

盐穴储气库溶腔夹层应力分布规律

班凡生¹,袁光杰¹,赵志成²

1. 中国石油集团钻井工程技术研究院,北京 100195
2. 长江大学湖北省油气钻采工程重点实验室,武汉 430100

摘要 针对层状盐岩地层水溶造腔过程中不溶性夹层的破坏坍塌现象,建立了夹层力学分析模型,应用小挠度薄板弯曲理论求解,得到了夹层剖面内各应力分量的分布规律。对夹层破坏坍塌条件进行分析,给出了一种计算夹层极限跨度的方法。研究成果为盐穴储气库水溶造腔过程中夹层破坏坍塌的预测提供了理论依据和有效的计算方法。

关键词 层状盐岩;溶腔;夹层;应力分布

中图分类号 TE972.2

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.16.007

Stress Distribution Rules of Interlayer in Salt Caverns Gas Storage

BAN Fansheng¹, YUAN Guangjie¹, ZHAO Zhicheng²

1. CNPC Drilling Research Institute, Beijing 100195, China
2. Key Laboratory of Hubei Province for Drilling and Production Engineering; Yangtze University, Wuhan 430100, China

Abstract The insoluble interlayer can have a major impact on the shape development of salt caverns when building salt caverns gas storage. A mechanical model of the interlayer is established and solved by bending theory of thin plates with small deflections for collapsing of interlayer in salt caverns gas storage. The stress distribution rules and collapsing conditions of the interlayer are analyzed with the mechanical model. A computing method is provided for ultimate span of the interlayer. Distribution characteristics of various stress components in the section of the interlayer are computed with engineering examples, and the collapse of position under the conditions of varying thickness of interlayer is computed. The results show that the maximum shear stress occurs in the middle plane of the fixed end of the interlayer, and the maximum normal stress occurred in the upper and lower end faces of the fixed end of the interlayer. Shear failure occurs at the fixed end of the interlayer when the maximum shear stress reaches its limit value. Tensile failure occurs at the fixed end of the interlayer when the maximum normal stress reaches its limit value. Engineering practice has proved that the greater the thickness of the interlayer, the larger the collapsing span. A theoretical basis and computing method are provided for prediction of collapsing of interlayer in salt caverns gas storage.

Keywords bedded salt rock; solution-mined salt caverns; interlayer; stress distribution

作为西气东输工程的重要配套工程,利用盐穴溶腔建造储气库,是实现天然气地下储备与季节调峰的主要形式^[1,2]。与国外建造储库的巨厚盐丘储层条件不同,中国盐岩矿床的地质条件相对复杂,主要特征是成层分布、埋深较浅、矿层数多、单层厚度薄^[3,4],盐岩体中一般含有较多的不溶性夹层,这些薄夹层的存在增加了储库建腔期对腔体形状控制的难

度。如何有效计算夹层应力分布规律,从而预测和判断夹层破坏与坍塌,成为水溶造腔过程中亟待解决的技术难题。

Bauer 等^[5]应用梁的弯曲理论对盐岩溶腔泥质顶板的破坏形式进行研究,考虑了泥质顶板的剪切及拉伸破坏形式。对于水溶造腔过程中夹层而言,该研究适用性不强,同时用梁的弯曲理论研究腔内夹层的受力与破坏问题与实际工况

收稿日期:2014-01-27;修回日期:2014-04-15

基金项目:北京市重大科技成果转化落地培育项目(Z111100059411024)

作者简介:班凡生,高级工程师,研究方向为地下储气库工程技术,电子信箱:bfsdri@cnpc.com.cn

引用格式:班凡生,袁光杰,赵志成. 盐穴储气库溶腔夹层应力分布规律[J]. 科技导报, 2014, 32(16): 45-48.

不相符。文献[6]建立了夹层力学分析模型,但未对应力分布特征进行进一步的分析,没有给出预测夹层坍塌破坏的求解方法。施锡林等^[7,8]采用圆形板几何模型,考虑了水平径向力对夹层破坏的影响,从力学角度,对因局部应力达到夹层强度条件之后引起的垮塌及夹层的整体垮塌现象进行分析。模型中忽略了夹层中心圆孔的影响,这与工程实际不符,特别是对于那些经过一次坍塌之后,在后续溶蚀过程中继续暴露出来的夹层而言,中心圆孔尺寸不容忽视。

本文应用小挠度薄板弯曲理论,建立不溶性夹层力学模型,求解夹层应力分布规律,对夹层的破坏形式进行分析。

1 夹层的力学模型

1.1 假设条件

1) 忽略地层倾角的影响;

2) 由于地层岩性显著的纵向非均质性,可以忽略其横向非均质性,假设盐层及不溶性夹层岩性均为横向等厚、均质各向同性;

3) 水溶建腔过程中,溶腔形态为轴对称分布,盐岩地层中不溶性夹层等厚,且物化性质分布均匀稳定,因此夹层承受的载荷为自身有效重力,也就是轴对称均布载荷;

4) 夹层厚度远小于横向尺寸,且在破坏坍塌以前,其变形也远小于板的厚度。

基于以上假设,可以将夹层视为环形有孔薄板如图1所示,内边界为自由端,半径为 a ,外边界为固支端,半径为 b ,其厚度为 t ,厚度尺寸远小于板面尺寸,平分薄板厚度的平面称为中面,板内平行于中面的平面称为纵面,将 x, y 坐标轴取在中面内, z 轴垂直于中面,板受垂直于中面的载荷后,中面将弯成的曲面称为弹性曲面,中面发生垂直于中面的位移 w 称为挠度,当挠度远小于板的厚度时,这种变形称为小挠度的薄板弯曲问题。

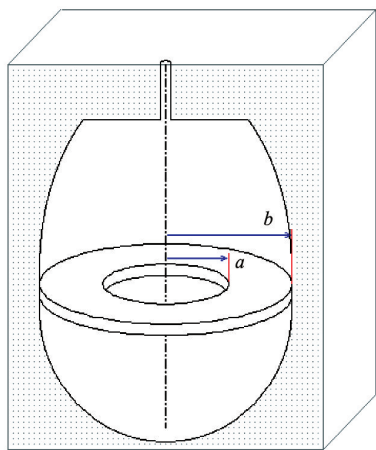


图1 溶腔内不溶性夹层示意

Fig. 1 Sketch map of insoluble interlayer in cavern

1.2 数学模型

1.2.1 挠曲面微分方程及其通解

文献[9]给出了小挠度薄板弯曲微分方程的一般形式:

$$\left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) = \frac{q}{D} \quad (1)$$

式中, $D = \frac{Et^3}{12(1-\mu^2)}$, 为板的弯曲刚度; q 为薄板所受的横向载荷。

对于轴对称溶腔, 圆板所受的横向载荷为轴对称, 即 $q = q(r)$, 且支承也是轴对称, 则其挠曲面必为轴对称, 即 $w = w(r)$ 。此时问题变为圆形薄板的轴对称弯曲, 其曲面微分方程具有如下形式^[10]:

$$\left(\frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \right) \left(\frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dw}{dr} \right) = \frac{q}{D} \quad (2)$$

其通解为

$$w = C_1 \ln r + C_2 r^2 \ln r + C_3 r^2 + C_4 + w_1 \quad (3)$$

式中, w_1 为一特解, 与载荷强度 q 有关, C 为积分常数, 与边界条件有关。

考虑溶蚀造腔工程中的实际情况, 不溶性夹层暴露之后, 将承受有效重力, 即自身重力与溶腔内卤水的浮力之差。对于金坛储气库而言, 不溶性夹层物性特征较为均匀稳定, 横向均质性良好, 因此可将夹层上的载荷视为均布载荷 $q = q_0$ 。

$$q_0 = (\rho_2 - \rho_1)gt \quad (4)$$

式中, ρ_2 为夹层密度; ρ_1 为溶腔内卤水密度; g 为重力加速度; t 为夹层厚度。

当载荷为均布载荷时, 可设模型的特解为 $w_1 = mr^4$, 式中 m 为常数, 代入微分方程, 可得到 $m = \frac{q_0}{64D}$, 故均匀载荷下圆板挠曲面的通解为

$$w = \frac{q_0 r^4}{64D} + C_1 \ln r + C_2 r^2 \ln r + C_3 r^2 + C_4 \quad (5)$$

对式(5)分别一次和二次微分运算, 有

$$\frac{dw}{dr} = \frac{q_0 r^3}{16D} + \frac{1}{r} C_1 + (2r \ln r + r) C_2 + 2r C_3 \quad (6)$$

$$\frac{d^2 w}{dr^2} = \frac{3q_0 r^2}{16D} - \frac{1}{r^2} C_1 + (2 \ln r + 3) C_2 + 2C_3$$

1.2.2 夹层内力分量及应力分量

根据内力分量与挠曲面微分的关系式, 各内力分量可表示为

$$\begin{aligned} M_r &= -D \left[\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \right) \right] \\ M_\theta &= -D \left[\left(\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \right) + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \right] \\ Q_r &= -D \frac{\partial}{\partial r} \nabla^2 w \end{aligned} \quad (7)$$

式中, M, Q 分别为弯矩和内力, 下标 r, θ 分别代表径向和周向分量。

根据应力分量与内力分量的关系式, 各应力分量表示为

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{12M_r}{l^3}z \\ \sigma_\theta &= \frac{12M_\theta}{l^3}z \\ \tau_{rz} &= \frac{6Q_r}{l^3}\left(\frac{l^2}{4}-z^2\right) \end{aligned} \quad (8)$$

式中, σ, τ 分别为正应力和剪应力, 下标 r, θ, z 分别代表径向、周向和轴向分量。

1.2.3 积分常数确定方法

$r=a$ 时, 内边界为自由边界, 满足内力分量为零的静力条件, 即

$$M_r|_{r=a} = 0 \quad Q_r|_{r=a} = 0 \quad (9)$$

$r=b$ 时, 外边界为固支边界, 满足位移与转角为零的几何条件, 即

$$w_{r=b} = 0 \quad \left. \frac{dw}{dr} \right|_{r=b} = 0 \quad (10)$$

根据上述边界条件, 可确定积分常数 C_1, C_2, C_3, C_4 。

2 计算实例

金坛储气库某溶腔中, 夹层厚度为 4 m, 内边界(自由端)半径为 10 m, 外边界(固支端), 半径为 20 m, 夹层密度为 2.4 g/cm³, 卤水密度 1.1 g/cm³, 弹性模量取 0.5 MPa, 泊松比取 0.25。利用本文所建模型及其求解方法, 可分别求得剪切应力、径向正应力、周向正应力在夹层剖面内的分布规律, 如图 2、图 3、图 4 所示。

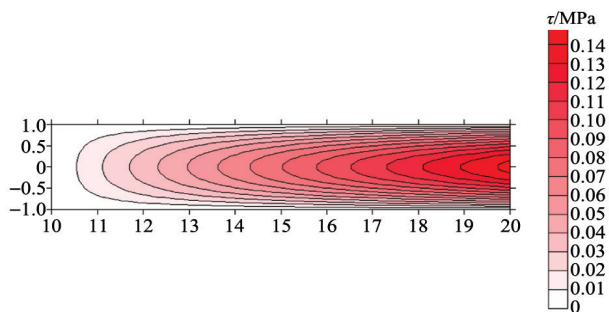


图 2 剪应力分布等值线图

Fig. 2 Contour map of shear stress distribution

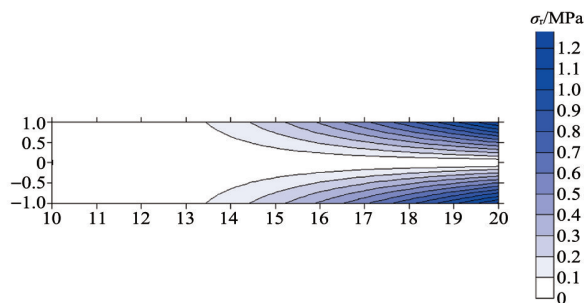


图 3 正应力(径向)分布等值线图

Fig. 3 Contour map of radial normal stress distribution

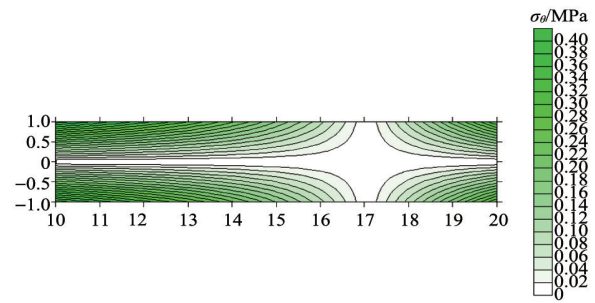


图 4 正应力(周向)分布等值线图

Fig. 4 Contour map of circular normal stress distribution

由图 2 可知, 在同一纵面上, 夹层自由端剪应力为 0, 越靠近夹层根端剪应力越大; 在同一半径位置处, 夹层上下端面剪应力为 0, 越靠近夹层中面剪应力越大。最大剪应力发生在夹层根端的中面上。

由图 3 可知, 在同一纵面上, 夹层自由端正应力为 0, 越靠近夹层根端(固支端)正应力越大; 在同一半径位置处, 夹层中面正应力为 0, 越靠近夹层上下端面正应力越大(上端面为径向拉伸正应力, 下端面为径向压缩正应力)。最大正应力发生在夹层根端(固支端)的上下端面上。

由图 4 可知, 在同一纵面上, 存在着正应力为 0 的一点, 自该点开始, 越靠近夹层内外边界(自由端与固支端)正应力越大; 在同一半径位置处, 夹层中面正应力为零, 越靠近夹层上下端面正应力越大。最大正应力发生在夹层自由端的上下端面上(上端面为周向拉伸正应力, 下端面为周向压缩正应力)。

3 夹层稳定性分析

1) 基于以上计算实例, 综合各应力分布图, 比较各应力分量最大值可以看出: 正应力(径向)最大, 正应力(周向)次之, 剪应力最小。

2) 当最大正应力(径向)首先达到极限值时, 将在夹层根端(固支端)发生径向拉伸破坏, 设正应力(径向)极限值为 $[\sigma_r]$, 则夹层坍塌条件可写为

$$\sigma_{r_{max}} \geq [\sigma_r] \quad (11)$$

3) 当最大正应力(周向)首先达到极限值时, 将在夹层末端(自由端)首先发生周向拉伸破坏。设正应力(周向)极限值为 $[\sigma_\theta]$, 则夹层坍塌条件可写为

$$\sigma_{\theta_{max}} \geq [\sigma_\theta] \quad (12)$$

当最大剪应力首先达到极限值时, 将在夹层根端(固支端)发生剪切破坏。设剪应力极限值为 $[\tau]$, 则夹层坍塌条件可写为

$$\tau_{max} \geq [\tau] \quad (13)$$

以上各应力分量极限值应根据相应的力学实验给出。根据本文所建模型, 结合上述分析, 可求得溶腔内夹层发生坍塌的可能位置, 仍以第 2 节计算实例中金坛储气库溶腔夹

层进行稳定性分析,计算不同厚度条件下的夹层发生坍塌的位置,夹层厚度分别取1、2、3、4、5、6 m,最大正应力(径向)极限值设为1.5 MPa,其他数据与第2节计算实例相同,所得不同厚度夹层发生坍塌的位置分别为17.6, 21.4, 24.6, 27.5, 30.1, 32.5 m。分析可知,在其他参数相同的条件下,对于厚度越大的夹层,发生坍塌的跨度也越大,即在溶腔建造过程中,越厚的夹层,越难坍塌,这已为工程实践所证明。

4 结论

针对层状盐岩地层水溶造腔过程中不溶性夹层的破坏坍塌现象,建立了夹层力学模型,应用小挠度薄板弯曲理论进行求解,根据求解结果得到夹层剖面内各应力分量的分布规律,并对夹层破坏坍塌条件进行分析,给出一种计算夹层极限跨度的方法。根据实例计算结果可知:不溶性夹层最大剪应力发生在夹层根端的中面上,最大正应力(径向)发生在夹层根端(固支端)的上下端面上,最大正应力(周向)发生在夹层自由端的上下端面上(上端面为周向拉伸正应力,下端面为周向压缩正应力),对于厚度越大的夹层,发生坍塌的跨度也越大,即在溶腔建造过程中,越厚的夹层,越难坍塌。研究成果为盐穴储气库水溶造腔过程中夹层破坏坍塌的预测提供了理论依据和有效的计算方法。

参考文献(References)

[1] Thoms R L, Gehle R M. A brief history of salt cavern use[C]//The 8th World Salt Symposium. Amsterdam: Elsevier, 2000, 2: 207-214.
[2] 杨春和, 梁卫国, 魏东吼, 等. 中国盐岩能源地下储存可行性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(24): 4409-4417.
Yang Chunhe, Liang Weiguo, Wei Donghou, et al. Investigation on possibility of energy storage in salt rock in China[J]. Chinese Journal of

Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(24): 4409-4417.
[3] 王清明. 盐类矿床水溶开采[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
Wang Qingming. Solution mining in salt deposit[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003.
[4] Li Y P, Yang C H, Qu D A. Experimental research on deformation and failure characteristics of laminated salt rock[C]//Proceedings of the 6th Conference on the Mechanical Behaviors of Salt. London: Taylor & Francis Group, 2007.
[5] Bauer S J, Ehgartner B L, Levin B L, et al. Waste disposal in horizontal solution mined caverns: considerations of site location, cavern stability, and development considerations[C/OL]. [2014-01-12]. <http://web.ead.anl.gov/saltcaverns/doc/horizontalsolmincav.pdf>.
[6] 班凡生, 袁光杰, 申瑞臣. 多夹层盐穴腔体形态控制工艺研究[J]. 石油天然气学报, 2010, 32(1): 362-364, 390.
Ban Fansheng, Yuan Guangjie, Shen Ruichen. Research on multi-interbed salt cavern shape control technology[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2010, 32(1): 362-364, 390.
[7] 施锡林, 李银平, 杨春和, 等. 盐穴储气库水溶造腔夹层垮塌力学机制研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3616-3620.
Shi Xilin, Li Yinping, Yang Chunhe, et al. Research on mechanical mechanism of interlayer collapse in solution mining for salt cavern gas storage[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3616-3620.
[8] 施锡林, 李银平, 杨春和, 等. 卤水浸泡对泥质夹层抗拉强度影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 29(11): 2301-2308.
Shi Xilin, Li Yinping, Yang Chunhe, et al. Test study on influence of brine to tensile strength of muddy intercalation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 29(11): 2301-2308
[9] 徐秉业, 刘信声. 应用弹塑性力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
Xu Bingye, Liu Xinsong. Applied elastic and plastic mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1995.
[10] 梁昆淼. 数学物理方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
Liang Kunmiao. Method of mathematical physics[M]. Beijing: Higher Education Press, 1998.

(责任编辑 刘志远)

·学术动态·



韩启德与云南大学生交流学习和生活

2014年5月24日,第16届中国科协年会专项活动——“韩启德主席与云南大学生见面会”在云南大学举办。全国政协副主席、中国科协主席韩启德与来自云南大学、云南师范大学、云南中医学院、昆明医科大学、昆明理工大学等高校的师生,就当代大学生的人生观、价值观及大学生关心的就业、科技创新等话题进行面对面交流。

韩启德勉励大学生努力学习,树立远大理想和正确的人生观、价值观,为国家科技进步和社会发展贡献青春和智慧。

详见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35473/n35518/15660846.html>。