

局 部 应 力

南 京 化 工 学 院

钱 惠 林

天 津 市 轻 工 业 设 计 院 翻 印

米米米米米米米米米米米米米米米米
米 局 部 应 力 米
米 米 米 米 米 米 米 米 米 米 米 米 米 米 米 米
米米米米米米米米米米米米米米米米

南 京 化 工 学 院

钱 惠 林

局 部 应 力

压力容器在制造、安装和使用过程中常会受到通过其附件（包括支架，吊耳和接管等，见图1）。传来的载荷由支架或吊耳传来的载荷通常是设计的静重，由接管传来的载荷则主要是管道或管系的热位移及其重量。如果把这些载荷向壳体表面进行分解即得作用在壳体上的径向和切向力载荷以及径向和环向的力矩载荷，因为这些载荷对承受载荷的壳体的重大影响常常限于附件周围很小的范围，所以被称为局部外载荷，而由此载荷引起的应力称之为局部应力。

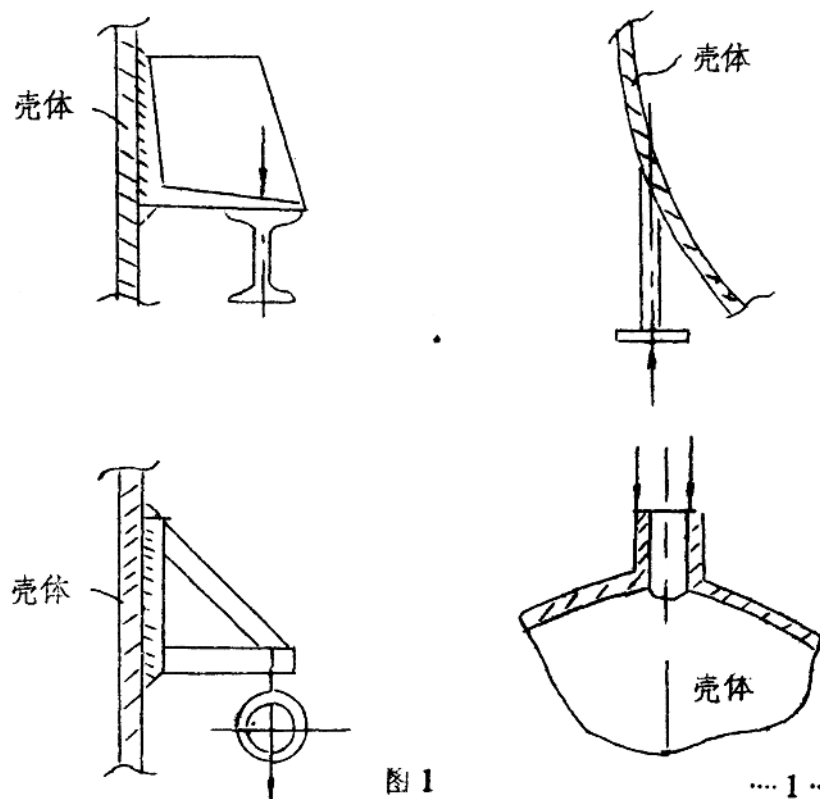


图 1

关于局部应力的计算，目前还没有正式列入各国的设计规范，英国标准 B·S·5500 1978·也只是在附录 G 中列出有关计算方法，所以，下面仅以 B·S·5500 附录 G 中的内容作一简单介绍。

1、应用范围

附录 G 主要论述来自支座的局部作用力和力矩或来自与配管连接的管道推力在压力容器壳体上产生的影响，主要包括：

(1) 除接管以外的其他附件作用于园筒形壳体上的局部载荷和力矩产生的应力（包括承载区边缘处的应力和承载区以外的应力），由径向载荷引起的挠度，由力矩产生的转角。

(2) 包括接管在内的附件作用于球形壳体上的局部载荷和力矩产生的应力，由径向载荷引起的挠度，由力矩引起的挠度，由力矩引起的转角。

对于容器附件的几何形状（见图 2）提出了如下限制：

对于园筒形壳体：(1) 筒体长度 $L >$ 筒体半径 r

(2) 从筒体端部到附件边缘的距离不得小于

$$r/2$$

(3) $\frac{C_\varphi}{r}$ 限制在 0.1~0.25 之间并取决

于 $\frac{r}{t}$ 值， r/t 控制在 50~300 之

$$\text{间 } C_\varphi / C_x \leq 4$$

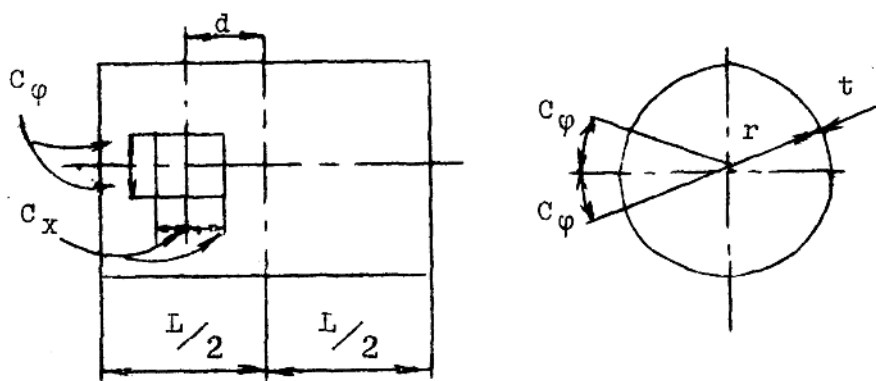


图 2

对于球形壳体: (1) 圆形刚性附件的半径与球壳半径之比

$$r_0 / r \leq 1 / 3 .$$

2、理论依据:

对于圆筒形壳体:

(1) 计算模型、两端简支

载荷分别为: a 对称于圆筒中心的一段母线上的分布径向载荷

b 反对称于圆筒中心的一段母线上的分布径向载荷

c 一段母线上的均匀分布的周向力矩载荷

d 沿周向圆弧作用的径向载荷

e 矩形区域上的均布径向载荷 (圆筒端部至矩形中心的距离为 b)

f 矩形区域上的三角形分布载荷 (相当一个纵向力矩, 矩形中心在圆筒长度的中点)。

(2) 基本方程:

对于线载荷采用 Donnell 近似壳体方程

$$\nabla^4 w + \frac{12(1-\nu^2)}{r^2 t^2} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = \frac{1}{D} \nabla^4 Z$$

$$r \nabla^4 u = -\nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^3 w}{r^2 \partial x \partial \theta^2}$$

$$-r \nabla^4 v = (2+\nu) \frac{\partial^2 w}{r \partial x^2 \partial \theta} + \frac{\partial^3 w}{r^3 \partial \theta^2}$$

$$\text{其中 } \nabla^2 (\dots) = \frac{\partial^2 (\dots)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (\dots)}{r^2 \partial \theta^2}$$

Z ——法向面载荷(向外为正)为 x 和 θ 的函数

$$N_x = \frac{E t}{1-\nu^2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\nu \partial v}{r \partial \theta} + \nu \frac{w}{r} \right)$$

$$N_\theta = \frac{E t}{1-\nu^2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{r \partial \theta} + \frac{w}{r} \right)$$

$$N_{x\theta} = \frac{E t}{2(1+\nu)} \left(\frac{\partial u}{r \partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$

$$M_X = \frac{D}{r} \left\{ r \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\nu}{r} \frac{\partial^2 \omega}{\partial \vartheta^2} \right\}$$

$$M_\vartheta = \frac{D}{r} \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \omega}{\partial \vartheta^2} + \nu r \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \right\}$$

$$M_{X\vartheta} = (1 - \nu) \frac{D}{r} \frac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial \vartheta}$$

$$Q_X = \frac{D}{r^2} \left\{ r^2 \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 \omega}{\partial x \partial \vartheta^2} \right\}$$

$$Q_\vartheta = \frac{D}{r^2} \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial^3 \omega}{\partial \vartheta^3} + r \frac{\partial^3 \omega}{\partial x^2 \partial \vartheta} \right\}$$

$$S_X = \frac{D}{r^2} \left\{ r^2 \frac{\partial^3 \omega}{\partial x^3} + (2 - \nu) \frac{\partial^3 \omega}{\partial x \partial \vartheta^2} \right\}$$

对于矩形载荷，可以利用线载荷所得结果，通过直接积分求得，也可以采用 P. P. Bijlaard 的方法

Bijlaard 所用的方程是对 Donnell 方程的一种修正：

$$\begin{aligned} \nabla^4 W + \frac{12(1-\gamma^2)}{r^2 t^2} \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + \frac{1}{r^2} \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial^6 \omega}{\partial \theta^6} + \right. \\ \left. (6+\gamma-\gamma^2) \frac{\partial^6 \omega}{r^2 \partial x^4 \partial \theta^2} + (7+\gamma) \frac{\partial^6 \omega}{r^4 \partial x^2 \partial \theta^4} \right) \\ = \frac{1}{D} \nabla^4 Z \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -r \nabla^4 u = \gamma \frac{\partial^3 \omega}{\partial x^3} - \frac{\partial^3 \omega}{r^2 \partial x \partial \theta^2} + \frac{(1+\gamma)t^2}{(1-\gamma)12r^2} \\ \left(\frac{\partial^3 \omega}{\partial x^3 \partial \theta^2} + \frac{\partial^3 \omega}{r^2 \partial x \partial \theta^4} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -r \nabla^4 v = (2+\gamma) \frac{\partial^3 \omega}{r \partial x^2 \partial \theta} + \frac{\partial^3 \omega}{r^3 \partial \theta^3} \frac{t^2}{12r^2} \left(-\frac{2r}{(1-\gamma)} \right. \\ \left. \frac{\partial^3 \omega}{\partial x^4 \partial \theta} + \frac{(3-\gamma)}{(1-\gamma)r} \frac{\partial^3 \omega}{\partial x^2 \partial \theta^3} + \frac{\partial^3 \omega}{r^3 \partial \theta^5} \right) \end{aligned}$$

对于球形壳体:

- (1) 计算模型: 球壳上连接一刚性圆形构件, 载荷则通过刚性圆形构件作用其上。

(2) 基本方程: 采用由应力函数 F 和径向挠度表示的扁壳方程:

$$\nabla^6 \omega + \frac{T}{R^2} - \frac{E}{D} \nabla^2 \omega = 0$$

$$\nabla^6 F + \frac{T}{R^2} - \frac{E}{D} \nabla^2 F = 0$$

$$\text{其中: } \nabla^2 = \frac{\partial^2 (\dots\dots)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial (\dots\dots)}{\partial r}$$

$$N_\varphi = \frac{1}{r} \frac{\partial F}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 F}{\partial \vartheta^2}$$

$$N_\vartheta = \frac{\partial^2 F}{\partial r^2}$$

$$N_{\varphi\vartheta} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial F}{\partial \vartheta} \right)$$

$$M_\varphi = D \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial r^2} + \frac{\gamma}{r} \frac{\partial \omega}{\partial r} \right)$$

$$M_\vartheta = D \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \omega}{\partial r} + \gamma \frac{\partial^2 \omega}{\partial r^2} \right)$$

$$Q_\varphi = D \frac{\partial}{\partial r} (\nabla^2 \omega)$$

3、结果表述：对于圆筒形壳：

分析结果，用无量纲量，如

M_{φ}/W , M_X/W , $N_{\varphi}t/W$, N_Xt/W , $\delta Er/W$,
表示成图表形式，其中 W 为径向载荷。

根据给定的 $\frac{r}{t}$, $\frac{C_X}{r}$, $\frac{2C_X}{L}$, $\frac{C_{\varphi}}{C_X}$ 值，即可求得对应的

M_{φ} , M_X , N_{φ} , N_X , δ 等

给出的图表只能用于承载区中心位于圆筒中点位置的矩形承载区，如果矩形承载区中心偏离圆筒中点位置时，应将圆筒全长修正

为一个当量长度 $L_0 = L - \frac{4d^2}{L}$ ，其中 d 是从圆筒最近一端

到承载区中心的距离。只要 d 大于 $r/2$ ，这个方法即可适用对于球形壳体，分析结果用无量纲量，如

$$\delta \frac{Et^2}{Wr}, \frac{M_X}{W}, \frac{N_Xt}{W}, \frac{N_{\varphi}t}{W}, \frac{M_{\varphi}}{W}, \frac{\delta}{M} \cdot \frac{Et^2}{\sqrt{\frac{r}{t}} \cos \theta}$$

$$\frac{M_X}{M} \frac{\sqrt{rt}}{\cos \theta}, \frac{N_Xt}{M} \frac{\sqrt{rt}}{\cos \theta}, \frac{N_{\varphi}t}{M} \frac{\sqrt{rt}}{\cos \theta}$$

表示成图表形式

依据无量纲参数 $S = \frac{1.82X}{\sqrt{rt}}$ 和 $U = \frac{1.82r}{\sqrt{rt}}$ 即可求得承载区

边缘或承载区以外各点的内力和挠度

给出的图表适用于圆形载荷区，对于作用在边长为 $2c_x$ 的方形载荷区，应近似地按 $r_0 = c_x$ 的圆形区域上的载荷来处理，对于作用在边长为 $2c_x \times 2c_\varphi$ 的矩形载荷区，则可近似地按 $r_0 = \sqrt{c_x c_\varphi}$ 的圆形载荷区来处理。

4、设计准则：

壳体的径向应力为：

$$f_x = \frac{N_x}{t} \pm \frac{6M_x}{t^2} \leq 2f$$

周向应力为：

$$f_\varphi = \frac{N_\varphi}{t} \pm \frac{6M_\varphi}{t^2} \leq 2f$$

其中 f 为设计强度

5、存在的问题：

(1) 对于圆柱壳：

a 理论分析是按等厚度壳计算的，载荷分布和边界条件也只考虑了易作数学处理的情况，但实际上由于存在补强垫板，壳体的厚度是变化的，载荷的分布方式也与垫板尺寸和焊缝形式有关。

b 对容器与附件的几何关系的限制比较严，满足这些限制的附件尺寸都非常小，而实际工程中所采用的附件尺寸则要大得多。

c 曲线的间隔比较大,插值的精度较差,有时甚至查不到。

(2) 对于球壳

理论分析是按等厚度壳,载荷作用于半径为 r_c 的管子上,并假定管子是固定在球壳上的刚体,易实际上除了接管以外,还有直接或经过垫板间接焊于壳体上的平板或管子所组成的附件,两者之间显然有较大的差别。

6、目前,我们正在对附录 G 中的某些问题作一些验证性的工作,对于圆柱壳:主要包括(1)当 $L/r > 3$ 时, L/r 值对应力的影响有多大?(2)当载荷区中心偏离圆筒中点时,应将圆筒全长修正

为一个当量长度 $L_0 = L - \frac{4d^2}{L}$, 这个计算当量长度的公式是

否可靠?(3)如果考虑加强垫板的作用将对应力有什么影响?

下面是从几个算例中取得的一些数据,从这些结果中可以看到:

1、B·S·5500 计算的载荷区边缘的应力值基本上是可
靠的。

2、当量长度的计算公式也是可靠的,只引起很小的误差。

3、 $L/R = 3$ 和 $L/R = 8$, 其他参数不变时,应力计算值
相差很小。

4、有加强板时,承载区中心的应力比没有加强板的要小,但
承载区边缘的应力比载区中心的应力值高。