

# 压力容器和压力管道的 分析与计算

Analysis and Calculation for  
Pressure Vessel and Pressure Pipeline

刘人怀 著



科学出版社

T1449  
2014000

# 压力容器和压力管道的 分析与计算

**Analysis and Calculation for Pressure  
Vessel and Pressure Pipeline**

刘人怀 著



科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书应用作者的实用的厚板壳弯曲理论和板壳非线性理论,研究了压力容器和压力管道领域中的重要装置,如铂重整装置反应器、尿素合成塔、高压固定式热交换器、高压聚乙烯反应器、加氢反应器、减压分馏塔、储油罐、焦炭塔、U型膨胀节、管道接头和深海软管等的关键力学问题,大部分都给出了解析解,其中多数工作属高压和超高压大型容器和压力管道领域国际前沿的研究成果,所得结果可直接用于工程设计。

本书可供力学、压力容器、压力管道等专业的研究生,以及科研人员和设计人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

压力容器和压力管道的分析与计算/刘人怀著. —北京: 科学出版社, 2013

ISBN 978-7-03-038899-5

I. ①压… II. ①刘… III. ①压力容器-分析②压力容器-计算③压力管道-分析④压力管道-计算 IV. ①TH49②U173.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013) 第 245239 号

责任编辑: 刘信力 / 责任校对: 胡小洁

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 陈 敬

**科学出版社**出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

**北京佳信达欣艺术印刷有限公司**印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2014年1月第一版 开本: B5 (720×1000)

2014年1月第一次印刷 印张: 21 1/2

字数: 423 000

定价: **98.00 元**

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 前 言

压力容器和压力管道属于特种承压设备,广泛用于石油、化工、化肥、电力、核能、冶金、农药、食品、运输、医药、军工等各行各业和广大城乡居民家庭,量大面广,发展迅猛,关系国家的繁荣富强,关系社会的安全稳定,关系人民的幸福安康,其重要性特别突出。

1969年,新中国156项工程之一的兰州石油化工机器厂的二分厂试制了炼油工业关键设备的我国第一台铂重整装置。不幸,因反应器封头开孔强度设计缺陷而未能成功。此时,作者作为一名教师正在兰州汽车修配厂下放劳动改造。该年10月下旬,突然接受兰州大学军宣队领导之命令,受二分厂技术科科长贾志杰同志(后任中共湖北省委书记等职)邀请承担了这个难题的研究任务。经过艰辛的努力,作者于次年3月完成了任务,提出了在开孔边增设护强板的改进措施,使我国第一台产品终于试制成功。从此,作者便与压力容器研究结下不解之缘,伴随终生。

四十多年来,作者先后参与解决了我国第一台大型高压尿素合成塔、第一台大型高压固定式热交换器、第一台最高压力的高压聚乙烯反应器、第一台大型高压加氢反应器、第一台大型常减压装置减压塔、第一个大型储油罐的网格顶盖等产品的工程设计制造关键难题,以及属于世界难题的焦炭塔、U型膨胀节、管道接头和深海软管的研究工作,创立了实用的厚板壳弯曲理论和波纹管非线性弯曲理论,攻克了一些科研难题,与助手和学生们合作,先后在国内外发表了近30篇学术论文。为了有助于压力容器和压力管道的制造、设计与科研的进一步发展,特将这些论文整理汇编成书出版。

书中难免有一些缺点和错误,望读者不吝赐教。

最后,借本书出版之际,真诚感谢曾经帮助和支持过我的所有朋友们。

刘人怀

2012年8月5日于暨南大学明湖苑

# 目 录

## 前言

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 第 1 章 铂重整装置反应器                   | 1   |
| 1.1 椭球封头中心开孔接管的强度问题              | 1   |
| 1.2 椭球封头中心开孔接管的实例计算              | 10  |
| 参考文献                             | 16  |
| 第 2 章 尿素合成塔                      | 17  |
| 2.1 尿素合成塔底部球形封头开孔的应力计算           | 17  |
| 2.2 厚壁球壳的弯曲理论及其在高压容器上的应用         | 29  |
| 参考文献                             | 43  |
| 第 3 章 高压固定式热交换器                  | 44  |
| 3.1 固定式厚管板的弯曲问题                  | 44  |
| 3.2 厚管板的设计                       | 59  |
| 参考文献                             | 78  |
| 第 4 章 高压聚乙烯反应器                   | 80  |
| 4.1 厚壁筒体径向开孔的应力计算                | 80  |
| 4.2 厚壁圆柱壳轴对称变形近似理论的应力公式          | 94  |
| 参考文献                             | 96  |
| 第 5 章 加氢反应器                      | 97  |
| 5.1 加氢反应器顶部厚壁壳体的应力分析             | 97  |
| 5.2 双层套箍式厚壁压力容器环沟部位的应力状态         | 117 |
| 5.3 双锥密封中的内力分析                   | 134 |
| 参考文献                             | 137 |
| 第 6 章 减压分馏塔                      | 139 |
| 6.1 500 万吨/年常减压装置减压塔下端部分壳体的应力分析  | 139 |
| 6.2 在轴向压力与均匀外压力共同作用下薄壁截头圆锥形壳的稳定性 | 161 |
| 参考文献                             | 169 |
| 第 7 章 储油罐                        | 170 |
| 7.1 方形网格扁球壳的非线性稳定理论              | 170 |
| 7.2 大型储油罐方形网格顶盖的实例研究             | 187 |
| 参考文献                             | 192 |

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| <b>第 8 章 焦炭塔</b> .....               | 194 |
| 8.1 焦炭塔鼓胀与开裂变形机理及疲劳断裂寿命预测的研究进展.....  | 194 |
| 8.2 焦炭塔瞬态温度场的分析.....                 | 202 |
| 8.3 含衬里焦炭塔热弹性问题的解析解.....             | 215 |
| 8.4 焦炭塔塔体材料的持久强度研究.....              | 231 |
| 8.5 焦炭塔塔体材质 20g 钢的物性研究与塔体变形机理分析..... | 235 |
| 8.6 焦炭塔的变形机理分析.....                  | 244 |
| 8.7 支座位置上移对焦炭塔塔体变形的影响.....           | 252 |
| 8.8 基于改进 BP 神经网络的焦炭塔热机械疲劳剩余寿命预测..... | 256 |
| 参考文献.....                            | 261 |
| <b>第 9 章 U 型膨胀节</b> .....            | 267 |
| 9.1 波纹管的制造与理论研究概况.....               | 267 |
| 9.2 U 型波纹管非线性变形的刚度和应力分析理论.....       | 272 |
| 9.3 变厚度 U 型波纹管非线性变形分析.....           | 287 |
| 参考文献.....                            | 299 |
| <b>第 10 章 管道接头</b> .....             | 302 |
| 10.1 用概率断裂力学方法预测 T 型管状接头的疲劳寿命.....   | 302 |
| 10.2 K 型管状接头随机疲劳强度和裂纹扩展规律的研究.....    | 308 |
| 10.3 内压下考虑塑性强化的三通塑性极限分析.....         | 314 |
| 参考文献.....                            | 320 |
| <b>第 11 章 深海软管</b> .....             | 324 |
| 11.1 软管空间形态的风洞试验.....                | 324 |
| 11.2 软管空间形态的仿真计算.....                | 328 |
| 参考文献.....                            | 334 |
| <b>索引</b> .....                      | 335 |

# 第 1 章 铂重整装置反应器

## 1.1 椭球封头中心开孔接管的强度问题\*

在工业容器制造中,将常常碰到在椭球封头中心孔上连接管子的情况.接管选用厚壁好还是薄壁好?这是搞工程的同志们很关心的一个问题.我们将通过一具体例子的强度分析来得出比较正确的结论.

铂重整装置反应器便有此一问题存在.这种装置是石油炼制工业中的重要装置,产品先进,用途很广,只要改变工艺条件,就可生产不同的石油制品.铂重整装置反应器是高温(设计温度为 $300^{\circ}\text{C}$ )中压(设计压力为 $80\text{kg}/\text{cm}^2$ )容器,因此,对其设计和制造说来,都提出了比较严格的要求.1969年下半年,某厂要我们对其制造的这种反应器的封头中心开孔接管的强度进行分析.由于当时尚无厚壁圆柱壳弯曲理论,我们进行了理论上的一点探讨,提出了实用的厚壁圆柱壳弯曲理论,并做了现场产品试验,初步解决了这个产品上的有关问题,同时对椭球封头中心开孔处采用厚壁和薄壁接管的优劣提供了初步看法.

### 1.1.1 椭球封头的基本方程和公式

我们仅研究承受内压的、只开了一个中心小孔的薄椭球壳.于是,问题便成为轴对称的,而且可去略去下边缘条件对小孔附近的影响.薄椭球壳的内力、内矩和位移的正方向示于图 1.1 中,其中  $\varphi$  为决定纬线圆上点位置的角度,  $\theta$  为中面法线和壳体轴线所夹的角,  $\theta_0$  为  $\theta$  在中心孔的边缘值,  $h$  为壳厚,  $q$  为均匀内压力,  $M_1$ 、 $M_2$  为经向和纬向弯矩,  $T_1$ 、 $T_2$  为经向和纬向法向力,  $Q_x$  为垂直于轴线方向的力,  $\Delta_x$  为垂直于轴线方向的位移分量,  $\psi$  为经线的切线转角.在上述情况下,薄椭球壳轴对称应力问题中的复内力  $T$  所满足的基本方程为<sup>[1]</sup>

$$\begin{aligned} & \frac{d^2T}{d\theta^2} + \left[ \left( \frac{2R_1}{R_2} - 1 \right) \cot \theta - \frac{1}{R_1} \frac{dR_1}{d\theta} \right] \frac{dT}{d\theta} + i \frac{R_1^2}{R_2 C} T \\ & = i \frac{R_1^2}{R_2 C} \left[ q R_2 - \frac{1}{\sin^2 \theta} \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \left( \bar{C} + \int_{\theta_0}^{\theta} q R_1 R_2 \sin \theta \cos \theta d\theta \right) \right], \quad (1.1) \end{aligned}$$

其中  $a$ 、 $b$  为椭球中曲面的短、长半轴,  $R_1$ 、 $R_2$  为中曲面的两个主曲率半径,  $\bar{C}$  为

\* 发表于《科技专刊(兰州大学)》,1973,(1):14-30. 合作者:陈山林.

积分常数,

$$\begin{aligned}
 T &= T_1 + T_2 - i \frac{M_1 + M_2}{(1 + \nu)C}, \\
 R_1 &= b \sqrt{\frac{1 + \gamma}{(1 + \gamma \sin^2 \theta)^3}}, \\
 R_2 &= b \sqrt{\frac{1 + \gamma}{1 + \gamma \sin^2 \theta}}, \\
 \gamma &= \frac{b^2}{a^2} - 1, \\
 C &= \frac{h}{\sqrt{12(1 - \nu)^2}},
 \end{aligned} \tag{1.2}$$

$\nu$  为泊松比.

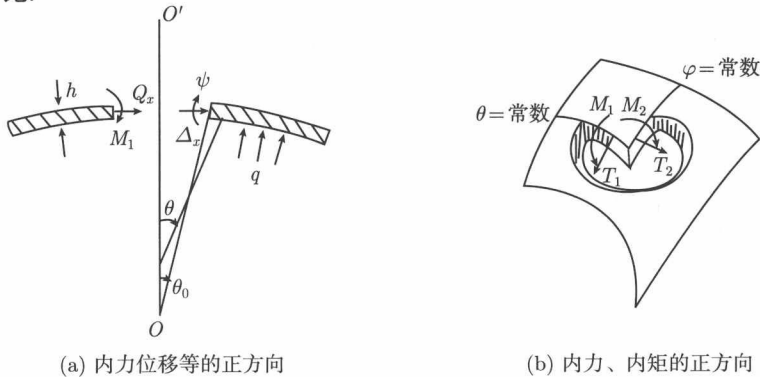


图 1.1 薄椭球壳的内力和位移

由变系数的常微分方程 (1.1) 解得复内力  $T$  后, 便可求出内力、内矩和位移的公式. 为避免文章繁杂起见, 我们略去推导, 直接从文献 [1] 中引出误差相对于 1 为

$\sqrt{\frac{h}{R}}$  级的有关结果:

$$\begin{aligned}
 \Delta_x &= \frac{\sqrt{2}R_2 \sin \theta}{Eh} \left[ -\sqrt{\frac{R_{20}}{C}} (Q_0 - Q_0^*) \sin \theta_0 \cos \beta - \frac{M_0}{C} \cos \left( \beta + \frac{\pi}{4} \right) \right] e^{-\beta} \\
 &\quad + \frac{qR_2^2 \sin \theta}{2Eh} \left( 2 - \nu - \frac{R_2}{R_1} \right), \\
 \psi &= -\frac{1}{Eh} \sqrt{\frac{2R_2}{C}} \left[ \sqrt{\frac{R_{20}}{C}} \sin \theta_0 (Q_0 - Q_0^*) \cos \left( \beta - \frac{\pi}{4} \right) + \frac{1}{C} M_0 \cos \beta \right] e^{-\beta}, \\
 T_1 &= \sqrt{\frac{2C}{R_2}} \cot \theta \left[ \sqrt{\frac{R_{20}}{C}} \sin \theta_0 (Q_0 - Q_0^*) \cos \left( \beta + \frac{\pi}{4} \right) - \frac{1}{C} M_0 \sin \beta \right] e^{-\beta}
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{2}qR_2, \\
T_2 & = \left[ -\sqrt{\frac{2R_{20}}{C}} \sin \theta_0 (Q_0 - Q_0^*) \cos \beta - \frac{\sqrt{2}}{C} M_0 \cos \left( \beta + \frac{\pi}{4} \right) \right] e^{-\beta} \\
& \quad + \frac{1}{2}qR_2 \left( 2 - \frac{R_2}{R_1} \right), \\
M_1 & = \left[ \sqrt{2}M_0 \cos \left( \beta - \frac{\pi}{4} \right) + \sqrt{2R_{20}C} \sin \theta_0 (Q_0 - Q_0^*) \sin \beta \right] e^{-\beta}, \\
M_2 & = \nu M_1,
\end{aligned} \tag{1.3}$$

其中  $E$  为弹性模量,  $S$  为弧长, 凡带下角标 “0” 的表示该量在  $\theta = \theta_0$  时的值 (以后类似如此时, 不再另述),

$$\begin{aligned}
Q_0^* & = \frac{1}{2}qR_{20} \cos \theta_0, \\
\beta & = \frac{1}{\sqrt{2}} \int_{\theta_0}^{\theta} \frac{R_1 d\theta}{\sqrt{R_2 C}} \approx \frac{S}{\sqrt{2R_{20}C}}.
\end{aligned} \tag{1.4}$$

需要指出, 公式 (1.3) 已略去了下边缘影响, 并满足了孔洞边缘条件:

$$\text{当 } \theta = \theta_0 \text{ 时, } \quad M_1 = M_0, \quad Q_x = Q_0. \tag{1.5}$$

为了确定  $M_0$ 、 $Q_0$  值, 我们需要位移  $\Delta_x$  和转角  $\psi$  在孔洞边缘处的表达式, 因此, 设

$$\text{当 } \theta = \theta_0 \text{ 时, } \quad \Delta_x = \Delta'_0, \quad \psi = \psi'_0. \tag{1.6}$$

将式 (1.3) 中的第一、二式代入式 (1.6) 中, 我们记为

$$\begin{aligned}
\Delta'_0 & = \alpha'_{11} Q_0 + \alpha'_{12} M_0 + \alpha'_1 q, \\
\psi'_0 & = \alpha'_{21} Q_0 + \alpha'_{22} M_0 + \alpha'_2 q,
\end{aligned} \tag{1.7}$$

其中

$$\begin{aligned}
\alpha'_{11} & = -\frac{2\sqrt[4]{3(1-\nu^2)}}{E} \sqrt{\frac{R_{20}^3}{R^3}} \sin^2 \theta_0, \\
\alpha'_{12} & = \alpha'_{21} \\
& = -\frac{\sqrt{12(1-\nu^2)}}{Eh^2} R_{20} \sin \theta_0, \\
\alpha'_{22} & = -\frac{4\sqrt[4]{27(1-\nu^2)^3}}{Eh^2} \sqrt{\frac{R_{20}}{h}}, \\
\alpha'_1 & = -\frac{1}{2}R_{20}\alpha'_{11} \cos \theta_0 + \frac{R_{20}^2 \sin \theta_0}{2Eh} \left( 2 - \nu - \frac{R_{20}}{R_{10}} \right),
\end{aligned}$$

$$\alpha'_2 = -\frac{1}{2}R_{20}\alpha'_{21} \cos \theta_0. \quad (1.8)$$

这里的单撇号是表示与封头有关的量。

由公式 (1.3), 我们给出直接计算孔边内力、内矩的公式:

当  $\theta = \theta_0$  时,

$$\begin{aligned} T_{10} &= (Q_0 - Q_0^*) \cos \theta_0 + \frac{1}{2}qR_{20}, \\ T_{20} &= -\sqrt{\frac{2R_{20}}{C}} (Q_0 - Q_0^*) \sin \theta_0 - \frac{M_0}{C} + \frac{1}{2}qR_{20} \left( 2 - \frac{R_{20}}{R_{10}} \right), \\ M_{10} &= M_0, \\ M_{20} &= \nu M_0. \end{aligned} \quad (1.9)$$

在求得了内力、内矩后, 便可由下面公式计算经向和纬向应力:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{T_1}{h} + \frac{12M_1z}{h^3}, \\ \sigma_2 &= \frac{T_2}{h} + \frac{12M_2z}{h^3}, \end{aligned} \quad (1.10)$$

其中  $z$  为中曲面法线方向坐标, 向外为正,  $T$  项为薄膜应力,  $M$  项为弯曲应力。

### 1.1.2 厚壁圆柱接管的基本方程和公式

我们仅研究承受内压的较长厚壁圆柱接管下端的情况。这样, 它们涉及的是半无限长厚壁圆柱壳体的轴对称应力问题。由于目前尚无厚壁圆柱壳弯曲理论, 为简单起见, 我们借助较精确薄壁圆柱壳体的理论<sup>[2]</sup>, 将它们简单改进, 建立实用的厚壁圆柱壳弯曲理论。注意壳厚过大的因素, 此时, 内压力  $q$  作用在壳内表面, 于是, 给出了经线方向位移  $u$  和中曲面法线方向位移  $w$  所满足的基本方程 (其内力、内矩、位移、坐标的正方向示于图 1.2 中):

$$\frac{d^2u}{d\alpha^2} + \nu \frac{dw}{d\alpha} - d^2 \frac{d^3w}{d\alpha^3} = 0, \quad (1.11a)$$

$$\nu \frac{du}{d\alpha} - d^2 \frac{d^3u}{d\alpha^3} + d^2 \frac{d^4w}{d\alpha^4} + (1 + d^2)w = \frac{1 - \nu^2}{Eh} R^2 \left( 1 - \frac{h}{2R} \right) q, \quad (1.11b)$$

其中  $R$  为中曲面半径,  $\alpha$  是以  $R$  作比例系数的经向无量纲坐标,  $N_1$  为经向横向力, 其余符号意义与椭球壳符号相同,

$$d^2 = \frac{h^2}{12R^2}. \quad (1.12)$$

因为  $d^2$  与 1 相较甚小, 故在  $(1 \pm d^2)$  项出现时, 我们可以略去  $d^2$ , 于是方程 (1.11b) 成为

$$\nu \frac{du}{d\alpha} - d^2 \frac{d^3u}{d\alpha^3} + d^2 \frac{d^4w}{d\alpha^4} + w = \frac{1 - \nu^2}{Eh} R^2 \left( 1 - \frac{h}{2R} \right) q. \quad (1.13)$$

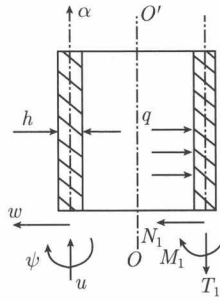


图 1.2 圆柱壳各量的正方向

由方程 (1.11a) 和 (1.13) 解得  $u$  和  $w$  后, 便可按下面公式求内力、内矩:

$$T_1 = \frac{Eh}{(1-\nu^2)R} \left( \frac{du}{d\alpha} + \nu w - d^2 \frac{d^2 w}{d\alpha^2} \right), \quad (1.14a)$$

$$N_1 = \frac{1}{R} \frac{dM_1}{d\alpha}, \quad (1.14b)$$

$$M_1 = \frac{D}{R^2} \left( \frac{du}{d\alpha} - \frac{d^2 w}{d\alpha^2} \right), \quad (1.14c)$$

其中

$$\text{抗弯刚度 } D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}. \quad (1.15)$$

实际上, 由方程 (1.11a) 和 (1.14a) 看出,  $T_1$  是一常数. 我们可以通过圆柱壳某一横截面的平衡单独解出  $T_1$ . 因为

$$2\pi RT_1 = \pi r^2 q,$$

其中  $r$  为圆柱壳内半径. 则有

$$T_1 = \frac{1}{2R} r^2 q. \quad (1.16)$$

现在, 我们来求解方程 (1.11a) 和 (1.13). 首先, 需要引入一个新的函数  $\phi(\alpha)$ , 它与位移的关系为

$$u = d^2 \frac{d^2 \phi}{d\alpha^2} - \nu \phi + m\alpha, \quad (1.17a)$$

$$w = \frac{d\phi}{d\alpha}, \quad (1.17b)$$

其中  $m$  是一待定常数, 它将通过关于  $T_1$  的平衡式来决定.

将式 (1.17) 代入式 (1.14a) 中, 便有

$$T_1 = \frac{Eh}{(1-\nu^2)R} m. \quad (1.18)$$

由式 (1.16) 和 (1.18) 的相等, 便决定了  $m$  值:

$$m = \frac{1 - \nu^2}{2Eh} r^2 q. \quad (1.19)$$

用代入法可以证明,  $\phi(\alpha)$  已经自动满足了方程 (1.11a). 将式 (1.17) 代入方程 (1.13), 并利用结果 (1.19), 就得关于  $\phi(\alpha)$  的五阶微分方程:

$$\frac{d^5 \phi}{d\alpha^5} + 2\nu \frac{d^3 \phi}{d\alpha^3} + k^2 \frac{d\phi}{d\alpha} = \frac{R^2 r q}{D} \left( R - \frac{1}{2} \nu r \right), \quad (1.20)$$

其中

$$k^2 = \frac{1 - \nu^2}{d^2}. \quad (1.21)$$

先研究式 (1.20) 的齐次方程:

$$\frac{d^5 \phi}{d\alpha^5} + 2\nu \frac{d^3 \phi}{d\alpha^3} + k^2 \frac{d\phi}{d\alpha} = 0. \quad (1.22)$$

我们可以引入一个新的函数  $P(\alpha)$ , 以使方程 (1.22) 降低一阶. 令

$$P(\alpha) = \frac{d\phi}{d\alpha}. \quad (1.23)$$

将式 (1.23) 代入方程 (1.22) 中, 得关于  $P(\alpha)$  的四阶方程:

$$\frac{d^4 P}{d\alpha^4} + 2\nu \frac{d^2 P}{d\alpha^2} + k^2 P = 0. \quad (1.24)$$

此方程的四个特征根为

$$\pm \sqrt{-\nu \pm ik}.$$

于是, 方程 (1.24) 的通解写为

$$P = e^{-\lambda_1 \alpha} [C_1 \cos(\lambda_2 \alpha) + C_2 \sin(\lambda_2 \alpha)] + e^{\lambda_1 \alpha} [C_3 \cos(\lambda_2 \alpha) + C_4 \sin(\lambda_2 \alpha)], \quad (1.25)$$

其中  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$  为待定常数,

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \sqrt{k} \cos \left[ \frac{1}{2} \arctan \left( -\frac{k}{\nu} \right) \right], \\ \lambda_2 &= \sqrt{k} \sin \left[ \frac{1}{2} \arctan \left( -\frac{k}{\nu} \right) \right]. \end{aligned} \quad (1.26)$$

利用式 (1.25) 和 (1.23), 并加上方程 (1.20) 的特解, 就得到方程 (1.20) 的通解:

$$\phi(\alpha) = \frac{r^2 q}{Eh} \left( \frac{R}{r} - \frac{1}{2} \nu \right) \alpha + \int e^{-\lambda_1 \alpha} [C_1 \cos(\lambda_2 \alpha) + C_2 \sin(\lambda_2 \alpha)] d\alpha$$

$$+ \int e^{\lambda_1 \alpha} [C_3 \cos(\lambda_2 \alpha) + C_4 \sin(\lambda_2 \alpha)] d\alpha + C_0, \quad (1.27)$$

其中  $C_0$  为待定常数.

显然,  $C_0$  表示刚性位移, 加之我们只讨论半无限长圆柱壳的下端情况, 故可令

$$C_0 = C_3 = C_4 = 0. \quad (1.28)$$

于是, 解 (1.27) 简化为

$$\phi(\alpha) = \frac{r^2 q}{Eh} \left( \frac{R}{r} - \frac{1}{2} \nu \right) \alpha + \int e^{-\lambda_1 \alpha} [C_1 \cos(\lambda_2 \alpha) + C_2 \sin(\lambda_2 \alpha)] d\alpha. \quad (1.29)$$

现在, 我们来决定解中的待定常数  $C_1$  和  $C_2$ . 先利用解 (1.29), 从式 (1.14b, c) 和 (1.17b) 求出

$$w = \frac{r^2}{Eh} \left( \frac{R}{r} - \frac{1}{2} \nu \right) q + e^{-\lambda_1 \alpha} [C_1 \cos(\lambda_2 \alpha) + C_2 \sin(\lambda_2 \alpha)], \quad (1.30a)$$

$$M_1 = \frac{r^2}{k^2} \left( \frac{1}{2} - \frac{\nu R}{r} \right) q - \frac{D}{R^2} \{ (\lambda_1^2 - \lambda_2^2 + \nu) [C_3 \cos(\lambda_2 \alpha) + C_2 \sin(\lambda_2 \alpha)] \\ + 2\lambda_1 \lambda_2 [C_1 \sin(\lambda_2 \alpha) - C_2 \cos(\lambda_2 \alpha)] \} e^{-\lambda_1 \alpha}, \quad (1.30b)$$

$$N_1 = \frac{D}{R^3} \{ \lambda_1 (\lambda_1^2 - 3\lambda_2^2 + \nu) [C_1 \cos(\lambda_2 \alpha) + C_2 \sin(\lambda_2 \alpha)] + \\ + \lambda_2 (3\lambda_1^2 - \lambda_2^2 + \nu) [C_1 \sin(\lambda_2 \alpha) - C_2 \cos(\lambda_2 \alpha)] \} e^{-\lambda_1 \alpha}. \quad (1.30c)$$

设圆柱壳下边缘处, 有

$$\text{当 } \alpha = 0 \text{ 时, } M_1 = M_0, \quad N_1 = N_0. \quad (1.31)$$

将式 (1.30b, c) 代入条件 (1.31) 中, 便得决定  $C_1$  和  $C_2$  的公式:

$$C_1 = \eta \left\{ 2\lambda_1 R N_0 + (3\lambda_1^2 - \lambda_2^2 + \nu) \left[ \frac{r^2}{k^2} \left( \frac{\nu R}{r} - \frac{1}{2} \right) q + M_0 \right] \right\}, \\ C_2 = \frac{\eta}{\lambda_2} \left\{ R (\lambda_1^2 - \lambda_2^2 + \nu) N_0 + \lambda_1 (\lambda_1^2 - 3\lambda_2^2 + \nu) \left[ \frac{r^2}{k^2} \left( \frac{\nu R}{r} - \frac{1}{2} \right) q \right. \right. \\ \left. \left. + M_0 \right] \right\}, \quad (1.32)$$

其中

$$\eta = - \frac{R^2}{D \left[ (\lambda_1^2 + \lambda_2^2)^2 + 2\nu (\lambda_1^2 - \lambda_2^2) + \nu^2 \right]}. \quad (1.33)$$

另外, 由式 (1.30a) 还可得到经线转角  $\psi$  的公式:

$$\psi = - \frac{1}{R} \frac{dw}{d\alpha}$$

$$= \frac{1}{R} \{ \lambda_1 [C_1 \cos(\lambda_2 \alpha) + C_2 \sin(\lambda_2 \alpha)] + \lambda_2 [C_1 \sin(\lambda_2 \alpha) - C_2 \cos(\lambda_2 \alpha)] \} e^{-\lambda_1 \alpha}. \quad (1.34)$$

令

$$\text{当 } \alpha = 0 \text{ 时, } \quad w = \Delta_0'', \quad \psi = \psi_0''. \quad (1.35)$$

再将式 (1.30a) 和 (1.34) 代入条件 (1.35) 中, 我们记为

$$\begin{aligned} \Delta_0'' &= \alpha_{11}'' N_0 + \alpha_{12}'' M_0 + \alpha_1'' q, \\ \psi_0'' &= \alpha_{21}'' N_0 + \alpha_{22}'' M_0 + \alpha_2'' q, \end{aligned} \quad (1.36)$$

其中

$$\begin{aligned} \alpha_{11}'' &= 2\lambda_1 R \eta, \\ \alpha_{12}'' &= (3\lambda_1^2 - \lambda_2^2 + \nu) \eta, \\ \alpha_1'' &= \frac{D\alpha_{12}''}{R^2} \left( \frac{\nu R}{r} - \frac{1}{2} \right) + \frac{r^2}{Eh} \left( \frac{R}{r} - \frac{1}{2}\nu \right), \\ \alpha_{21}'' &= (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 - \nu) \eta, \\ \alpha_{22}'' &= 2\lambda_1 (\lambda_1^2 + \lambda_2^2) \frac{\eta}{R}, \\ \alpha_2'' &= \frac{r^2 \alpha_{22}''}{k^2} \left( \frac{\nu R}{r} - \frac{1}{2} \right). \end{aligned} \quad (1.37)$$

这里的双撇号表示与接管有关的量, 薄壁接管情况也同此。

### 1.1.3 薄壁圆柱接管的公式

因有以上现成的公式, 我们就不再单独求解薄壁接管的基本方程。从第二部分公式中略去厚壁因素项, 便可得薄壁圆柱壳方程和公式。不过, 考虑到所推的薄接管公式需要与薄椭球壳公式误差一致 (相对于 1 的  $\sqrt{\frac{h}{R}}$  级误差), 我们宁愿从第一部分结果来推出所需要的公式。这样, 只需令

$$R_1 \rightarrow \infty, \quad R_2 = R = \text{const}, \quad \theta = \frac{\pi}{2},$$

便从公式 (1.6)~(1.8) 推得薄圆柱壳 (符号同厚壁圆柱壳情况) 的有关结果:

$$\text{当 } \alpha = 0 \text{ 时, } \quad w = \Delta_0'', \quad \psi = \psi_0'', \quad (1.38)$$

其中

$$\begin{aligned}\Delta_0'' &= \alpha_{11}'' N_0 + \alpha_{12}'' M_0 + \alpha_1'' q, \\ \psi_0'' &= \alpha_{21}'' N_0 + \alpha_{22}'' M_0 + \alpha_2'' q;\end{aligned}\quad (1.39)$$

$$\alpha_{11}'' = -\frac{2\sqrt[4]{3(1-\nu^2)}}{E} \sqrt{\frac{R^3}{h^3}},$$

$$\alpha_{12}'' = \alpha_{21}'' = -\frac{\sqrt{12(1-\nu^2)}}{Eh^2} R,$$

$$\alpha_{22}'' = -\frac{4\sqrt[4]{27(1-\nu^2)^3}}{Eh^2} \sqrt{\frac{R}{h}},$$

$$\alpha_1'' = \left(1 - \frac{\nu}{2}\right) \frac{R^2}{E},$$

$$\alpha_2'' = 0. \quad (1.40)$$

#### 1.1.4 椭球封头与接管的连接条件

在椭球封头中心开孔处, 接管与封头是用焊缝连接起来的 (位于图 1.3 中的  $mn$  截面处). 有时, 在孔边缘会增置一块护强板, 造成孔附近封头为双层壳情况. 因护强板的尺寸较  $mn$  截面尺寸大得多, 材质又与封头相同, 而且双层壳总厚度又不太大, 所以只要选取离封头下表面距离为  $h_0$  (其值为双层壳总厚度之半) 的平行面作为坐标参考面, 我们就可以照常应用第一部分单层壳的公式来计算这种双层壳情况下的焊缝应力.

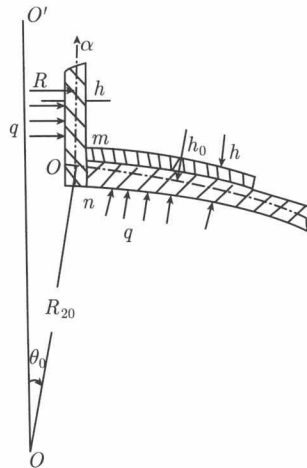


图 1.3 薄椭球壳中心开孔接管截面

现在需要决定前面公式中的  $M_0$ 、 $Q_0$  未知值. 考虑到焊接部分的变形情况, 我

们将接管与封头连接部分的连续条件写为

$$\begin{aligned}\Delta'_0 &= \Delta''_0, \\ \psi'_0 &= -\psi''_0, \\ Q_0 &= -N_0, \\ M'_{10} &= M''_{10} = M_0.\end{aligned}\tag{1.41}$$

将公式 (1.7)、(1.36) 或公式 (1.7)、(1.39) 代入式 (1.41) 中, 便得关于  $M_0$  和  $Q_0$  的二元联立方程组:

$$\begin{aligned}l_{11}Q_0 + l_{12}M_0 &= l_1q, \\ l_{21}Q_0 + l_{22}M_0 &= l_2q,\end{aligned}\tag{1.42}$$

其中

$$\begin{aligned}l_{11} &= \alpha'_{11} + \alpha''_{11}, \\ l_{12} &= \alpha'_{12} - \alpha''_{12}, \\ l_{21} &= \alpha'_{21} - \alpha''_{21}, \\ l_{22} &= \alpha'_{22} + \alpha''_{22}, \\ l_1 &= \alpha''_1 - \alpha'_1, \\ l_2 &= -(\alpha'_2 + \alpha''_2).\end{aligned}\tag{1.43}$$

解方程组 (1.42), 得决定  $M_0$ 、 $Q_0$  值之公式:

$$\begin{aligned}Q_0 &= \frac{l_1l_{22} - l_2l_{12}}{l_{11}l_{22} - l_{12}l_{21}}q, \\ M_0 &= \frac{l_2l_{11} - l_1l_{21}}{l_{11}l_{22} - l_{12}l_{21}}q.\end{aligned}\tag{1.44}$$

于是, 我们就能由公式 (1.3)、(1.9)、(1.10) 计算封头孔洞附近和焊缝处的应力, 从而达到本章分析椭圆封头中心开孔接管强度的目的. 下面, 我们用实际例子来说明这个问题.

## 1.2 椭圆封头中心开孔接管的实例计算

### 1.2.1 实例

铂重整装置反应器椭圆封头上的开孔情况示于图 1.4 中, 中心孔最大, 旁侧的催化剂卸出口次之, 其余三个孔很小, 且离中心孔较远. 为了避免计算这复杂的复



连通区域的强度问题, 我们假定封头仅有一个中心孔 (这一孔洞的边缘应力是本文要计算的). 另外, 中心孔的接管是由圆柱壳和锥壳组合而成, 由于感兴趣的是开孔接管连接处的强度, 故我们以一半无限长圆柱壳来代替. 这样, 便可以应用前面的公式进行计算. 可以预料, 图 1.4 中 A 点的理论值将在误差允许范围以内; B 点的理论值将较实际值低, 这是旁侧孔干扰的结果. 我们将通过试验值来估计这干扰引起的误差, 以便解决铂重整装置反应器产品上的强度问题. 下面, 我们分四种情况来进行计算.

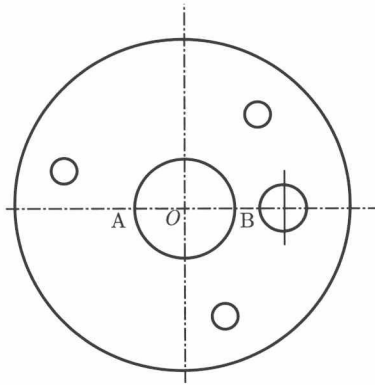


图 1.4 反应器封头开孔情况

**例 1** 对现有产品的计算. 厂内已生产的几台产品是修改了原设计方案后制造的, 此时, 接管是厚壁的, 孔边未置护强报, 有关数据为

对于薄椭球壳而言, 有

$$a = 480\text{mm}, \quad b = 930\text{mm}, \quad h = 60\text{mm}.$$

对于厚壁接管而言, 有

$$R = 211.5\text{mm}, \quad h = 90\text{mm}.$$

制造产品的钢材为 20CrMo9, 其泊松比、弹性模量和屈服极限为

$$\nu = 0.3, \quad E = 2.1 \times 10^4 \text{kg/mm}^2, \quad \sigma_S = 35.0 \text{kg/mm}^2.$$

容器的设计压力:  $q = 0.80 \text{kg/mm}^2$ .

将以上数据代入公式 (1.8)、(1.37) 和 (1.43) 中, 便有

$$\begin{aligned} \alpha'_{11} &= -2.80 \times 10^{-4}, & \alpha'_{12} = \alpha'_{21} &= -9.25 \times 10^{-6}, & \alpha'_1 &= 3.44 \times 10^{-1}, \\ \alpha'_{22} &= -6.10 \times 10^{-7}, & \alpha'_2 &= 8.10 \times 10^{-3}; \end{aligned} \quad (1.45)$$

$$\begin{aligned} \alpha''_{11} &= -4.47 \times 10^{-4}, & \alpha''_{12} &= -4.56 \times 10^{-6}, & \alpha''_1 &= 2.27 \times 10^{-2}, \\ \alpha''_{21} &= -3.93 \times 10^{-6}, & \alpha''_{22} &= -7.77 \times 10^{-8}, & \alpha''_2 &= -1.73 \times 10^{-5}; \end{aligned} \quad (1.46)$$

$$l_{11} = -7.28 \times 10^{-4}, \quad l_{12} = -4.68 \times 10^{-6}, \quad l_1 = -3.21 \times 10^{-1},$$