

过程设备设计（下）  
30学时

第五章 储存设备(7学时)

第六章 换热设备(8学时)

第七章 塔设备(8学时)

第八章 反应设备(6学时)

各章的三维动画(1学时)

# 第五章 储存设备

- 第一节 概述
- 第二节 卧式储罐
- 第三节 球形储罐

## 第二节 卧式储罐

● 5.2.1 基本结构

● 5.2.2 设计计算

本章重点

## 5.2 卧式储罐

教学重点：

卧式储罐的设计计算。

教学难点：

卧式储罐的设计计算。

本章计算  
重点

本章计算  
难点

# 一、地面卧式储罐

## 1.基本结构

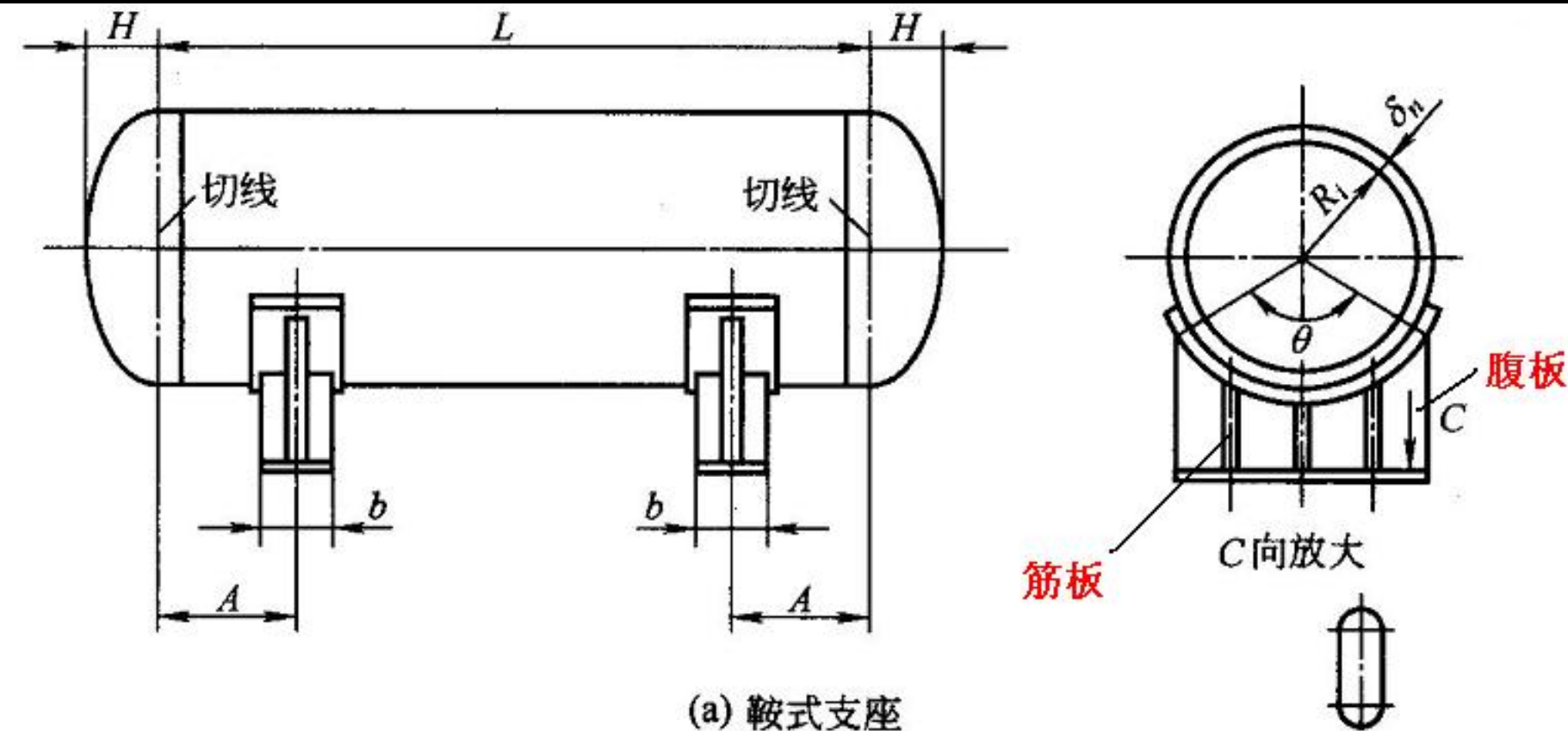
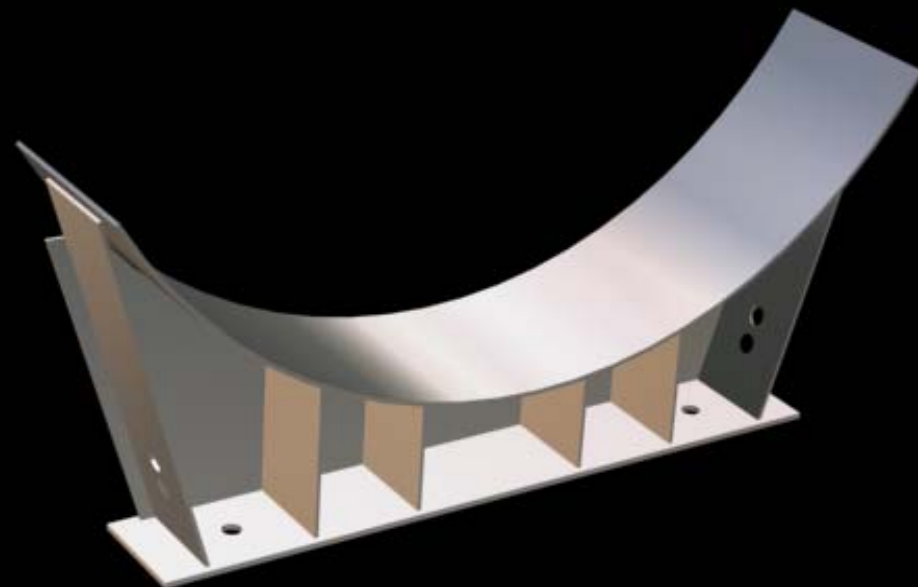
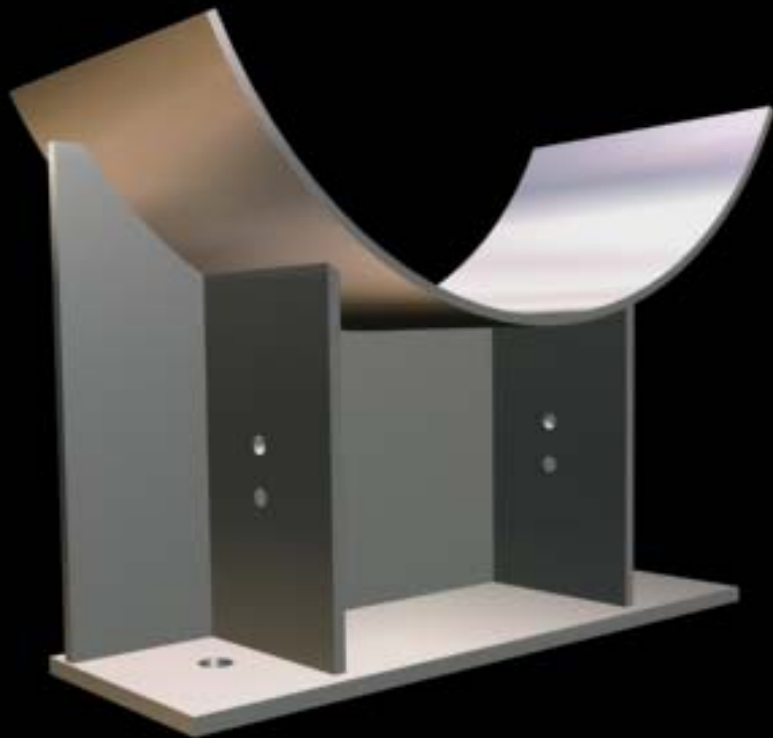


图5-1 地面储罐的基本结构（鞍式支座）



# 鞍式支座

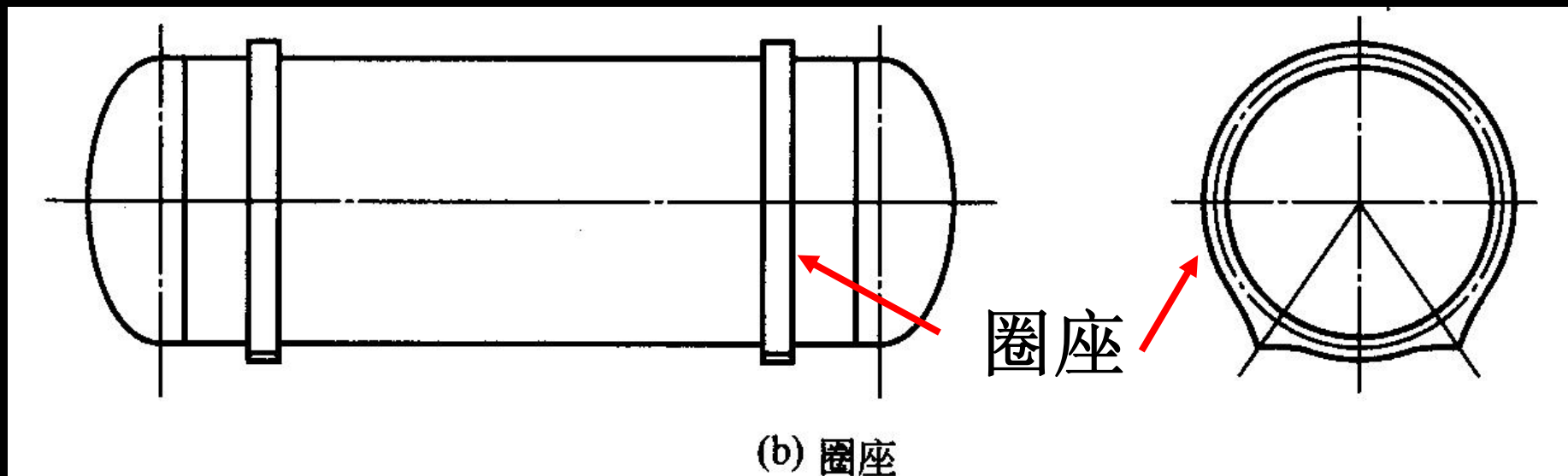


图5-1 地面储罐的基本结构（圈座）

- 根据内压或外压设备的设计方法初步计算厚度
- 考虑支座形式及结构的影响
- 校核附加载荷下周向、轴向强度和稳定性

从而确定实际的圆筒厚度

## A.鞍式支座

### 设计要点

支座数量的决定

安装位置的安排

鞍座包角的选取

鞍座标准的选用



支座数量的决定

双鞍座结构较普遍，多支座结构难于保证各支座受力均匀

安装位置的安排

一般， $A \leq 0.2L$ ，且最好 $A \leq 0.5R_m$   
A 最大不超过 $0.25L$

为什么?

双支座

一个固定（重量大，配管较多的一侧）  
一个可沿轴线移动（操作时和安装时的温度不同可能引起热膨胀以及可能出现弯曲造成附加应力）

鞍座包角的选取

影响鞍座处圆筒截面上的应力分布，影响稳定性和储罐-支座系统重心的高低

常用包角 $120^\circ$ 、 $135^\circ$ 、 $150^\circ$  我国JB/T4712用 $120^\circ$ 、 $150^\circ$

## 鞍座标准的 选用

利用标准选用支座时  
要充分考虑

设计温度  
地震设防烈度  
支座允许载荷  
是否设有垫板等

## B. 圈座

应用情况

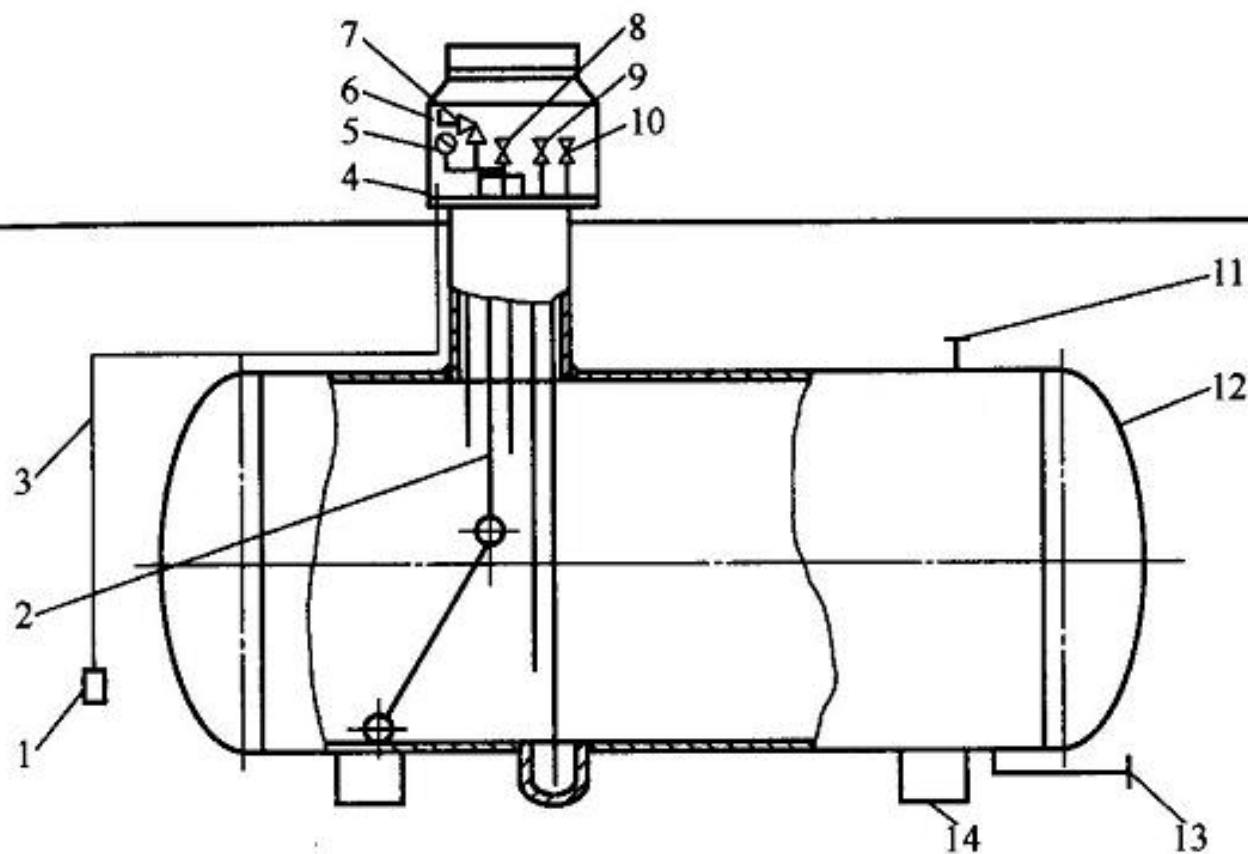
因自身重量而可能造成严重  
挠曲的薄壁容器

多于两个支承的长容器

其计算与  
鞍式支座相同

## 结构

## 二、地下卧式储罐



- 1-牺牲阳极
- 2-浮子液面计
- 3-金属导线
- 4-电线保护测试点
- 5-压力表
- 6-护罩
- 7-安全阀
- 8-罐装气相阀门
- 9-罐装液相阀门
- 10-排污和倒空管阀门
- 11-罐间气相连接管
- 12-罐体
- 13-罐间液相连接管
- 14-支座

图5-2 地下储罐结构示意图

# 优点

减少占地面积和安全防火距离  
避开环境温度的影响

# 埋地措施

地下室

埋土

地下支座

涂沥青防锈层或牺牲阳极法

地土埋设，达到预期埋土高度

## 第二节 卧式储罐

● 5.2.1 基本结构

● 5.2.2 设计计算

## 卧式储罐的计算过程

给定设计条件：压力、温度、直径、长度、材料等

计算圆筒和封头厚度  $\delta_n$  ,  $\delta_h$

设置鞍座位置A

计算容器质量、鞍座反力、轴向弯矩  $m$ 、 $F$ 、 $M_1$ 、 $M_2$

● 计算轴向应力  $\sigma_{1 \sim 4}$

● 计算切向应力  $\tau$ 、 $\tau_h$

● 计算周向应力  $\sigma_{5-8}$

● 计算鞍座应力  $\sigma_9$

四类应力按此  
顺序逐一符合要求，  
则设计结束。

若四类应力中有任何一个不符合  
许用要求，则需要做相应调整。



调整方法

调整鞍座位置

调整鞍座形式

设置加强件、加强板或加强圈

增加圆筒或封头厚度

调整方法和顺序，见课本**238**页



## 一、卧罐的载荷分析

1. 压力： 内压或外压
2. 储罐重量： 圆筒+封头+附件的总重量
3. 物料重量： 正常操作时=物料重量  
水压试验时=充水重量
4. 其他载荷： 环境影响下的载荷，如风载、雪载、地震载等

卧罐总重量作用的总长度为  $L' = L + (4/3)H$

两凸形封头折算成  
同直径圆筒长度

单位长度的均布载荷

$$q = \frac{2F}{L'} = \frac{2F}{L + \frac{4}{3}H}$$

忽略储罐自身重量

$$q \approx \pi R_i^2 \rho g$$

工程上的  
简化力学模型



## 力学模型的简化

简化为长度L，受均布载荷q作用的外伸简支梁

课本错误

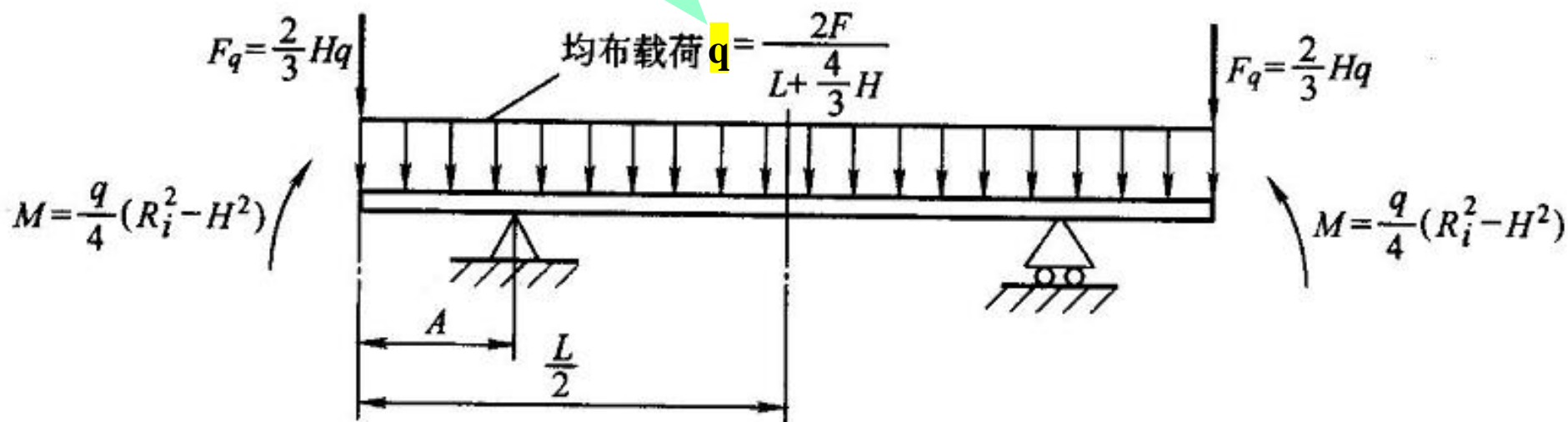


图5-3 双鞍座卧式储罐受力分析 (b) 两支点外伸梁

封头本身和其中物料的总量

$$\frac{2}{3}Hq \text{ 作用在其重心上}$$

凸形封头（包括物料）重心近似

$$e = \frac{3}{8}H \text{ 到封头切线距离}$$

凸形封头（包括物料）重量近似在简支梁端点的等效载荷为

$$\text{剪力: } F_q = \frac{2}{3}Hq$$

$$\text{力偶: } m_1 = \frac{H^2}{4}q$$

罐内充满的液体对平板封头推力力矩近似：

$$m_2 = Sy_c = qR_i \frac{R_i}{4} = \frac{qR_i^2}{4}$$

对其他凸形封头的  
推力力矩均简化为

平移到轴线后力的  
大小忽略不计

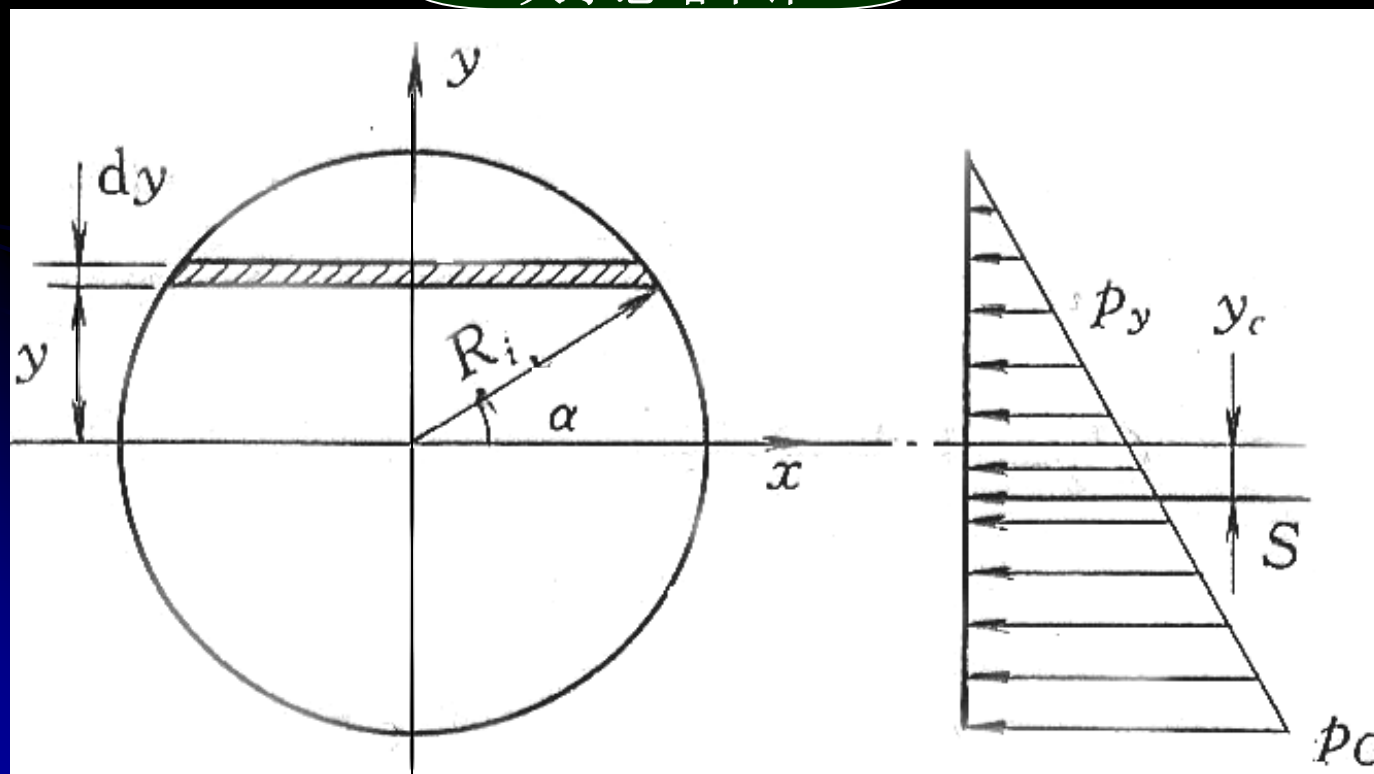


图5-4  
液体静压力  
及其合力

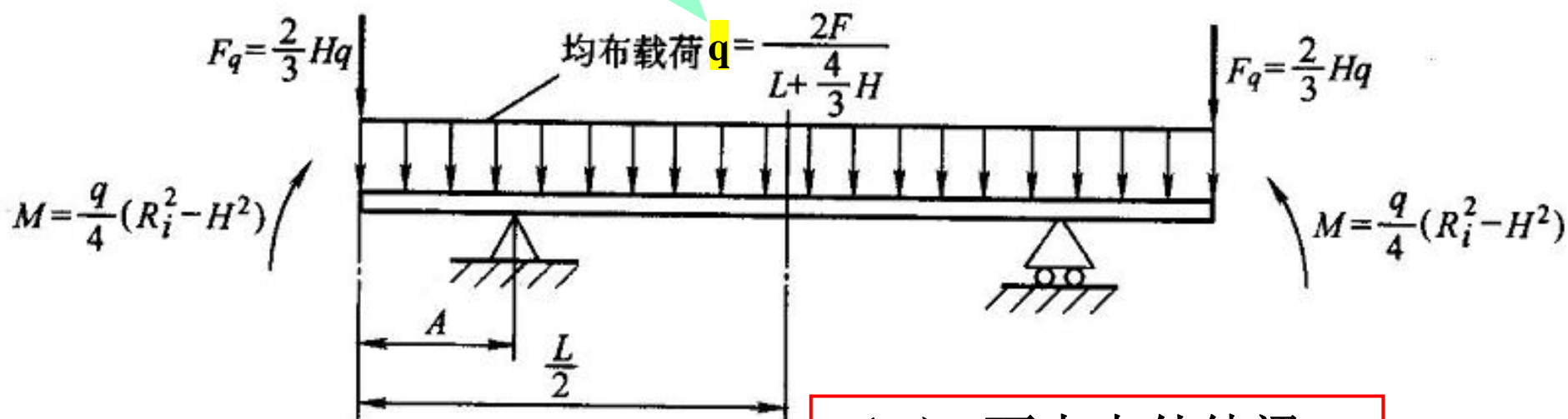
得梁端点的力偶

$$M = m_2 - m_1 = \frac{q^2}{4} (R_i^2 - H^2)$$

通过以上简化

卧罐的力学简化模型

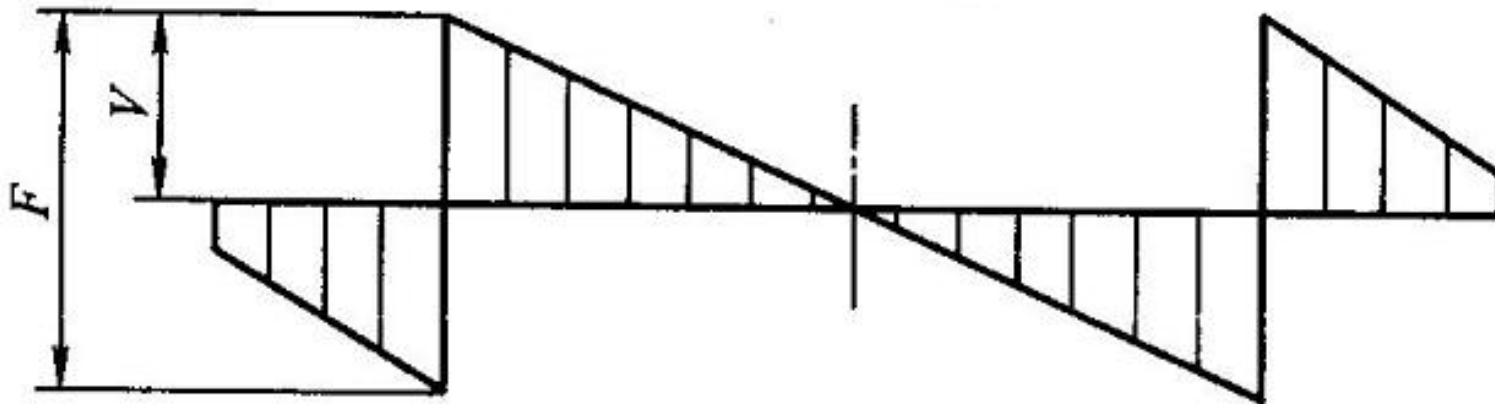
课本错误



(b) 两支点外伸梁

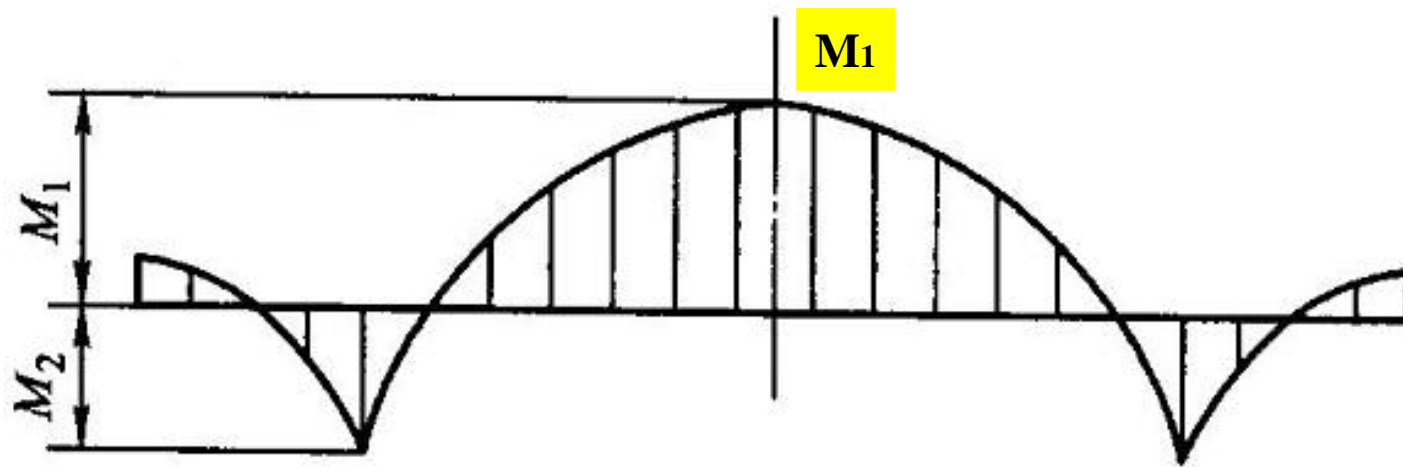
图5-3 双鞍座卧式储罐受力分析

剪力



(c) 剪力图

弯矩



(d) 弯矩图



## 二、内力分析

### (1) 弯矩

#### A. 圆筒在支座跨中截面处的弯矩

课本错误，没有平方

$$M_1 = \frac{q^2}{4} (R_i^2 - H^2) - \frac{2}{3} Hq \left( \frac{L}{2} \right) + F \left( \frac{L}{2} - A \right) - q \left( \frac{L}{2} \right) \left( \frac{L}{4} \right)$$

简化

$$C_1 = \frac{1 + 2 \left[ \left( \frac{R_i}{L} \right)^2 - \left( \frac{H}{L} \right)^2 \right]}{4 \left( 1 + \frac{4}{3} \frac{H}{L} \right)}$$

整理几何参数

$$M_1 = F (C_1 L - A)$$

$M_1$ 为正：上半部圆筒受压缩  
下半部圆筒受拉伸

## B. 圆筒在支座截面处的弯矩

$$M_2 = \frac{q}{4}(R_i^2 - H^2) - \frac{2}{3}HqA - qA\left(\frac{A}{2}\right)$$

简化  $C_2 = 1 + \frac{4H}{3L}$      $C_3 = \frac{R_i^2 - H^2}{2R_i L}$     整理几何参数

$$M_2 = \frac{FA}{C_2} \left( 1 - \frac{A}{L} + C_3 \frac{R_i}{A} - C_2 \right)$$

**M<sub>2</sub>为负：** 上半部圆筒受拉伸  
下半部圆筒受压缩

**(2) 剪力**

A. 支座跨距中点处截面的剪力等于0

B. 支座截面上的剪力:

应计及外伸圆筒  
和封头两部分  
重量的影响

a. 当  $A > 0.5R_i$  时:

$$V = F - q \left( A + \frac{2}{3}H \right) = F \left( \frac{L - 2A}{L + \frac{4}{3}H} \right)$$

(5-5a)

b. 当  $A \leq 0.5R_i$  时:

$$V = F \quad \text{保守做法}$$

(5-5b)

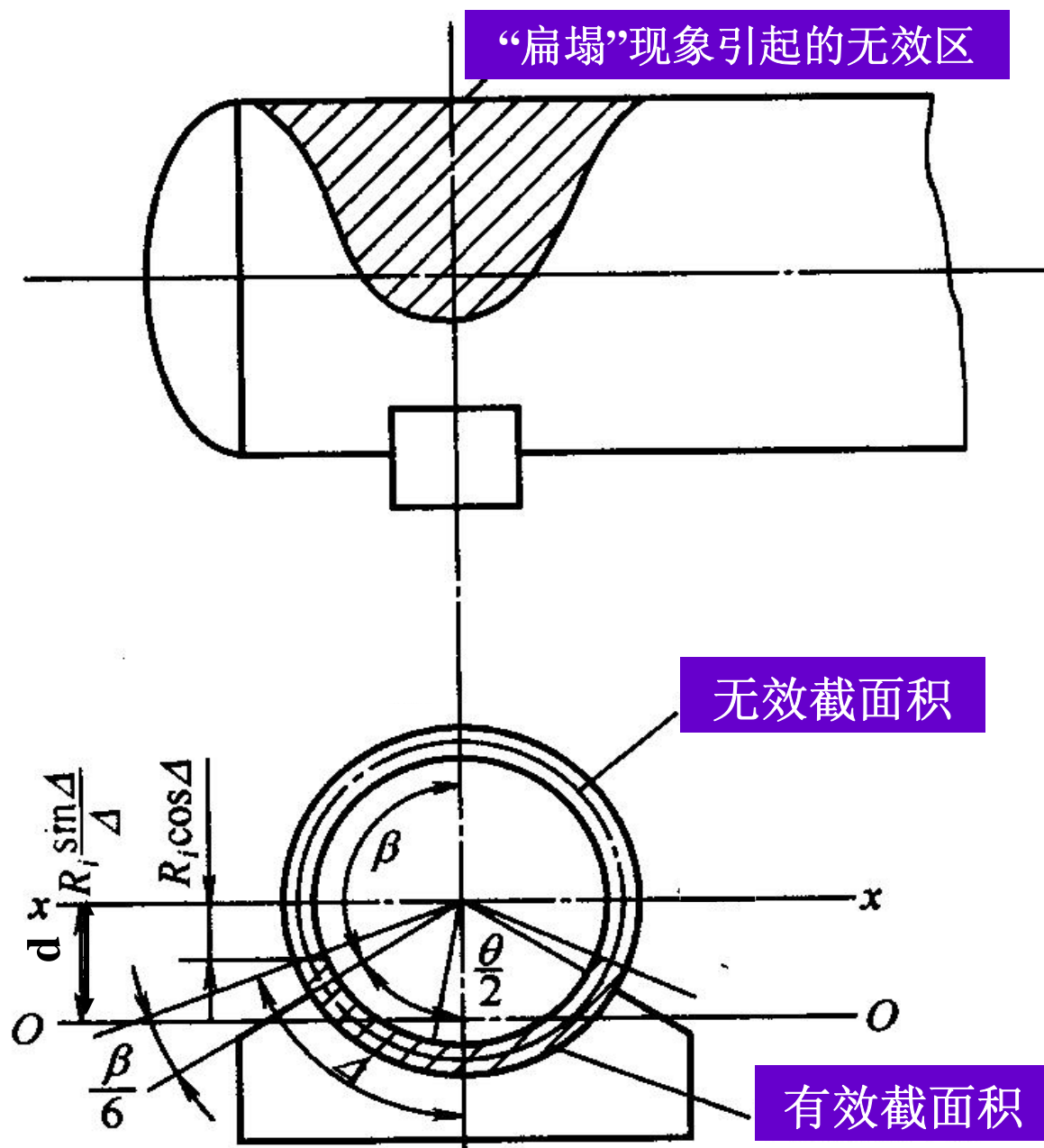
### 三、圆筒应力计算和强度校核

- (1) 圆筒上的轴向应力
- (2) 支座截面处圆筒和封头上的切向切应力和封头的附加拉伸应力
- (3) 支座截面处圆筒的周向弯曲应力
- (4) 支座截面处圆筒的周向压缩应力
- (5) 周向弯曲应力和周向压缩应力的强度校核
- (6) 加强圈设计

圆筒  
周向应力

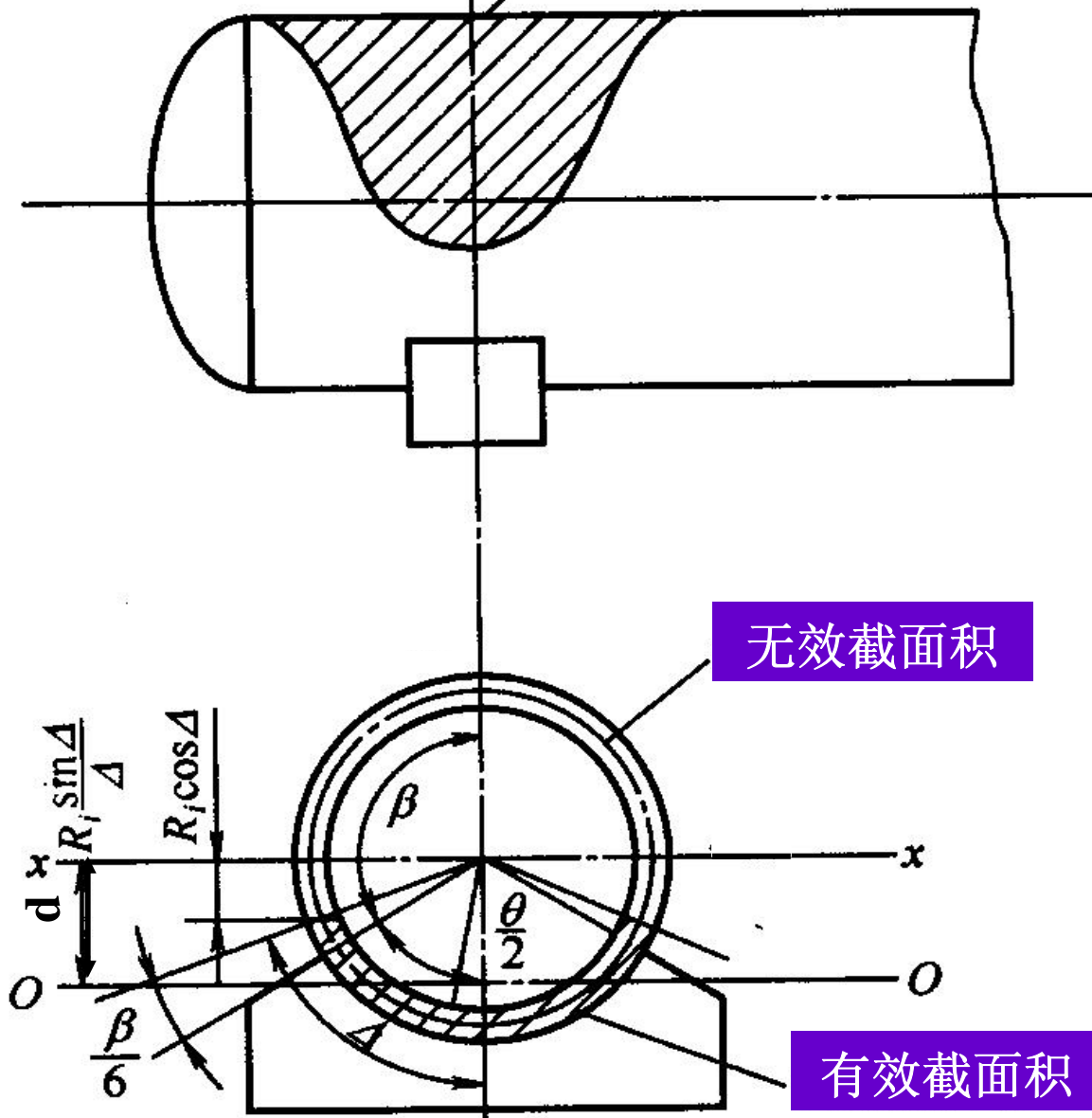
## (1) 圆筒上的轴向应力

- 除支座附近截面外，其他各处圆筒在承受轴向弯矩时，仍然可以看成抗弯截面模量为  $\pi R_i^2 \delta_e$  的空心圆截面梁，而并不承受周向弯矩的作用。

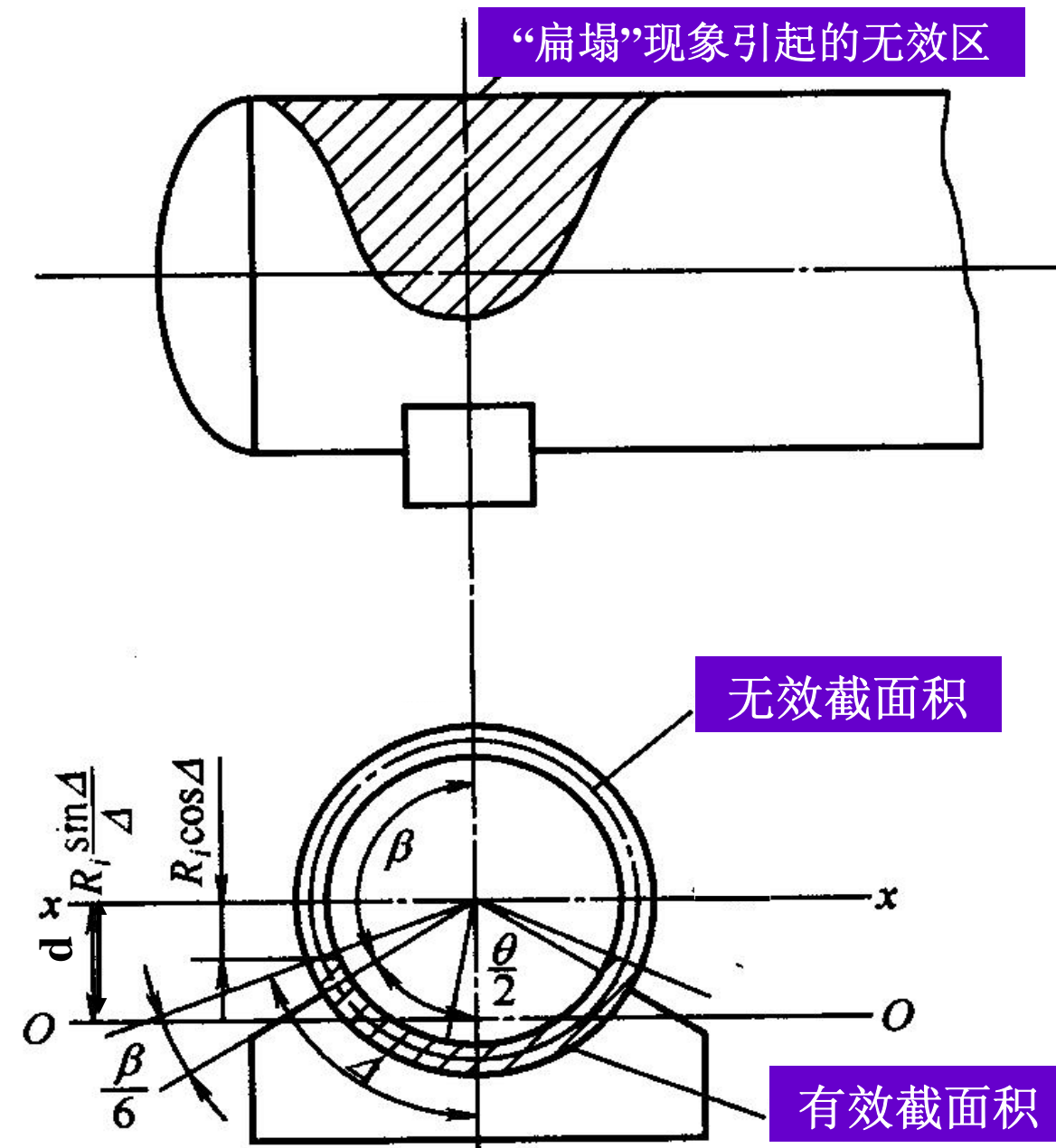


- 如果圆筒不设加强圈，且  $A > 0.5R_i$ ，由于支座处截面受剪力作用而产生周向弯矩，在周向弯矩的作用下，导致支座处圆筒的上半部发生变形，产生所谓“扁塌”现象，见图5-5。

“扁塌”现象引起的无效区



- “扁塌”一旦发生，那么支座处圆筒截面的上部就成为难以抵抗轴向弯矩的“无效截面”，而剩下的圆筒下部截面才是能够承担轴向弯矩的“有效截面”。



齐克据实验测定结果认为，与“有效截面”弧长对应的半圆心角  $\Delta$  等于鞍座包角  $\theta$  之半加上  $\beta/6$ ，即

$$\Delta = \frac{\theta}{2} + \frac{\beta}{6}$$

$$= \frac{1}{12} (360^\circ + 5\theta)$$

图5-5“扁塌”现象



**a** ■ 跨距中点处圆筒截面由轴向弯矩引起的轴向应力

最高点（压缩应力）

$$\sigma_1 = \frac{M_1}{\pi R_i^2 \delta_e} \quad (5-6)$$

最低点（拉伸应力）

$$\sigma_2 = \frac{M_1}{\pi R_i^2 \delta_e} \quad (5-7)$$

■ 跨距中点处圆筒截面由内压引起的轴向应力

$$\sigma' = \frac{pR_i}{2\delta_e}$$

■ 跨距中点处圆筒截面总的轴向应力

$$\sigma_1' = -\frac{|M_1|}{\pi R_i^2 \delta_e} + \frac{pR_i}{2\delta_e}$$

$$\sigma_2' = \frac{|M_1|}{\pi R_i^2 \delta_e} + \frac{pR_i}{2\delta_e}$$

## b 支座截面处圆筒由轴向弯矩引起的轴向应力

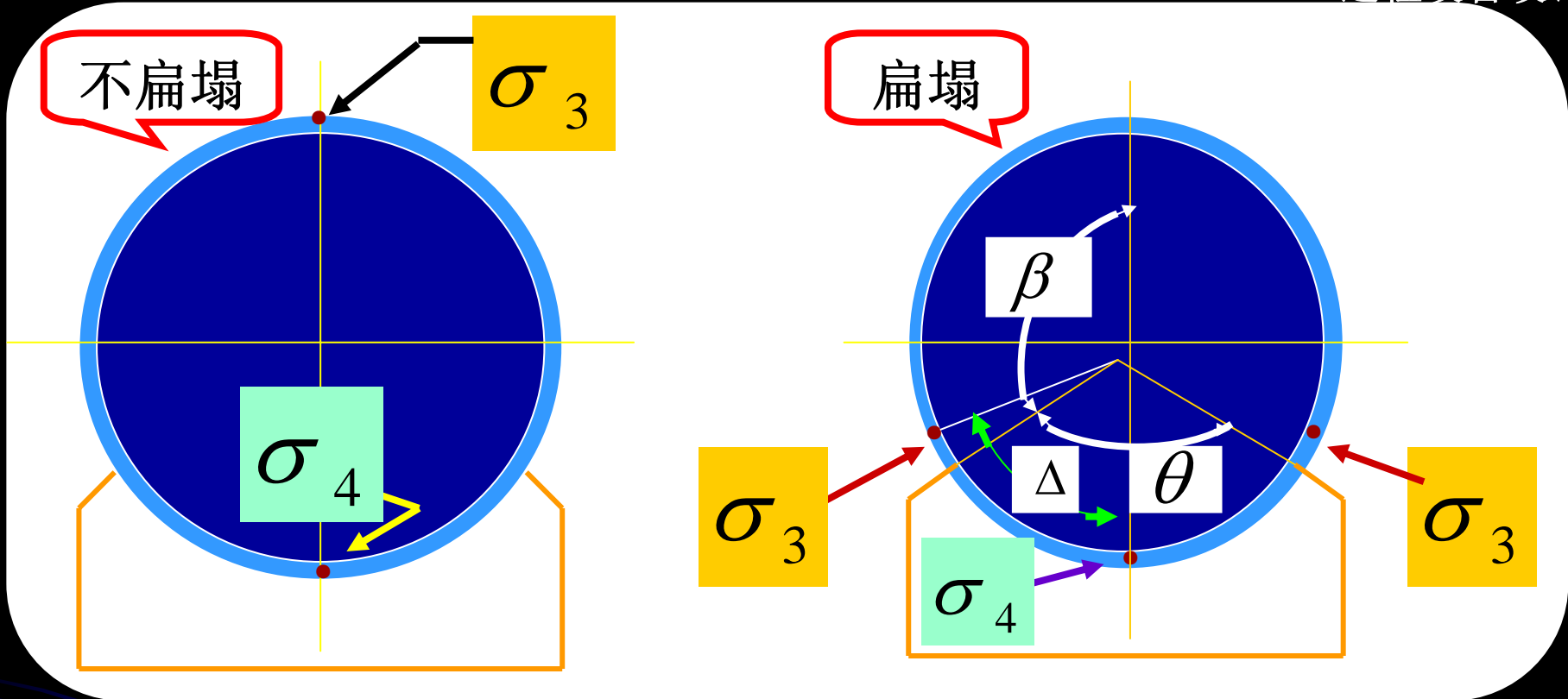
惯性矩、  
抗弯截面模量  
变化

支座截面处圆筒由轴向弯矩引起的轴向(拉伸)应力  $\sigma_3$

位置

当圆筒在鞍座平面上有加强圈或被封头加强  
(即  $A < R_m/2$ ) 时轴向应力  $\sigma_3$  位于横截面最高点处

当圆筒在鞍座平面上没有加强圈或不被封头加强  
(即  $A \geq R_m/2$ ) 时轴向应力  $\sigma_3$  位于靠近水平中心线处

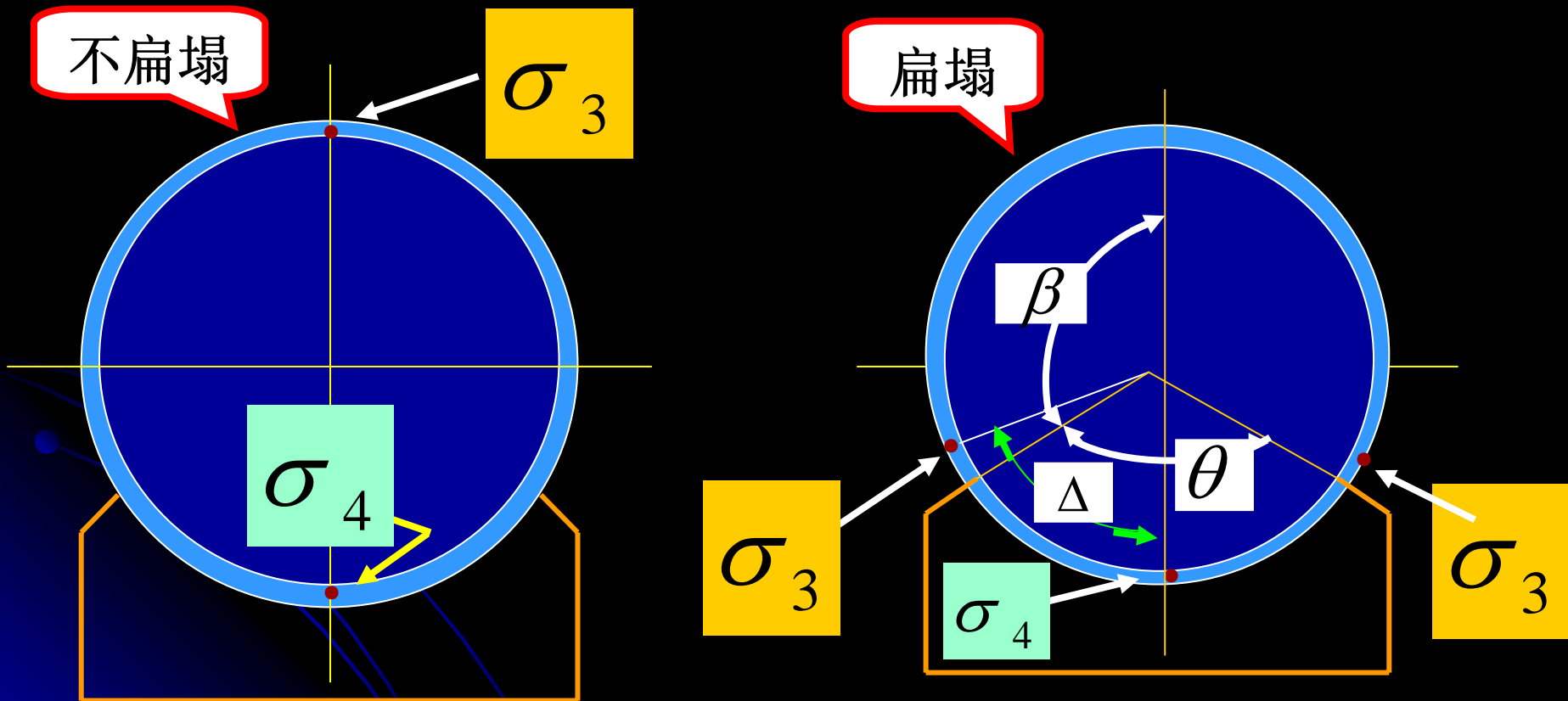


大小

$$\sigma_3 = \frac{M_2 y_0}{I_{0-0}} = \frac{M_2 \left( R_i \frac{\sin \Delta}{\Delta} - R_i \cos \Delta \right)}{R_i^3 \delta_e \left( \Delta + \sin \Delta \cos \Delta - 2 \frac{\sin^2 \Delta}{\Delta} \right)} = \frac{M_2}{K_1 \pi R_i^2 \delta_e} \quad (5-8)$$

支座截面处圆筒由轴向弯矩引起的轴向(压缩)应力  $\sigma_4$

位置始终处于截面最低点



大小

$$\sigma_4 = \frac{M_2 y_n}{I_{0-0}} = \frac{M_2 \left( R_i - R_i \frac{\sin \Delta}{\Delta} \right)}{R_i^3 \delta_e \left( \Delta + \sin \Delta \cos \Delta - 2 \frac{\sin^2 \Delta}{\Delta} \right)} = \frac{M_2}{K_2 \pi R_i^2 \delta_e} \quad (5-9)$$

$K_1$ 、 $K_2$ 为“扁塌”现象引起的抗弯截面模量减少系数

包角  $\theta$   齐克  有效截面对应的半圆心角  $\Delta$

$K_1$ 、 $K_2$  (表5-1)

表5-1 系数 $K_1$ 、 $K_2$ 值

条件	鞍座包角 $\theta$	$K_1$	$K_2$
$A \leq 0.5R_i$ 即封头对圆筒起加强作用，或鞍座处有加强圈的圆筒	$120^\circ$	1.0	1.0
	$135^\circ$	1.0	1.0
	$150^\circ$	1.0	1.0
$A > 0.5R_i$ 且圆筒无加强圈，或虽有加强圈，但加强圈不在鞍座处	$120^\circ$	0.107	0.192
	$135^\circ$	0.132	0.234
	$150^\circ$	0.161	0.279

## 圆筒上的轴向应力校核

圆筒上的轴向应力由两部分组成，即压力及轴向弯矩引起的轴向应力叠加

拉伸应力  $\leq [\sigma]^t$

压缩应力  $\left\{ \begin{array}{l} \leq [\sigma]_{cr} \\ \leq [\sigma]^t \end{array} \right.$

在操作工况、试验工况和充水工况下，卧式储罐所受的载荷并不相同，应分别进行筒体应力计算和强度校核：

- a. 在操作工况下，由储罐重量、物料重量等所引起的拉伸、压缩弯曲应力，应与设计压力（内压或外压）引起的轴向拉伸（或压缩）应力进行叠加；
- b. 在试验工况下，由压力试验时的试验介质（一般为水）重量、储罐重量等引起的位伸、压缩弯曲应力，应与试验压力所引起的轴向拉伸应力相叠加；
- c. 在充水工况下，水压试验过程中若已充满水而水压尚未升起时，或在操作过程中充满物料后而压力尚未升起时，由充水或物料重量以及储罐重量引起的拉伸、压缩弯曲应力。



## (2) 支座截面处圆筒和封头上的切向切（剪）应力 和封头的附加拉伸应力



- a. 支座截面处设置有加强圈的圆筒
- b. 支座截面处无加强圈且 $A > 0.5R_i$  的圆筒
- c. 被封头加强的圆筒

依据支座截面处圆筒的不同加强方式，切向切（剪）应力的分析分三种情况

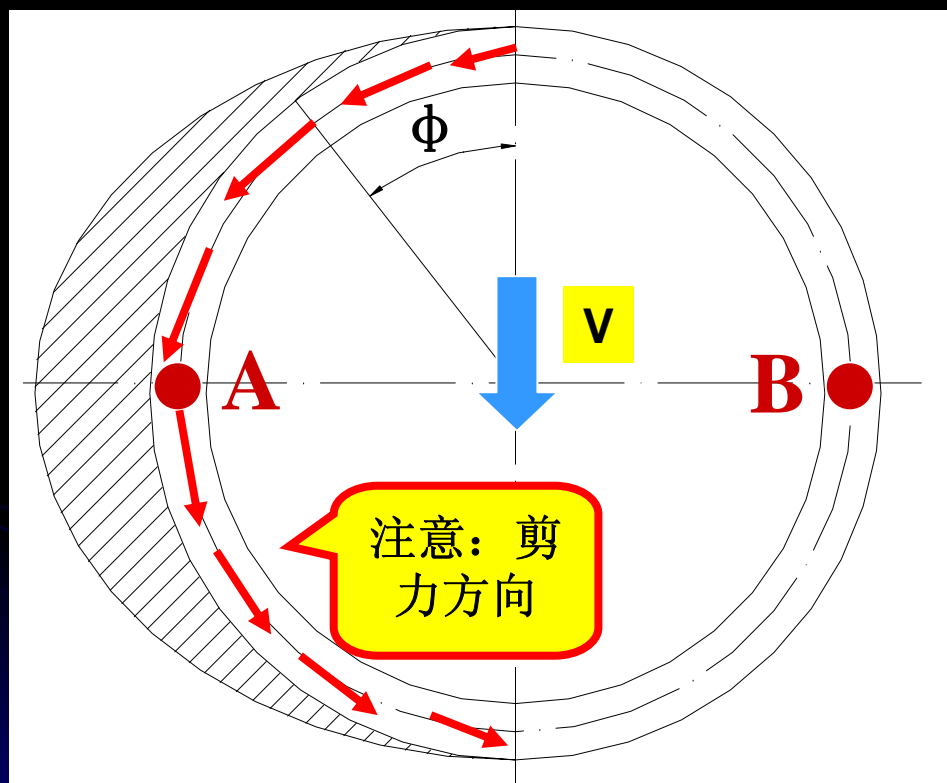
d. 封头中的附加拉伸应力

( $A \leq 0.5R_i$ , 封头对圆筒起加强作用)

有加强的情况

V在切向的分量

a. 支座截面处设置有加强圈的圆筒:



$$\tau = \frac{V \sin \phi}{\pi R_i \delta_e} = \frac{K_3 V}{R_i \delta_e} \quad (5-10)$$

$$K_3 = \frac{\sin \phi}{\pi}$$

其中，剪力  $V = F \left[ \frac{L - 2A}{L + \frac{4}{3}H} \right]$

当  $\phi = \pi / 2$  时，  
 $\sin \phi = 1, K_3 = 1 / \pi = 0.319$   
 $\tau$  为最大

$\tau$  最大值在A、B位置

图5-6 支座截面上有加强圈时圆筒上的切向切应力

无任何加强的情况

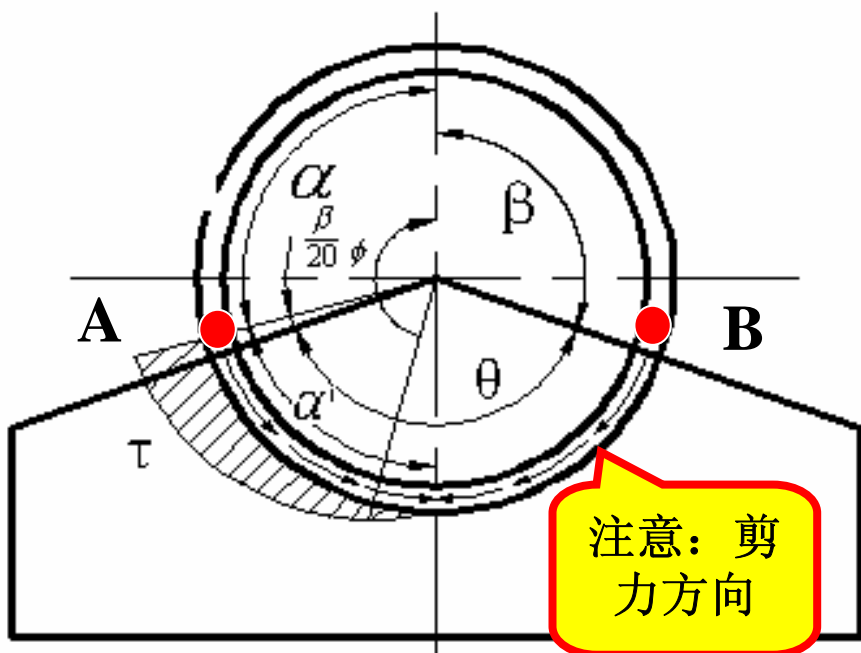
b. 在支座截面处无加强圈且  $A > 0.5R_i$  的简体:

图5-7 未被加强圆筒上的切向切应力

$$\tau_n = C\tau = \frac{V \sin \phi}{R_i \delta_e (\pi - \alpha + \sin \alpha \cos \alpha)}$$

$\phi = \alpha$  时,  $\tau$  最大

$$\tau_{\max} = \frac{\sin \alpha}{\pi - \alpha + \sin \alpha \cos \alpha} \frac{V}{R_i \delta_e} = K_3 \frac{V}{R_i \delta_e}$$

(5-11)

其中, 剪力  $V = F \left[ \frac{L - 2A}{L + \frac{4}{3}H} \right]$

当  $\theta = 120^\circ$ 、 $135^\circ$ 、 $150^\circ$  时, 可对应求得  $K_3 = 1.171$ 、 $0.958$  和  $0.799$

有加强的情况

## c. 被封头加强的圆筒:

此时外伸部分重量忽略，由此假设外伸部分无剪力，看右图

截面上上下下力相等

当  $\theta = \alpha$  时，  
 $\tau$  最大

$$\tau_{\max} = \frac{\sin \alpha}{\pi} \left( \frac{\alpha - \sin \alpha \cos \alpha}{\pi - \alpha + \sin \alpha \cos \alpha} \right) \frac{F}{R_i \delta_e} = K_3 \frac{F}{R_i \delta_e}$$

(5-12)

$$K_3 = \frac{\sin \alpha}{\pi} \left( \frac{\alpha - \sin \alpha \cos \alpha}{\pi - \alpha + \sin \alpha \cos \alpha} \right) \quad \text{其中，剪力 } V=F$$

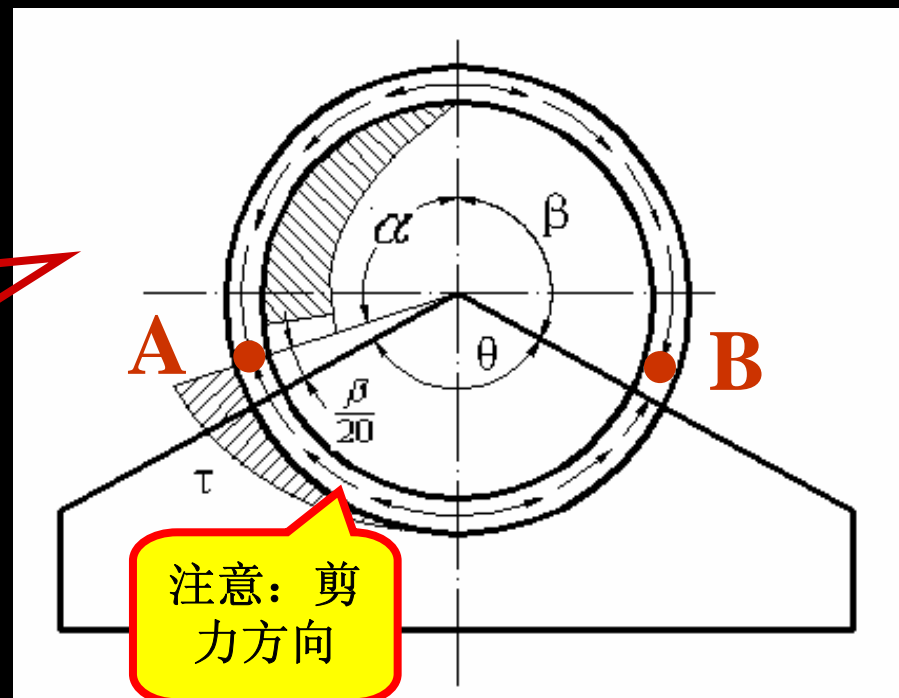


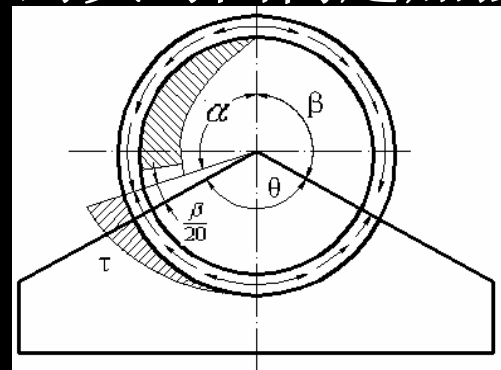
图5-8 被封头加强的圆筒上的切向切应力

$\tau$  最大值在  
A、B位置

当  $\theta$  分别为  $120^\circ$ 、 $135^\circ$  和  $150^\circ$  时， $K_3 = 0.880$ 、 $0.645$  和  $0.485$ 。

d. 封头中的附加拉伸应力 ( $A \leq 0.5R_i$ , 封头对圆筒起加强作用)

图5-8中，封头切向切应力会对封头产生水平的附加拉伸应力，作用范围沿着封头的整个高度。



$$\tau_h = \frac{F}{2} \left( \frac{\sin^2 \alpha}{\pi - \alpha + \sin \alpha \cos \alpha} \right) \frac{1.5}{2R_i \delta_{he}} = K_4 \frac{F}{R_i \delta_{he}} \quad (5-13)$$

$$K_4 = \frac{3}{8} \left( \frac{\sin^2 \alpha}{\pi - \alpha + \sin \alpha \cos \alpha} \right)$$

当  $\theta$  分别为  $120^\circ$ 、 $135^\circ$  和  $150^\circ$  时  $K_4=0.401$ 、 $0.344$  和  $0.297$

表5-1 系数 $K_3$ 、 $K_4$ 值

条件		鞍座包角 $\theta$	圆筒 $K_3$	封头 $K_4$
$A > 0.5R_i$ 且圆筒无加强圈， 或虽有加强圈，但加强圈不在鞍座处		$120^\circ$	<b>1.171</b>	/
		$135^\circ$	<b>0.958</b>	
		$150^\circ$	<b>0.799</b>	
$A > 0.5R_i$ ，但圆筒在鞍座平面有加强圈		$120^\circ$	<b>0.319</b>	/
		$135^\circ$	<b>0.319</b>	
		$150^\circ$	<b>0.319</b>	
封头对圆筒起加强作用	$b < A \leq 0.5R_i$	$120^\circ$	<b>0.880</b>	<b>0.401</b>
		$135^\circ$	<b>0.654</b>	<b>0.344</b>
		$150^\circ$	<b>0.485</b>	<b>0.297</b>
	$0.5b < A \leq b$	$120^\circ$	<b>0.880</b>	<b>0.880</b>
		$135^\circ$	<b>0.654</b>	<b>0.654</b>
		$150^\circ$	<b>0.485</b>	<b>0.485</b>

$K_3$ : 0.319 / 0.880 / 1.171

比例: 0.880 / 0.401

## 切向切（剪）应力的校核

筒体中的切向切应力，应小于材料的许用切应力，即

$$\tau \leq [\tau]^t = 0.8[\sigma]^t$$

作用在封头上的附加拉伸应力和由内压所引起的拉伸应力相叠加后

$$\tau_h + \sigma_h \leq 1.25[\sigma]^t \quad (5-14)$$

$$\sigma_h = \frac{KpD_i}{2\delta_{he}}$$

其中， $K$ 是椭圆形封头形状系数，如果是碟形或圆形，请同学考虑。

当封头承受外压时，5-14中不必计算内压引起的拉伸应力  $\sigma_h$

# 周向应力校核

(3) 支座截面处圆筒的周向弯曲应力

+

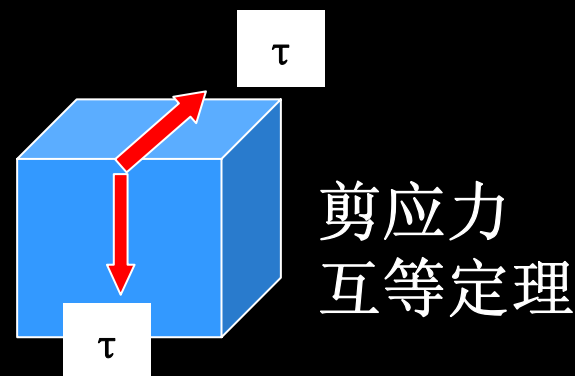
(4) 支座截面处圆筒的周向压缩应力

筒体所受周向应力



### (3) 支座截面处圆筒的周向弯曲应力

支座截面上的切向切应力引起筒体径向截面产生周向弯矩



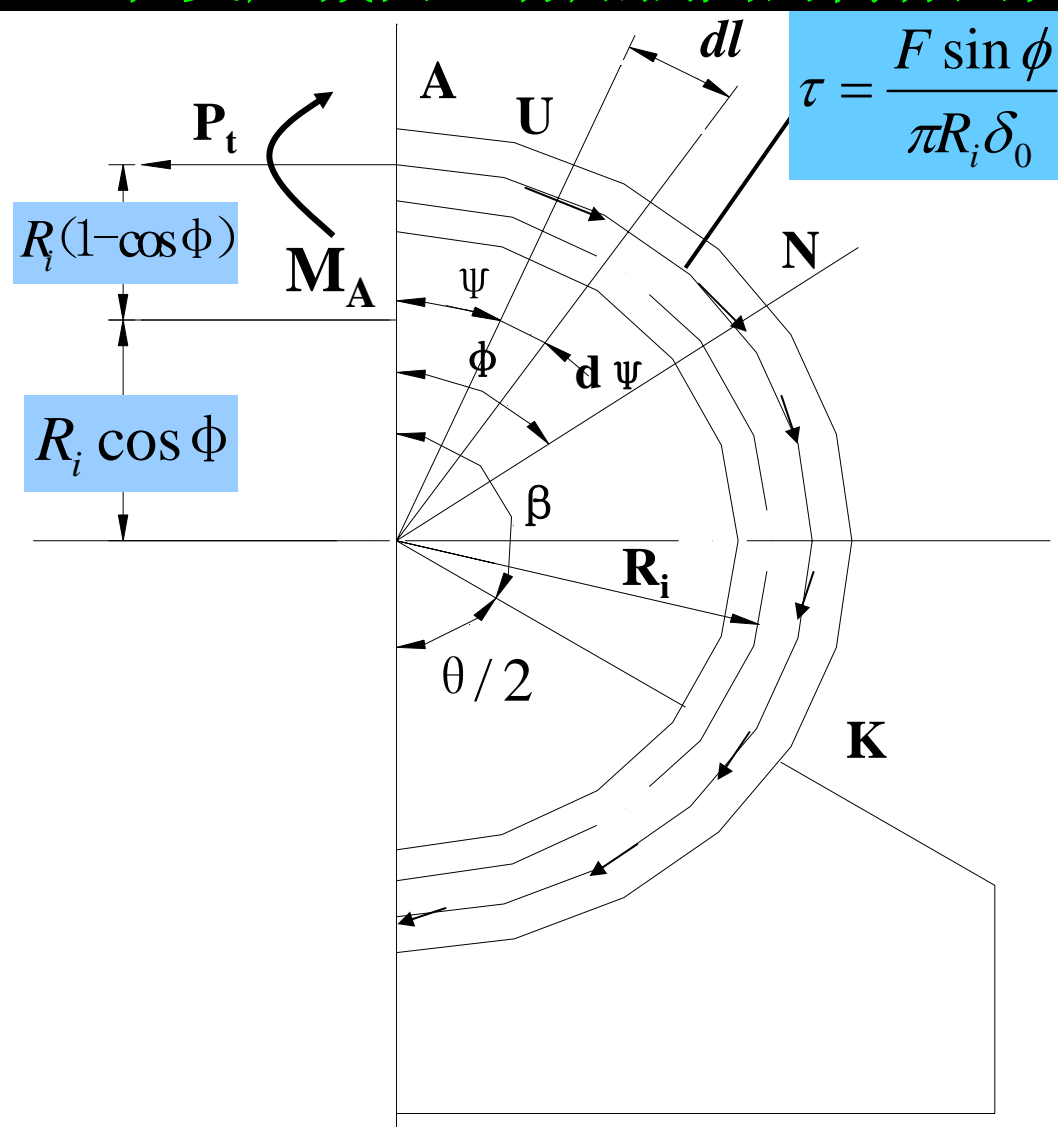
有加强圈、无加强圈、封头是否加强的周向弯矩 $M$   
有加强圈、无加强圈、封头是否加强的抗弯截面模量 $W$

周向弯矩引起的周向弯曲应力

与周向压缩应力一同校核

a. 在支座截面上有加强圈的筒体周向弯矩  $M_\phi$ 

这种工况可以  
理论计算



在圆环顶点A处,存在周向弯矩和周向力。利用边界条件,即A点的水平位移和转角为零,可以确定 $M_A$  和 $P_t$ 。

在 $M_A$ 、 $P_t$  和圆环上切向切应力  $\tau$  作用下,可得出任意角度  $\phi$  处的周向弯矩 $M_\phi$  为:

$$M_{\phi} = \frac{FR_t}{\pi} \left\{ \cos\phi + \frac{\phi}{2} \sin\phi - \frac{3 \sin\beta}{2\beta} + \frac{\cos\beta}{2} - \frac{1}{4} \left( \cos\phi - \frac{\sin\beta}{\beta} \right) \right. \\ \left. \times \left[ \frac{4 - 6 \left( \frac{\sin\beta}{\beta} \right)^2 + 2 \cos^2 \beta}{9 - \frac{\sin\beta}{\beta} \cos\beta + 1 - 2 \left( \frac{\sin\beta}{\beta} \right)^2} \right] \right\}$$

(5-15)

$$\frac{M_{\phi}}{FR_i} \sim f(\theta, \phi)$$

当  $\phi = \beta$  时  $\frac{M_{\phi}}{FR_i}$  具有最大值

写作: 
$$\frac{M_{\beta}}{FR_i} = K_6'$$

$$M_{\beta} = K_6' FR_i$$

(5-16)

由图5-11查 $K_6'$ 从而得 $M_{\beta}$

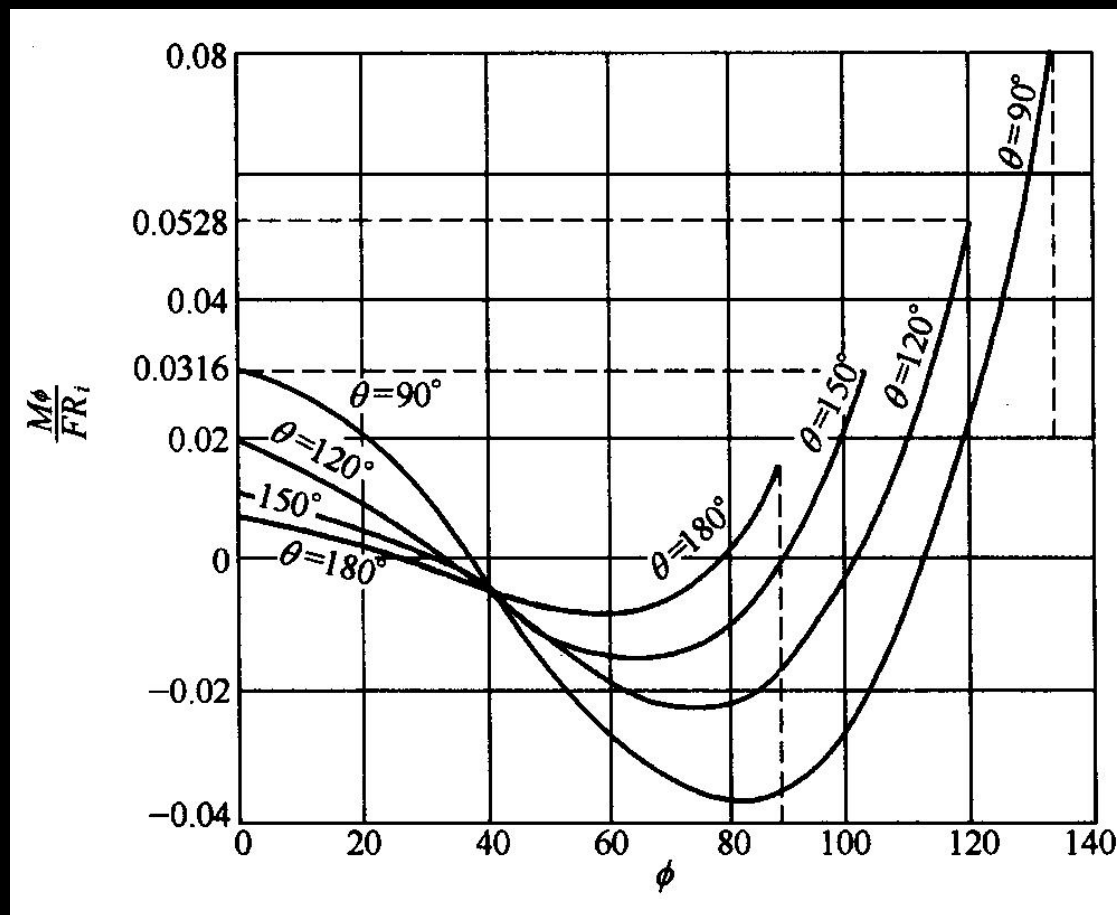
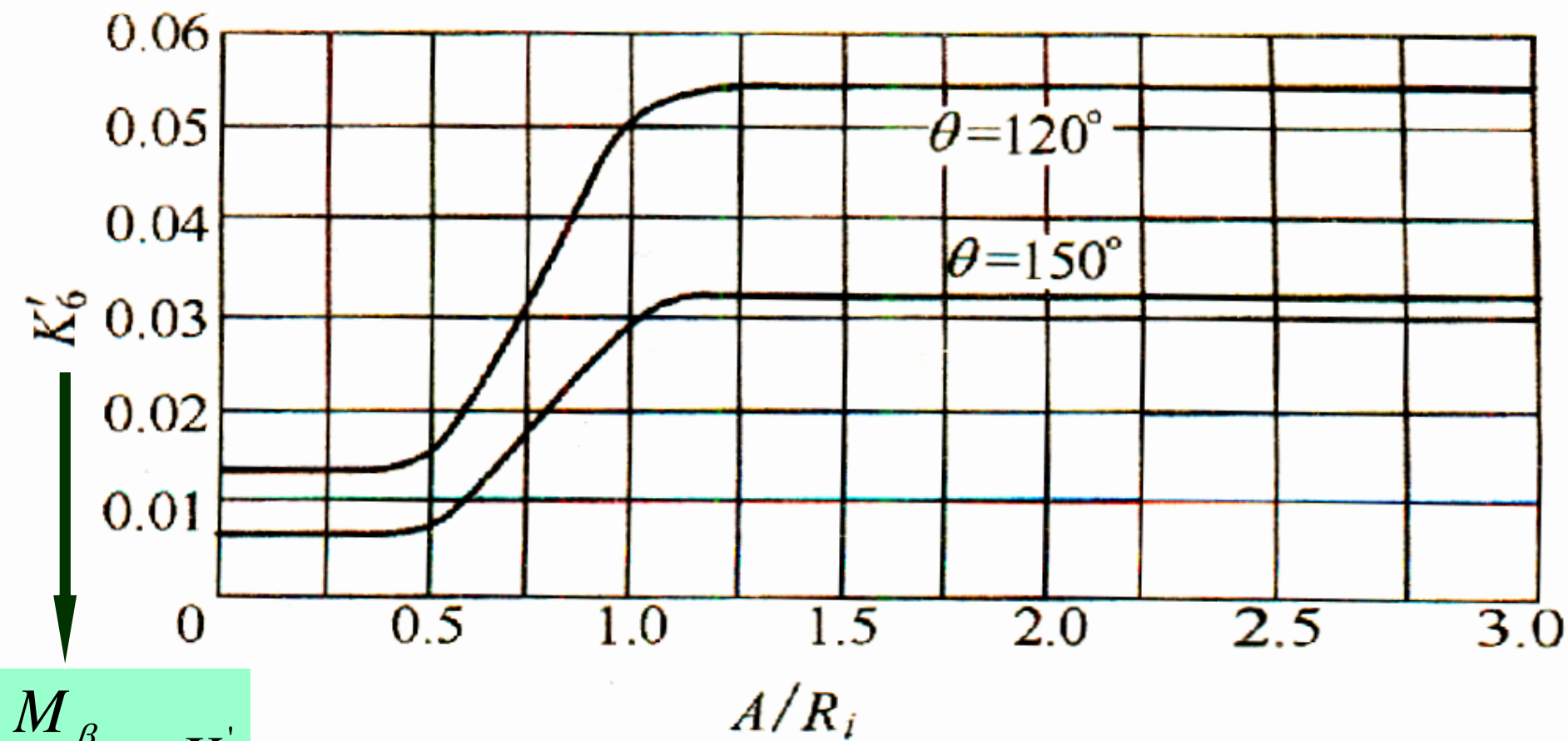


图5-10 周向弯矩 $M_{\phi}$ 在圆筒上的分布



$$\frac{M_\beta}{FR_i} = K'_6$$

图5-11 系数 $K'_6$ 值

查 $K'_6$ 从而得 $M_\beta$

## b. 在支座截面处没有加强圈的筒体周向应力

包括  $A \geq 0.5R_i$ ，封头对支座处截面的筒体不起加强作用以及筒体虽有加强圈，但加强圈不是位于支承截面附近时。

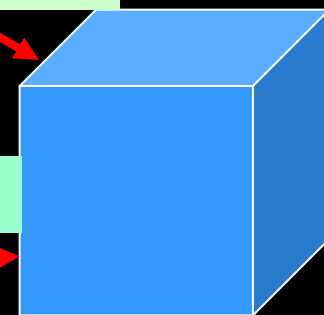
由切向切应力分布可知，在鞍座边角处的最大周向弯矩小于按有加强圈时推导得出的  $K_6'FR_i$  值，按  $K_6'FR_i$  值计算偏于安全。

沿轴向长度

齐克研究指出，在支座截面处筒体承受周向弯矩的有效宽度，可取 $4R_i$ 或 $L/2$ 中的较小值，因此筒体的抗弯截面模量 $W$ 为：

$$L \geq 8R_i \quad W = \frac{1}{6}(4R_i)\delta_e^2 = \frac{2}{3}R_i\delta_e^2$$

$$L < 8R_i \quad W = \frac{1}{6}\left(\frac{L}{2}\right)\delta_e^2 = \frac{1}{12}L\delta_e^2$$

梁的长度 $b$ 厚度 $\delta$ 

$$W = \frac{b}{6}\delta^2$$

则在支座截面处没有加强圈的筒体周向应力为：

包括 $A \geq 0.5R_i$ ，封头对支座处截面的筒体不起加强作用以及筒体虽有加强圈，但加强圈不是位于支承截面附近时

$$L \geq 8R_i \quad \sigma_6 = \pm \frac{M_\beta}{W} = \pm \frac{3K_6' F}{2\delta_e^2} \quad (5-17)$$

$$L < 8R_i \quad \sigma_6 = \pm \frac{M_\beta}{W} = \pm \frac{12K_6' FR_i}{L\delta_e^2} \quad (5-18)$$



## c. 被封头加强的圆筒的周向弯曲应力

弯矩:

$$M_{\beta} = K_6 FR_i$$

$$K_6 = \frac{1}{4} K'_6$$

$$L \geq 8R_i$$

$$\sigma_6 = \pm \frac{M_{\beta}}{W} = \pm \frac{3K_6 F}{2\delta_e^2}$$

(5-19)

$$L < 8R_i$$

$$\sigma_6 = \pm \frac{M_{\beta}}{W} = \pm \frac{12K_6 FR_i}{L\delta_e^2}$$

(5-20)

表5-3中的 $K_6$ 已经包含了5-17、5-18式中的 $K_6'$ 和5-19、5-20式中的 $K_6$

## (4) 支座截面处圆筒的周向压缩应力

通过鞍座作用于筒体上的载荷导致在支座截面处筒体上产生周向压缩

a. 用加强圈加强圆筒

(在“加强圈设计”中讨论)

b. 未用任何形式加强的圆筒

c. 被封头加强的圆筒

无加强圈

## b. 未用任何形式加强的圆筒

由支座反力对筒体截面处所引起的周向压缩载荷，可由筒体上的微内力  $\tau dA$  和鞍座作用于筒体的径向反力  $q'$  对筒体中心取力矩平衡求取。

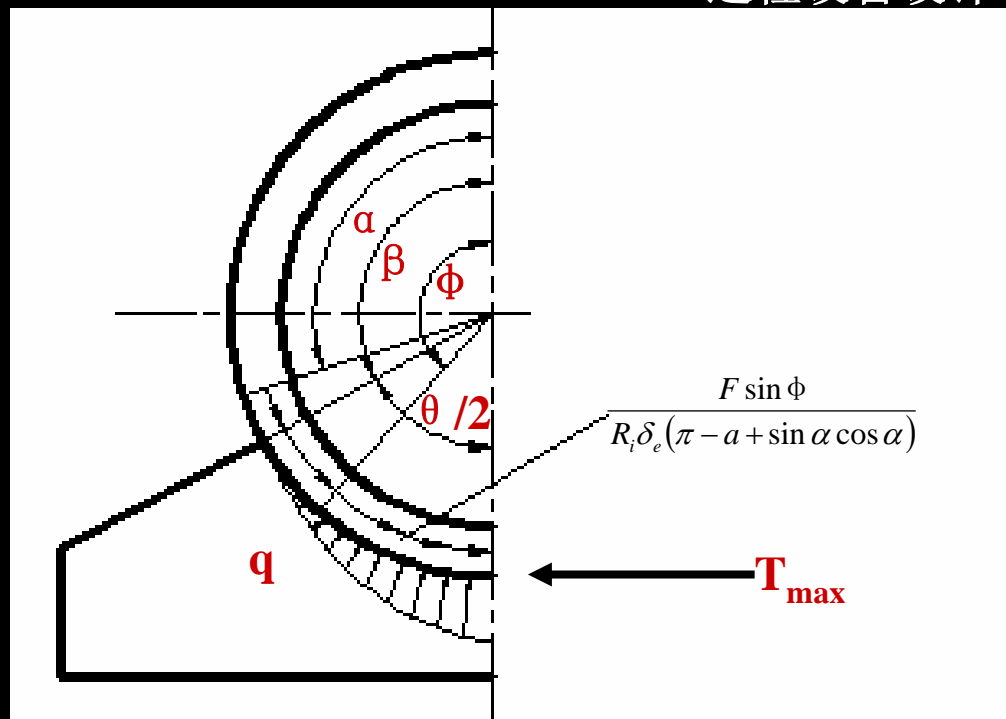


图5-12 周向压缩载荷

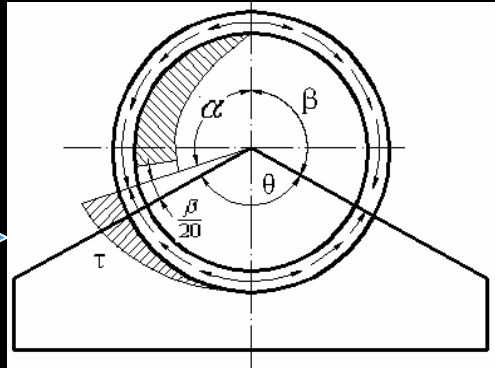
$$T = \int_{\alpha}^{\phi} \frac{F \sin \phi \delta_e R_i d\phi}{R_i \delta_e (\pi - \alpha + \sin \alpha \cos \alpha)} = F \left( \frac{-\cos \phi + \cos \alpha}{\pi - \alpha + \sin \alpha \cos \alpha} \right)$$

(5-21)

$$T_{\max} = F \frac{1 + \cos \alpha}{\pi - \alpha + \sin \alpha \cos \alpha} = K_5 F$$

## c. 被封头加强的圆筒

切应力的分布



$$T = - \int_0^{\alpha} \frac{F \sin \phi}{\pi R_i} \delta_e R_i d\phi - \int_{\alpha}^{\phi} \frac{F \sin \phi}{\pi R_i \delta_e} \left( \frac{\alpha - \sin \alpha \cos \alpha}{\pi - \alpha + \sin \alpha \cos \alpha} \right) \delta_e R_i d\phi]$$

课本错误

$$= -F \left( \frac{-\cos \phi + \cos \alpha}{\pi - \alpha + \sin \alpha \cos \alpha} \right)$$

$$T_{\max} = -F \left( \frac{1 + \cos \alpha}{\pi - \alpha + \sin \alpha \cos \alpha} \right) = -K_5 F$$

表5-3 系数 $K_5$ 、 $K_6$ 值

鞍座包角	$K_5$	$K_6$	
		$A \leq 0.5R_i$	$A > 0.5R_i$
$120^\circ$	0.760	0.0132	0.0528
$135^\circ$	0.711	0.0103	0.0413
$150^\circ$	0.673	0.0070	0.0316

 $K_6'$ 

$$K_6 = \frac{1}{4} K_6'$$

未被加强的筒体和被封头加强的筒体在截面最低处存在最大的压缩力 $T_{max}$ ，但在此处不存在周向弯矩 $M_\beta$ ；而在鞍座边角处存在最大的周向弯矩 $M_\beta$ ，并存在一定的周向压缩力 $T$ ，齐克认为，其值可取  $T=F/4$

周向压缩应力为

$$\sigma_T = \frac{T}{b_2 \delta_e} \quad (5-23)$$

承受周向压缩力的“有效长度”

$$b_2 = b + 1.56 \sqrt{R_i \delta_e}$$

支座的轴向宽度

周向弯曲  
应力  $\sigma_6$

周向压缩  
应力  $\sigma_5$

(3)、(4)求得的应力叠加后，进行校核

(5) 周向弯曲应力和周向压缩应力的强度校核

## (5) 周向弯曲应力和周向压缩应力的强度校核

### 鞍座垫板

$$b_2 = b + 1.56\sqrt{R_i\delta_e}$$

当筒体上鞍座垫板的宽度不小于 $b_2$ ，且鞍座垫板的包角达到 $(\theta + 12^\circ)$ 时，则可认为鞍座垫板起到加强作用，并与筒体一起承受周向压缩应力及周向弯曲应力；

如果以上两个条件均不满足，则认为鞍座垫板不起加强板的作用，即仅由筒体承受周向压缩应力和周向弯曲应力。



## (5) 周向弯曲应力和周向压缩应力的强度校核 (续)

### ● 无垫板或垫板不起加强作用时

横截面最低点处  $\sigma_5$

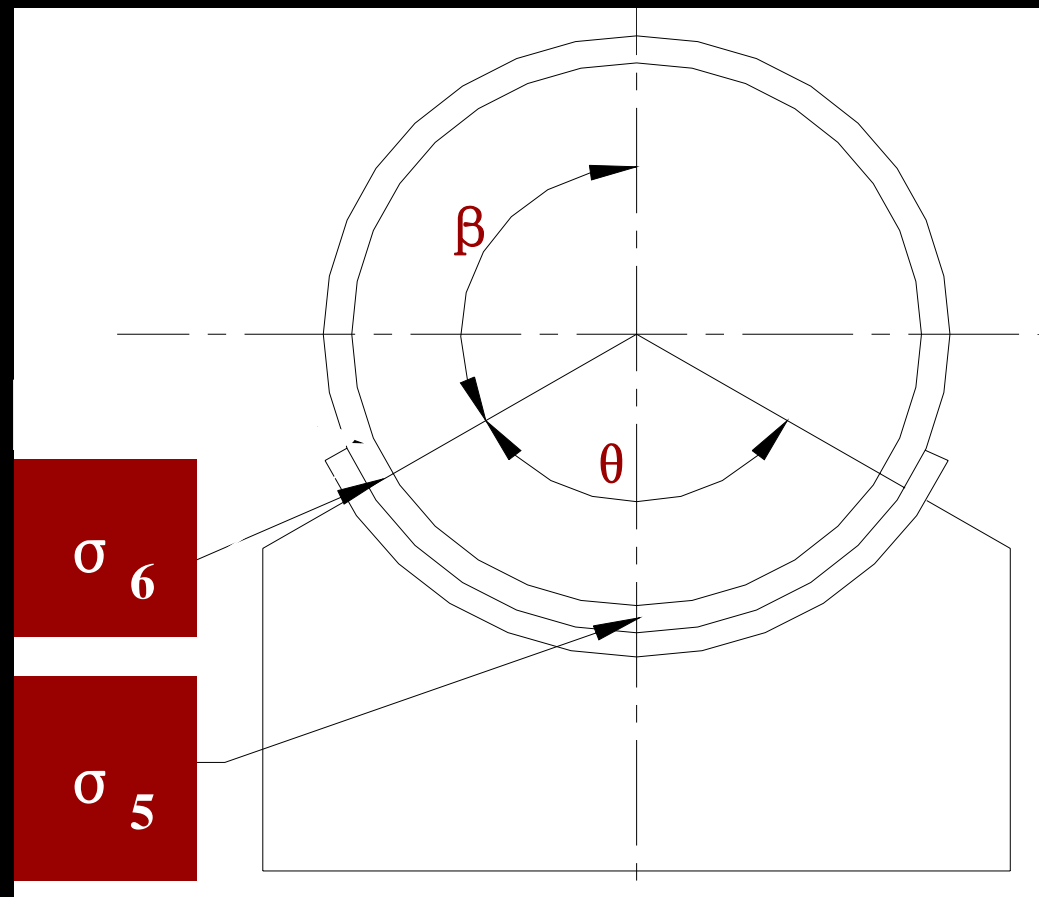
鞍座边角处  $\sigma_6$

### ● 垫板起加强作用时

横截面最低点处  $\sigma_5$

鞍座边角处  $\sigma_6$

有效厚度  $\delta_e$  不同



## 无垫板或垫板不起加强作用时

横截面最低点处  $\sigma_5$

$$\sigma_5 = \frac{-K_5 F}{(b + 1.56\sqrt{R_i \delta_e}) \delta_e} \leq [\sigma]^t$$

(5-24)

鞍座边角处  $\sigma_6$

课本  
错误

$$L \geq 8R_i$$

$$\sigma_6 = \frac{-K_5 F}{4(b + 1.56\sqrt{R_i \delta_e}) \delta_e} - \frac{3K_6 F}{2\delta_e^2} \leq 1.25[\sigma]^t \quad (5-25a)$$

$$L < 8R_i$$

$$\sigma_6 = \frac{-K_5 F}{4(b + 1.56\sqrt{R_i \delta_e}) \delta_e} - \frac{12K_6 F R_i}{L \delta_e^2} \leq 1.25[\sigma]^t \quad (5-25b)$$

压缩应力  
 $\sigma_5$

弯曲应力  
 $\sigma_6$

垫板起加强作用时横截面最低点处  $\sigma_5$ 

$$\sigma_5 = \frac{-K_5 F}{(b + 1.56\sqrt{R_i \delta_e})(\delta_e + \delta_1)} \leq [\sigma]^t$$

鞍座边角处  $\sigma_6$ 鞍座垫板  
厚度 $L \geq 8R_i$ 

$$\sigma_6 = \frac{-K_5 F}{4(b + 1.56\sqrt{R_i \delta_e})(\delta_e + \delta_1)} - \frac{3K_6 F}{2(\delta_e^2 + \delta_1^2)} \leq 1.25[\sigma]^t$$

 $L < 8R_i$ 

$$\sigma_6 = \frac{-K_5 F}{4(b + 1.56\sqrt{R_i \delta_e})(\delta_e + \delta_1)} - \frac{12K_6 F R_i}{L(\delta_e^2 + \delta_1^2)} \leq 1.25[\sigma]^t$$

## (6) 加强圈设计

如卧式储罐支座因结构原因而不能设置在靠近封头处，且圆筒不足以承受周向弯矩时，就需在支座截面处的筒体上设置加强圈，以便与圆筒一起承载。

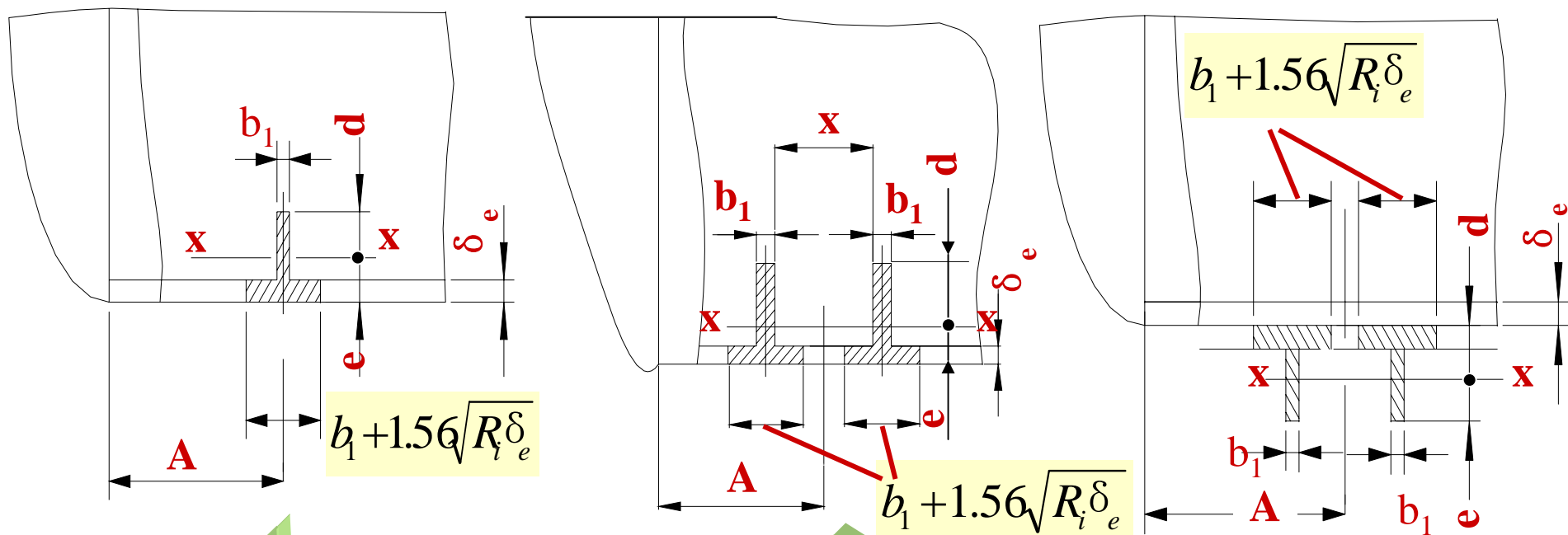
支座截面处圆筒的周向压缩应力

a. 用加强圈加强圆筒

(在“加强圈设计”中讨论)

## 位置

加强圈可设置于鞍座截面或靠近鞍座截面的筒体上，可设置在筒体内侧或外侧，见图5-13。



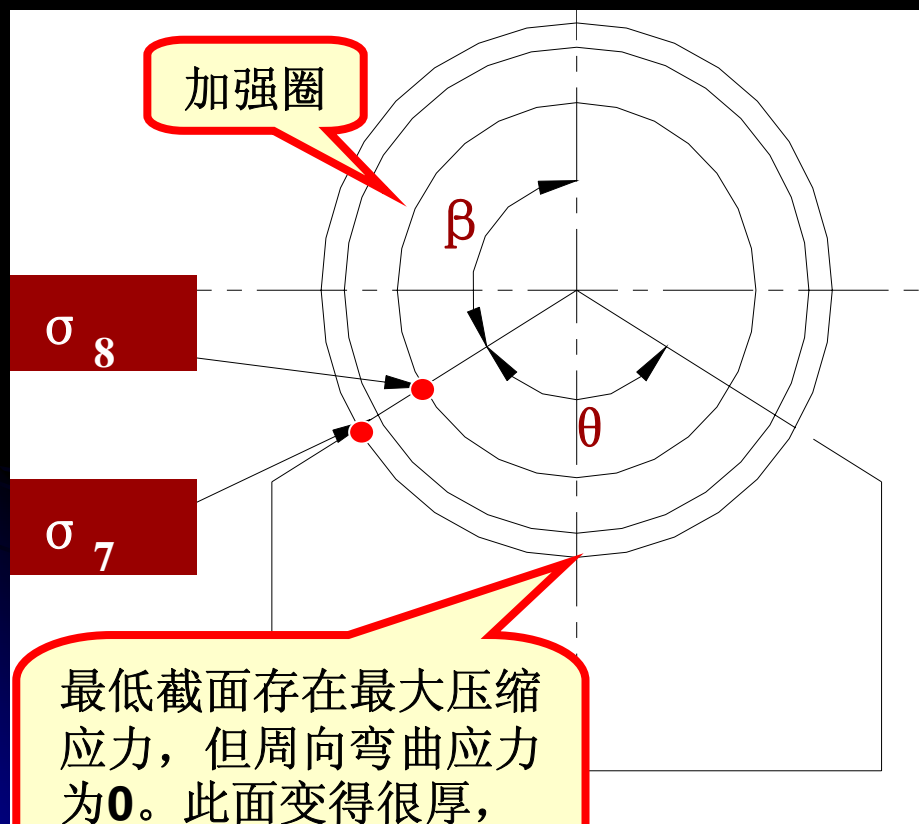
(a) 在鞍座截面上的加强圈

(b) 靠近鞍座的内加强圈

(c) 靠近鞍座的外加强圈

图5-13 加强圈结构

## 情况I: 鞍座截面处设置内加强圈时



最低截面存在最大压缩应力，但周向弯曲应力为0。此面变得很厚，不用校核压缩应力。

## 鞍座边角处筒壁外缘周向应力

$$\sigma_7 = -\frac{K_7 FR_i e}{I_0} - \frac{K_8 F}{A_0} \leq 1.25[\sigma]^t$$

弯曲  
应力

压缩  
应力

(5-26)

## 鞍座边角处加强圈内缘周向应力

$$\sigma_8 = -\frac{K_7 FR_i d}{I_0} - \frac{K_8 F}{A_0} \leq 1.25[\sigma]^t$$

弯曲  
应力

压缩  
应力

(5-27)

其中，

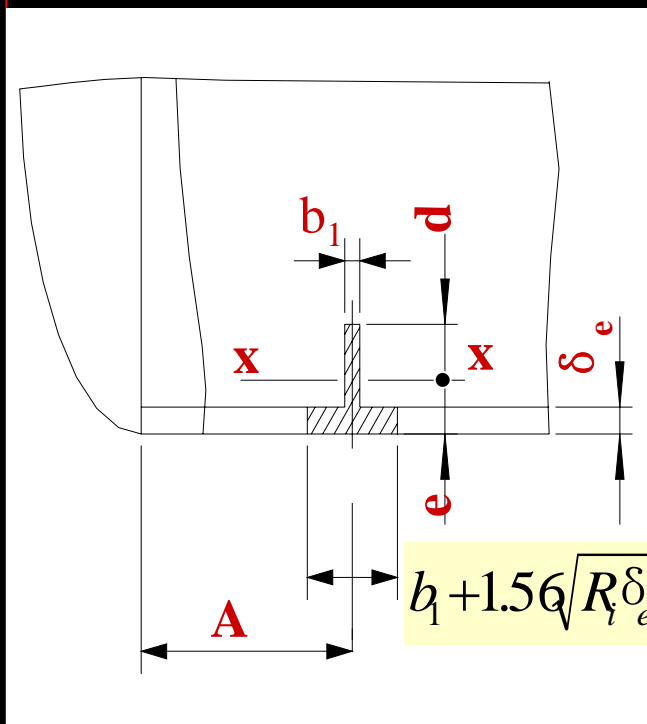
$A_0$ —加强圈与有效宽度内筒壁的组合截面积，见图5-13(a)中的阴影线截面积；

$I_0$ —加强圈与有效宽度内筒壁的组合截面积对中性轴的惯性矩，见图5-

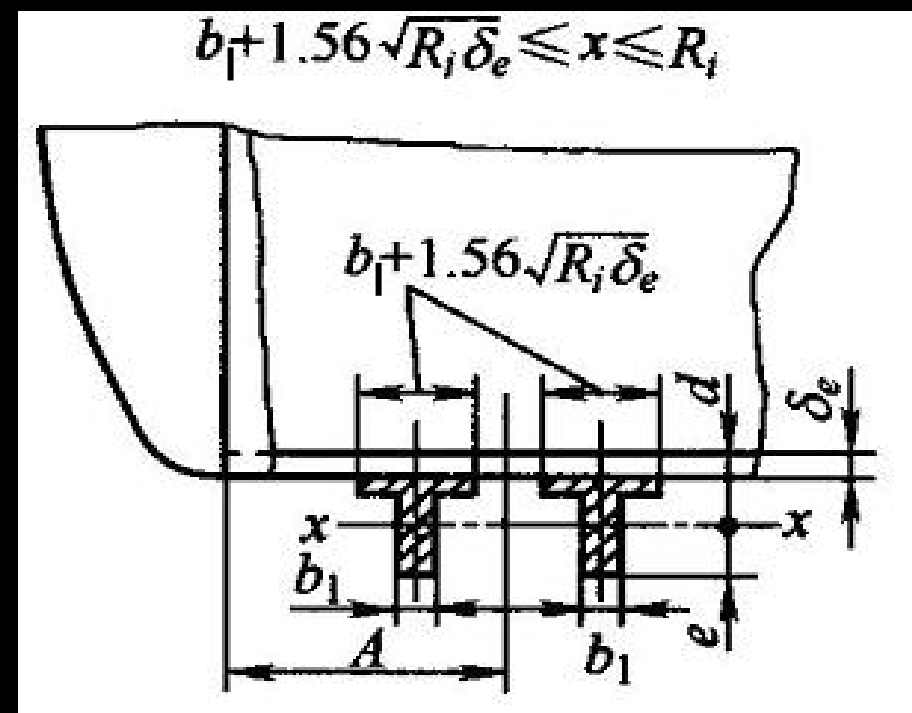
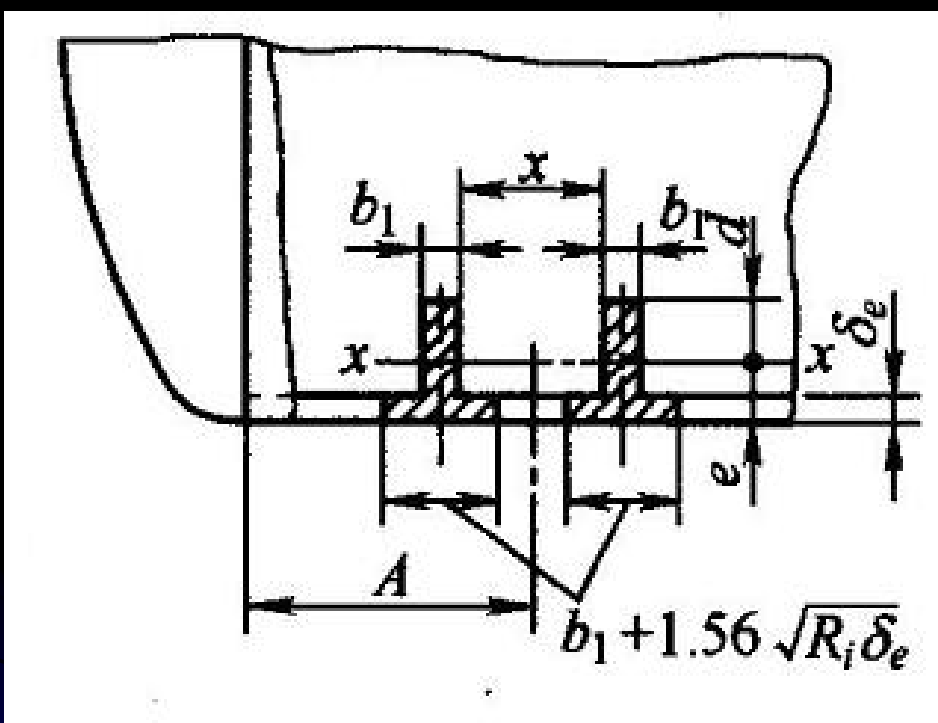
13(a)中的阴影线截面对x-x轴的惯性矩；

$d$ —图5-13(a)中组合截面中性轴至加强圈内缘的距离；

$e$ —图5-13(a)中组合截面中性轴至筒壁外缘的距离。



## 情况II: 靠近鞍座截面处设置加强圈时



(b) 靠近鞍座的  
内加强圈

图5-13 加强圈结构

(c) 靠近鞍座的  
外加强圈



## 5.2.2 设计计算

存在最大压缩应力，但  
周向弯曲应力为0

圆筒截面最低处

$$\sigma_5 = \frac{K_5 F}{\delta_0 (b + 1.56 \sqrt{R_i \delta_e})} \leq [\sigma]^t$$

弯曲  
应力

压缩  
应力

(5-28)

$$\sigma_7 = -\frac{K_7 F R_i e}{n I_0} - \frac{K_8 F}{n A_0} \leq 1.25 [\sigma]^t$$

(5-29)

鞍座边角处

周向弯曲应力和周  
向压缩应力叠加

$$\sigma_8 = -\frac{K_7 F R_i d}{n I_0} - \frac{K_8 F}{n A_0} \leq 1.25 [\sigma]^t$$

(5-30)

每个支座处加强圈的数量

弯曲  
应力

压缩  
应力

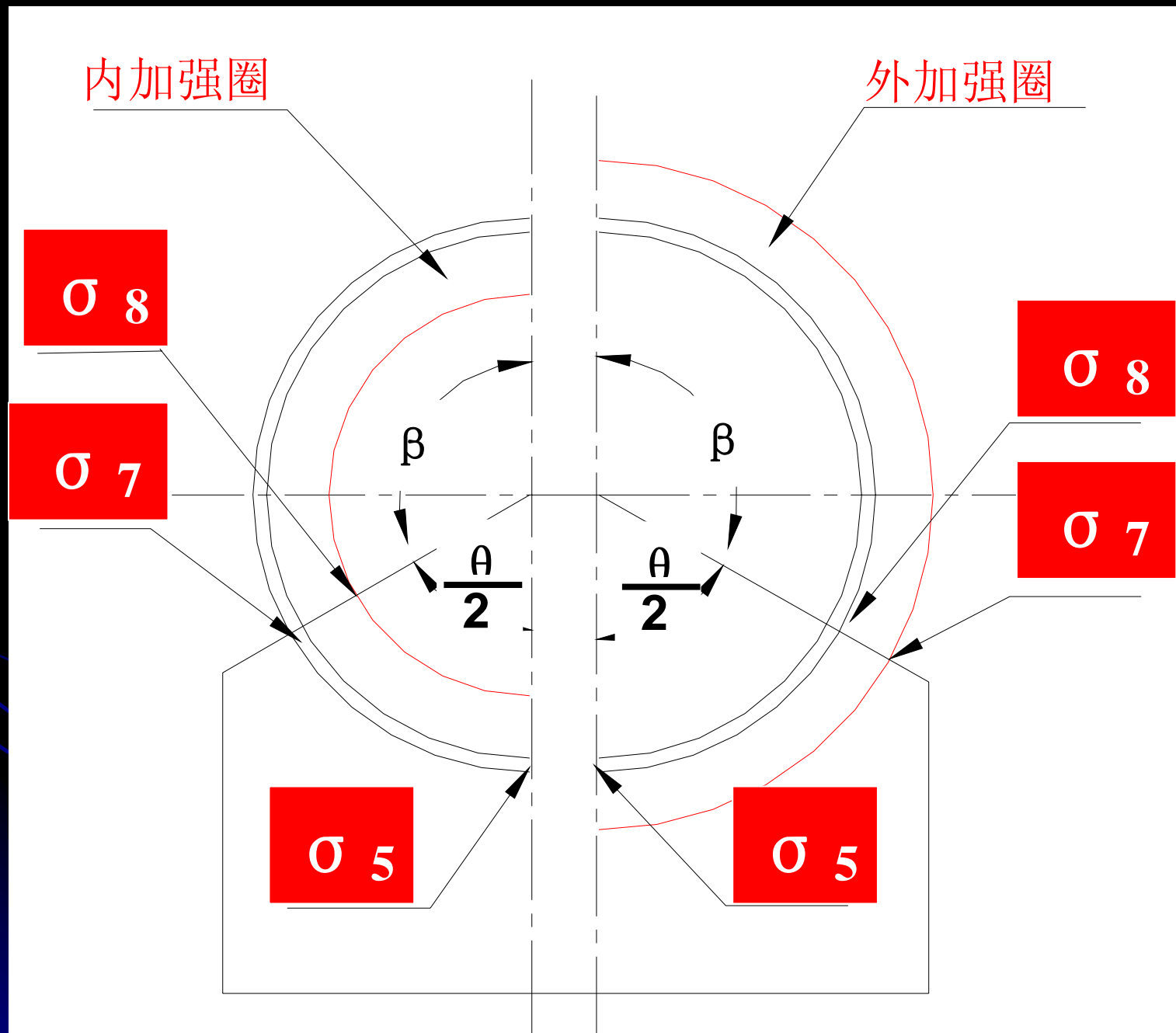


表5-4 系数 $K_5$ 、 $K_7$ 和 $K_8$ 

条件 系数	位于鞍座平面处的加强圈			靠近鞍座平面的加强圈					
	内环[见图5-13(a)]			内环[见图5-13(b)]			外环见图5-13(c)		
$\theta$	120°	135°	150°	120°	135°	150°	120°	135°	150°
<b>K5</b>	—	—	—	<b>0.760</b>	<b>0.711</b>	<b>0.673</b>	<b>0.760</b>	<b>0.711</b>	<b>0.673</b>
<b>K7</b>	<b>0.0528</b>	<b>0.0413</b>	<b>0.0316</b>	<b>0.0581</b>	<b>0.0471</b>	<b>0.0355</b>	<b>0.0581</b>	<b>0.0471</b>	<b>0.0355</b>
<b>K8</b>	<b>0.340</b>	<b>0.323</b>	<b>0.303</b>	<b>0.271</b>	<b>0.248</b>	<b>0.219</b>	<b>0.217</b>	<b>0.248</b>	<b>0.219</b>

## 四、鞍座强度校核

■ 鞍座包角  $\theta$  一般为  $120^\circ \sim 150^\circ$

一般规定钢制鞍座的宽度  $b$  一般可取大于或等于  $8\sqrt{R_i}$ ，初步决定鞍座宽度  $b$  值后，必须通过上述一系列校核后，最终确定  $b$  值。如难以满足周向应力的校核条件，则可增加鞍座垫板宽度至  $b_2 = b + 1.56\sqrt{R_i\delta_e}$ ，以降低筒体上的周向应力水平。

对鞍座而言，筒体对其施加的径向载荷如图5-14所示。此径向力的水平分量即为鞍座本身所承受的水平推力。

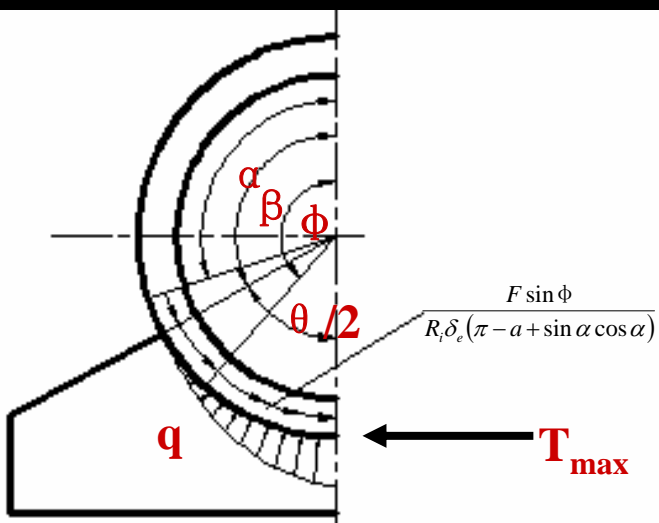


图5-12 周向压缩载荷

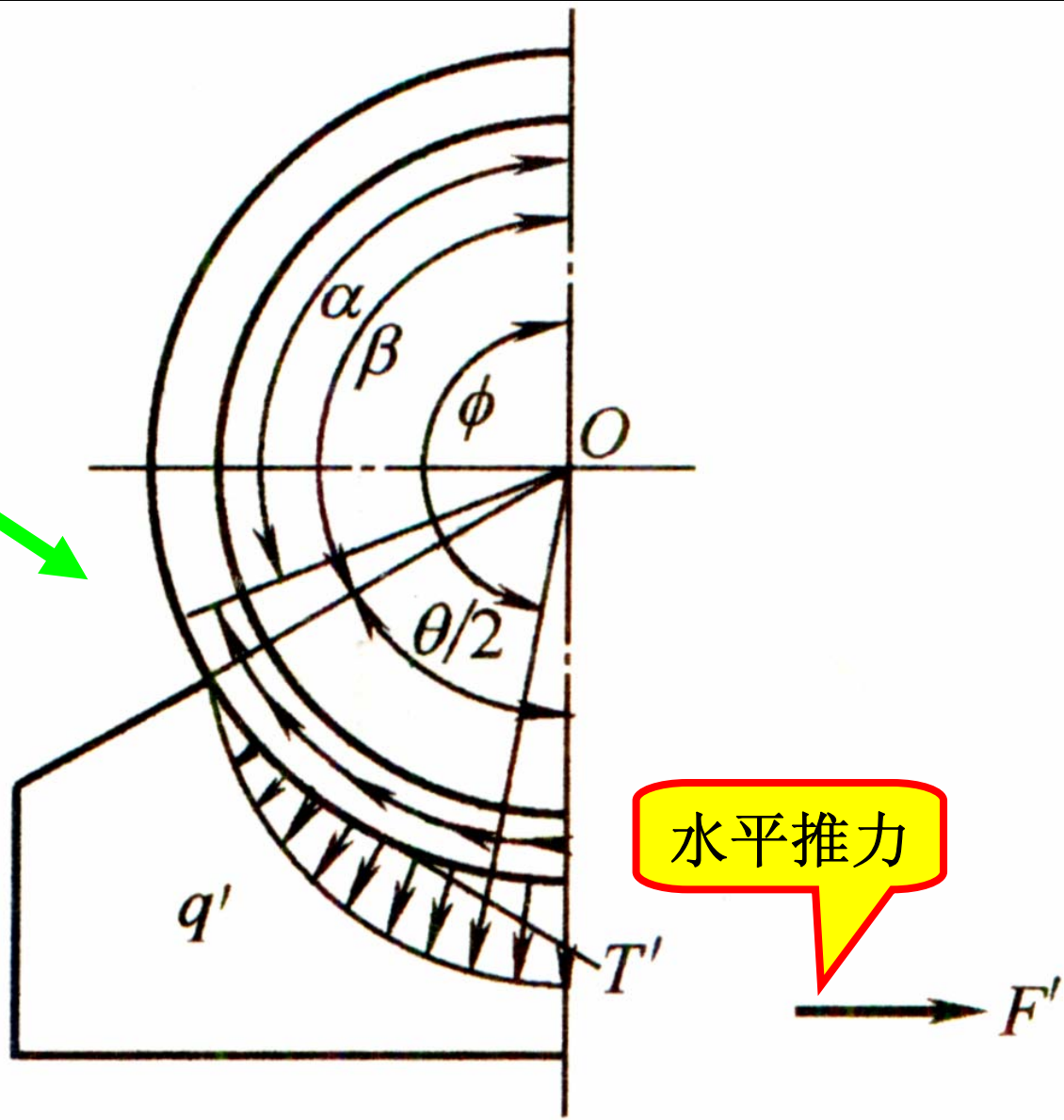


图5-14 鞍座的水平推力

作用力与反作用力  
 $q$ 与 $q'$

在径向力  $q'$  的作用下，鞍座垫板的纵向截面上产生周向拉力，设  $\phi$  角处的周向拉力为  $T'$ ，其值可按周向压缩力的推导原理（见式5-21）推导，在鞍座包角范围内的  $\beta \sim \phi$  限内将鞍座上的切向切应力予以积分来求取。

$$T' = \int_{\beta}^{\phi} \frac{FR_i \sin \phi d\phi}{R_i (\pi - \beta + \sin \beta \cos \beta)} = F \left( \frac{-\cos \phi + \cos \beta}{\pi - \beta + \sin \beta \cos \beta} \right)$$

则鞍座上的径向反力  $q'$

$$q' = \frac{T'}{R_i} = \frac{F}{R_i} \left( \frac{-\cos \phi + \cos \beta}{\pi - \beta + \sin \beta \cos \beta} \right)$$

此径向反力的水平分量即为作用于鞍座上的水平推力  $F'$ ：

$$F' = \int_{\beta}^{\pi} q' \sin(\pi - \phi) R_i d\phi = F \left( \frac{1 + \cos \beta - \frac{1}{2} \sin^2 \beta}{\pi - \beta + \sin \beta \cos \beta} \right)$$

$$= K_9 F$$

式中

$$K_9 = \frac{1 + \cos \beta - \frac{1}{2} \sin^2 \beta}{\pi - \beta + \sin \beta \cos \beta}$$

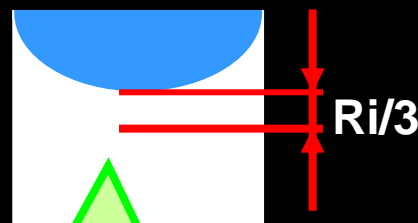
当  $\theta = 120^\circ$ 、 $135^\circ$  和  $150^\circ$  时，可  $K_9 = 0.204$ 、 $0.231$  和  $0.260$ 。

上面推导的水平推力是对筒体未被加强时得到的，根据齐克的观点，对于筒体被封头加强以及加强圈加强时，用同样的 $K_9$ 值计算鞍座上的水平推力 $F'$ ，其结果是安全的。



5.2.2 设计计算

齐克提出，仅在筒体最低部位以下  $R_i/3$  范围内的鞍座腹板承受此水平推力  $F'$ ，考虑到此时未计及筒体上的周向弯矩影响，推荐采用较低的许用应力，其值取正常许用应力的  $2/3$ ，于是



鞍座并不是越高越好

鞍座有效断面的平均应力

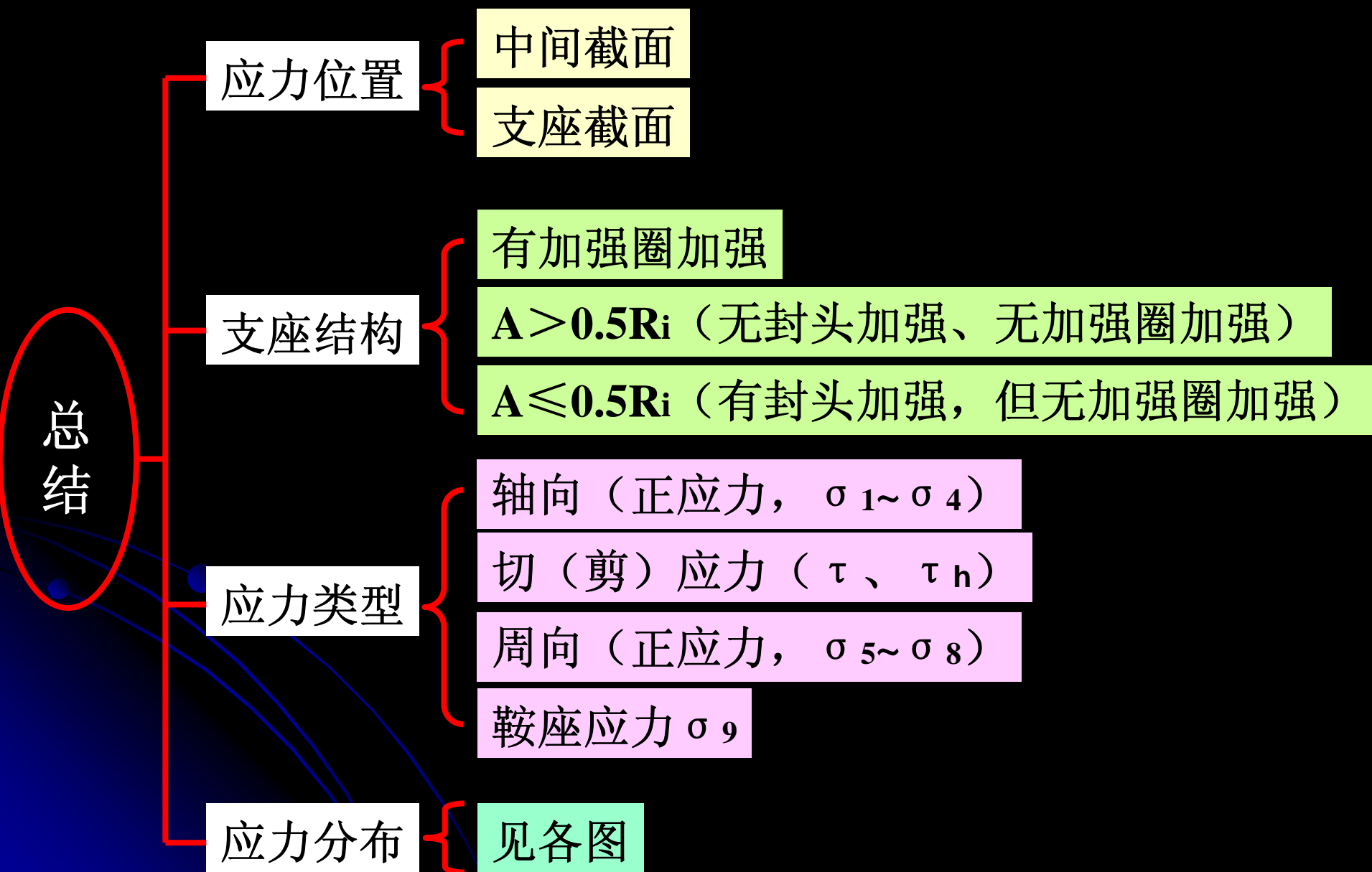
$$\sigma_9 = \frac{K_9 F}{\frac{1}{3} R_i b_0} \leq \frac{2}{3} [\sigma]^t$$

鞍座腹板厚度

周向拉应力，  
水平方向  
JB/T4712

(5-31)

注意：如鞍座的实际高度小于  $R_i/3$ ，则以鞍座的实际高度计算鞍式支座有效断面的平均应力  $\sigma_9$



## 四类应力

### 一、轴向应力 $\sigma_1 \sim \sigma_4$

### 二、切（剪）应力

$\tau$ ：支座截面圆筒中的切向切应力

$\tau_h$ ：封头中的水平附加拉应力（封头加强时才有）

### 三、周向应力 $\sigma_5 \sim \sigma_8$

$\sigma_5$ ：支座截面最低处，周向压缩应力

$\sigma_6$ ：支座截面边角处，周向弯曲应力

周向应力校核：（支座边角处）总 =  $\sigma_5 \div 4 + \sigma_6$ ，（支座最低端）总 =  $\sigma_5$

$\sigma_7$ 、 $\sigma_8$ 为有加强圈时鞍座边角处弯曲应力+压缩应力

分为：鞍座截面设置内加强圈，靠近鞍座截面设置加强圈

### 四、鞍座应力

$\sigma_9$ ：鞍座腹板纵向截面所受的周向拉伸应力（水平方向）

## 卧式储罐的计算过程

给定设计条件：压力、温度、直径、长度、材料等

计算圆筒和封头厚度  $\delta_n$  ,  $\delta_h$

设置鞍座位置A

计算容器质量、鞍座反力F、轴向弯矩m、 $M_1$ 、 $M_2$

■ 计算轴向应力  $\sigma_1 \sim \sigma_4$

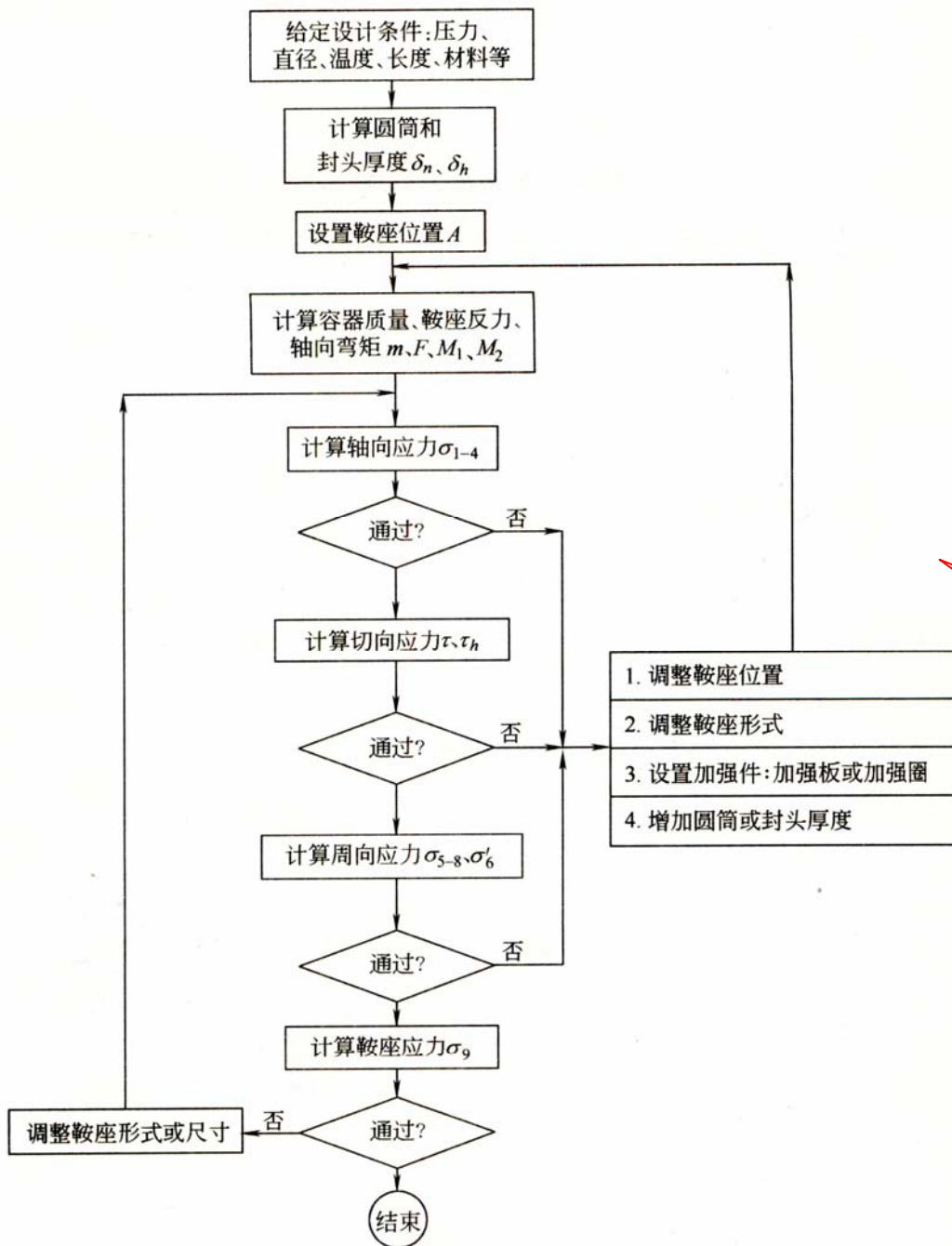
■ 计算切向应力  $\tau$ 、 $\tau_h$

■ 计算周向应力  $\sigma_{5-8}$

■ 计算鞍座应力  $\sigma_9$

四类应力按此顺序  
逐一符合要求，则  
设计结束。

若四类应力中有任何一个不符合  
许用要求，则需要做相应调整。



按程序进行  
计算

图 5-15 卧式储罐计算程序

## 随堂小测验

- 一、请阐述“扁塌”现象。
- 二、双鞍座卧式容器设计中应计算哪些应力？并简述这些应力是如何产生的。