

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

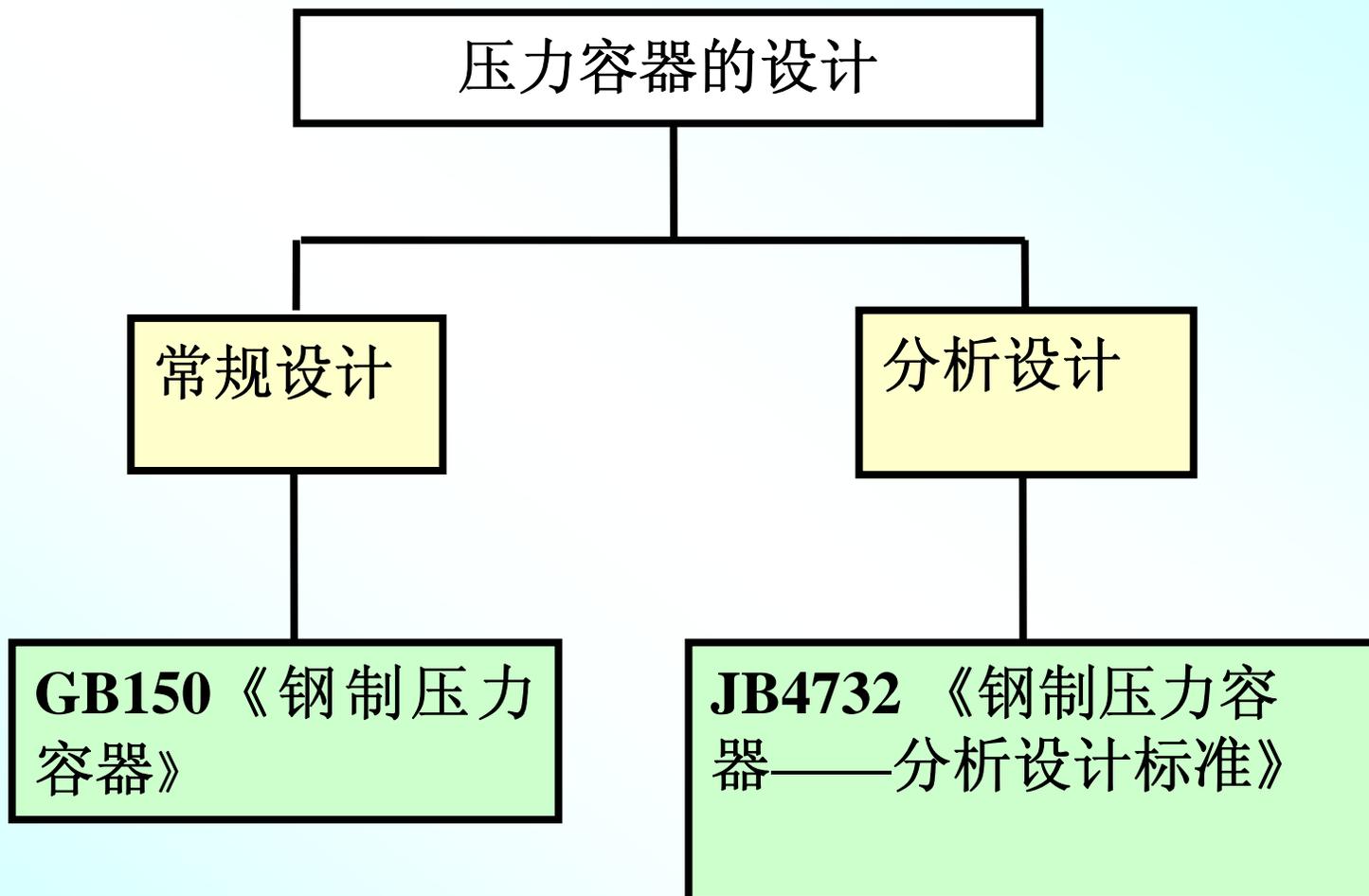
教学重点：

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

常规设计的局限性:

(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	简单的公式计算	解析法,数值法,实验法
研究的对象	壳体	设备上的所有点

常规设计的局限性（续）：

（3）容器的结构形式

标准	常规设计	分析设计
结构形式	某些规定的结构形式	任何结构

分析设计的基本思想

（1）不同种类的应力对容器失效的影响各不相同；

（2）如果能够对应力进行更严格而详细的计算，压力容器的设计就能够做到更合理、更科学。

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) 应力的作用区域和分布形式

(2) 应力产生的原因

主要的应力形式： 一次应力, 二次应力, 峰值应力

一次应力 (P):

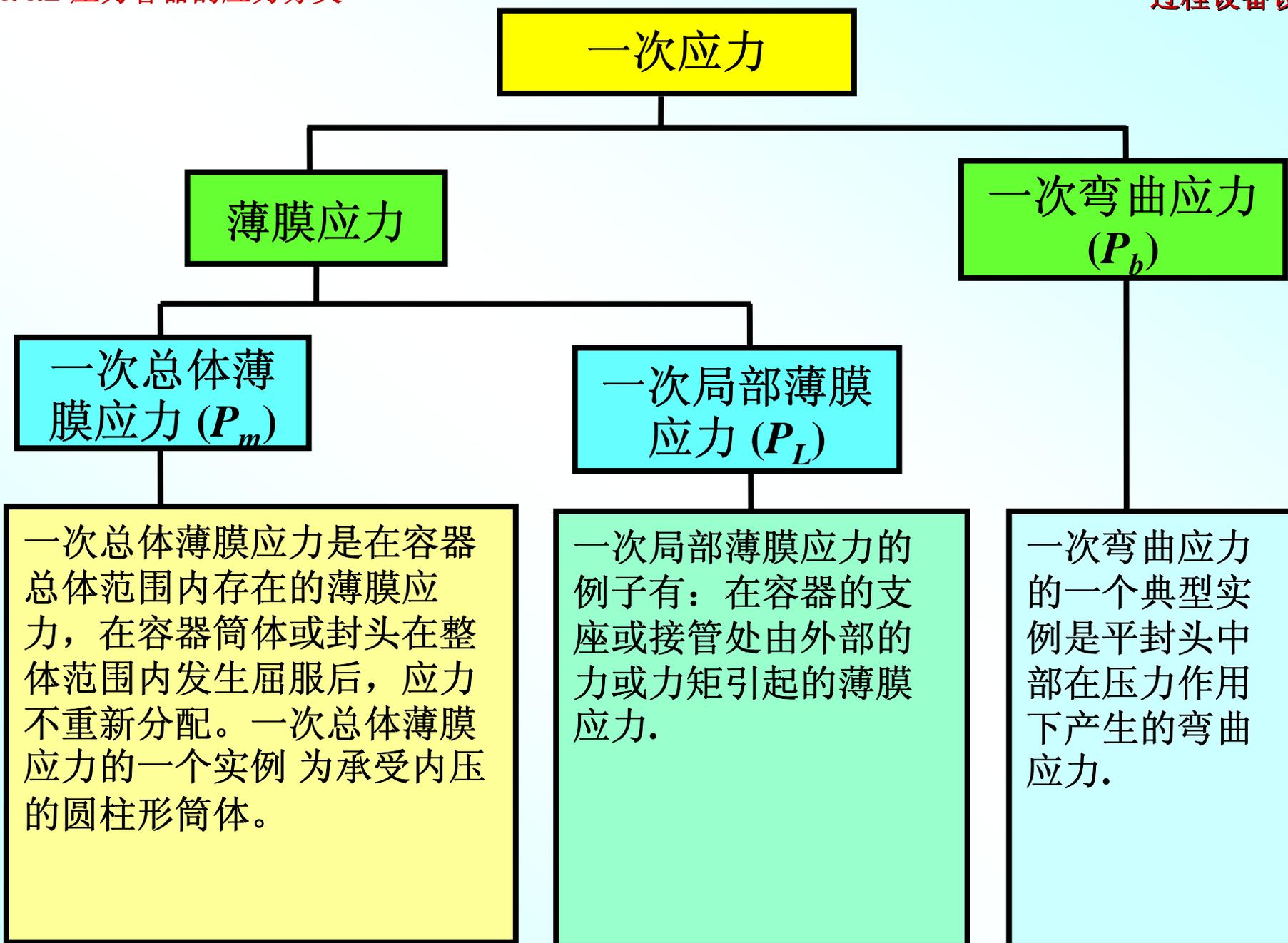
定义: 为平衡外加机械载荷而产生的力;

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应力

基本特征： 自限性

峰值应力 (F)

定义： 分析区域内的最大应力值

基本特征： 不引起任何明显的变形，其有害性仅是可能引起疲劳或脆性断裂

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

Table 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

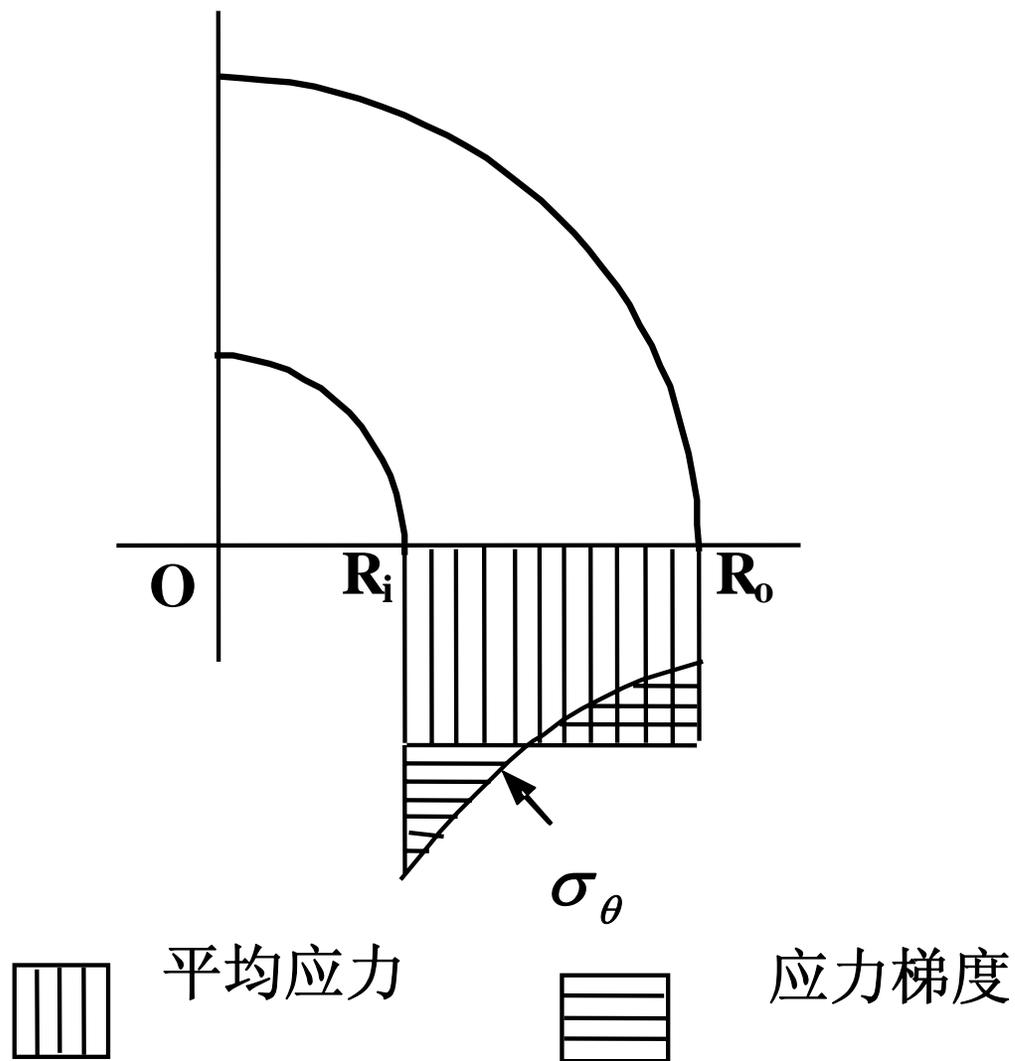


图4-56 内压厚壁圆筒环向应力的分解

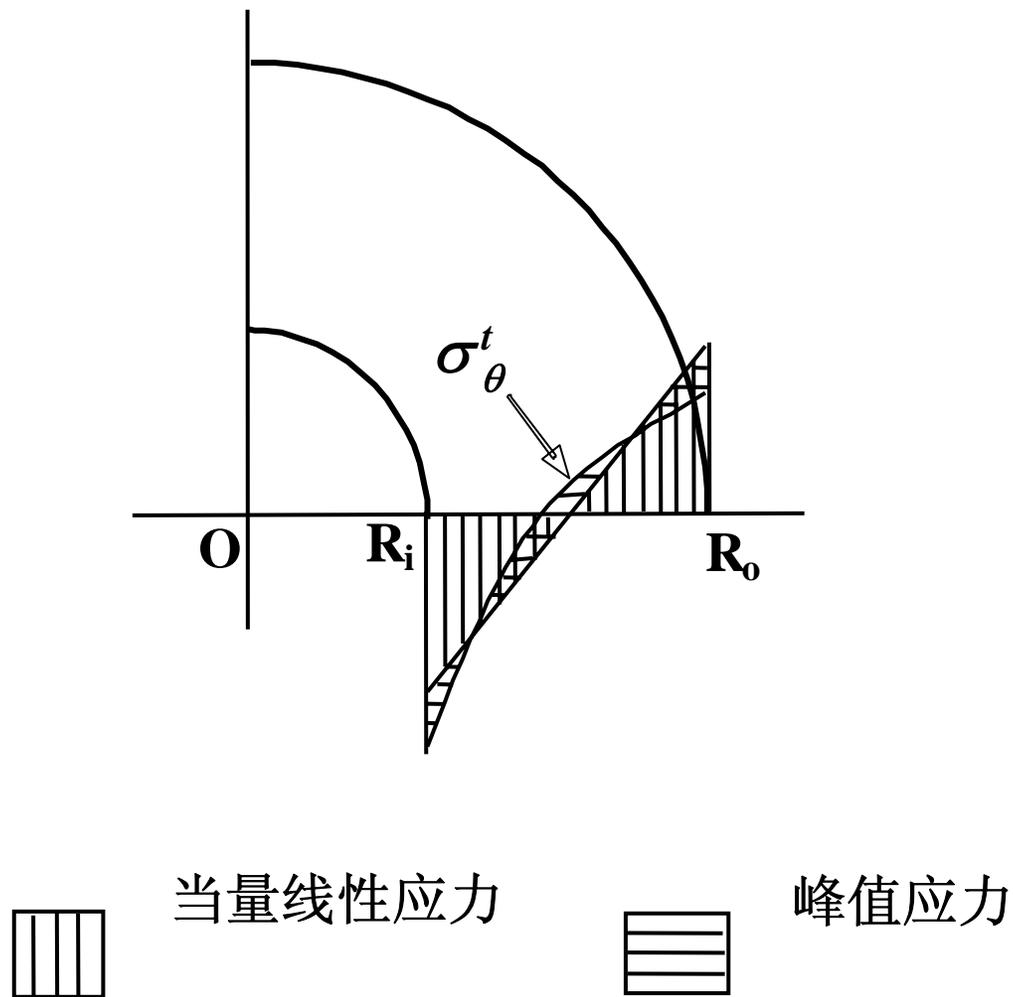


图4-57 外加热厚壁圆筒环向热应力的线性化处理

4.4.3 应力强度计算

应力强度： 该点最大主应力与最小主应力之差

五类基本的应力强度： S_I , S_{II} , S_{III} , S_{IV} and 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）

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, θ, z 表示，用 σ_x, σ_θ 和 σ_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 P_L $P_L + P_b$ $P_L + P_b + Q$

$P_L + P_b + Q + F$ 。

应力强度计算的步骤:

(4) 计算主应力 σ_1 , σ_2 和 σ_3 , 取 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$.

(5) 计算每组的最大主应力差

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

σ_{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

设计应力强度：

$$S_m = \min \left(\frac{\sigma_s}{n_s}, \frac{\sigma_s^t}{n_s^t}, \frac{\sigma_b}{n_b} \right)$$

where σ_s 常温下材料的最低屈服点；

σ_b 常温下材料的最低抗拉强度；

σ_s^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

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

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。

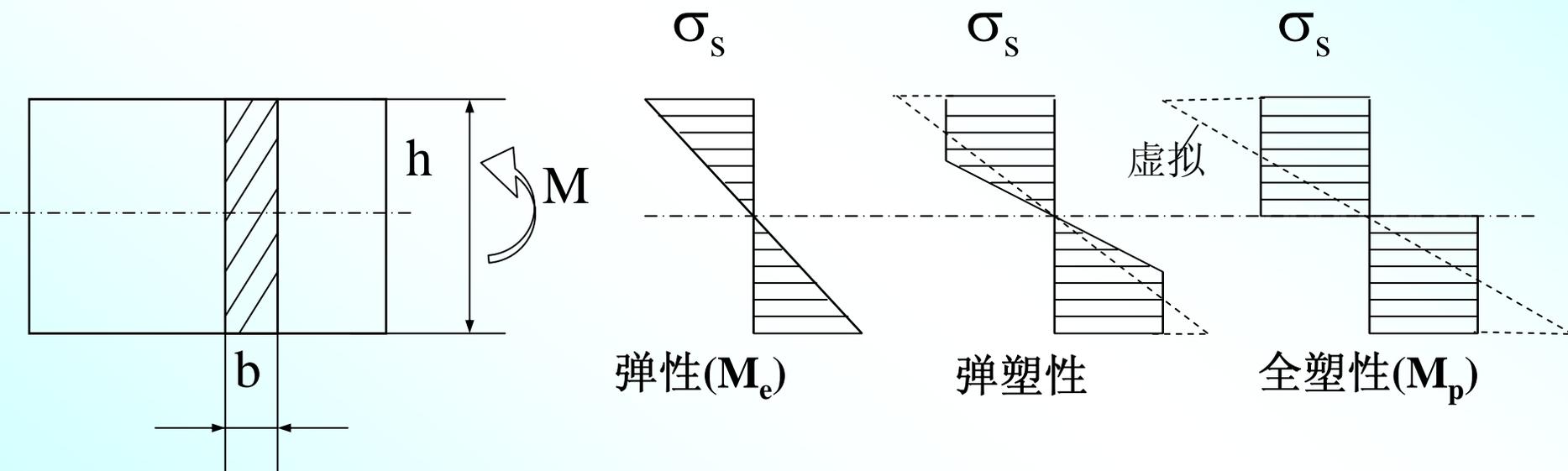


图4-59 纯弯曲矩形截面梁的极限分析

$$M_p = \sigma_s \frac{bh^2}{4}$$

且

$$M_p = 1.5M_e$$

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

所以弯曲应力的上限，即屈服点 σ_s 为 $1.5S_m$

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 $S_I \leq K S_m$ 用设计载荷 用工作载荷	P_L $S_{II} \leq 1.5 K S_m$	$P_L + P_b$ $S_{III} \leq 1.5 K S_m$	$P_L + P_b + Q$ $S_{IV} \leq 3 S_m$	$P_L + P_b + Q + F$ $S_V \leq S_a$

4.4.5 分析设计的应用

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

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) 压力高，直径大的容器；
- (2) 受疲劳载荷作用的容器；
- (3) 结构复杂或结构特殊的容器。