

**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

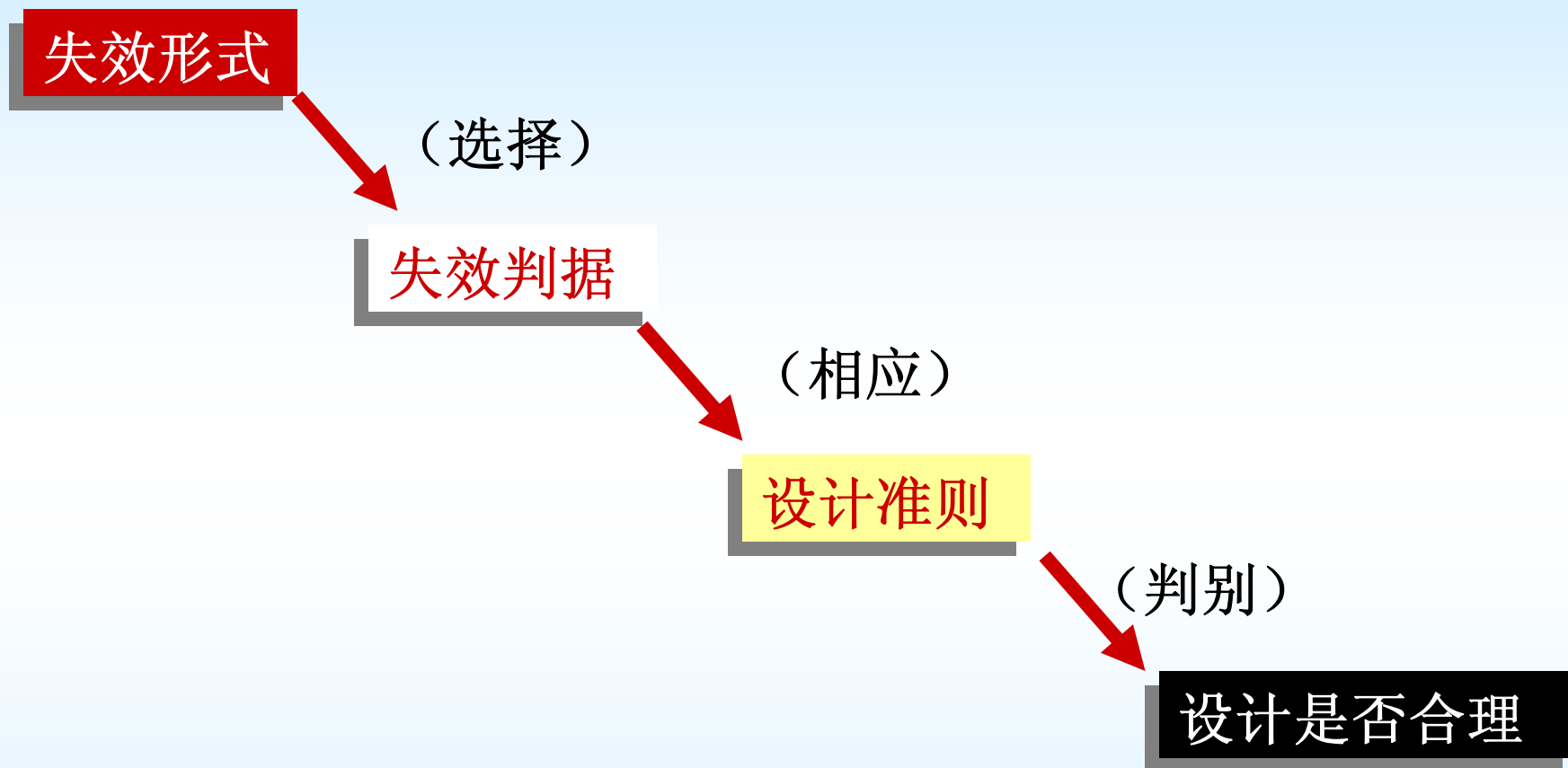
**教学重点：**

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

- 
- (1) 强度失效
  - (2) 刚度失效
  - (3) 失稳失效
  - (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，称为强度失效，包括

- (a) 韧性断裂
- (b) 脆性断裂
- (c) 疲劳断裂
- (d) 蠕变断裂
- (e) 腐蚀断裂等。

**a.韧性断裂**——压力容器在载荷作用下，产生的应力达到或接近所用材料的强度极限而发生的断裂。

## 4.2.1 压力容器失效

韧性断裂  
特征

断后有肉眼可见的宏观变形，如整体鼓胀，周长伸长率可达**10~20%**，断口处厚度显著减薄；没有碎片，或偶尔有碎片；按实测厚度计算的爆破压力与实际爆破压力相当接近。

课本第1  
页彩图3

## 原因

壁厚过薄和**内压过高**

壁厚未经设计计算和壁厚因腐蚀而减薄

操作失误、液体受热膨胀、化学反应失控等。



## 4.2.1 压力容器失效

### 4.2 设计准则



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、选材，  
配备相应的安全附件，  
且运输、安装、使用、检修遵循有关的规定



韧性断裂可以避免

## 4.2.1 压力容器失效

**b.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**

断裂时容器没有膨胀，即无明显的塑性变形；其断口齐平，并与最大应力方向垂直；断裂的速度极快，常使容器断裂成碎片。由于脆性断裂时容器的实际应力值往往很低，爆破片、安全阀等安全附件不会动作，其后果要比韧性断裂严重得多。

课本第1页彩图2



图2 厚壁容器脆性断裂外观

## 4.2.1 压力容器失效

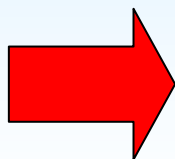
## 脆性断裂原因

- ★ 材料脆性和缺陷。
- ★ 材料选用不当、焊接与热处理不当使材料脆化；低温、长期在高温下运行、应变时效等也会使材料脆化；
- ★ 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

**c. 疲劳断裂**——压力容器在交变载荷作用下，经过一定周期后发生的断裂。

**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。

需要指出，原材料或制造过程中产生的裂纹，也会在交变载荷的反复作用下扩展而导致压力容器疲劳。

## 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、裂纹扩展区和瞬时断裂区组成。

**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。常呈现贝纹状，是疲劳裂纹扩展过程中留下的痕迹。

**瞬时断裂区**——裂纹扩展到一定程度时的快速断裂区。

失效形式——“未爆先漏”，破坏需要有一定时间。

## 4.2.1 压力容器失效

**d.蠕变断裂**——压力容器在高温下长期受载，随着时间的增加材料不断发生蠕变变形，造成厚度明显减薄与鼓胀变形，最终导致压力容器断裂。

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

**e. 腐蚀断裂**——韧性断裂特征 / 脆性断裂特征。

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) 失稳失效——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——泄漏而引起的失效。

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

## 设计思路

求得压力容器在稳态或瞬态工况下的力学响应  
(如应力、应变、固有频率等)

(根据)

压力容器最可能发生的失效形式

确定力学响应的限制值以判断压力容器能否安全使用  
是否获得满意的使用效果

## 4.2.1 压力容器失效

(1) 失效判据——将力学分析结果与简单实验测量结果相比较，判别压力容器是否会失效。这种判据，称为失效判据。

(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。

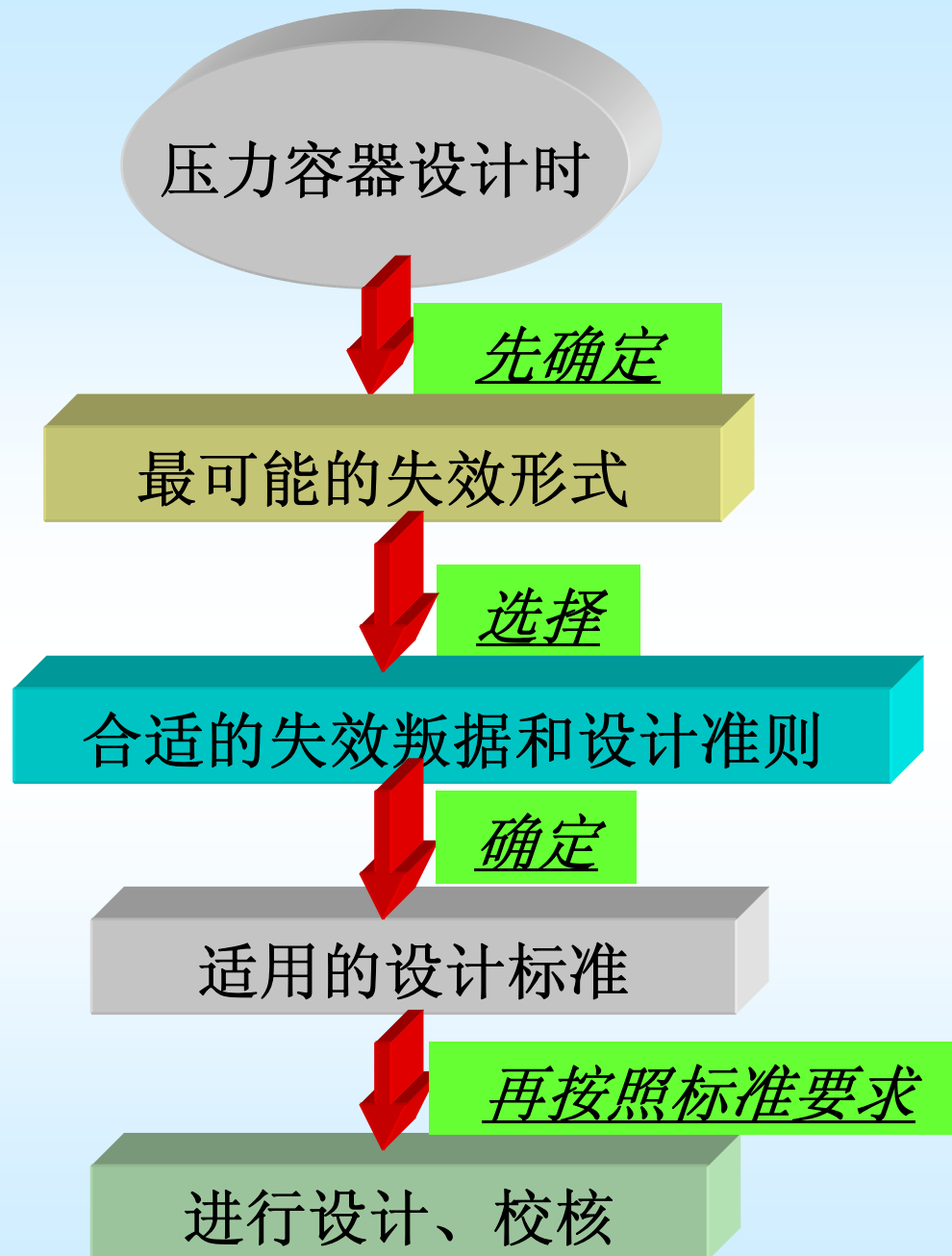
分类

强度失效设计准则

刚度失效设计准则

失稳失效设计准则

泄漏失效设计准则



## 4.2.2 强度失效设计准则

强度失效的两种主要形式

屈服

断裂

(在常温、静载  
作用下)

常用的强度失效设计准则

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

## 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

$$\sigma = \sigma_s$$

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

$\sigma_s$

——屈服应力

$[\sigma]^t$

——许用应力

$\sigma_1$

——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

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_s$$

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



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

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

任意应力  
状态

$$\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \leq [\sigma]^t \quad (4-5)$$

## 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： $\sigma_{eqi} \leq [\sigma]^t$

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

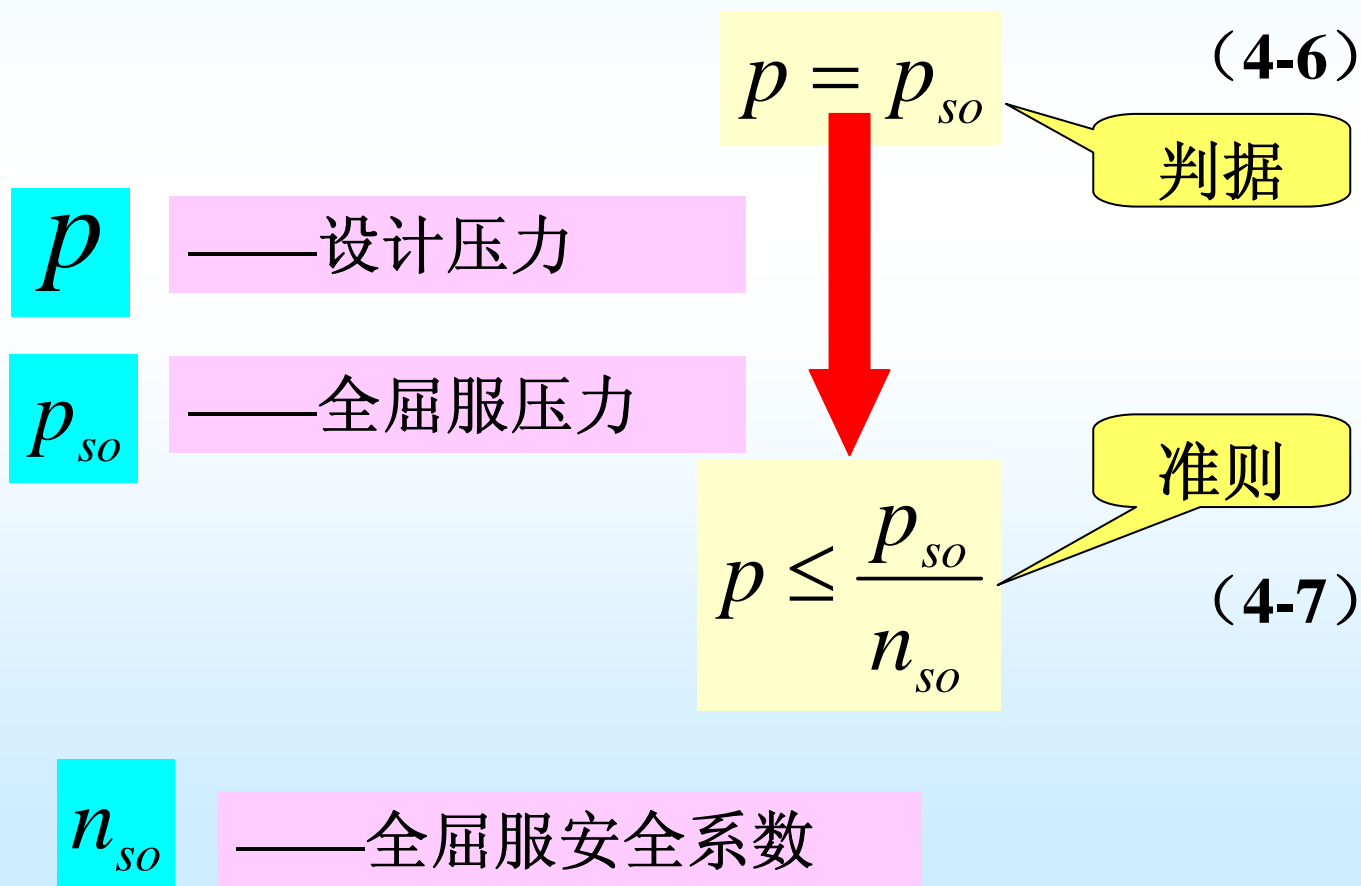
$$\sigma_{eq3} = \sigma_1 - \sigma_3$$

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

## 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

### 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：

$$p \leq \frac{p_b}{n_b}$$

(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。

初始屈服载荷——最大应力点进入塑性相对应的载荷。

### 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

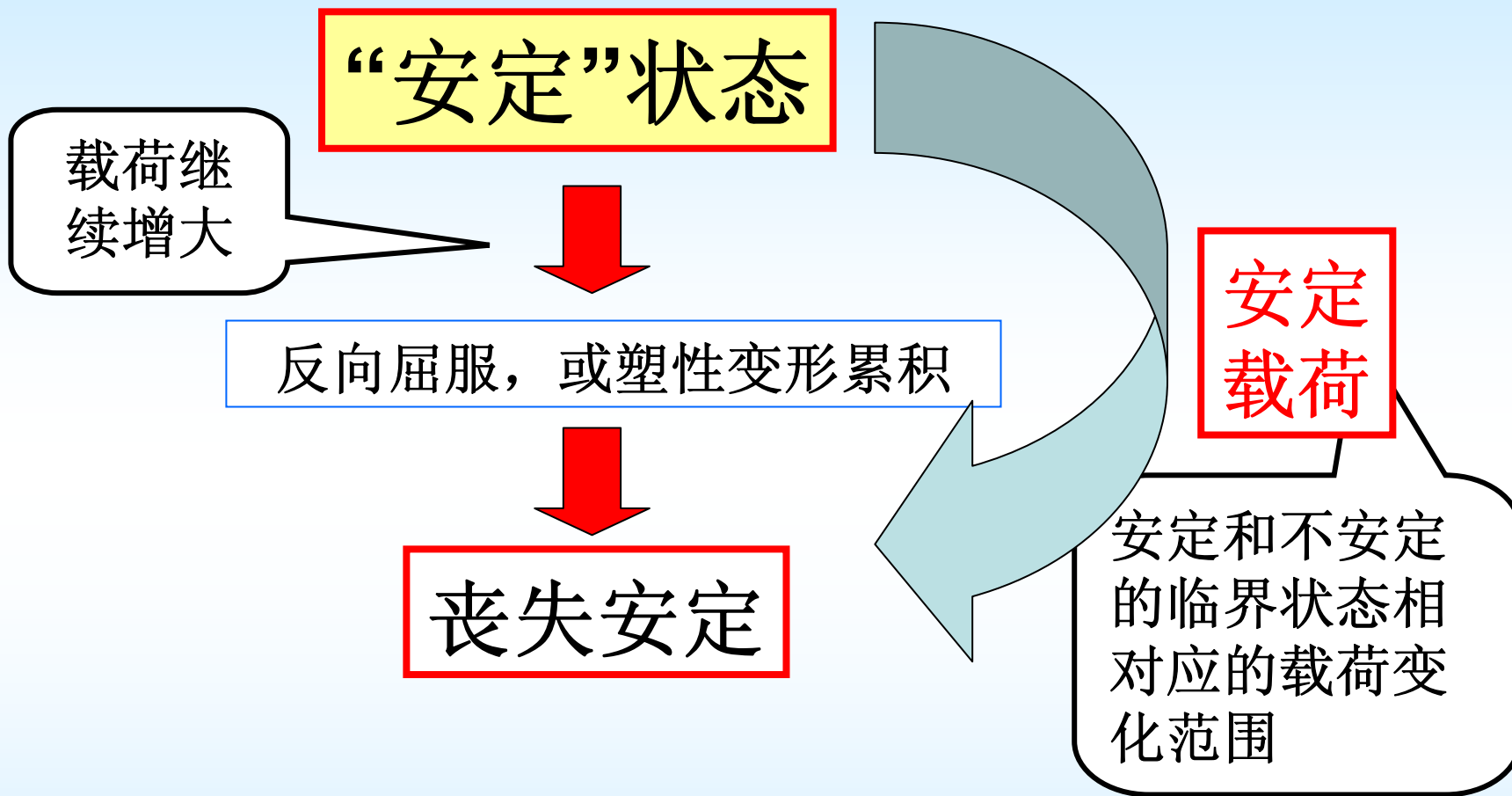
若容器所受的载荷较小

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：**假设裂纹，真实裂纹（漏检或在使用中产生）

### 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 失稳失效设计准则

——防止失稳发生

{ 周向失稳  
轴向失稳  
局部失稳

## 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许用泄漏率