

盐岩地下储气库地表沉降风险失效概率的计算分析

张 宁¹, 张强勇², 向 文², 李术才², 贾 超², 刘 健²

(1. 解放军理工大学 爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 江苏 南京 210007; 2. 山东大学 岩土与结构工程中心, 山东 济南 250061)

摘要: 盐岩地下储气库在运营过程中, 因盐腔蠕变体积收缩引起地表沉降变形, 从而对盐矿区地面设施(如建筑物、桥梁、路基等)产生不良影响, 为了评估该影响, 建立盐岩地下储气库地表沉降风险失效概率的计算方法, 即: 首先通过数值计算获得盐岩储气库的体积收缩率, 然后通过 SRAKA SCHOBER 矿山法获得盐腔体积收缩引起的地表沉降, 并建立地表沉降风险功能函数表达式, 最后采用基于随机变量的蒙特卡洛方法可计算获得盐腔体积收缩引起的地表沉降风险失效概率。将该方法应用于金坛盐岩地下储气库, 有效获得储气库体积收缩引发的地表沉降对盐矿区地面建筑的影响, 为储气库区地面设施风险安全控制提供理论依据。

关键词: 岩石力学; 盐岩地下储气库; 蠕变体积收缩; 地表沉降; 风险失效概率

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2012)增 2 - 3757 - 06

CALCULATION AND ANALYSIS FOR FAILURE RISK PROBABILITY OF GROUND SETTLEMENT ON AREA OF SALT ROCK UNDERGROUND GAS STORAGE

ZHANG Ning¹, ZHANG Qiangyong², XIANG Wen², LI Shucui², JIA Chao², LIU Jian²

(1. State Key Laboratory for Disaster Prevention and Mitigation of Explosion and Impact, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China; 2. Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China)

Abstract: During the operation of salt rock underground gas storages, ground settlement would be generated due to the volume shrinkage of salt rock caverns, and that would made a negative impact on the facilities on the ground(such as buildings, bridges, roadbed, etc.). In order to assess the impact, the method for calculating the failure probability of ground settlement in the area of salt rock underground gas storage was established. Firstly, the volume shrinkage of the salt rock caverns was obtained by numerical calculation. Then the SRAKA SCHOBER mining method was used to obtain the surface settlement caused by the volume shrinkage, and the performance function of the risk was established. Finally, the failure risk probability of ground settlement can be calculated by Monte Carlo method based on random variables. The method was applied to the Jintan underground gas storage in salt rock, the impact of the facilities on the ground settlement was effectively accessed, and the theoretical basis for the safety control of the salt mine zone was also provided.

Key words: rock mechanics; salt rock underground gas storage; creep volume shrinkage; ground settlement; failure risk probability

收稿日期: 2011 - 10 - 31; **修回日期:** 2012 - 01 - 19

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2009CB724607); 国家自然科学基金资助项目(51209074); 中国博士后基金(2012M511189)

作者简介: 张 宁(1986 -), 男, 2007年毕业于山东大学土木工程专业, 现为博士后, 主要从事于盐岩地下储库风险评估方面的研究工作。E-mail: renfeng1986@qq.com

1 引言

盐岩具有较低的渗透性、损伤的自我修复能力和良好的蠕变性，使盐岩成为能源储备的理想介质，利用深部盐穴进行能源地下储备得到国际上的广泛认可。较欧美各国而言，我国盐岩地层具有埋深浅、盐层薄、夹层多、品位低等特点，导致我国盐岩储气库建造运营风险较高^[1]，为保障人民生命财产安全，对盐岩储气库进行风险评估和调控势在必行。

地表沉陷事故是盐岩地下储备库在建设和运营过程中引发的常见事故，其影响范围较大，会造成地面出现不均匀降低，导致建筑物开裂、路基下陷、地下管道和桥梁破裂，还会引起民众恐慌，造成不良的社会影响，因此，有必要对盐岩地下储库因盐腔蠕变体积收缩引起的地表沉降进行风险评估和分析。工程风险评估方法主要分为定性风险评估方法和定量风险评估方法，在定量风险评估方法(如故障树法、事故树、贝叶斯神经网络等方法)中，量化失效概率是进行风险评估的主要内容之一。在盐岩储库风险方面，贾超等^[2]曾对盐岩储气库运营期时变可靠度进行了计算分析，得出了储库可靠指标随时间的变化规律及风险发生水平，拟合出满足工程可靠度要求的体积收敛率限值与储气内压的关系式。李媛等^[3]通过故障树的方法对盐岩地下油气储库运营期风险进行了定性的研究，对储库运营期的风险因子进行了辨识。井文君等^[4]采用基于事故统计的方法对盐岩地下油/气储库风险进行了评价，得到了储备库重大事故的发生概率、风险等级、事故类型以及引发事故的主要原因。目前为止还没有学者对盐岩地下储气库地表沉降风险失效概率进行研究。为评估盐腔体积收缩引起的地表沉降对盐矿区地面建筑产生的不良影响，本文建立了盐岩地下储气库地表沉降风险失效概率的计算分析方法。

2 盐腔收敛体积计算方法

盐岩储气库在构造应力的作用下，盐岩储气库发生蠕变变形，使储气库产生体积收敛。较强的收敛率必将引起储存库容积的减少。地表沉降值大小与盐腔体积收敛程度有关，因此在能源地下储气库运行过程中，盐岩的蠕变特性是评估储库安全运行稳态性的重要参数。盐岩的蠕变特性比较复杂，迄今对其做了大量的研究工作。研究表明，盐岩的蠕变与材料种类、载荷大小、性质以及所处的环境(温

度、湿度、围压)有关。在应力水平不太高的情况下，盐岩蠕变曲线总体上分成 2 个阶段：即初始蠕变阶段和稳态蠕变阶段。总结金坛盐岩、泥岩的试验资料，其蠕变本构方程^[5]可表示为

$$\varepsilon = \varepsilon_t + \varepsilon_{ss} \tag{1}$$

$$\varepsilon_t = A(1 - e^{-\alpha t}) \tag{2}$$

$$\varepsilon_{ss} = \beta \Delta \sigma^n t \tag{3}$$

式中： α ， β ， A ， n 均为盐岩流变参数； $\Delta \sigma = \sqrt{3/2 S_{ij} S_{ij}}$ ， S_{ij} 为偏应力； t 为时间； ε_t 为初始蠕变； ε_{ss} 为稳态蠕变； ε 为总蠕变。

式(2)表明：初始蠕变速率随时间增加而减少；恒温下，稳态蠕变速率与 Mises 等效应力成幂指数关系。根据梁卫国等^[6]研究，当围压达到一定水平(>3 MPa)后，盐岩的稳态蠕变速率随围压变化不明显。因此式(1)较好地反应了盐岩在三维应力状态下的蠕变特性，且形式简洁，便于数值计算采用，因此本文利用 FLAC^{3D}内嵌的 Fish 语言编写上述模型程序，并相应计算盐岩地下储库的体积收敛。

3 地表沉降预测方法

F. Schober^[7]认为，地下各种矿层被开采后都会留有开采空间，而地表下沉则是开采空间向地表传播扩散的结果，开采空间的存在就是引起地表下沉的根源。矿层开采引起的地表下沉传播影响可用图 1 来描述，图 1 中： β 为影响角， r_u 为影响半径， r_0 影响内径， Z_0 为盐穴顶部距地面的高度， Z_u 为盐穴底部距地面的高度。开采引起的地表下沉函数^[8]可表达为

$$S(X, Y, Z) = \iiint_{\Omega} Q(\xi, \zeta, \eta) F(X, Y, Z) d\Omega \tag{4}$$

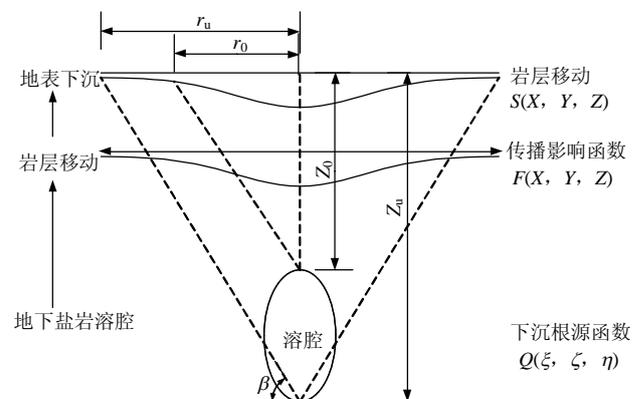


图 1 盐岩地下储气库引起的地表下沉传播影响图
Fig.1 Influence diagram of ground settlement caused by volume shrinkage of salt rock underground gas storage

为了预测开采引起的地表下沉，就应分别研究下沉根源函数 $Q(\xi, \zeta, \eta)$ 和下沉传播影响函数 $F(X, Y, Z)$ 以及开采空间 Ω 的几何形状。下沉根源函数有着明确的物理意义，因下沉的机制不同而不同，对它的研究要针对具体的开采对象和地质采矿条件。

设盐腔原始体积为 V_0 ，地表最终下沉后的体积为 V_S^{Ende} ，则盐腔的体积收敛率 λ 为

$$\lambda = \frac{V_S^{Ende}}{V_0} = \frac{\frac{1}{3}\pi r_u^2 S_{max}^{Ende}}{V_0} \quad (5)$$

由图 1 可以得到以下关系：

$$r_z = \sqrt{Z_0 Z_u c \tan^2 \beta \left(\frac{Z_0 - Z}{Z_0}\right)^n \left(\frac{Z_u - Z_0}{Z_0}\right)^n} \quad (6)$$

式中： n 为与覆岩性质有关的变形传递系数， Z 为垂直距离变量。

因此当 $n=1$ ， $Z=0$ 时，水平半径则可表示为

$$r_z = r_u = \sqrt{Z_0 Z_u c \tan \beta} \quad (7)$$

由式(5)得

$$S_{max}^{Ende} = \lambda \frac{3V_0}{\pi r_u^2} = \lambda \frac{3V_0}{\pi Z_0 Z_u} \tan^2 \beta \quad (8)$$

本文采用 Knothte 函数作为下沉影响传播函数，其表达式^[9]为

$$F(X, Y, Z) = \frac{1}{r^2} \exp\left(-\pi \frac{d^2}{r^2}\right) \quad (9)$$

其中，

$$d^2 = X^2 + Y^2$$

$$r = Z \cot \beta$$

根据地下盐岩开采空间的几何形状不同，选择合适的下沉根源函数，我国地下盐穴开采一般采用椭球形结构，因此本文中采用的盐腔单元开采体积表示为

$$dV = \pi B^2 \left[1 - \frac{(Z - Z_u)^2}{A^2}\right] dz \quad (10)$$

式中： A 为椭球的长半轴长度， B 为短半轴长度。

对式(4)的地表沉降正常预测模型进行坐标系转换，可得到

$$S(d) = S_{max}^{Ende} \int_{Z_0}^{Z_u} F(X, Y, Z) dV \quad (11)$$

将 dV 的具体表达式代入式(11)，就可以得到椭

球形盐腔收敛引起的地表下沉量的表达式为

$$S(d) = S_{max}^{Ende} \int_V F(X, Y, Z) dV = \lambda \frac{\pi B^2 V_0}{Z_0 Z_u} \int_{Z_0}^{Z_u} F(X, Y, Z) \left[1 - \frac{(Z - Z_u)^2}{A^2}\right] dZ \quad (12)$$

4 地表沉降风险失效概率计算方法

盐岩地下储库主要作用是调节城市能源供给，一般建设于城市郊区，因此盐岩地下储库上方的地面一般建设有各种公共设施，如建筑物、地下管道、桥梁和道路铁路交通设施等(见图 2)。

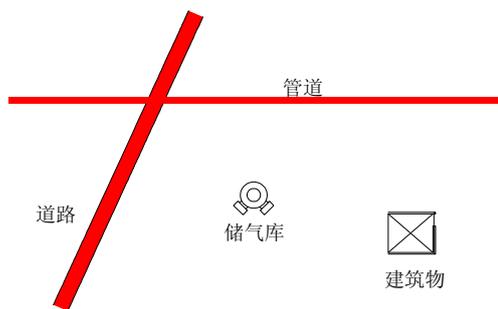


图 2 盐岩储库地表设施分布图
Fig.2 Distribution of facilities on the ground of salt rock underground gas storage cavern

盐岩储气库体积收缩引发的地面沉降将对地面构筑物产生不良影响，当不均匀沉降量达到一定值时会导致建筑物开裂、路基下陷、地下管道和桥梁破裂。因此根据式(12)可建立基于地表沉降的风险功能函数表达式：

$$G = S(d) - S_{max} \quad (13)$$

式中： $S(d)$ 为盐腔体积收缩引起的地表沉降计算值， S_{max} 为最大容许沉降量。

将式(13)作为功能函数，通过 MATLAB 编程，即可对盐岩地下储气库引发地表沉降的风险失效概率进行蒙特卡洛模拟。

5 工程应用

5.1 计算模型

将上述建立的盐岩地下储气库地表沉降风险失效概率的计算方法应用于江苏金坛盐岩地下储气库，选取计算范围：长 800 m、高 800 m、厚 800 m，计算范围内包含 2 层盐岩夹层，上部夹层厚 2.5 m，

下部夹层厚 3.0 m，顶板和底板各有 300 m 的泥岩层(见图 3)。盐腔为标准椭球体，长、短半轴分别为 70 和 30 m，位于盐岩层中间。盐腔顶部 900 m 上覆盖层厚度作为等效荷载施加在模型上。计算模型共剖分了 108 796 个单元，101 688 个节点，如图 4 所示。

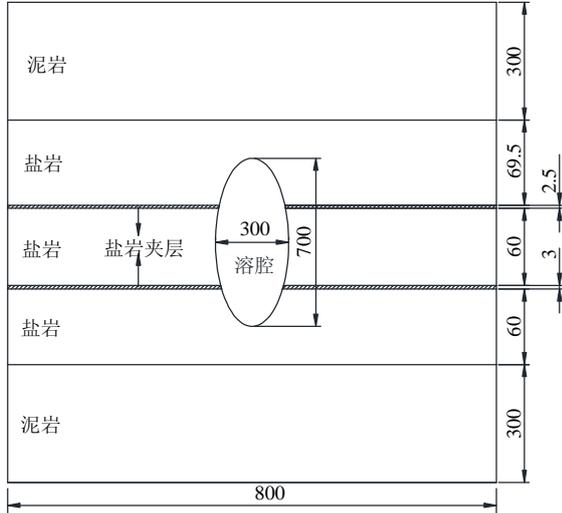


图 3 金坛盐岩储气库地层分布(单位: m)

Fig.3 Strata distribution of Jintan salt rock underground gas storage cavern(unit: m)

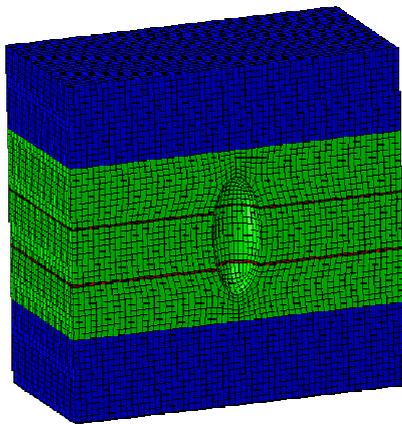


图 4 金坛盐岩储气库有限元模型

Fig.4 Finite element model of Jintan salt rock underground gas storage cavern

5.2 计算参数

盐岩、泥岩和盐岩夹层采用弹塑性流变模型进行计算，计算参数采用尹雪英等^[5]中数据。储库介质力学参数的统计分布根据材料力学试验结果并结合经验值确定(见表 1~3)。

盐穴矿区由于盐腔蠕变引起的地表沉降影响范围很大，但影响角较小，为 40°~45°，本文在计算中影响角近似取 43°。同时为计算盐岩地下储库蠕变收缩引起的地表沉降风险失效概率，假设在距离

表 1 储库介质弹性参数统计分布

Table 1 Elastic parameters and statistical distribution of storage medium

项目	弹性模量				泊松比			
	平均值/ GPa	变异 系数	标准 差	分布 类型	平均 值	变异 系数	标准 差	分布 类型
泥岩	10.0	0.1	1.0	正态	0.27	-	-	-
盐岩	18.0	0.1	1.8	正态	0.30	-	-	-
夹层	4.0	0.1	0.4	正态	0.30	-	-	-

表 2 储库介质塑性参数统计分布

Table 2 Plastic parameters and statistical distribution of storage medium

项目	黏聚力				内摩擦角			
	平均值/ GPa	变异 系数	标准 差	分布 类型	平均 值/(°)	变异 系数	标准 差	分布 类型
泥岩	1.00	0.10	0.10	正态	35	-	-	-
盐岩	0.50	0.10	0.05	正态	40	-	-	-
夹层	1.00	0.10	0.10	正态	40	-	-	-

表 3 储库介质流变参数统计分布

Table 3 Rheological coefficients and statistical distribution of storage medium

项目	A		n		β		α	
	盐岩	夹层	盐岩	夹层	盐岩	夹层	夹层	盐岩
平均值	1.542	3.084	3	3	2.64× 10 ⁻⁴	2.64× 10 ⁻⁴	0.153	0.153
变异系数	0.100	0.100	-	-	0.1	0.1	-	-
标准差	0.154	0.308	-	-	2.64× 10 ⁻⁵	2.64× 10 ⁻⁵	-	-
分布类型	正态	正态	-	-	正态	正态	-	-

盐岩储库 500 m 处有一建筑物，其容许最大沉降量 S_{max} 假设为 50 mm。

5.3 计算结果分析

(1) 盐腔体积收敛

通过前述模型和方法，利用 FLAC^{3D} 计算了盐岩地下储气库在 6, 8, 10, 12, 14, 16 MPa 气压下运营 20 a 内的盐腔体积变化，得到了盐腔体积收缩率随的时间变化曲线，如图 5 所示。

由图 5 可知：恒定内压下，盐岩地下储气库存在体积收缩。内压 6~16 MPa 下，盐腔体积收缩率为 2.475%~25.560%，且盐腔体积收缩率随着内压的增大而减小。

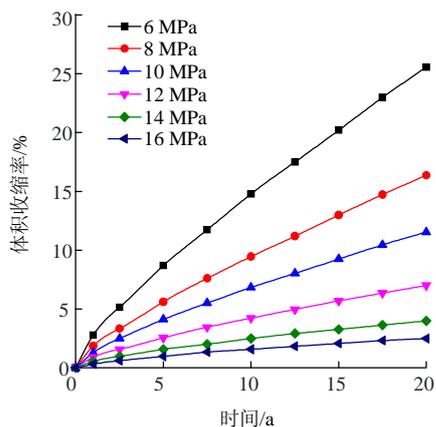


图 5 盐腔体积收敛率随时间变化曲线

Fig.5 Volume convergence ratios of salt rock caverns changing with time

通过图 5 所示的拟合曲线，可得到盐腔体积收缩率与时间和盐腔内压之间的关系表达式为

$$\frac{\Delta V}{V} = [\beta(20.38 - p)^n + \beta'(20.38 - p)^m]t + A(1 - e^{-at}) \quad (14)$$

式中： p 为盐腔内压； β' ， m 均为待定系数， $\beta' = -1.95 \times 10^{-2}$ ， $m=1$ 。

(2) 地表沉降预测

将数值计算所得盐腔体积收缩率代入沉降预测公式(式(12))，即可得到盐腔体积收缩引发的地表沉降量。图 6 为内压 6 MPa 下，储库运营 20 a 后的地表沉降形态，图 7 为沉降量等值线分布。

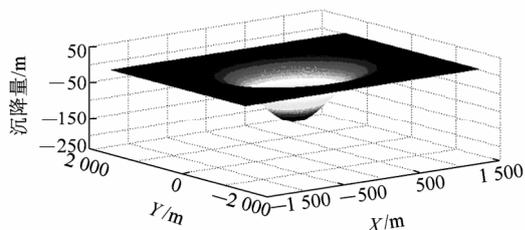


图 6 运营气压 6 MPa 下运营 20 a 后地表沉降形态
Fig.6 Settlement shape of ground after storage cavern operates for 20 years under pressure of 6 MPa

由图 6 可以看出，由于盐穴体积收缩，通过地层反应而形成地表变形，地表变形呈盆状。由图 7 可以看出，储库体积收缩造成的地表沉降范围较大，其影响半径在 1 000 m 左右，而最大地表沉降点位于储库正上方，其值为 155 mm。

(3) 地表沉降风险失效概率

考虑盐岩蠕变参数为随机变量，通过前述地表沉降风险失效概率计算方法可得到地表沉降风险失效概率。图 8 为不同储气库内压下，地表沉降随时间

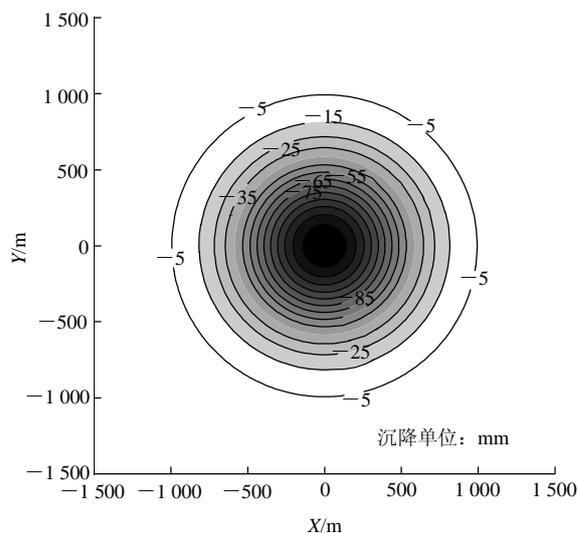


图 7 运营气压 6 MPa 下运营 20 a 后地表沉降等值线图
Fig.7 Contours of ground settlement after storage cavern operates for 20 years under pressure of 6 MPa

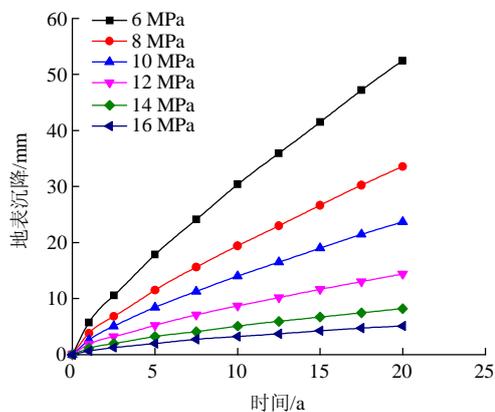


图 8 地表沉降随时间变化曲线
Fig.8 Ground settlement changing with operation time

变化曲线；图 9 为地表沉降风险失效概率随时间变化曲线。

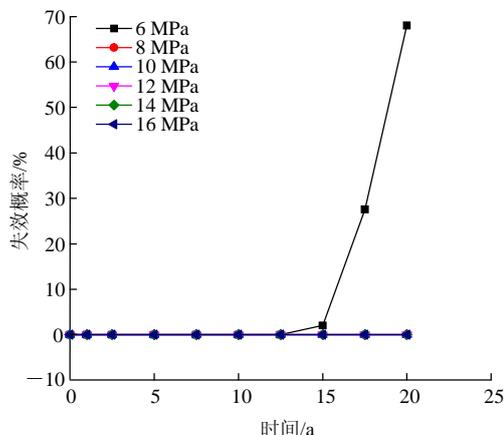


图 9 地表沉降风险失效概率随时间变化曲线
Fig.9 Failure risk probability of ground settlement changing with operation time

由图 8 可知: 地表沉降量随储气内压的增大而减小。如在气压 6 MPa 下, 储气库蠕变体积收缩引起的地表沉降量最大, 运营 20 a 后可达 52.5 mm。

根据高谦等^[10]的研究, 对于非承重自稳地下建筑体, 其容许失效概率为 11.5%, 这样由图 9 可知: 储库气压 6 MPa, 运营 17.5 a 后, 地表沉降风险失效概率超过该许可范围, 说明地表建筑将可能发生失效破坏。而当储气气压大于 8 MPa 时, 储库蠕变体积收缩引起的地表沉降风险失效概率接近 0。

6 结 论

本文把地表下沉视作开采空间向地表传播扩散的结果, 采用下沉根源函数和下沉传播影响函数的积分来预测地表下沉, 从而建立了盐腔体积收缩引起的地表沉降风险失效概率的计算方法, 将该方法应用于江苏金坛盐岩地下储气库, 计算表明: (1) 储库气压低于 6 MPa 时, 运营 17.5 a 后, 地表沉降风险失效概率超过许可范围, 地表设施将可能发生失效破坏, 当储库气压大于 8 MPa 运营时, 储库蠕变体积收缩引起的地表沉降风险失效概率接近于 0; (2) 储库设计压力为 6~16 MPa, 考虑平均运营压力为 11 MPa, 运营 20 a 后, 地表沉降风险失效概率在可容许范围之内; (3) 建立的地表沉降风险失效概率计算方法可为盐矿区地面设施风险安全控制提供了理论依据。

参考文献(References):

- [1] 贾超, 张强勇, 张宁, 等. 盐岩地下储气库风险分级机制初探[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3 621 - 3 626.(JIA Chao, ZHANG Qiangyong, ZHANG Ning, et al. Preliminary research of risk classification for underground salt rock gas storage[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3 621 - 3 626.(in Chinese))
- [2] 贾超, 刘家涛, 张强勇, 等. 盐岩储气库运营时期变可靠度计算及风险分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1 479 - 1 484.(JIA Chao, LIU Jiatao, ZHANG Qiangyong, et al. Time-variant reliability calculation and risk analysis for salt rock gas storage during operation time[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(5): 1 479 - 1484.(in Chinese))
- [3] 李媛, 张强勇, 贾超, 等. 盐岩地下油气储库运营期风险的故障树分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 1 125 - 1 130.(LI Yuan, ZHANG Qiangyong, JIA Chao, et al. Fault tree analysis of salt cavern storage during its operational period[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4): 1 125 - 1 130.(in Chinese))
- [4] 井文君, 杨春和, 陈峰. 基于事故统计分析的盐岩地下油/气储库风险评价[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1 787 - 1 793.(JING Wenjun, YANG Chunhe, CHEN Feng. Risk assessment of salt cavern oil/gas storage based on accident statistical analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(6): 1 787 - 1 793.(in Chinese))
- [5] 尹雪英, 杨春和, 陈剑文. 金坛盐矿老腔储气库长期稳定性分析数值模拟[J]. 岩土力学, 2006, 27(6): 869 - 874.(YIN Xueying, YANG Chunhe, CHEN Jianwen. Numerical simulation research on long-term stability of gas storage in Jintan Salt Mine[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(6): 869 - 874.(in Chinese))
- [6] 梁卫国, 徐素国, 赵阳升, 等. 盐岩蠕变特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 15(7): 1 386 - 1 390.(LIANG Weiguo, XU Suguo, ZHAO Yangsheng, et al. Experimental study on creep property of rock salt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 15(7): 1 386 - 1 390.(in Chinese))
- [7] SCHÖBER F. Die berechnung von bodenbewegungen fiber kaver nenanigen hohmiumenunter beachtung der globalen volumen konvergenz [Ph. D. Thesis][D]. Clausthal: TU Clausthal, 1982.
- [8] 姜岩, 田茂义. 石油与天然气开采引起的地表下沉预测[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2003, 22(6): 746 - 748.(JIANG Yan, TIAN Maoyi. Prediction of subsidence caused by exploiting oil and gas[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2003, 22(6): 746 - 748.(in Chinese))
- [9] 廖灿平. 采矿引起地表下沉及位移计算的模糊影响函数法[J]. 煤炭学报, 1993, 18(4): 25 - 35.(LIAO Canping. Fuzzy influence function method for calculation of surface subsidence and displacement[J]. Journal of China Coal Society, 1993, 18(4): 25 - 35.(in Chinese))
- [10] 高谦, 吴顺川, 万林海, 等. 土木工程可靠性理论及其应用[M]. 北京: 中国建材出版社, 2007: 267 - 268.(GAO Qian, WU Shunchuan, WAN Linhai, et al. Civil engineering reliability theory and application[M]. Beijing: Chinese Building Materials Press, 2007: 267 - 268.(in Chinese))