

文章编号: 1000-7598(2011)05-1479-06

盐岩储气库运营期时变可靠度计算及风险分析

贾 超¹, 刘家涛¹, 张强勇¹, 沈 鑫¹, 李术才¹, 刘 健¹, 杨春和²

(1. 山东大学 土建与水利学院, 济南 250061; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘 要: 盐岩是一种典型的流变性材料, 其蠕变特性对建于其中的储库稳定性具有重要影响, 储库可靠性具有明显时变特性。虽然在盐岩的蠕变力学特性及其变形特性方面, 前人已做了大量的研究工作, 但国内外在基于随机力学理论的盐岩储备库时变可靠度风险分析方面的研究尚不多见。以国内某盐岩地下储气库为例, 建立了相应的可靠度计算功能函数, 开展储气库运营期时变可靠度计算及储库风险分析研究。以储库的蠕变体积收缩率为风险控制指标, 采用响应面法结合 Monte-Carlo 抽样, 对储气库进行设计运营期内不同内压条件下蠕变随机力学计算, 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库内压的关系式, 并探讨了储气库可靠性对主要随机因素的敏感性, 结论可为盐岩地下储气库的安全运行和后期维护提供理论依据。

关 键 词: 盐岩储气库; 蠕变; 随机力学; 时变可靠度; 风险; 体积收敛率限值; 数值模拟

中图分类号: TE 122.2

文献标识码: A

Time-variant reliability calculation and risk analysis for salt rock gas storage during operation time

JIA Chao¹, LIU Jia-tao¹, ZHANG Qiang-yong¹, SHEN Xin¹, LI Shu-cai¹, LIU Jian¹, YANG Chun-he²

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: As salt rock is a typical rheological material, creep property has a significant influence on stability of the underground storage, and the reliability has strong time-variant property. Although much work had been done on the mechanical property and deformation characteristic of salt rock, utilizing stochastic mechanical theory in time-variant reliability risk analysis of salt rock storage was scarcely published all over the world. The reliability function is established to calculate the time-variant reliability and analyze the risk of an underground salt rock gas storage in China. Taking volumetric shrinkage as a risk controlling criterion, and adopting response surface and Monte Carlo methods, creep stochastic mechanical calculations under different intrinsic pressures have been done on the storage during service period; laws of reliability index with time and risk level are obtained; and the equation between volumetric shrinkage limitation within reliability requirements and intrinsic pressure of the storage is fitted. Major random parameters sensitivity to reliability index are further discussed. Some useful conclusions are finally obtained, which could provide scientific basis for the storage safety operation and maintenance.

Key words: salt rock storage; creep; stochastic mechanics; time-variant reliability; risk; volumetric shrinkage limitation; numerical simulation

1 引 言

能源储备是国家重大战略需求, 盐岩由于具有低渗透特性和良好的蠕变行为, 已成为能源储存的理想介质, 利用深部盐岩洞穴进行能源地下储备成为国际上广泛认可的能源储备方式, 目前我国已经开始大规模兴建盐岩能源地下储库群。尽管相对于

其他地下能源存储介质, 盐岩地下能源储备库具有较好的安全性、适用性和耐久性, 但总结近 30 年来国外盐岩地下储库使用状况可见灾难性事故时有发生, 经常出现地表沉陷、油气渗漏、腔体垮塌和体积丧失等严重灾害, 对周围的环境和人民生活造成了重要影响, 也给储库的安全运行带来了灾难性后果^[1]。因此, 开展盐岩地下油气储库(群)的风险

收稿日期: 2010-08-02

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)(No. 2009CB724607); 山东大学自主创新基金资助项目(No. 2009TS092)。

第一作者简介: 贾超, 男, 1976 年生, 博士后, 副教授, 主要从事工程可靠度风险分析方面的研究工作。E-mail: jiachao@sdu.edu.cn

分析, 研究其可靠度及风险水平在设计使用期内的变化规律具有重要意义。

目前, 国内外众多专家学者对可靠度在地下洞室工程中应用进行了卓有成效的研究, 如 Celestino^[2]对洞室围岩支护结构的可靠度进行研究; Kwangho You 等^[3]对地下洞室的风险分析进行了初步研究; Antanas Kudzys^[4]对洞室群系统的安全性进行了可靠度评价; 刘东升^[5]将地下洞室围岩视为随机不确定系统, 通过引入单元屈服的可靠度判据, 计算出了在不同目标可靠度情况下的围岩概率塑性区和相应的体系可靠度; 刘宁等^[6]研究了地应力渗流作用下地下洞室可靠度的计算方法, 进行了地下洞室围岩可靠度的敏感性计算, 开发了地下洞室三维非线性随机有限元程序; 黄宏伟等^[7]对隧道及地下工程建设中的风险管理进行了研究。然而, 将工程随机可靠度理论应用于地下盐岩储气库风险分析方面尚未见相关报道, 对储备库开展基于随机场理论的可靠度计算及风险评估研究较少。同时, 由于盐岩具有良好的蠕变特性, 随着使用时间的增长, 该特性对盐岩地下储备库的抗力和使用效率具有重要影响, 其可靠度具有明显的时变性, 国内外开展该方面的研究成果更为鲜见。

近些年来, 国内外越来越重视对工程在其设计运营期内可靠度变化规律的研究。因此, 基于盐岩的蠕变特性和随机力学理论, 开展盐岩地下储气库设计运营期内不同储气内压条件下的蠕变随机力学计算, 分析可靠度随时间的变化规律, 找出影响储备库时变可靠度的主要风险因子, 并为储备库的安全运行和后期维护提供理论依据十分必要和具有重要现实意义。本文在考虑盐岩蠕变特性的基础上, 建立了以盐岩地下储气库体积收缩率为表达形式的功能函数, 探讨了盐岩地下储气库蠕变变形特性及其时变可靠度风险变化规律, 是进行盐岩地下储气库随机分析的有益探索。

2 蠕变机制及时变可靠度计算方法

2.1 盐岩储气库蠕变机制

盐岩的蠕变变形很大, 一般盐岩的总变形包括 3 或 4 部分: 弹性变形、初始蠕变变形、稳定蠕变变形和可能的加速蠕变变形。在长期变形的情形下, 弹性变形、初始蠕变变形与稳定蠕变变形相比很小; 通常情况下加速蠕变变形所经历的时间极短, 在工程上可以不考虑, 因此, 盐岩的蠕变特性可用稳态蠕变率来衡量。Durup^[8]选用 Norton Power 模型描述盐岩的稳态蠕变率。Norton Power 本构模型中, 盐

岩蠕变由 Mises 应力 $q = \sqrt{3J_2}$ ($J_2 = 1/2 S_{ij} S_{ij}$ 为应力偏量第 2 不变量) 激活, 其稳态蠕变率由下式计算:

$$\dot{\varepsilon}_{cr}^s = A_1 q^n \quad (1)$$

式中: A_1 、 n 为材料参数。

根据 Mises 应力定义及蠕变流动法则, 盐岩稳态蠕变率的张量形式有:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^s = \dot{\varepsilon}_{cr}^s \frac{\partial q}{\partial s_{ij}} = \dot{\varepsilon}_{cr}^s \frac{3}{2} \frac{S_{ij}}{q} \quad (2)$$

2.2 时变可靠度计算方法及储气库失效准则

由于盐岩具有较强的流变性等特点, 因此, 储气库的失效是随时间变化的随机过程。这样将可靠度理论用于盐岩的风险估算时, 就必须考虑时间因素, 用随机过程描述其风险, 这种包括时间因素在内的结构可靠度模型称为时变可靠度模型。进行时变可靠度计算时, 某一极限状态的功能函数用随机过程表示为

$$Z(t) = g[R(t), S(t)] = R(t) - S(t) \quad (3)$$

式中: $R(t)$ 为结构抗力随机过程; $S(t)$ 为结构荷载随机过程, 为结构中一个荷载或多个荷载的线性或非线性函数。若采用 2 个综合变量抗力效应 $R(t)$ 和作用效应 $S(t)$:

$$\left. \begin{aligned} R(t) &= g_R(X_1, X_2, \dots, X_m) \\ S(t) &= g_S(X_{m+1}, X_{m+2}, \dots, X_n) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

设计基准期内结构的失效概率为

$$P_f(T) = P\{R(t_i) - Q(t_i) < 0, t_i \in [0, T]\} = P\{\min[R(t) - Q(t)] < 0, t \in [0, T]\} \quad (5)$$

可靠指标表示为

$$\beta_f = -\Phi^{-1}(P_f) = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} \quad (6)$$

结构抗力的随机不确定性主要表现在: 材料性能的不定性, 几何参数的不定性, 计算模型的不定性。构件的抗力采用非平稳随机过程模型, 任意时刻抗力 $R(t)$ 的概率密度函数可表示为

$$f_R(r, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\beta_{R_t} r} \exp\left\{-\frac{[\ln R - a_{R_t}]^2}{2\beta_{R_t}^2}\right\} \quad (7)$$

式中: a_{R_t} 、 β_{R_t} 为由抗力 $R(t)$ 的平均值 $\mu_R(t)$ 和标准差 $\sigma_R(t)$ 确定的参数。

盐岩储气库内压力与岩石原始应力存在差时,

盐岩就会发生蠕变使储气库体积产生收敛。实际上，任何盐岩储气库的体积都会因盐岩的蠕变产生收敛，因此，在层状盐岩中建设地下储存库必须从经济因素上考虑其收敛性，较强的收敛性必将引起储存库容积的减少，导致天然气储存库储存效率下降，当储存库的体积收敛超过某一极限值时，储存库就不再适合天然气储存。因此，层状盐岩中天然气地下储存库在运营过程中必须对体积收敛做出预测，分析储存库的长期储存能力。盐岩储气库的可用性准则是其体积收敛减少量不影响储存库的正常使用，引起的地面沉降不对地面构筑物产生过大的影响。因此，时变可靠度计算的功能函数即选择为盐腔体积收缩率的函数。定义为

$$G(X) = \frac{\Delta V_t(t)}{V_0} - t\xi(t, P_{inter}) = 0 \quad (8)$$

$$\Delta V_t(t) = \sum_{i=1}^K e_i(t) \quad (9)$$

$$e_i(t) = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z + \varepsilon_y \varepsilon_z + \varepsilon_x \varepsilon_y + \varepsilon_z \varepsilon_x + \varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_z \quad (10)$$

式中： V_0 为储气库初始体积； ΔV_t 为蠕变变形 t 时间后储气库体积变化量； ξ 为储气库体积收缩率限值，为时间 t 和储气库内压 P_{inter} 的函数； e_i 为单位体积的体积改变，即体积应变，只考虑微小的应变，式(10)中 3 个应变分量的乘积项略去不计^[9]。

进行时变可靠度分析，需要确立结构性能退化函数和结构可靠度功能函数之间的关系，而这一关系往往难以得到显式的表达。对于上述功能函数在特定时间点的可靠度计算，本文采用有限元软件 ANSYS 中提供的响应面法^[10-13]，输入各随机变量在特定时间点的随机值，拟合结构正常使用极限状态响应面，然后在拟合的响应面上执行 Monte-Carlo 抽样，抽样次数为 1 000 000 次，具体计算方法可参考文献[14]，在此不累述。

3 储气库时变可靠度计算模型

3.1 数值计算模型

本文以江苏金坛盐岩地下储气库为计算算例，计算区域设定为一立方体，储气库地质剖面如图 1 所示，纵剖面包括 203.81 m 厚盐岩层及泥岩夹层，盐岩层上下各取 300 m 厚的泥岩层，计算剖面厚度共计 803.81 m，底面积为 800 m×800 m；库型选择椭球型腔体，长轴长为 75 m，短轴长为 32.142 8 m，长短轴比为 7/3，腔体体积为 3.246×10⁵ m³。根据反演分析，上覆岩层的重量简化为模型上表面的等效荷载 16 MPa，运营期储气库内压为 6~14.5 MPa，

计算工况取用的上限压力为 16 MPa。由于模型对称，仅取 1/4 部分进行数值建模，数值计算模型如图 2 所示。选用单元 solid187，共剖分单元 14 678 个，生成节点 21 334 个。

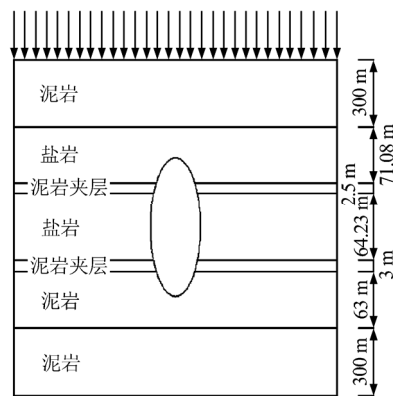


图 1 金坛盐矿储气库地质剖面示意图
Fig.1 Sketch of geological profile of Jintan salt rock gas storage

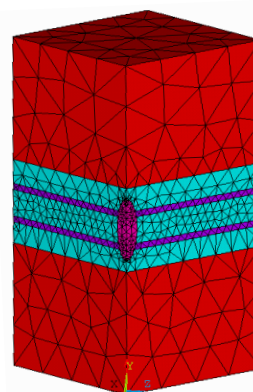


图 2 金坛盐矿储气库数值计算模型
Fig.2 The numerical model of Jintan gas storage

3.2 数值计算参数

蠕变分析中盐岩和泥岩夹层采用盐岩幂指数本构方程模型 $\dot{\varepsilon} = A\sigma^n$ (A 、 n 为材料参数)，泥岩采用经典 Maxwell 流变本构模型。根据文献[1]提供的金坛盐矿盐岩单轴、三轴试验及蠕变试验的结果，参考国外储气库计算所采用的参数及国内部分深层钻井盐膏岩反演计算的盐岩蠕变参数，确定盐岩和夹层岩石的蠕变参数如下：盐岩 $A = 6.0 \times 10^{-6} \text{MPa}^{-3.5}/\text{a}$ ， $n = 3.5$ ；夹层 $A = 12.0 \times 10^{-6} \text{MPa}^{-3.5}/\text{a}$ ， $n = 3.5$ ；金坛储气库数值计算模型选用物理力学参数见表 1。山东大学针对金坛盐岩储库介质材料做了 400 组相似试块室内物理力学试验^[15]，根据试验结果进行初步统计分析，认为储库介质力学参数近似服从正态分布；在一段相对稳定的运营期内假定模型顶部压力

及腔体内压服从均匀分布。材料随机输入变量及其分布参数如表 2 所示。

表 1 金坛储气库介质物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters for the numerical calculation of Jintan gas storage

| 地层 | 弹性模量 / GPa | 泊松比 | 密度 / (kg/m ³) | 抗拉强度 / MPa |
|------|------------|------|---------------------------|------------|
| 泥岩 | 10 | 0.27 | 2 650 | 1.0 |
| 盐岩 | 18 | 0.30 | 2 300 | 1.0 |
| 泥岩夹层 | 4 | 0.30 | 2 650 | 0.5 |

表 2 储气库可靠度计算随机变量及分布特性参数

Table 2 The input stochastic variables and distribution parameters

| 随机变量 | 平均值 | 变异系数 | 标准差 | 分布形式 | |
|------------|------------|-------|-------------|-------|------|
| 弹性模量 / GPa | 泥岩 | 10.00 | 0.10 | 1.000 | 正态分布 |
| | 盐岩 | 18.00 | 0.10 | 1.800 | 正态分布 |
| | 夹层 | 4.00 | 0.10 | 0.400 | 正态分布 |
| | 泥岩 | 0.27 | 0.07 | 0.019 | 正态分布 |
| 泊松比 | 盐岩 | 0.30 | 0.07 | 0.021 | 正态分布 |
| | 夹层 | 0.30 | 0.07 | 0.021 | 正态分布 |
| | 顶部压力/ MPa | 16.00 | 0.08 | 1.280 | 均匀分布 |
| 腔体内压/ MPa | 6.00~16.00 | 0.10 | 0.600~1.600 | 均匀分布 | |

4 盐岩储气库数值模拟结果分析

本文选用有限元软件 ANSYS 进行储气库的蠕变数值模拟及时变可靠度计算，初始地应力只考虑介质的自重应力，忽略其构造应力。对该洞形盐岩储气库分别模拟了储气内压为 6、10、14.5、16 MPa 工况时的长期流变效应并计算了储气库时变可靠度。

4.1 流变效应模拟结果

盐岩在储气库运行初期表现出比较明显的流变现象，储气库运行 1 年后腔体顶部的位移随时间的变化如图 3 所示。随着储气内压的增大，盐岩的稳态蠕变率减小，进入稳态蠕变的时间就越长，腔周的最大位移和腔体体积收缩率也明显减少。表 3 列出了储气库在不同内压条件下运行 30 年后部分蠕变计算结果。

图 4 为储气库储气库体积收缩率随蠕变时间的变化关系。储气库运行 30 年后，腔体底部均出现隆起现象，高内压（16 MPa）较低内压（6 MPa）运行时，竖向最大隆起位移减少 92.6%，因此增加储气库在高内压的运行时间能够明显的改善储气库的变形和受力条件，有利于储气库的安全稳定运行，这与以前盐岩储气库流变效应计算得出的结论是一致的^[1]。

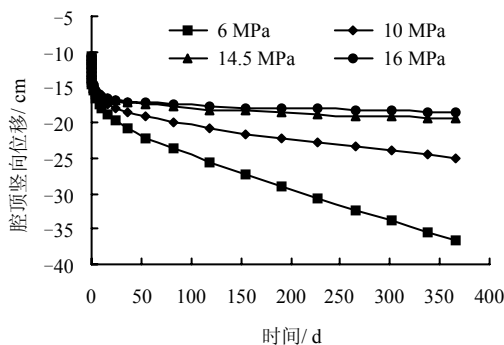


图 3 腔体顶部竖向位移随蠕变时间（1 年）变化关系曲线 Fig.3 The variation curves of vertical displacements at the top of the storage with creep time(1 year)

表 3 金坛储气库蠕变特性分析结果

Table 3 Creep property analysis results of Jintan gas storage

| 内压 / MPa | 洞周最大位移 / m | 体积收缩率 / % |
|----------|------------|-----------|
| 6.0 | 8.796 | 26.31 |
| 10.0 | 3.840 | 11.15 |
| 14.5 | 1.117 | 3.20 |
| 16.0 | 0.650 | 1.91 |

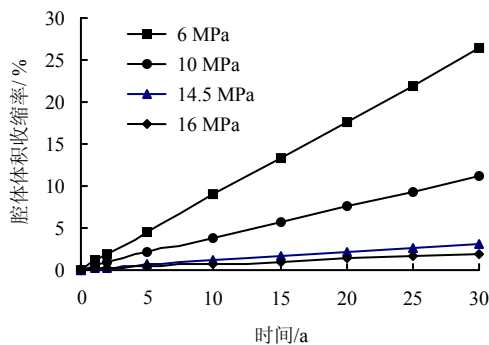


图 4 腔体体积收缩率随时间的变化关系曲线 Fig.4 The relation curves between volumetric shrinkage of the storage and creep time

4.2 储气库时变可靠度风险分析

图 5 为储气内压 6 MPa 时输出变量柱状图，抽样结果比较靠近分布函数曲线，表明模拟的次数足够。

在储气内压为 6 MPa 时，经过 30 年运行后，储气库可靠指标较低，这说明储库发生了较严重的变形，参考盐岩地下油气储库运营期风险分级表^[6]，该工况风险等级评定为Ⅲ级，属重度风险。合理增大储气内压并缩小低压运行时间，储气库可靠性明显提高，风险水平明显降低至可接受水平。各工况下，储气库运行 30 年后的可靠度及风险水平如表 4 所示。

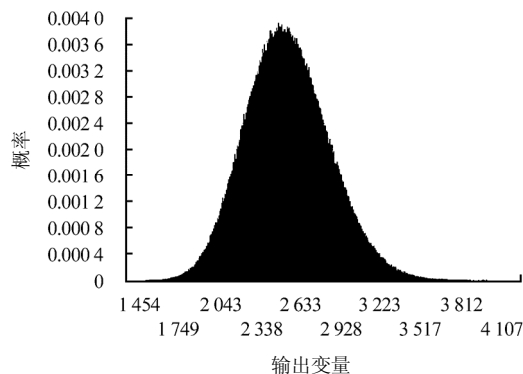


图 5 输出变量柱状图

Fig.5 The histogram of the output variable

表 4 储气库运营 30 年后可靠度计算结果及风险分析
Table 4 Reliability calculations and risk analysis of Jintan gas storage after 30 years

| 内压 /MPa | 失效概率 /% | 可靠指标 | 风险等级 | 风险水平 |
|---------|---------|-------|------|-------|
| 6.0 | 2.509 4 | 1.958 | III | 重度风险 |
| 10.0 | 0.782 4 | 2.417 | II | 轻度风险 |
| 14.5 | 0.361 6 | 2.686 | I | 可接受风险 |
| 16.0 | 0.172 2 | 2.925 | I | 可接受风险 |

图 6 为不同储气内压条件下，储气库时变可靠度变化曲线。可靠指标随储气库运营时间增加呈近似幂函数关系下降。储气库运行初期，储气内压对可靠指标影响较小，可靠指标为 4.02~4.27。储气库运行约 1 年后，可靠指标在低压运行时较高压运行时下降显著加快，这说明低压运行时，储气库性能随运行时间的增加退化比较显著。

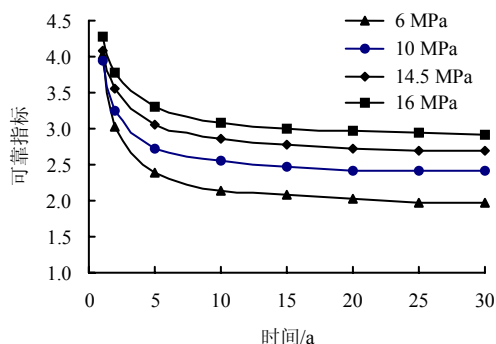


图 6 储气库时变可靠度变化曲线

Fig.6 The variation laws of the time-variant reliability

图 7 为储气库体积收缩失效概率随运行时间的变化曲线。盐腔体积收缩风险失效概率随储气内压的减小而显著增大。随着运营时间的增加，储库在低压阶段的体积收缩风险失效概率比在高压阶段的体积收缩风险概率要增长的快，因此合理控制储气低压和低压运行时间对保证储库运营安全和延长储库设计使用寿命十分重要。

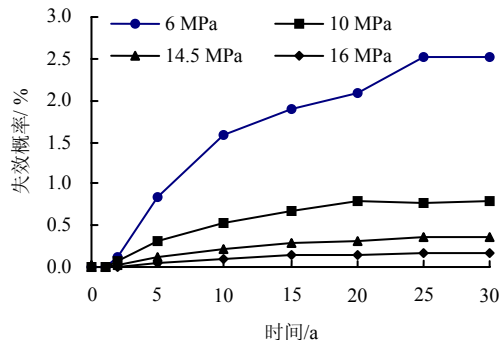


图 7 储气库失效概率随运行时间的变化曲线
Fig.7 The variation laws of failure probability of the storage with service time

本文根据储气库的可用性准则，将时变可靠度计算及风险评估的功能函数选择为盐腔体积收缩率的函数。借鉴延性结构破坏目标可靠指标^[13]，暂定储库运行初期目标可靠指标为 3.7；储库运行 30 年后，目标可靠度假定为不低于 95%。图 8 为储气库年体积收缩率限值与储气内压的关系图，并通过计算拟合出满足工程可靠度要求的储气库年体积收缩率限值与储气内压的关系，如式 (11) 所示，相关系数为 $R^2 = 0.999 9$ 。

$$\xi = -1.112 1 \ln(P_{inter}) + 3.355 1 \quad (11)$$

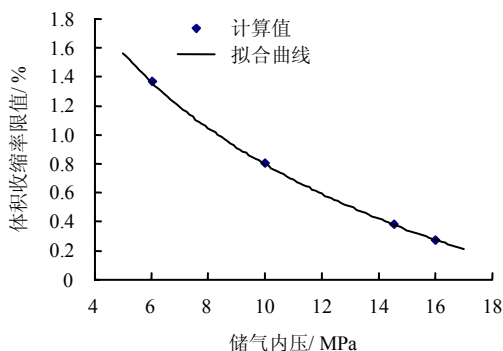


图 8 储气库年体积收缩率限值与储气内压关系图
Fig.8 The relationship between annual volumetric shrinkage limitation and intrinsic pressure

采用有限元软件 ANSYS 提供的 PDS 模块，可分析计算各随机输入变量对储库体积收缩率的灵敏度。灵敏度分析结果如图 9 所示，根据灵敏度分析结果可知，各随机输入变量对体积收缩率的灵敏度排序为：模型顶部压力、储气内压、盖层泥岩弹性模量、盖层泥岩泊松比、盐岩泊松比、盐岩弹性模量、夹层弹性模量、夹层泊松比。从图中可知，模型上覆岩层等效压力、储气内压、腔体泥岩盖层弹性模量对腔体的体积收敛有着较重要影响，因此，需要搞清楚储气库周围地层的水文地质情况，为储

备库建设提供准确的基本资料。

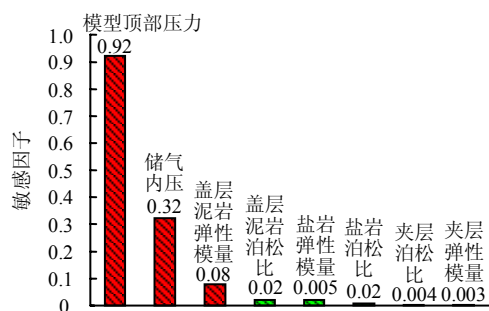


图9 储气库随机变量对储库体积收缩率的敏感因子的比较
Fig.9 Comparison between sensitivity factors of random variables and volumetric shrinkage of the storage

5 结论

(1) 金坛储气库在现有工程条件下, 在高储气内压运营时的失效风险概率远小于低压运营时的失效风险概率。

(2) 同一储气压力下, 储库的可靠指标随运行时间呈近似幂函数关系下降, 且储气压力越小可靠指标下降越明显。因此, 合理控制储气低压下限及低压运行时间对保证储库运营安全和延长储库设计使用寿命十分重要。

(3) 储库的埋深、储气内压及上覆岩层介质物理力学参数对储库的体积收缩有重要影响, 需搞清储库周围地层的水文地质情况, 为储库建设及安全运行提供准确的数据资料。

参考文献

- [1] 杨春和, 李银平, 陈峰. 层状盐岩力学理论与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [2] CELESTINO T B, AOKI N, SILVA R M. Evaluation of tunnel support structure reliability[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2006, 21: 311—318.
- [3] KWANGHO Y, YEONJUN P, LEE J S. Risk analysis for determination of a tunnel support pattern[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2005, 20: 479—486.
- [4] ANTANAS K. Reliability evaluation of idealized tunnel systems[J]. *Structural Safety*, 1993, 12: 241—242.
- [5] 刘东升. 基于弹塑性随机有限元的围岩稳定可靠度研究[D]. 重庆: 重庆建筑大学, 1996.
- [6] 刘宁. 可靠度随机有限元法及其工程应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- [7] 黄宏伟. 隧道及地下工程建设中的风险管理研究进展[J]. *地下空间与工程学报*, 2006, (2): 13—20.
HUANG Hong-wei. State of the art of the research on risk management in construction of tunnel and underground works[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2006, (2): 13—20.
- [8] DURUP J G. Long term tests for tightness evaluations with brine and gas in salt[R]. [S. l.]: [s. n.], 1994.
- [9] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 北京: 人民教育出版社, 1979.
- [10] 吴世伟. 结构可靠度分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 1990.
- [11] 叶勇, 郝艳华, 张昌汉. 基于 ANSYS 的结构可靠性分析[J]. *机械工程与自动化*, 2004, (6): 63—65.
YE Yong, HAO Yan-hua, ZHANG Chang-han. Structure reliability analysis in ANSYS[J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2004, (6): 63—65.
- [12] 徐军, 郑颖人. 可靠度响应面有限元及其工程应用[J]. *地下空间*, 2001, 21(5): 354—359.
XU Jun, ZHENG Ying-ren. Reliability response surface finite element and project application[J]. *Underground Space*, 2001, 21(5): 354—359.
- [13] 中华人民共和国行业标准编写组. GB 50513—2008 工程结构可靠度设计统一标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [14] 张伟. 结构可靠性理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [15] 张强勇, 刘德军, 贾超, 等. 盐岩油气储库介质地质力学模型相似材料的研制[J]. *岩土力学*, 2009, 12(30): 3581—3586.
ZHANG Qiang-yong, LIU De-jun, JIA Chao, et al. Development of geomechanical model similitude material for salt rock oil-gas storage medium[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 12(30): 3581—3586.
- [16] 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, 12(30): 3621—3626.
JIA Chao, ZHANG Qiang-yong, ZHANG Ning, et al. Preliminary research of risk classification for underground salt rock gas storage[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 12(30): 3621—3626.