三强度理论

$$\sigma_1 - \sigma_3 = R_{eL}$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 \leq [\sigma]^t$$



任意应力
状态

(4-4)

4.2.2 强度失效设计准则

2. 任意应力状态（续）

（2）形状改变比能准则

——**Mises**屈服失效判据

——形状改变比能失效判据

——**第四强度理论**

$$\sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} = R_{eL}$$

任意应力状态

$$\sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \leq [\sigma]^t$$

（4-5）

4.2.2 强度失效设计准则

3. 应力强度或相当应力

弹性失效设计准则统一：

$$\sigma_{eqi} \leq [\sigma]^t$$

$$\sigma_{eq1} = \sigma_1$$

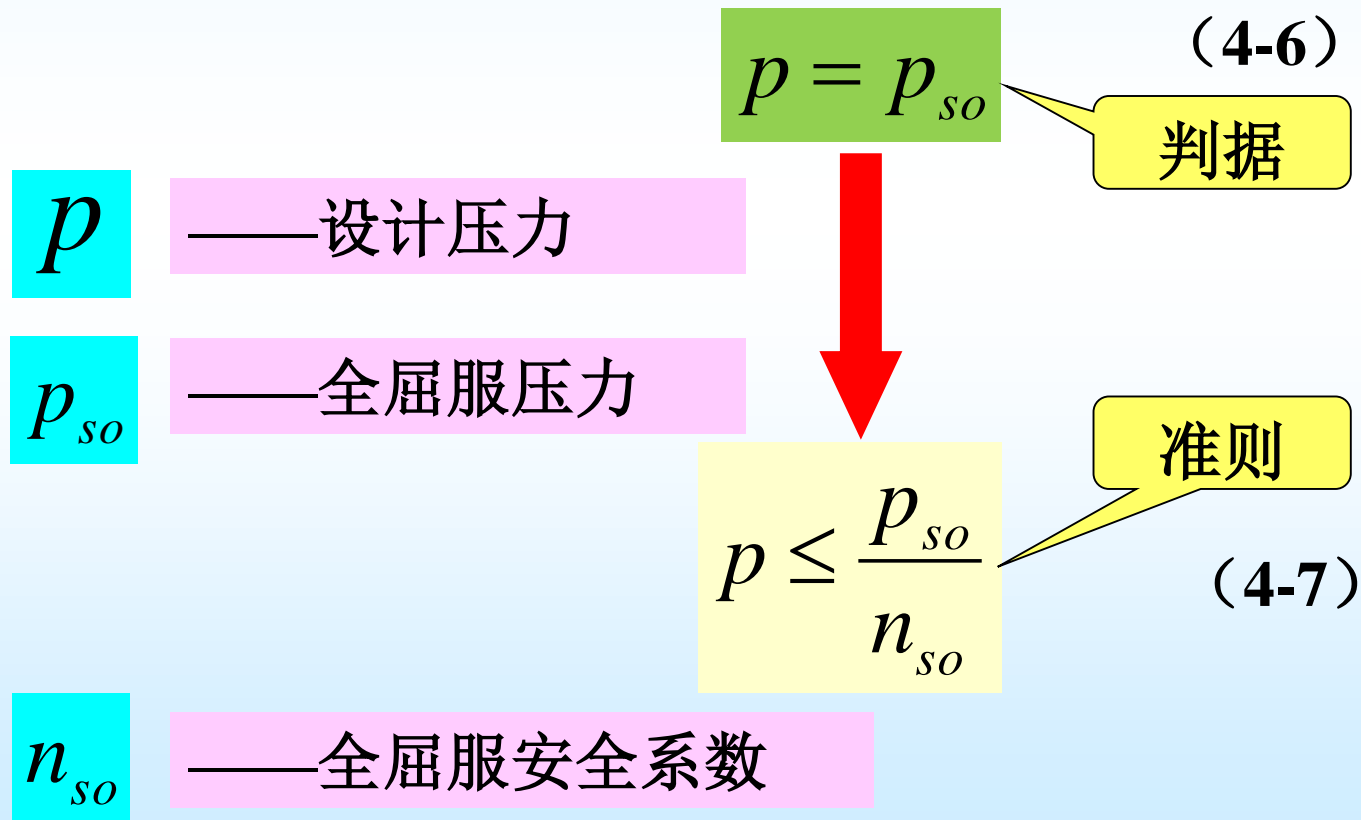
$$\sigma_{eq3} = \sigma_1 - \sigma_3$$

$$\sigma_{eq4} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$$

二、塑性失效设计准则

1. 塑性失效设计准则（内压厚壁圆筒）

——假设理想弹塑性材料，以整个危险面屈服作为失效状态的设计准则。



4.2.2 强度失效设计准则

二、塑性失效设计准则（续）

2. 弹性失效准则与塑性失效准则的对比

	弹性失效设计准则	塑性失效设计准则
依据	危险点的应力强度达到许用应力	整个危险面屈服
应用	韧性材料各处应力分布均匀，如薄壁容器	韧性材料应力分布不均匀，如厚壁圆筒

4.2.2 强度失效设计准则

三、爆破失效设计准则

——容器爆破作为失效判据

——压力容器一般具有应变硬化现象

爆破压力大于全屈服压力

爆破失效设计准则：

$$p \leq \frac{p_b}{n_b} \quad (4-8)$$

p_b ——爆破压力

n_b ——爆破安全系数

4.2.2 强度失效设计准则

四、弹塑性失效设计准则

难点

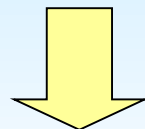
弹塑性失效设计准则——又称为安定性准则，认为载荷变化范围达到**安定载荷**，容器就失效。

应用场合：适用于各种载荷不按同一比例递增、载荷大小反复变化的场合。

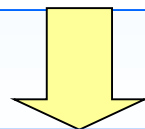
4.2.2 强度失效设计准则

安定状态

容器承受稍大于初始屈服载荷的载荷

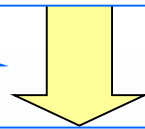


容器内少量的局部塑性变形

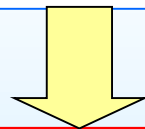


若容器所受的
载荷较小

残余应力场

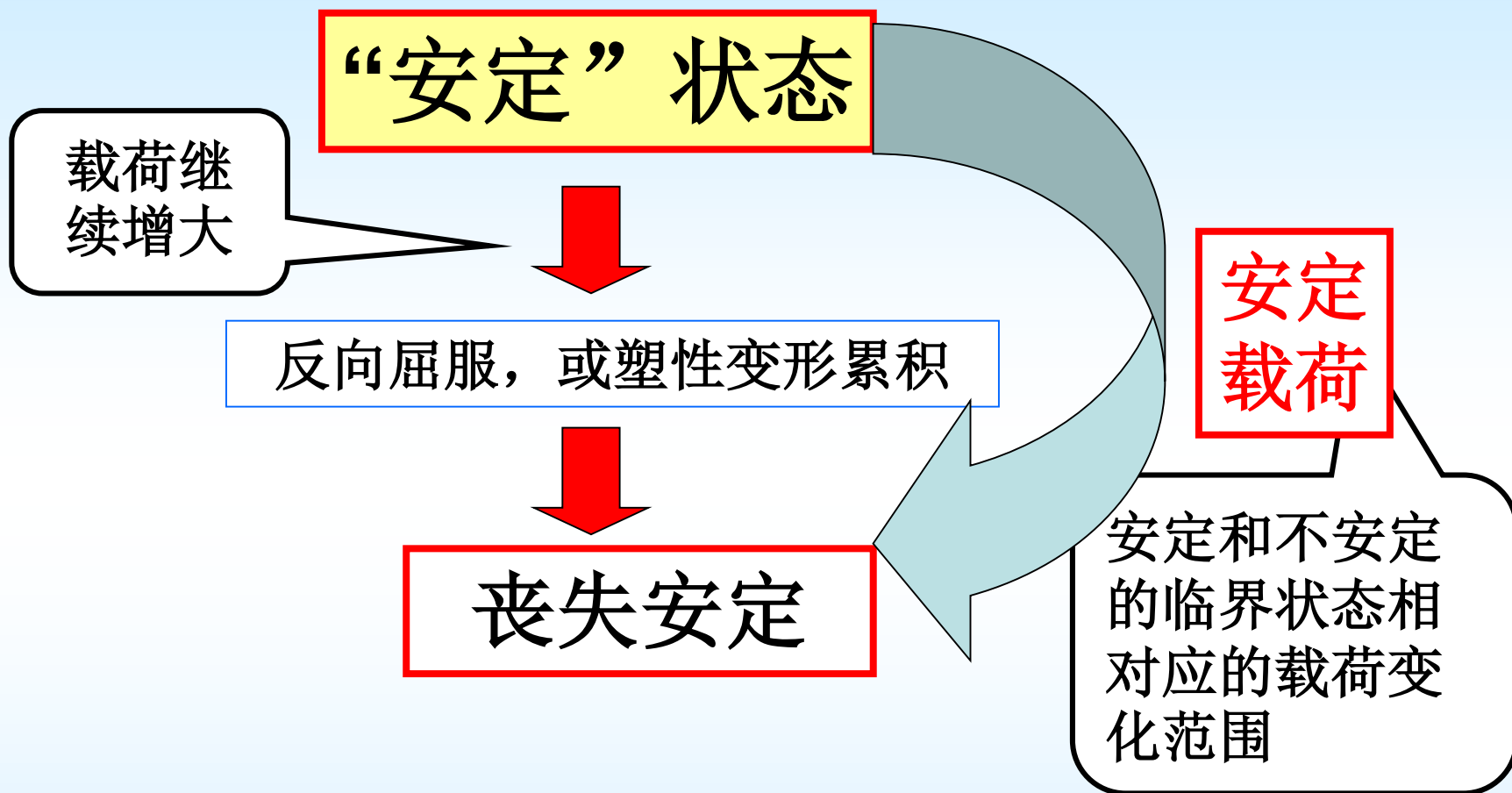


应力叠加后小于屈服点，保持弹性行为，无新塑性变形



“安定”状态

4.2.2 强度失效设计准则



工程上: 由于超过安定载荷后容器并不立即破坏,
安定载荷的安全系数=1.0,
最大载荷变化范围 < 安定载荷。

4.2.2 强度失效设计准则

五、疲劳失效设计准则

低周疲劳——每次循环中材料都将产生一定的塑性应变，疲劳破坏时的循环次数较低，一般在 10^5 次以下。

低周疲劳设计曲线——由试验及理论得，虚拟应力幅与许用循环次数之间的关系曲线。

疲劳失效设计准则——最大虚拟应力幅按低周疲劳设计曲线所确定的许用循环次数大于容器所需的循环次数，容器就不会发生疲劳失效。

断裂力学理论——带裂纹的压力容器疲劳设计准则，即按照疲劳裂纹扩展与断裂的规律对循环载荷作用下的容器作出安全评定。

4.2.2 强度失效设计准则

六、蠕变失效设计准则

将应力限制在由蠕变极限和持久强度确定的许用应力以内。

七、脆性断裂失效设计准则

传统强度设计准则假设材料是无缺陷的均匀连续体，因此无法解释脆性断裂现象。

脆性断裂——属于断裂力学的研究范围，认为材料中存在缺陷，研究缺陷在载荷和环境作用下的破坏规律。

断裂力学应用——（1）指导压力容器的选材和设计
（2）在役压力容器的安全评定

4.2.2 强度失效设计准则

防止容器发生脆性破坏：

- (1) **材料**——根据受压元件的厚度、应力水平、最低金属温度、载荷性质、介质对材料韧性的影响等因素，提出材料夏比V形缺口冲击功或断裂韧性验收指标。
- (2) **缺陷**——尽量减少焊接接头；提高无损检测技术。
- (3) **设计**——由无损检测水平→假设高应力区存在裂纹→利用断裂方法→裂纹安全性评估→确保容器不发生低应力脆性破坏。

4.2.2 强度失效设计准则

脆性断裂失效设计准则——

- (1) 破损安全设计——假设裂纹存在时，结构还能承受工作载荷——容器裂纹容限问题。
- (2) 未爆先漏设计——材料具有足够韧性，快速断裂前，裂纹已穿透壁厚，导致泄漏发生，可避免突发快速断裂，减少损失。

说明：采用防脆断设计方法，并不意味着存在假设的裂纹，而是指万一有裂纹时（漏检或在使用中产生）要确保不发生脆断事故——材料要有足够的断裂韧性

4.2.3 刚度失效设计准则

在载荷作用下，要求构件的弹性位移和（或）转角不超过规定的数值

$$\left. \begin{array}{l} w \leq [w] \\ \theta \leq [\theta] \end{array} \right\} \quad (4-9)$$

4.2.4 屈曲失效设计准则

——防止屈曲发生

{ 周向屈曲
轴向屈曲
局部屈曲

4.2.5 泄漏失效设计准则

——密封装置的介质泄漏率不得超过允许泄漏率