

第二章 压力容器应力分析

CHAPTER II STRESS ANALYSIS OF PRESSURE VESSELS

第六节 典型局部应力

主要内容

2.6.1 概述

2.6.2 受内压壳体与接管连接处的局部应力

2.6.3 降低局部应力的措施

2.6 典型局部应力

教学重点：

受内压壳体与接管连接处的
局部应力。

教学难点：

应力集中系数法。

2.6.1 概述

1. 局部应力的产生

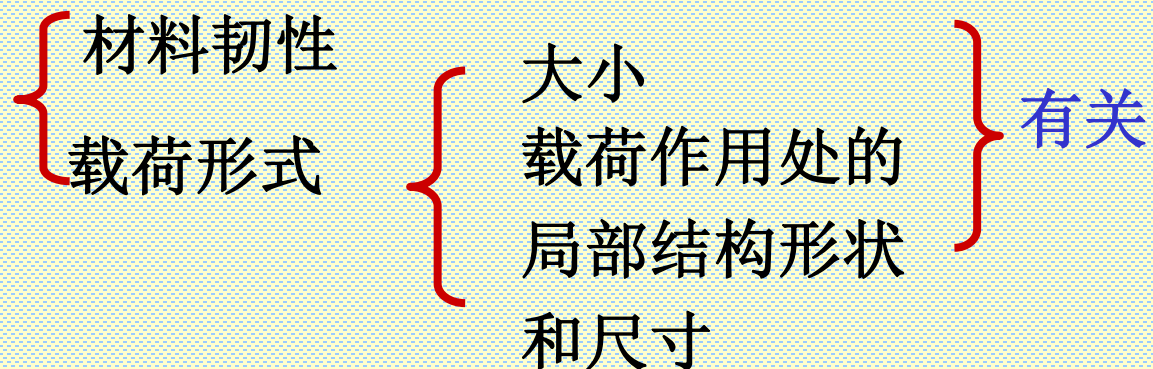
局部载荷

设备的自重、
物料的重量、
管道及附件的重量、
支座的约束反力、
温度变化引起的载荷等

附加应力

在压力作用下，压力容器材料或结构不连续处，在局部区域产生的附加应力，如截面尺寸、几何形状突变的区域、两种不同材料的连接处等

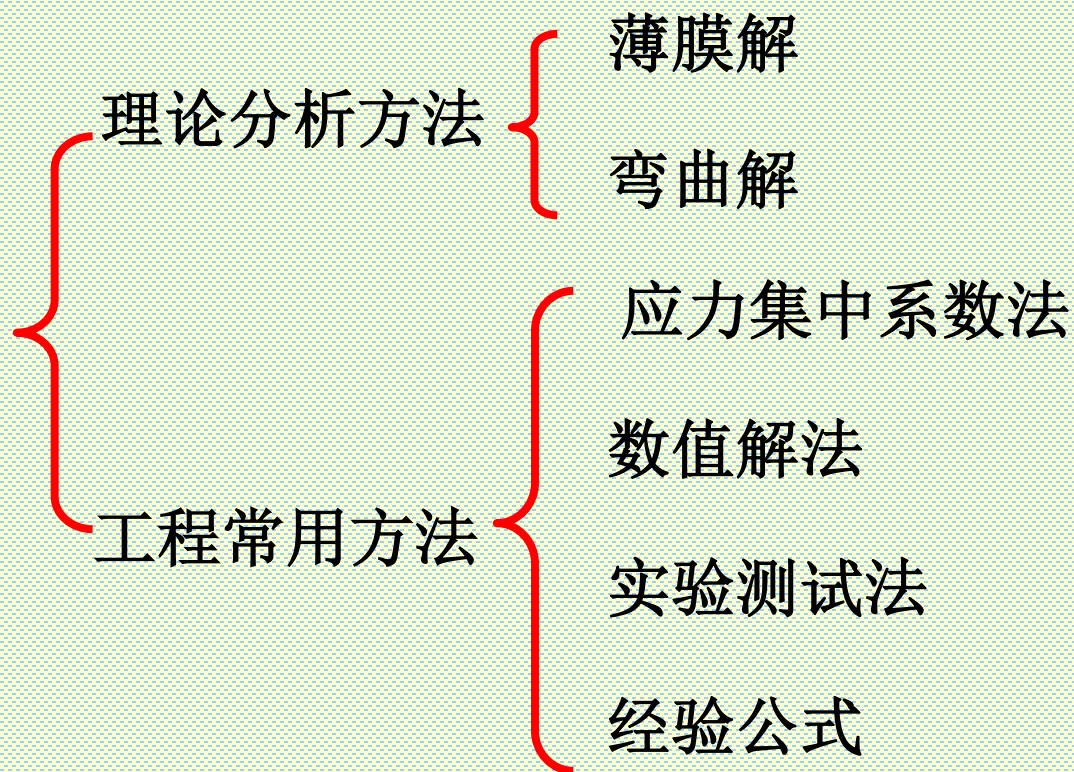
2.6.1 概述（续）

2. 局部应力的危害性与  有关

危害性 过大的局部应力使结构处于不安定状态，在交变载荷下，易产生裂纹，可能导致疲劳失效。

2.6.2 受内压壳体与接管连接处的局部应力

由于几何形状及尺寸的突变，受内压壳体与接管连接处附近的局部范围内会产生较高的不连续应力。



2.6.2 受内压壳体与接管连接处的局部应力（续）

一、应力集中系数法

1. 应力集中系数曲线

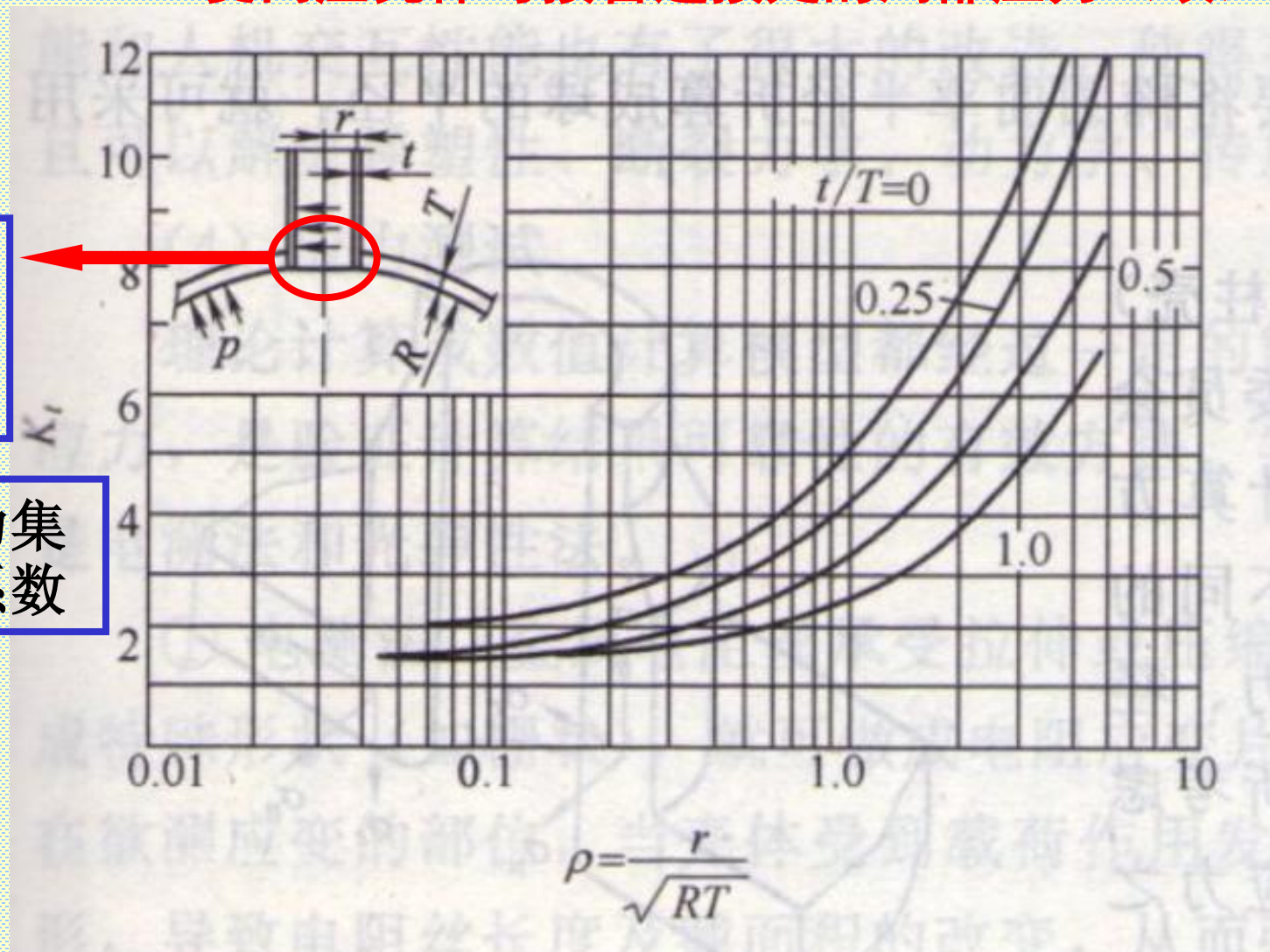
$$k_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\theta}}$$

σ_{\max} ——受内压壳体与接管连接处的最大弹性应力

σ_{θ} ——该壳体不开孔时的环向薄膜应力

通过应力集中系数曲线图查 K_t ，得到最大应力

2.6.2 受内压壳体与接管连接处的局部应力（续）



开孔系数 $\rho = \frac{r}{\sqrt{RT}}$

图2-40 球壳带平齐式接管的应力集中系数曲线

2.6.2 受内压壳体与接管连接处的局部应力（续）

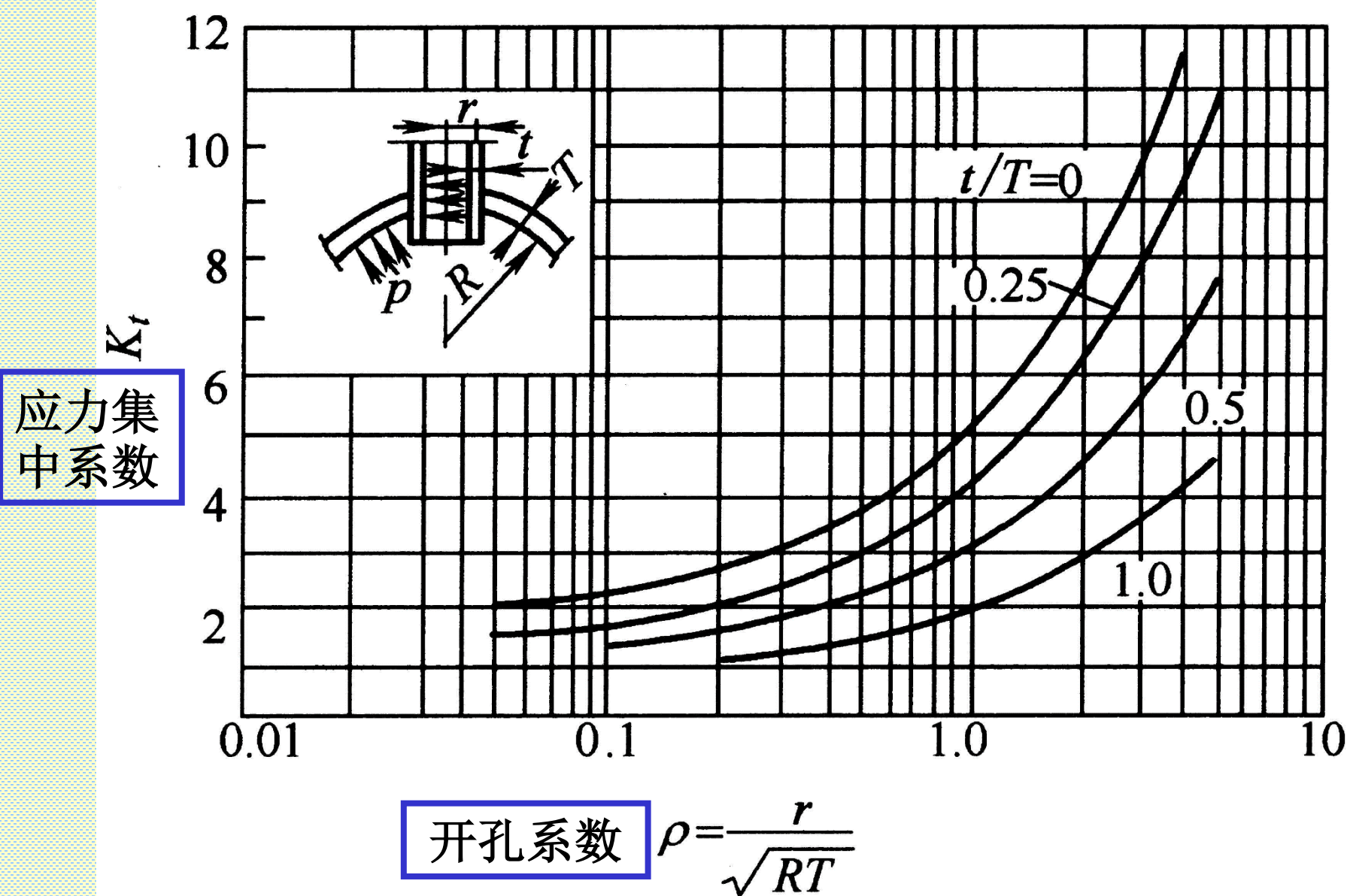


图2-41 球壳带内伸式接管的应力集中系数曲线

2.6.2 受内压壳体与接管连接处的局部应力（续）

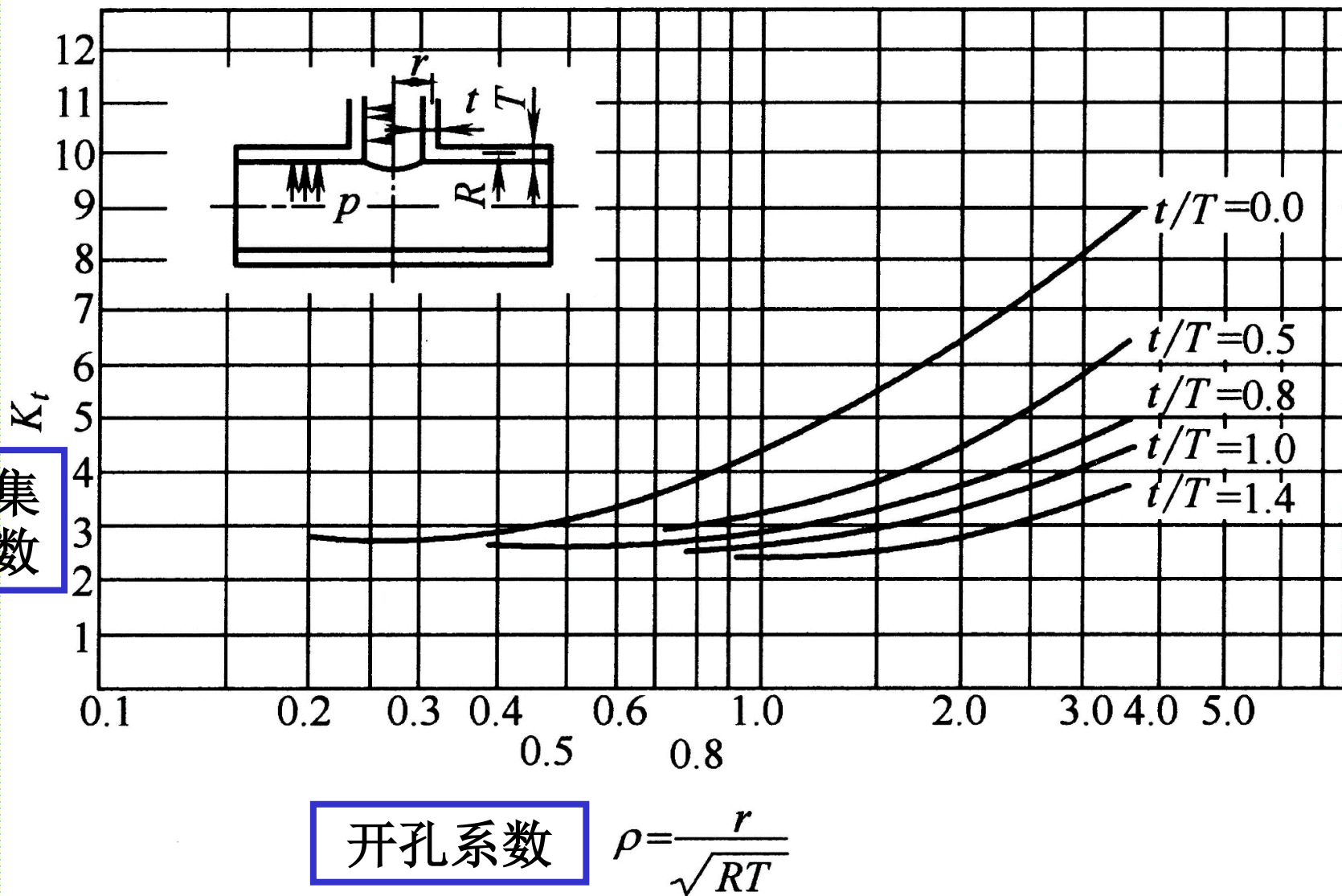


图2-42 圆柱壳开孔接管的应力集中系数曲线

2.6.2 受内压壳体与接管连接处的局部应力（续）

图中

$$\rho = \frac{r}{\sqrt{RT}}$$

是开孔系数， r 接管平均半径，
 R 壳体平均半径，
 T 壳体壁厚

$$\sqrt{RT}$$

为边缘效应的衰减长度。

故开孔系数 ρ 表示开孔大小和壳体局部应力
衰减长度的比值

2.6.2 受内压壳体与接管连接处的局部应力（续）

应力集中系数

K_t

- 随着开孔系数的增大而增大
- 随壁厚比 t/T 的增大而减小
- 内伸式接管的应力集中系数较小

即：增大接管和壳体的壁厚，减小接管半径，
有利于降低应力集中系数

球壳带接管的应力集中系数曲线，对开孔大小和壳体厚度的限制范围：

$$0.01 \leq \frac{r}{R} \leq 0.4$$

$$30 \leq \frac{R}{T} \leq 150$$

2.6.2 受内压壳体与接管连接处的局部应力（续）

椭圆形封头上接管连接处的局部应力，
只要将椭圆曲率半径折算成球的半径，
就可采用球壳上接管连接处局部应力的计算方法。

2.6.2 受内压壳体与接管连接处的局部应力（续）

2. 应力指数法

与应力集中系数法不同的是：

考虑了连接处的三个应力：

经向应力
径向应力
法向应力

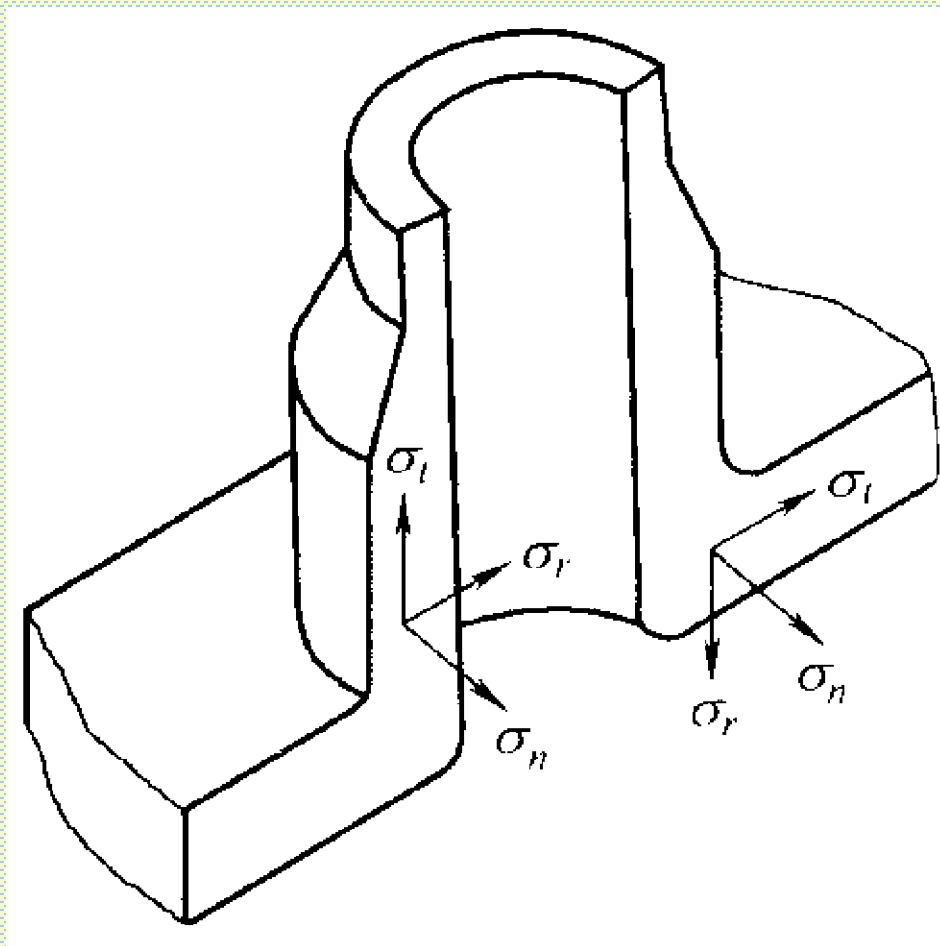


图2-43 接管连接处的各向应力分量

2.6.2 受内压壳体与接管连接处的局部应力（续）

2. 应力指数法（续）

应力指数——所考虑的各应力分量与壳体在无开孔接管时的环向应力之比。

应力指数法已列入中国、美国、日本等国家压力容器分析设计标准。

见《钢制压力容器——分析设计标准》P165

2.6.2 受内压壳体与接管连接处的局部应力（续）

二、经验公式

用三个无因次参量表示应力集中系数，它们是：

- a. 接管中面直径 d 与壳体中面直径 D 之比
- b. 接管厚度 t 与壳体厚度 T 之比
- c. 壳体中面直径 D 与其厚度之比

2.6.2 受内压壳体与接管连接处的局部应力（续）

二、经验公式（续）

常用经验公式：

a. Rodabaugh公式：

$$K_1 = 2.8 \left(\frac{D}{T} \right)^{0.182} \left(\frac{d}{D} \right)^{0.367} \left(\frac{t}{T} \right)^{-0.382} \left(\frac{r_o}{t} \right)^{-0.148}$$

该式考虑了接管与圆柱壳过渡处外圆角 r_o 半径的影响，已被ASME规范第III篇NB-3638.8所采用。适用范围为 $D/T \leq 100$ ， $0.09 \leq t/T \leq 4.3$ ， $0.5 \leq r/t \leq 12.5$

2.6.2 受内压壳体与接管连接处的局部应力（续）

二、经验公式（续）

b. Decock公式

$$K_t = \frac{2 + 2 \frac{d}{D} \sqrt{\frac{d}{D} \frac{t}{T}} + 1.25 \sqrt{\frac{D}{T}}}{1 + \frac{t}{T} \sqrt{\frac{d}{D} \frac{t}{T}}}$$

其适用范围是 $1.4 \leq \frac{D}{T} \leq 240, 0.04 \leq \frac{d}{D} \leq 1.0, 0.048 \leq \frac{t}{T} \leq 2.8$

2.6.2 受内压壳体与接管连接处的局部应力（续）

三、数值计算

应力数值计算的方法比较多，如差分法、变分法、有限单元法和边界元法等。但目前使用最广泛的是有限单元法。

有限单元法的基本思路：

将连续体离散为有限个单元的组合体，以单元结点的参量为基本未知量，单元内的相应参量用单元结点上的数值插值，将一个连续体的无限自由度问题变成有限自由度的问题，再利用整体分析求出未知量。显然，随着单元数量的增加，解的近似程度将不断改进，如单元满足收敛要求，近似解也最终收敛于精确解。

2.6.2 受内压壳体与接管连接处的局部应力（续）

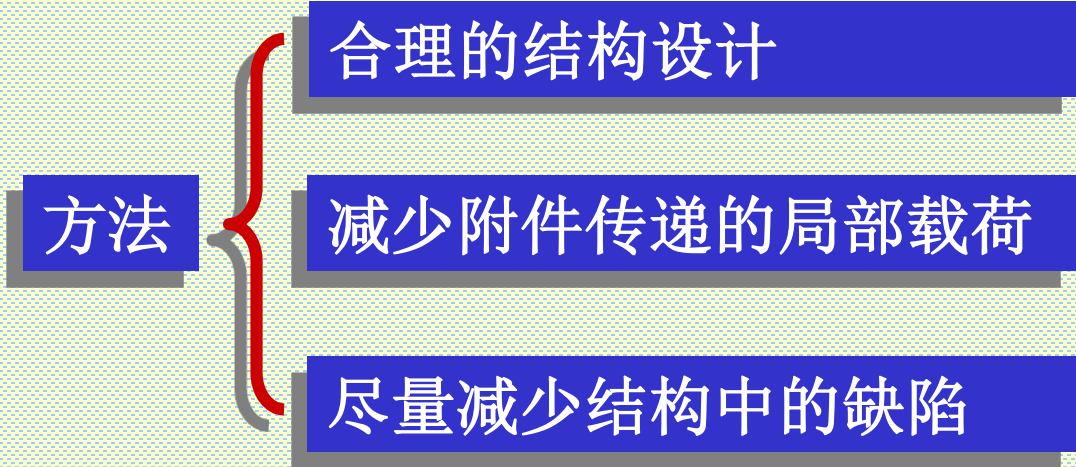
四、应力测试

实验应力分析方法直接测量计算部位的应力，
是验证计算结果可靠性的有效方法

常用实验应力分析方法 { 电测法
光弹性法

测试机理及 特点和注意事项参见教材P69

2.6.3 降低局部应力的措施



2.6.3 降低局部应力的措施（续）

一、合理的结构设计



(1) 减少两连接件的刚度差

(2) 尽量采用圆弧过渡

(3) 局部区域补强

(4) 选择合适的开孔方位

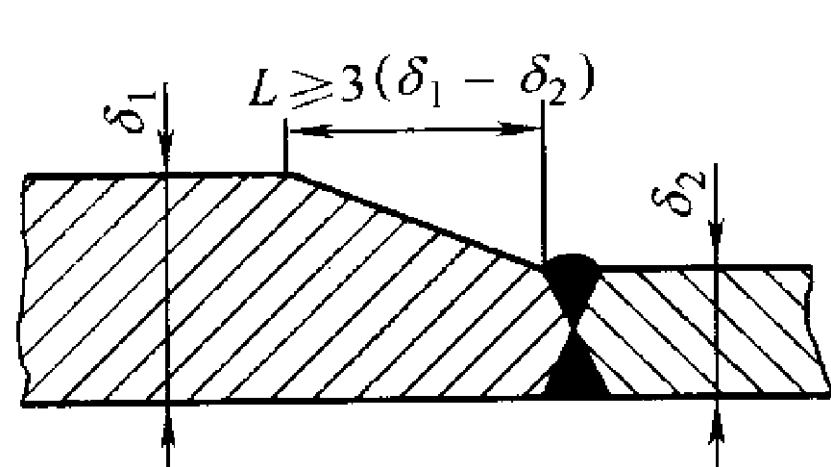
2.6.3 降低局部应力的措施（续）

(1) 减少两连接件的刚度差

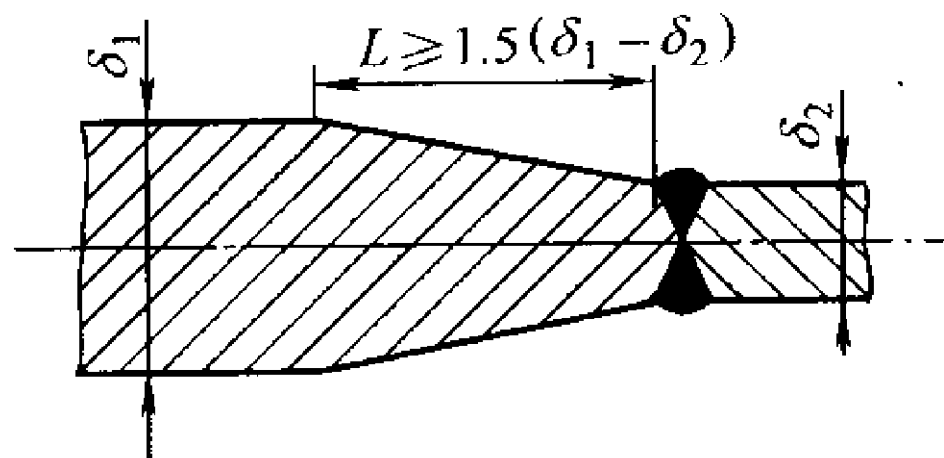
两连接件变形不协调会引起边缘应力。

壳体的刚度与材料的弹性模量、曲率半径、壁厚等因素有关。

设法减少两连件的刚度差，是降低边缘应力的有效措施之一。



(a) 单面削薄



(b) 双面削薄

图2-44 不同厚度筒体的连接

2.6.3 降低局部应力的措施（续）

（2）尽量采用圆弧过渡

几何形状或尺寸的突然改变是产生应力集中的主要原因之一。
在结构不连续处应尽可能采用圆弧或经形状优化的特殊曲线过渡。

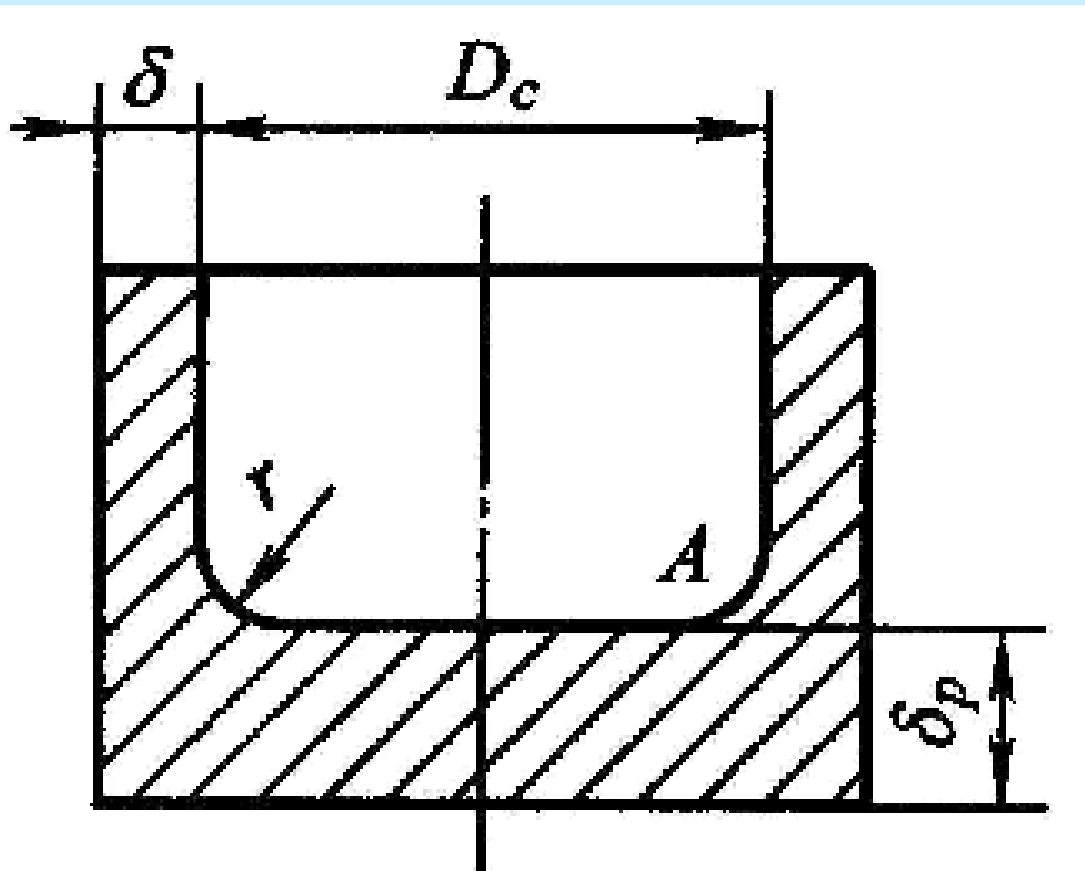


图2-45 平盖内表面的圆弧过渡

2.6.3 降低局部应力的措施（续）

（3）局部区域补强

在有局部载荷作用的壳体处，适当给以补强。

例如，壳体与吊耳的连接处、卧式容器与鞍式支座连接处，在壳体与附件之间加一块垫板，给以适当补强可以有效地降低局部应力。

2.6.3 降低局部应力的措施（续）

（4）选择合适的开孔方位

根据载荷的情况，选择适当的开孔位置、方向和形状。
如椭圆孔的长轴应与开孔处的最大应力方向平行，
孔尽量开在原来应力水平比较低的部位，以降低局部应力。

2.6.3 降低局部应力的措施（续）

二、减少附件传递的局部载荷

如果将与壳体相连的附件采取一定的措施，就可以减少附件所传递的局部载荷对壳体的影响，从而降低局部应力。

例如：

- 对管道、阀门等设备附件设置支承或支架，可降低这些附件的重量对壳体的影响；
- 对接管等附件加设热补偿元件可降低因热胀冷缩所产生的热载荷。

2.6.3 降低局部应力的措施（续）

三、尽量减少结构中的缺陷

在压力容器制造过程中，由于制造工艺和具体操作等原因，可能在容器中留下气孔、夹渣、未焊透等缺陷，这些缺陷会造成较高的局部应力，应尽量避免。