

# 第四章 压力容器设计

## CHAPTER IV

### Design of Pressure Vessel

#### 4.4 分析设计 ( Design by Analysis )

**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**

**4.4.1 概述**

**4.4.2 压力容器的应力分类**

**4.4.3 应力强度计算**

**4.4.4 应力强度限制**

**4.4.5 分析设计的应用**

## 4.4 分析设计

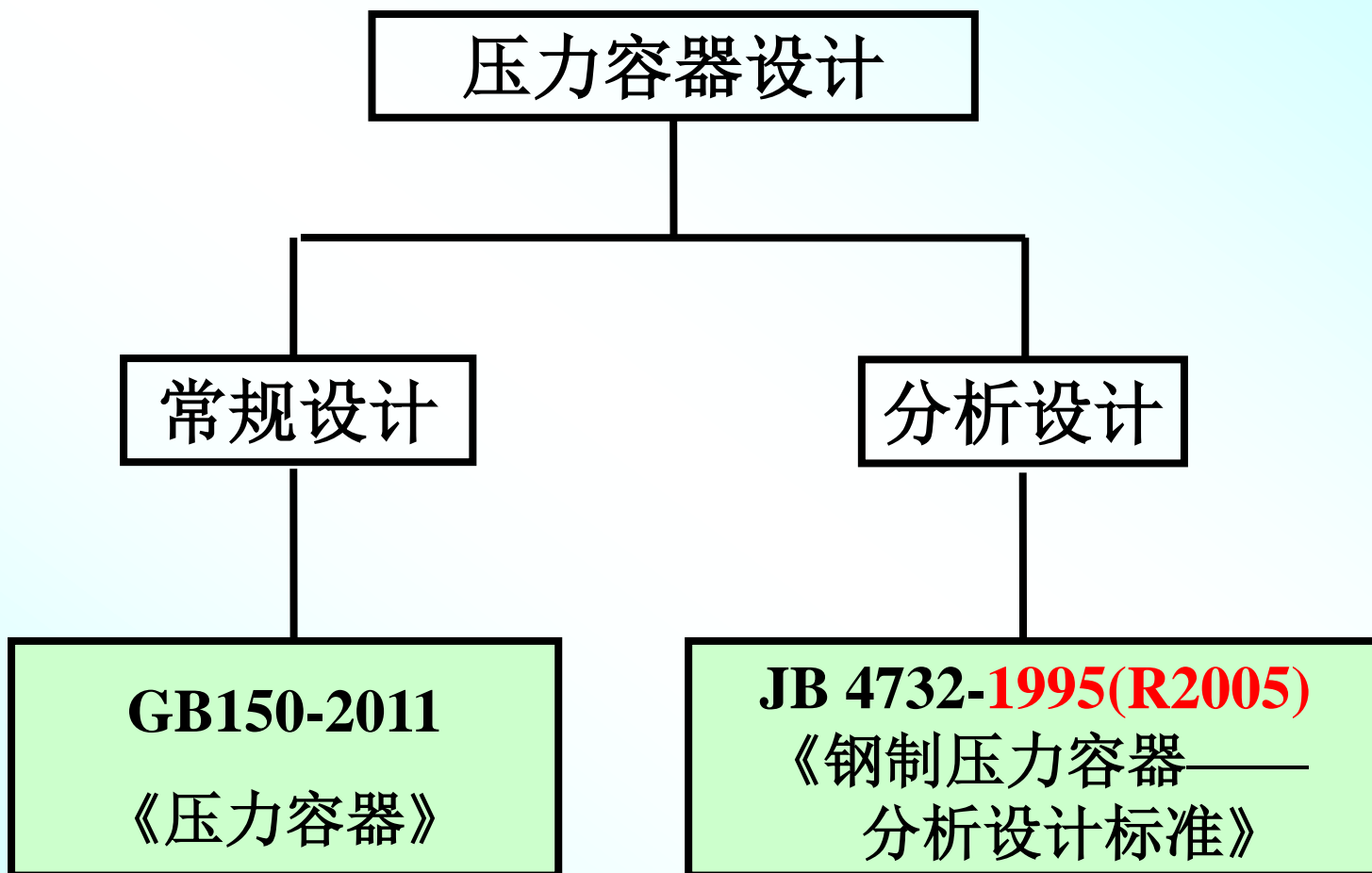
**教学重点：**

压力容器的应力分类。

**教学难点：**

应力强度计算。

## 4.4 分析设计



## 4.4.1 概述

### 4.4.1.1 常规设计局限性

#### (1) 载荷性质

载荷	常规设计	分析设计
静载荷	√	√
交变载荷	×	√

#### (2) 应力计算

应力计算	常规设计	分析设计
计算方法	简单公式计算	解析法,数值法, 实验法
研究对象	壳体	设备上所有点

### 4.4.1.1 常规设计局限性（续）：

#### （3）容器结构形式

标准	常规设计	分析设计
结构形式	某些规定结构	任何结构



### 4.4.1.2 分析设计基本思想

(1) 1965年美国颁布了首部分析设计标准

(2) 分析设计定义：指以塑性失效准则为基础、采用精细的力学分析手段的压力容器设计方法。

分析设计

应力分类法

基于失效模式的直接法

### 4.4.1.2 分析设计基本思想（续）

设计压力容器时，必须先进行详细的弹性应力分析，即通过理论解、数值计算或者试验测量，将各种载荷作用下产生的弹性应力分别计算出来，然后根据塑性失效准则对弹性应力进行分类，再按等安全裕度原则限制各类应力，保证容器在预期的使用寿命内不发生失效。这种以弹性应力分析和塑性失效准则为基础的压力容器设计方法称为应力分类法。

弹性应力分析时，假设容器始终处于弹性状态，即应力应变关系是线性的。这样算出来的应力，当超过材料屈服强度时，就不是容器中的实际应力，而是“**虚拟应力**”。

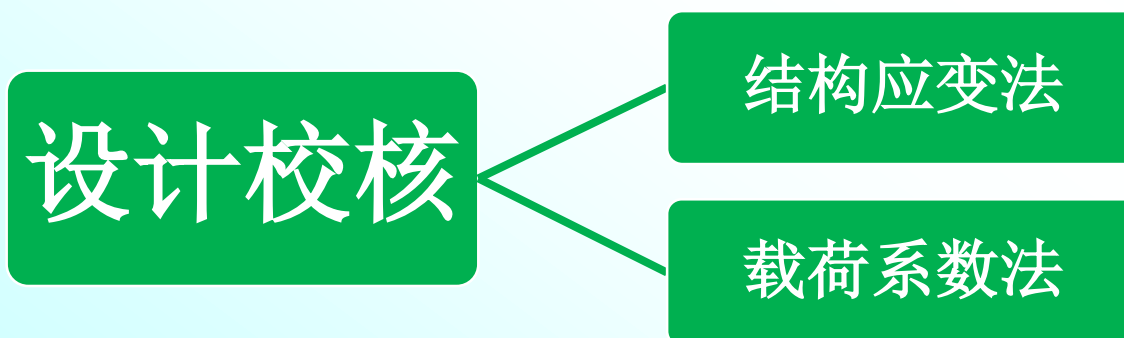


### 4.4.1.2 分析设计基本思想（续）

#### 基于失效模式的直接法：

压力容器设计的重要任务是防止其失效。

根据压力容器结构和服役条件，先确定压力容器潜在的失效模式，如总体塑性变形失效、渐增塑性变形失效、屈曲失效、疲劳失效等，再结合不同的载荷工况，对每种失效模式进行设计校核，直至全部合格。



### 4.4.1.2 分析设计基本思想（续）

#### 基于失效模式的直接法：

##### 1. 结构应变法

在一个不考虑引起局部应力 / 应变集中的局部结构细节，而考虑结构真实几何形状的理想化模型中确定的应变，称为结构应变。

设计时，先建立压力容器理想化模型，进行详细的弹塑性有限元分析，计算结构主应变；再结合失效模式和载荷工况，限制结构主应变最大值的绝对值。

正常操作  
小于5%

压力试验工况  
小于7%

### 4.4.1.2 分析设计基本思想（续）

#### 基于失效模式的直接法：

#### 2. 载荷系数法

根据不同的载荷组合，引入载荷系数把载荷放大，对压力容器及其部件进行弹塑性有限元分析，单调地逐步施加载荷，若计算中每步都能收敛到平衡解而不发散，则表明结构的抗力足以承受已用载荷系数放大的了的载荷，设计是合格的。

### 4.4.1.2 分析设计基本思想（续）

常规设计和分析设计之间既有独立性又有互补性。

#### 独立性

常规设计能独立完成的设计，可以直接应用，而不必再做分析设计；

分析设计所完成的设计，也不受常规设计能否通过的影响。

#### 互补性

常规设计不能独立完成的设计（如疲劳分析、复杂几何形状和载荷情况），可以用分析设计来补充完成。

分析设计也常借助常规设计的公式来确定部件初步设计方案，然后再做详细分析。

## 4.4.2 压力容器的应力分类

### 4.4.2.1 应力分类

应力分类的依据： 对容器强度失效所起作用的大小

判断的依据：

- (1) 应力产生的原因——应力是外载荷直接产生的还是在变形协调过程中产生的，外载荷是机械载荷还是热载荷；
- (2) 应力作用区域和分布形式——应力的作用是总体范围还是局部范围，沿厚度的分布是均布的还是线性的或非线性的。

## 4.4.2 压力容器的应力分类

### 4.4.2.1 应力分类（续）

应力分类法定义：

以弹性应力分析和塑性失效准则为基础的压力容器设计方法。

主要应力形式：

注意：不是后面要讲的 5 类基本应力强度

一次应力、二次应力、峰值应力

## 一次应力 ( $P$ ):

**定义：** 为平衡外加机械载荷而产生的力；

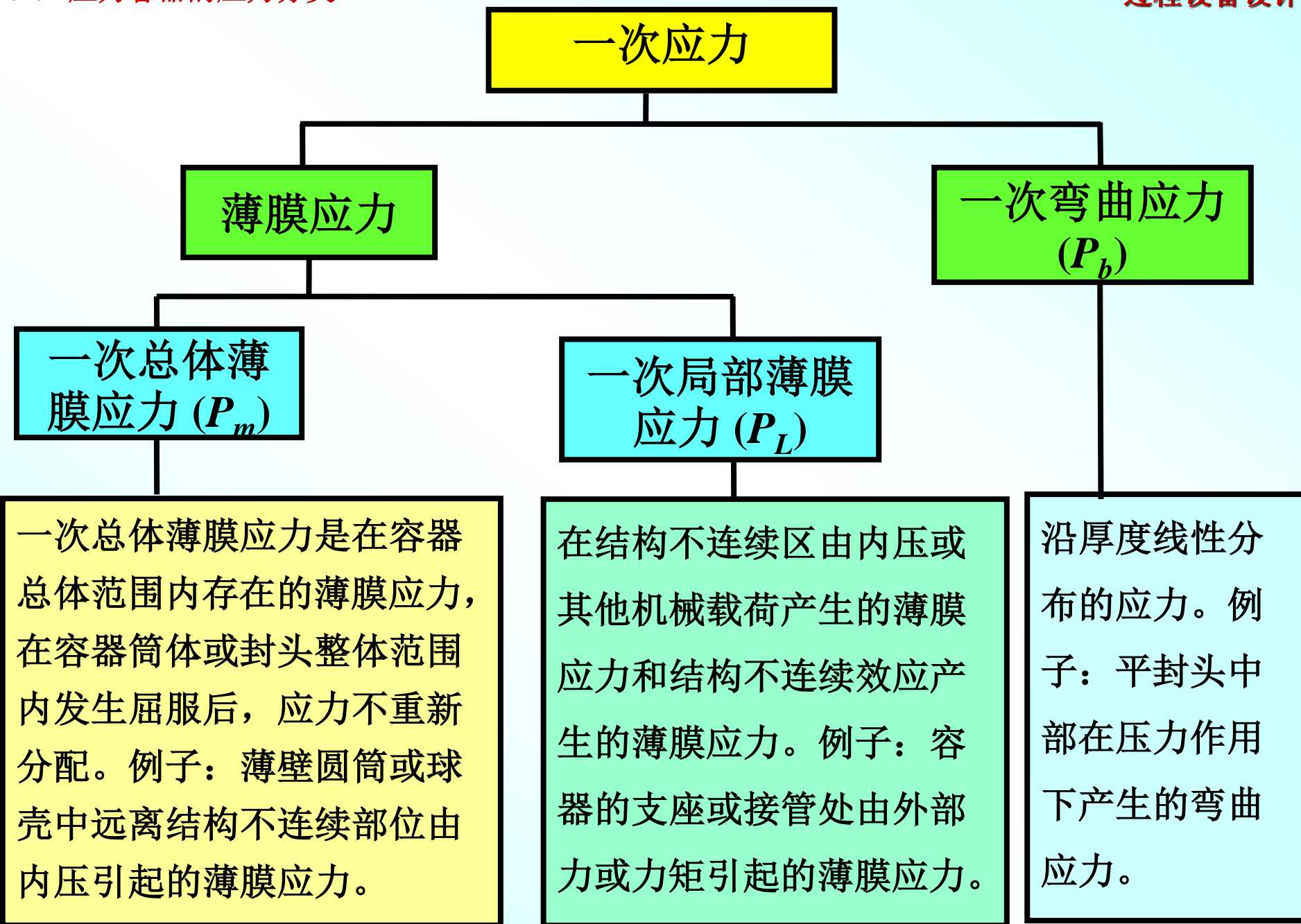
必须满足外载荷与内力及内力矩的静力平衡关系

**基本特征：**                      非自限性

**一次应力可分为：**      一次总体薄膜应力 ( $P_m$ )

一次局部薄膜应力 ( $P_L$ )

一次弯曲应力 ( $P_b$ )





## 二次应力 ( $Q$ )

**定义：** 由相邻部件的约束或结构自身的约束引起的正应力或切应力。

二次应力不是由外载荷直接产生的，其作用不是为平衡外载荷，而是使结构在受载时变形协调。

**基本特征：** 自限性

## 二次应力 ( $Q$ )

### 二次应力的示例:

1. 总体结构不连续处的弯曲应力——总体结构不连续对结构总体应力分布和变形有显著的影响，如筒体与封头、筒体与法兰、筒体与接管以及不同厚度筒体连接处；
2. 总体热应力——解除约束后，会引起结构显著变形的热应力，例如圆筒壳中轴向温度梯度所引起的热应力；壳体与接管间的温差所引起的热应力；厚度圆筒中径向温度梯度引起的当量线性热应力。

## 峰值应力 ( $F$ )

**定义：** 峰值应力是由局部结构不连续和局部热应力的影响而叠加到一次加二次应力之上的应力增量，介质温度急剧变化在器壁或管壁中引起的热应力也归入峰值应力。

**主要特点：** 高度的局部性，因而不引起任何明显的变形。  
有害性仅是可能引起疲劳或脆性断裂。

## 峰值应力 ( $F$ )

**局部结构不连续：**几何形状或材料在很小区域内的不连续，只在很小范围内引起应力和应变增大，即应力集中，但对结构总体应力分布和变形没有显著的影响。

**局部热应力：**解除约束后，不会引起结构显著变形的热应力。

应当指出的是，只有材料具有较高的韧性，允许出现局部塑性变形，上述应力分类才有意义。

若是脆性材料，一次应力和二次应力的影响没有明显不同，对应力进行分类也就没有意义了。

压缩应力主要与容器的稳定性有关，不需要加以分类

4.4.2.2 容器典型部位的应力分类

为便于设计师对压力容器进行应力分类，分析设计标准一般给出典型部位应力类别。

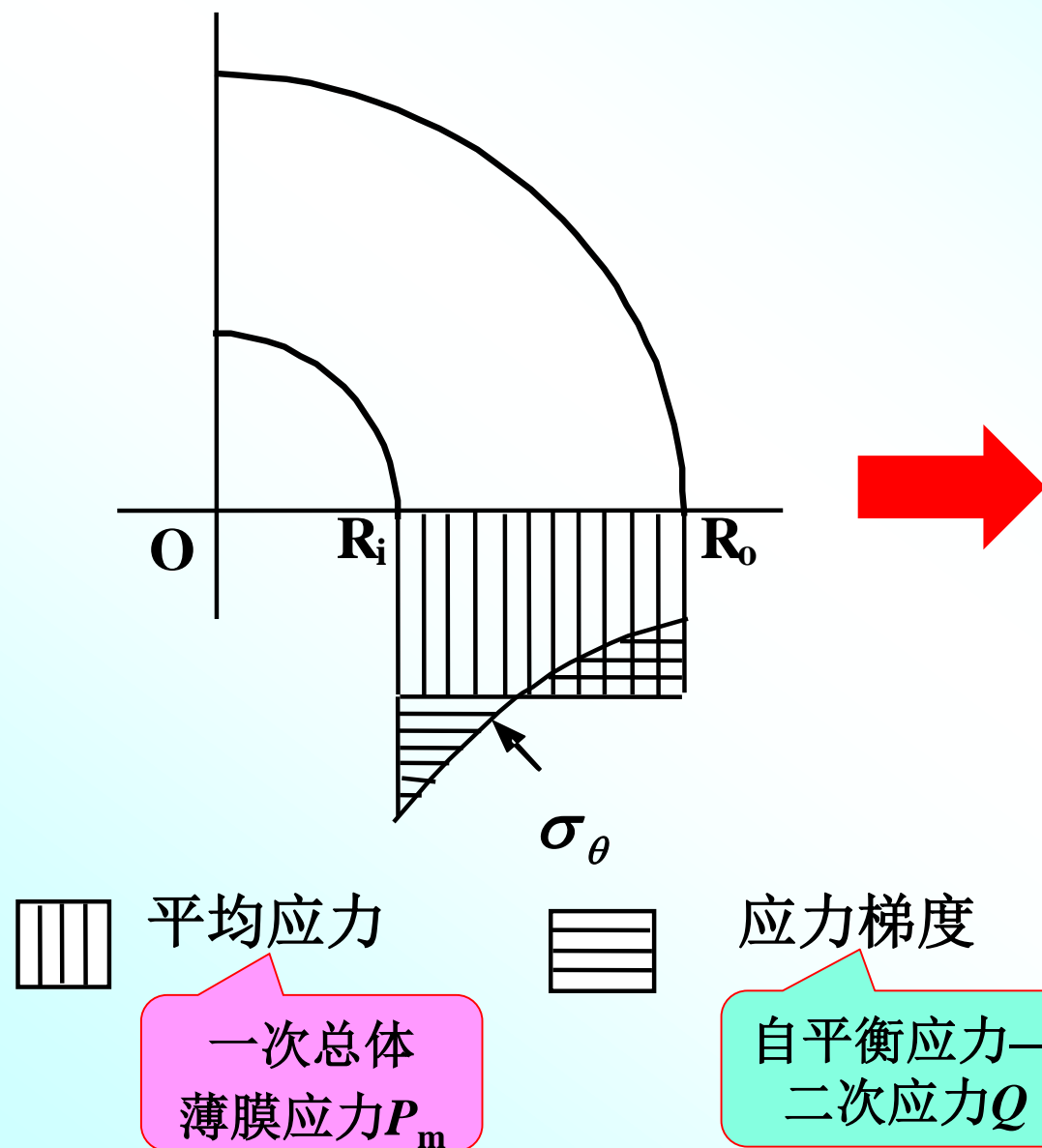
表 4-15 压力容器典型部位的应力分类

容器部件	位置	应力的起因	应力的类型	符号
圆筒或球形壳体	远离不连续处的壳体	内压	一次总体薄膜应力 沿厚度的应力梯度-二次应力	$P_m$ $Q$
		轴向温度梯度	薄膜应力-二次应力 弯曲应力-二次应力	$Q$ $Q$
	与封头或法兰的连接处	内压	局部薄膜应力-一次应力 弯曲应力-二次应力	$P_L$ $Q$
	在接管或其它开孔附近	外部载荷或力矩，或内压	局部薄膜应力-一次应力 弯曲应力-二次应力 峰值应力	$P_L$ $Q$ $F$

表4-15 压力容器典型部位的应力分类（续）

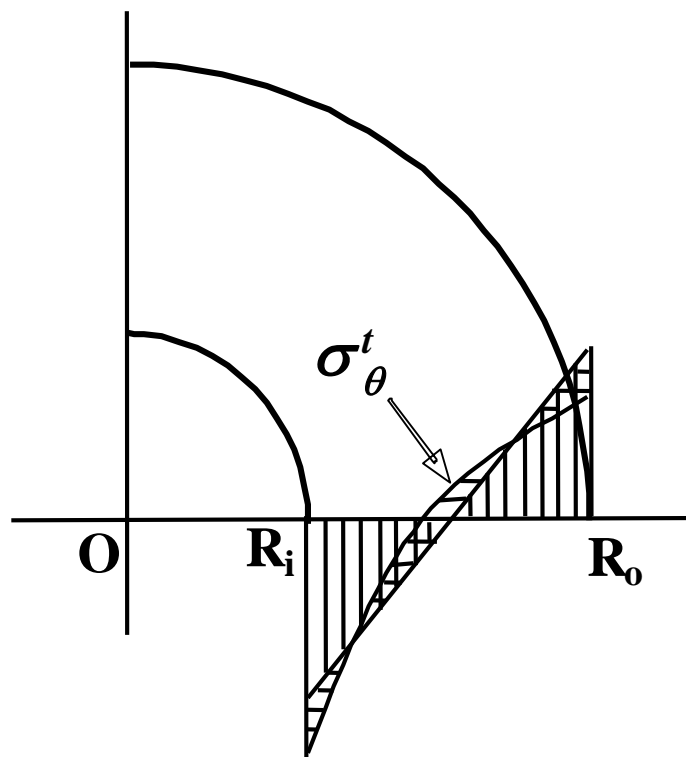
容器部件	位置	应力的起因	应力的类型	符号
蝶形封头或锥形封头	顶部	内压	一次总体薄膜应力 一次弯曲应力	$P_m$ $P_b$
	过渡区或与筒体连接处	内压	一次局部薄膜应力 弯曲应力-二次应力	$P_L$ $Q$
平盖	中心区	内压	一次总体薄膜应力 一次弯曲应力	$P_m$ $P_b$
	与筒体连接处	内压	局部薄膜应力-一次应力 弯曲应力-二次应力	$P_L$ $Q$

## 4.4.2 压力容器的应力分类



分析设计认为沿厚度的平均应力是满足与外载荷的平衡关系所必须的，属于一次总体薄膜应力 ( $P_m$ )，而沿厚度的应力梯度是满足筒壁各层结构连续所需要的自平衡应力，因此划分为二次应力 ( $Q$ )

图4-56 内压厚壁圆筒环向应力的分解



当量线性应力

二次应力 $Q$ 

峰值应力

峰值应力 $F$ 

径向温度梯度产生的热应力沿厚度呈非线性分布，可将它分为当量线性应力和非线性分布应力两部分。

所谓当量线性应力，是指和实际应力有相同弯矩的线性分布应力。由于热应力具有局限性，危害性比一次应力小，所以分析设计将当量线性应力划分为二次应力（ $Q$ ），而将余下的非线性分布应力划为峰值应力（ $F$ ）。

图4-57 外加热厚壁圆筒环向热应力的线性化处理



## 4.4.3 应力强度计算

### 1. 应力强度

最大  
切应力准则

该点最大主应力与最小主应力之差

注意区别应力  
分为三大类，  
一次应力、二  
次应力、峰值  
应力

五类基本的应力强度：

$S_I, S_{II}, S_{III}, S_{IV}, S_V$

- (1) 一次总体薄膜应力强度  $S_I$
- (2) 一次局部薄膜应力强度  $S_{II}$
- (3) 一次薄膜（总体或局部）加一次弯曲应力（ $P_L + P_b$ ）强度  $S_{III}$
- (4) 一次加二次应力（ $P_L + P_b + Q$ ）强度  $S_{IV}$
- (5) 峰值应力强度  $S_V$ （由  $P_L + P_b + Q + F$  算得）

## 4.4.3 应力强度计算

### 2. 应力强度计算步骤

(1) 在所考虑的点上，选取一正交坐标系，如经向、环向和法向分别用下标  $x, \theta, z$  表示，用  $\sigma_x, \sigma_\theta$  和  $\sigma_z$  表示该坐标系中的正应力， $\tau_{x\theta}, \tau_{xz}, \tau_{z\theta}$  表示该坐标系中的切应力。

(2) 计算各种载荷下的各应力分量，并根据定义将各组应力分量归入以下类别： $P_m, P_L, P_b, Q$  和  $F$ 。

(3) 将各类应力按同种分量叠加，

分别得到：

$$P_m \quad P_L \quad P_L + P_b \quad P_L + P_b + Q$$
$$P_L + P_b + Q + F$$

## 2. 应力强度计算步骤（续）

(4) 计算主应力  $\sigma_1, \sigma_2$  和  $\sigma_3$ ，取  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ 。

(5) 计算每组的最大主应力差

$$\sigma_{13} = \sigma_1 - \sigma_3$$

$\sigma_{13}$  即为分别与  $P_m$ ， $P_L$ ， $P_L + P_b$ ， $P_L + P_b + Q$ ，

$P_L + P_b + Q + F$  相对应的应力强度  $S_I$ ， $S_{II}$ ， $S_{III}$ ， $S_{IV}$

和  $S_V$ 。

## 4.4.4 应力强度限制

### 4.4.4.1 设计应力强度

$$S_m = \min \left( \frac{R_{eL}}{n_s}, \frac{R_{eL}^t}{n_s^t}, \frac{R_m}{n_b} \right)$$

$R_{eL}$  常温下材料的最低屈服点；

$R_m$  常温下材料的最低抗拉强度；

$R_{eL}^t$  设计温度下材料的屈服点；

$n_s$  ,  $n_s^t$  ,  $n_b$  为相应的材料设计系数。

**JB4732《钢制压力容器——分析设计标准》规定**

$$n_s = n_s^t \geq 1.5, \quad n_b \geq 2.6$$

## 4.4.4 应力强度限制

### 4.4.4.2 极限分析和安定性分析

极限分析和安定性分析主要是为了确定应力强度许用值。

#### (1) 极限分析

理想弹塑性  
材料

极限分析假定结构所用材料为理想弹塑性材料。

在某一载荷下结构进入整体或局部区域的全域屈服后，变形将无限制地增大，结构达到了它的极限承载能力，这种状态即为塑性失效的极限状态，这一载荷即为塑性失效时的极限载荷。

## 4.4.4 应力强度限制

### 4.4.4.2 极限分析和安定性分析

#### (1) 极限分析

理想弹塑性材料

设有一矩形截面梁，宽度为 $b$ ，高为 $h$ ，受弯矩 $M$ 作用

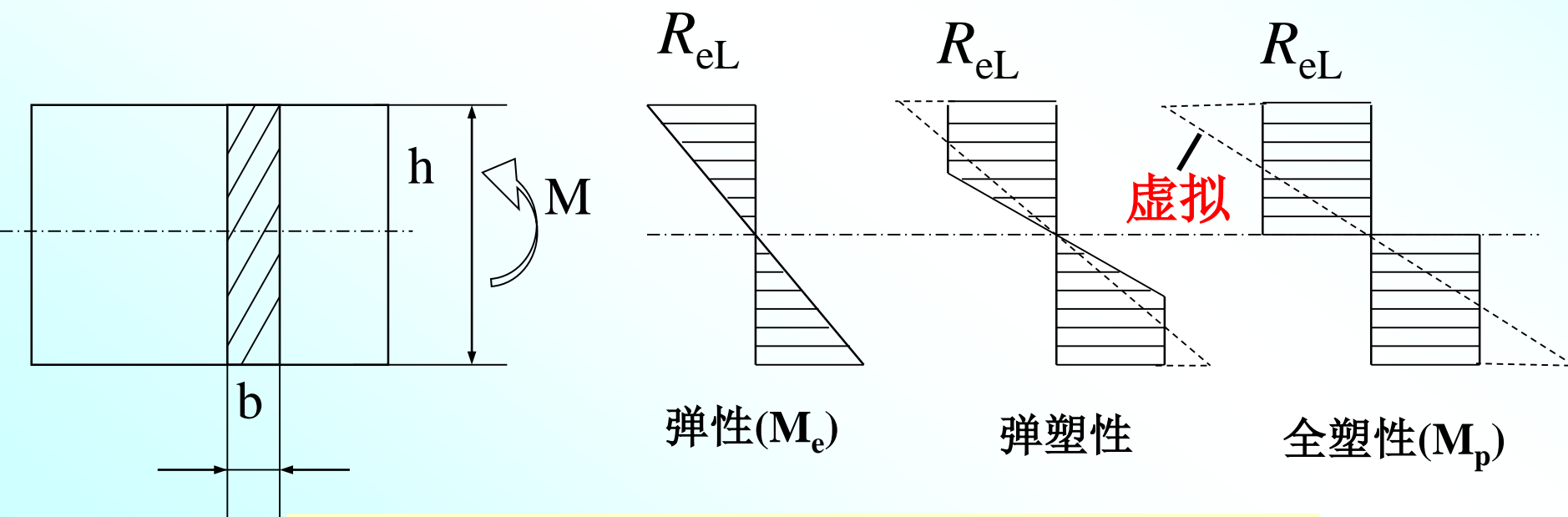


图4-59 纯弯曲矩形截面梁的极限分析

## 4.4.4 应力强度限制

### 4.4.4.2 极限分析和安定性分析

#### (1) 极限分析

最大应力

$$\sigma_{\max} = \frac{6M}{bh^2}$$

由材料力学可知，矩形截面梁在弹性情况下，截面应力呈线性分布，即上下表面处应力最大，一边受拉，一边受压。

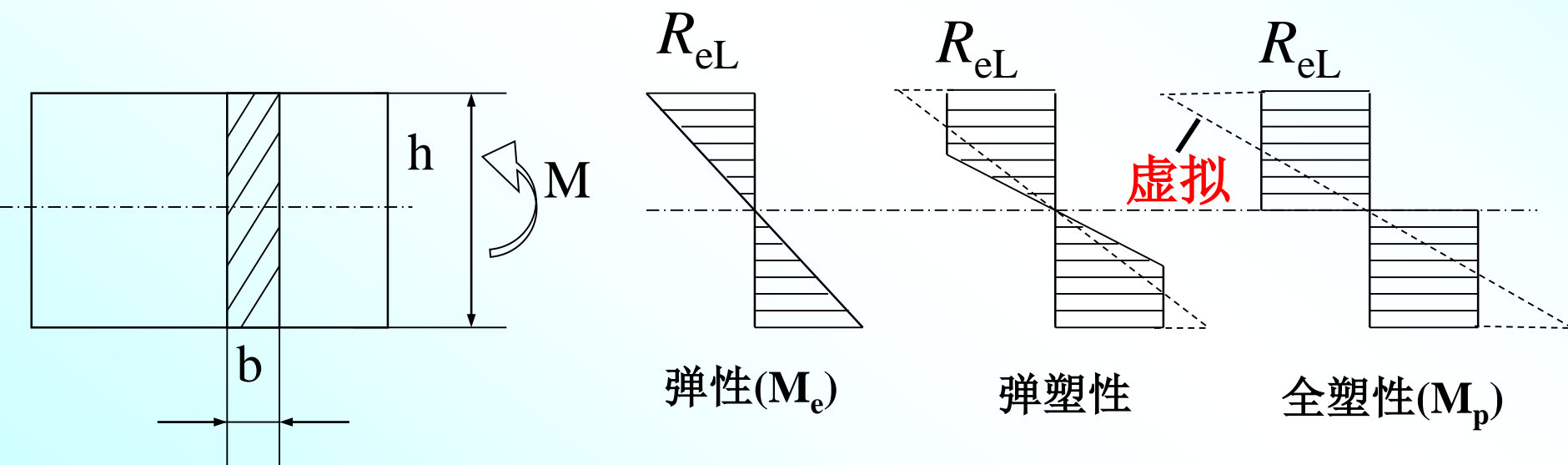


图4-59 纯弯曲矩形截面梁的极限分析

## 4.4.4 应力强度限制

### 4.4.4.2 极限分析和安定性分析

#### (1) 极限分析

$$\sigma_{\max} = R_{eL}$$

上下表面屈服时梁达到弹性失效状态，对应的载荷为弹性失效载荷

$$M_e = R_{eL} \frac{bh^2}{4}$$

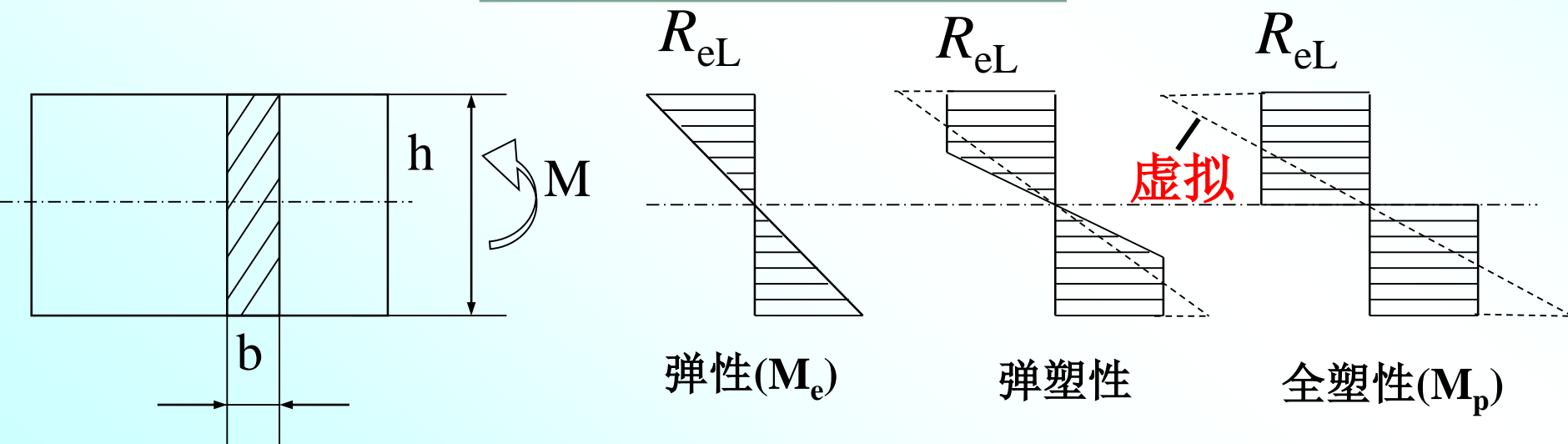


图4-59 纯弯曲矩形截面梁的极限分析



## 4.4.4 应力强度限制

### 4.4.4.2 极限分析和安定性分析

#### (1) 极限分析

从塑性失效观点看，梁除上下表面材料屈服外，其余材料仍处于弹性状态时还可继续承载。随着载荷增大，梁内弹性区减少，塑性区扩大，当达到全塑性状态时，由平衡关系可得极限载荷为

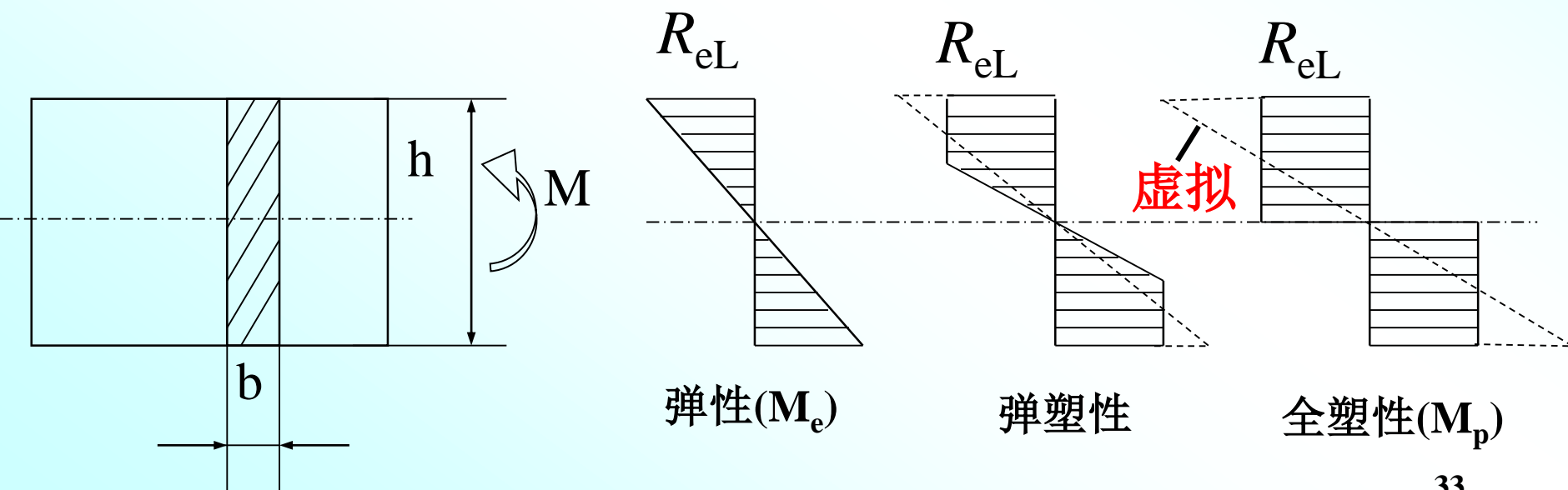


图4-59 纯弯曲矩形截面梁的极限分析

随着载荷增大，梁内弹性区减少，塑性区扩大，当达到全塑性状态时，由平衡关系可得极限载荷为

$$M_p = R_{eL} \frac{bh^2}{4}$$


且

$$M_p = 1.5M_e$$

若按弹性应力分布，则极限载荷下的虚拟应力为

$$\sigma'_{\max} = \frac{6M_p}{bh^2} = 1.5R_{eL}$$

所以，弯曲应力的上限，即屈服点 $R_{eL}$ 为 **$1.5S_m$**



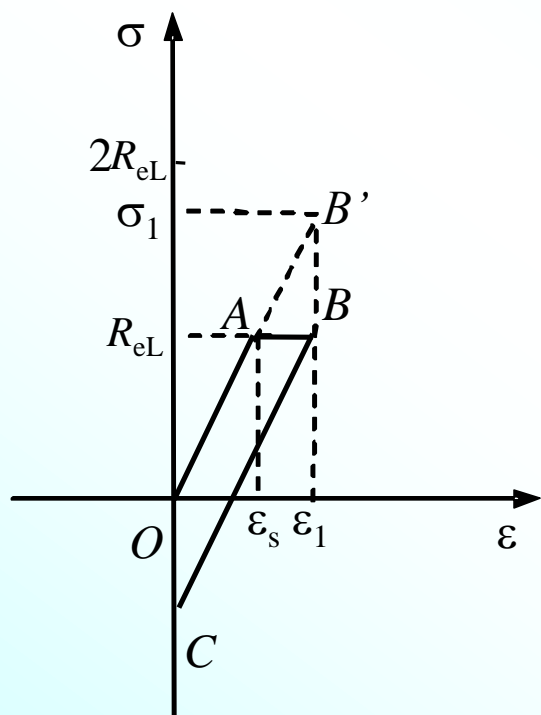
## 理想弹塑性材料

### (2) 安定性分析

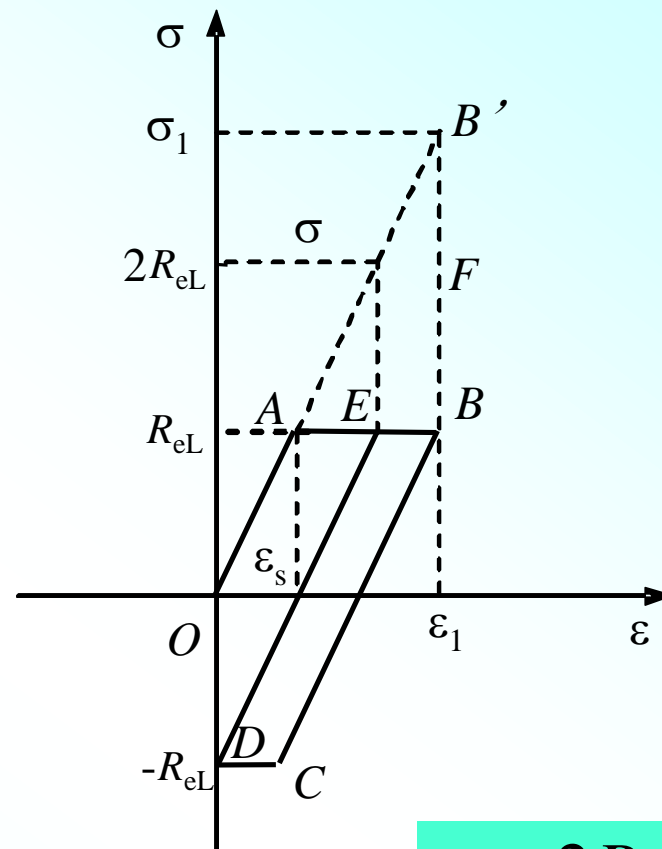
如果一个结构经几次反复加载后，其变形趋于稳定，或者说不再出现渐增的非弹性变形，则认为此结构是安定的。丧失安定后的结构会在反复加载卸载中引起新的塑性变形，并可能因塑性疲劳或大变形而发生破坏。

若虚拟应力超过材料屈服强度，局部高应力区由塑性区和弹性区两部分组成。塑性区被弹性区包围，弹性区力图使塑性区恢复原状，从而在塑性区中出现残余压缩应力。残余压缩应力的大小与虚拟应力有关。设结构由理想弹塑性材料制造，现根据虚拟应力 $\sigma_1$ 的大小简单分析处于安定状态的条件。

## (2) 安定性分析 (续)



(a)  $R_{eL} < \sigma_1 \leq 2R_{eL}$



(b)  $\sigma_1 > 2R_{eL}$

图4-60 安定性分析

## (2) 安定性分析 (续)

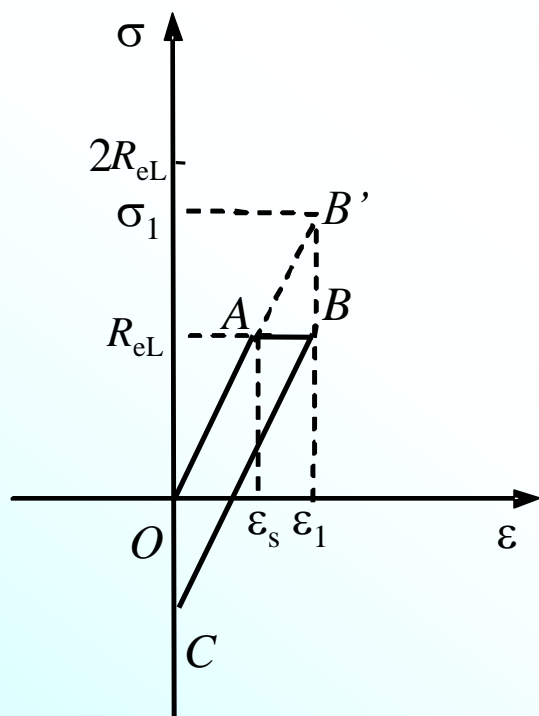
(a)  $R_{eL} < \sigma_1 \leq 2R_{eL}$ 

图4-60 安定性分析

当结构第一次加载时，塑性区中应力-应变关系按 $OAB$ 线变化，虚拟应力-应变线为 $OAB'$ 。卸载时，在周围弹性区的作用下，塑性区中的应力沿 $BC$ 线下降，且平行于 $OA$ 。塑性区便存在了残余压缩应力  $E(\varepsilon_1 - \varepsilon_s)$ ，即纵坐标上的 $OC$ 值。若载荷大小不变，则以后的加载、卸载循环中，应力将分别沿 $CB$ 、 $BC$ 线变化，不会出现新的塑性变形，在新的状态下保持弹性行为，这时结构是安定的。

## (2) 安定性分析 (续)

第一次加载时，塑性区中的应力-应变关系按OAB线变化，卸载时沿BC线下降，在C点发生反向压缩屈服而达到D点。于是在以后的加载、卸载循环中，应力将沿DEBCD回线变化。如此多次循环，即反复出现拉伸屈服和压缩屈服，将引起塑性疲劳或塑性变形逐次递增而导致破坏，这时结构是不安定的。

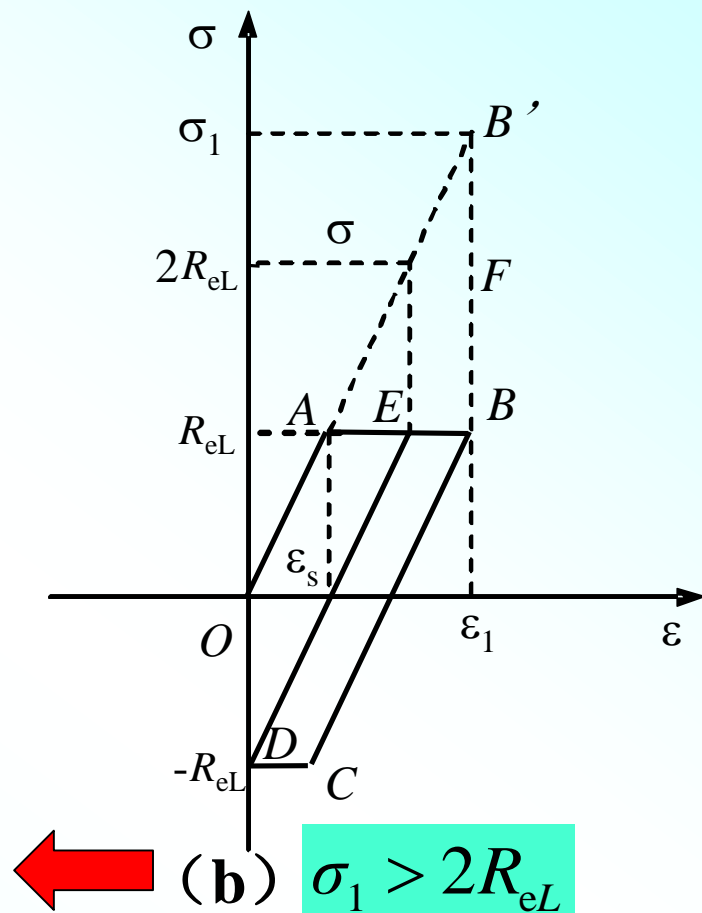


图4-60 安定性分析

可见，保证结构安定的条件是  $\sigma_1 \leq 2R_{eL}$ ，由于  $R_{eL} \geq 1.5S_m$ ，分析设计中将一次加二次应力强度限制在  **$3S_m$**  内。

### 4.4.4.3 应力强度限制

由于各容器失效的危害程度不同，所以对它们的限制条件也各不相同，不采用统一的许用应力值。

在分析设计中

一次应力的许用值是由**极限分析确定**，主要目的是防止韧性断裂或塑性失稳；

二次应力的许用值是由**安定性分析确定**，目的在于防止塑性疲劳或过度塑性变形；

峰值应力的许用值是由**疲劳分析确定**，目的在于防止由大小和（或）方向改变的载荷引起的疲劳。

### 4.4.4.3 应力强度限制

## 五类应力强度的安全判据

- (1) 一次总体薄膜应力强度  $S_I \leq K S_m$
- (2) 一次局部薄膜应力强度  $S_{II} \leq 1.5 K S_m$
- (3) 一次薄膜（总体或局部）加一次弯曲应力强度  $S_{III} \leq 1.5 K S_m$
- (4) 一次加二次应力强度  $S_{IV} \leq 3 S_m$
- (5) 峰值应力强度  $S_V \leq S_a$



### 4.4.4.3 应力强度限制

## 五类应力强度的安全判据

### (1) 一次总体薄膜应力强度 $S_I \leq K S_m$

总体薄膜应力是容器承受外载荷的应力成分，在容器的整体范围内存在，没有自限性，对容器失效的影响最大。一次总体薄膜应力强度 $S_I$ 的许用值是以极限分析原理来确定的。

### (2) 一次局部薄膜应力强度 $S_{II} \leq 1.5 K S_m$

局部薄膜应力是相对于总体薄膜应力而言，它的影响仅限于结构局部区域，同时，由于包含了边缘效应所引起的薄膜应力，它还具有二次应力的性质。因此，在设计中，对它允许有比一次总体薄膜应力高、但比二次应力低的许用应力。

### 4.4.4.3 应力强度限制

## 五类应力强度的安全判据

(3)一次薄膜（总体或局部）加一次弯曲应力强度  $S_{III} \leq 1.5KS_m$

弯曲应力沿厚度呈线性变化，其危害性比薄膜应力小。矩形截面梁的极限分析表明，在极限状态时，拉弯组合应力的上限是材料屈服强度的1.5倍。

(4)一次加二次应力强度  $S_{IV} \leq 3S_m$  ， 根据安定分析。

(5)峰值应力强度  $S_V \leq S_a$

由于峰值应力同时具有自限性与局部性，它不会引起明显的变形，其危害性在于可能导致疲劳失效或脆性断裂。

4.4.4.3 应力强度限制

应力种类	一次应力			二次应力	峰值应力
	总体薄膜	局部薄膜	弯曲		
符号	$P_m$	$P_L$	$P_b$	$Q$	$F$
应力分量的组合和应力强度的许用极限					
	$P_m$				
	$S_I \leq KS_m$				
用设计载荷		$P_L$	$P_L + P_b$	$P_L + P_b + Q$	$P_L + P_b + Q + F$
用工作载荷		$S_{II} \leq 1.5KS_m$	$S_{III} \leq 1.5KS_m$	$S_{IV} \leq 3S_m$	$S_V \leq S_a$

图4-61 应力分类和应力强度极限值

## 4.4.5 分析设计的应用

### (1) 压力容器分析设计的一般步骤

- (1) 结构设计
- (2) 建立力学分析模型
- (3) 应力分析
- (4) 应力分类
- (5) 应力强度计算
- (6) 应力强度校核

## (2) 分析设计标准的应用

常规设计标准和分析设计标准是两个相互独立的标准。它们都可以用在压力容器的设计中，但两者不能混用。

一般认为在下列情况之一，可考虑采用分析设计标准。

- (1) 作为常规设计的替代方法；
- (2) 常规设计适用范围以外的压力容器，如受变动载荷作用的压力容器、结构或者载荷特殊的压力容器；
- (3) 压力高、直径大的高参数压力容器；
- (4) 超过常规设计制造允差的例外情况。