

# 深海空间站外壁厚度的理论分析

徐万海, 吴应湘, 曾晓辉

(中国科学院力学研究所, 北京, 100080)

## 摘 要

设计深海空间站时, 首先要解决外部耐压壳的强度和稳定性问题, 根据经典的弹性理论导出的壳体应力公式, 应用强度理论中的 Tresea 屈服条件, 确定了壳的厚度的取值范围, 并得到了最小厚度的表达式。之后进行稳定性分析, 研究理想条件下, 强度要求和稳定性要求对球壳厚度的影响。考虑球壳过厚会增加施工难度, 进行分层处理。

**关 键 词:** 深海空间站; 强度理论; 耐压壳; 球壳; 稳定性

## 1 引言

海洋占地球总表面积的 71%。作为人类尚待开发的宝地和高技术领域之一, 海洋已经成为各国的重要战略目标。21 世纪是海洋的世纪, 能源的紧缺以及军事国防的需要, 人们迫切的希望深海建立一个海底空间站。可以用来侦测非法进入领海的船只, 搜寻沉船或搜救海难人员, 深海的油气开采等等。国内外这方面的研究工作才刚刚起步, 我国学者在这方面也做出了一些贡献<sup>[1-5]</sup>, 本文分别考虑强度和稳定性的影响, 获得了建造深海空间站外壁球壳的最小厚度。全文共四部分, 第一部分根据 Tresea 屈服条件和经典弹性理论中球壳的应力表达式, 得到了单层球壳满足强度条件时的最小厚度; 第二部分根据稳定性条件, 得出了球壳满足稳定性的厚度; 第三部分对球壳进行分层处理, 得到分层之后的球壳厚度; 最后是结论部分。

## 2 强度分析得到的球壳厚度

假设深海空间站的模型是一个空心球体, 设内径为  $R_0$ , 外径为  $R$ , 内部压力为  $P_0$ , 外部压力为  $P$ , 不考虑体积力的影响。根据经典的弹性力学理论<sup>[8-9]</sup>, 及相应边界条件  $(\sigma_r)_{r=R_0} = P_0$ ,  $(\sigma_r)_{r=R} = P$ , 得到三个方向的应力表达式为:

$$\sigma_r = \frac{1}{R_0^3 - R^3} \left[ (PR^3 - P_0R_0^3) - (P - P_0) \frac{R^3 R_0^3}{r^3} \right] \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_\varphi = \frac{1}{R_0^3 - R^3} \left[ (PR^3 - P_0R_0^3) + (P - P_0) \frac{R^3 R_0^3}{2r^3} \right]$$

由于  $|\sigma_r| \leq |\sigma_\theta|$ , 应用 Tresea 屈服条件  $|\sigma_\theta| - |\sigma_r| \leq [\sigma]$  及公式 (1) 得到:

$$\frac{1}{R_0^3 - R^3} \left[ (PR^3 - P_0R_0^3) - (P - P_0) \frac{R^3 R_0^3}{r^3} \right] - \frac{1}{R_0^3 - R^3} \left[ (PR^3 - P_0R_0^3) + (P - P_0) \frac{R^3 R_0^3}{2r^3} \right] \leq [\sigma] \quad (2)$$

化简(2)式:

$$\frac{3(P-P_0)R^3R_0^3}{2(R^3-R_0^3)^3} \leq [\sigma] \quad (3)$$

因为  $\frac{3(P-P_0)R^3R_0^3}{2(R^3-R_0^3)^3}$  的最大值在  $r=R_0$  处取得, 所以把  $r=R_0$  代入(3)式:

$$R_0 \leq \left[ \frac{2[\sigma]-3(P-P_0)}{2[\sigma]} \right]^{\frac{1}{3}} R \quad (4)$$

$D=R-R_0$ , 其中  $D$  为球壳的厚度最后得到:

$$D \geq R \left\{ 1 - \left[ \frac{2[\sigma]-3(P-P_0)}{2[\sigma]} \right]^{\frac{1}{3}} \right\} \quad (5)$$

取等号时所需的球体厚度最小:

$$D_{\min} = R \left\{ 1 - \left[ \frac{2[\sigma]-3(P-P_0)}{2[\sigma]} \right]^{\frac{1}{3}} \right\} \quad (6)$$

令  $k = \frac{(P-P_0)}{2[\sigma]}$ , 它的物理意义为内外压差与许用应力的比值。

$$\text{则: } D_{\min}(k) = R \left\{ 1 - [1-1.5k]^{\frac{1}{3}} \right\} \quad (7)$$

工程中可以用来建造深海空间站的材料许用应力范围为 200MPa ~ 600MPa, 假设我们设计建造的空间站在水下 3000m 以内, 则外部海水给予球壳的外压为  $300P_0$ , 所以  $k$  的取值范围约为 0~0.5, 当  $R=10, 25, 50, 100$  时分别做出厚度  $D(k)$  关于  $k$  的变化图像如图 1 所示:

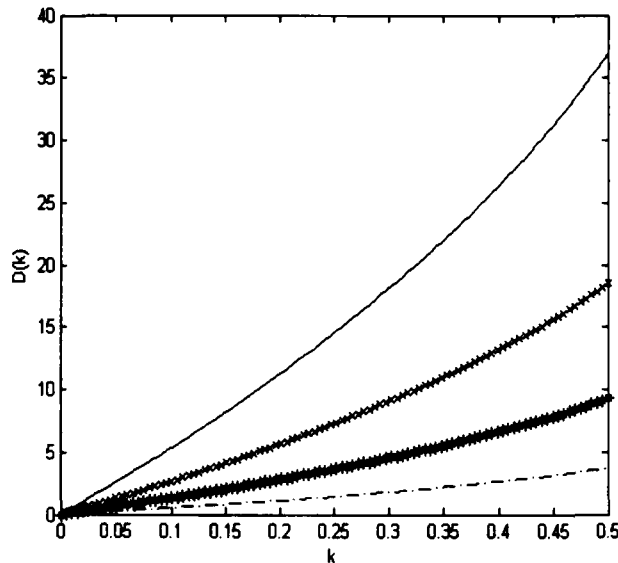


图 1 不同的外径时, 球壳厚度的变化

其中实线代表  $R=100$ , 点号代表  $R=50$ , 星号  $R=25$ , 虚线  $R=10$ , 当球壳的外半径发生变化时, 函数的图像整体走势不变, 只是相应的球壳厚度发生改变。而且随着半径的增加, 球壳厚度增加的速度变得越快, 当内外压差与许用应力的比值增大时, 球壳的厚度也随之增大。

### 3 稳定性计算得到的球壳厚度

如果压力超过某一极限值, 受压壳体的球形平衡状态将变为不稳定, 从而导致球壳失稳<sup>[7]</sup>。受外压薄球壳弹性失稳的最早理论公式是由 R. Zoelly 在 1915 年用小变形假设导出的, 它的结果由 (8) 式表示, 称为经典理论值<sup>[4-6]</sup>:

$$P_E = \frac{2E}{\sqrt{3(1-\mu^2)}} \left(\frac{D}{R}\right)^2 \quad (8)$$

其中  $P_E$  为临界外压,  $E$  弹性模量,  $\mu$  为泊松比

化简 (8) 可得:

$$D = R \sqrt{\frac{P_E}{2E}} \sqrt{3(1-\mu^2)} \quad (9)$$

让  $P_E = 300 \text{ MPa}$ , 选取一种钢的材料为例: 许用应力  $[\sigma] = 400 \text{ MPa}$ ,  $\mu = 0.3$ ,  $E = 210 \text{ GPa}$  来检验根据理想的弹性理论和稳定性理论计算的球壳厚度, 如图 2 所示:

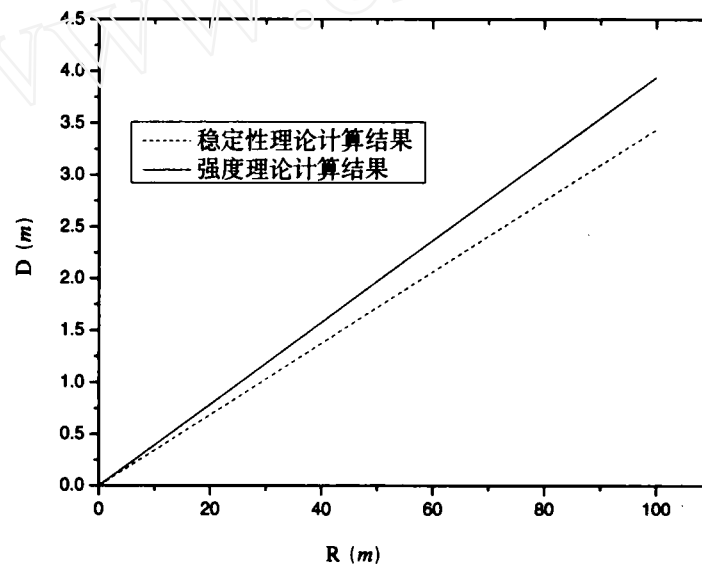


图 2 强度理论与稳定性理论计算得到的厚度结果比较

分析可以得到, 稳定性计算得到的球壳厚度比强度理论得到的厚度要薄, 所以在理想状况下, 只需做强度校核就足够了。但是由于公式 (9) 要求结构必须满足如下条件: ① 材料均匀和各向同性; ② 完善的几何球形; ③ 无初始应力; ④ 应力—应变关系是线性的。对于一般金属材料, 上述第一个条件是满足的。但要满足几何形状完善以及焊接结构中无残余应力, 比较难以做到。因此, 上述理论临界值远高于试验临界值。由均匀外压作用下球壳的稳定性实验也表明: 失稳发生于压力远小于式 (8) 所给的临界压力值, 一般仅是它的  $1/3 \sim 1/4$  左右, 而且失稳是突然的发生。显然, 考虑实际情况, 研究球壳的屈曲强度十分重要, 本文的后续工作将开展这方面研究。

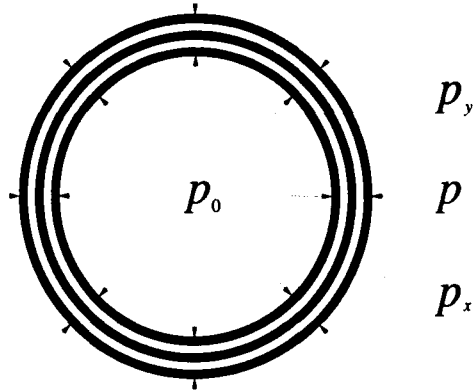


图3 分层之后的球壳模型

#### 4 分层处理

工程施工中,对厚钢板或者合金板焊接和铸造是很困难的。所以本文提出一种新的工程施工设计的方法对球壳进行分层处理,可以根据实际的需要和工程造价的考虑,把球壳分成需要的层数,暂时以分成3层为例,总的厚度为 $D = D_1 + D_2 + D_3$ ,其中 $P, P_x, P_y, P_0$ 分别为由外及内的压力, $D_1, D_2, D_3$ 分别为各层厚度。根据公式(6)可以得到:

$$D = R \left\{ 1 - \left\{ \frac{2[\sigma] - 3(P - P_x)}{2[\sigma]} \right\}^{\frac{1}{3}} \right\} + (R - D_1) \left\{ 1 - \left\{ \frac{2[\sigma] - 3(p_x - p_y)}{2[\sigma]} \right\}^{\frac{1}{3}} \right\} + (R - D_1 - D_2) \left\{ 1 - \left\{ \frac{2[\sigma] - 3(p_y - P_0)}{2[\sigma]} \right\}^{\frac{1}{3}} \right\} \quad (10)$$

当 $P_x = \frac{2P + P_0}{3}, P_y = \frac{P + 2P_0}{3}$ 时 $D(P_x, P_y)$ 取最小值

$$D_{\min} = R \left\{ 1 - \left\{ \frac{2[\sigma] - (P - P_0)}{2[\sigma]} \right\}^{\frac{1}{3}} \right\} + (R - D_1) \left\{ 1 - \left\{ \frac{2[\sigma] - (P - P_0)}{2[\sigma]} \right\}^{\frac{1}{3}} \right\} + (R - D_1 - D_2) \left\{ 1 - \left\{ \frac{2[\sigma] - (P - P_0)}{2[\sigma]} \right\}^{\frac{1}{3}} \right\} = R \left\{ 1 - \left\{ \frac{2[\sigma] - (P - P_0)}{2[\sigma]} \right\}^{\frac{1}{3}} \right\} + R \left\{ \frac{2[\sigma] - (P - P_0)}{2[\sigma]} \right\}^{\frac{1}{3}} \left\{ 1 - \left\{ \frac{2[\sigma] - (P - P_0)}{2[\sigma]} \right\}^{\frac{1}{3}} \right\} + R \left\{ \frac{2[\sigma] - (P - P_0)}{2[\sigma]} \right\}^{\frac{2}{3}} \left\{ 1 - \left\{ \frac{2[\sigma] - (P - P_0)}{2[\sigma]} \right\}^{\frac{1}{3}} \right\} \quad (11)$$

其中

$$D_1 = R \left\{ 1 - \left\{ \frac{2[\sigma] - (P - P_0)}{2[\sigma]} \right\}^{\frac{1}{3}} \right\} \quad (12)$$

$$D_2 = \left( R - R \left\{ 1 - \left\{ \frac{2[\sigma] - (P - P_0)}{2[\sigma]} \right\}^{\frac{1}{3}} \right\} \right) \left\{ 1 - \left\{ \frac{2[\sigma] - (P - P_0)}{2[\sigma]} \right\}^{\frac{1}{3}} \right\} \quad (13)$$

$$D_3 = \left( R - R \left\{ 1 - \left\{ \frac{2[\sigma] - (P - P_0)}{2[\sigma]} \right\}^{\frac{1}{3}} \right\} \right) \left( R - R \left\{ 1 - \left\{ \frac{2[\sigma] - (P - P_0)}{2[\sigma]} \right\}^{\frac{1}{3}} \right\} \right) \left\{ 1 - \left\{ \frac{2[\sigma] - (P - P_0)}{2[\sigma]} \right\}^{\frac{1}{3}} \right\} \right) \left\{ 1 - \left\{ \frac{2[\sigma] - 3(Y - P_0)}{2[\sigma]} \right\}^{\frac{1}{3}} \right\} \quad (14)$$

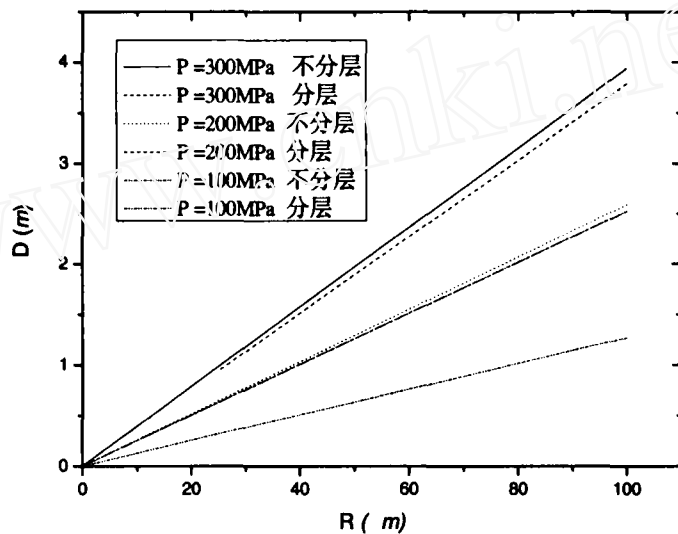


图4 不同外压下分层与不分层的计算结果比较

当 $[\sigma] = 400 \text{ MPa}$ , 外压取为 $P = 300, 200, 100 \text{ MPa}$ 时分别得到单层球壳和三层球壳的总厚度与半径的关系如图4所示, 可以看出, 当外压逐渐的增大时, 分层处理所得到的球壳厚度与不分层得到的厚度差异越来越明显, 当外压很小时, 或者球壳的外半径很小时, 分层处理不能明显的降低球壳的厚度。

## 5 结论

单层球壳在既考虑稳定性又考虑强度的影响时, 理想条件下强度条件得到球壳厚度要比稳定性条件得到的厚度值大; 若单层球壳厚度过厚, 提出一种改进方案, 采用分层处理的方式, 暂以三层为例, 可以得到总厚度的最小值; 根据具体的数值计算结果, 可知分层处理只会增加工程施工的可行性, 却不能有效的明显降低球壳的整体厚度, 以此来节省材料, 降低工程造价是做不到的。

## 参考文献

- 1 李良碧, 王仁华, 俞铭华, 王自力 深海载人潜水器耐压球壳的非线性有限元分析 中国造船 2005.
- 2 陆蓓, 刘涛, 崔维成 深海载人潜水器耐压球壳极限强度研究 船舶力学 2004.
- 3 李向阳, 刘涛, 黄小平, 崔维成 大深度载人潜水器载人耐压球壳的疲劳载荷

- 4 谱分析, 船舶力学 2004.
- 5 施德培, 李长春 《潜水器结构强度》, 上海交通大学出版社, 1991.
- 6 周承侗 《弹性稳定理论》, 四川人民出版社, 1981.
- 7 陈铁云, 沈惠申 结构的屈曲[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1993.
- 8 俞铭华, 王自力, 李良碧, 王仁华 大深度载人潜水器耐压壳结构研究进展, 华东船舶工业学院学报(自然科学版), 2004.
- 9 徐芝纶 《弹性力学》, 高等教育出版社, 北京, 1987.
- 10 刘鸿文 《材料力学》, 高等教育出版社, 2000.

## The thickness analysis of exterior pressure shell used in submarine workstation

XU Wan-hai WU Ying-xiang Zeng Xiaohui

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

### Abstract

When designing a submarine workstation, we should first face the problem of intensity and stability. The stress of spherical shell has been deduced in classical elastic theory, based on Tresca yield criterion, the analytic expression of pressure shell thickness can be deduced. Then based on stability condition, we get the influence of intensity and stability to the thickness of spherical shell in ideal conditions. If the shell thickness is impracticable in engineering. Otherwise, a new method is presented herein, dividing heavy layer into many thin parts can account for this difficult problem.

**Keywords:** submarine space station; intensity analysis; pressure shell; spherical shell; stability

### 作者简介

徐万海 男, 1982年生, 主要从事海洋结构振动分析。