

基于可靠度方法的盐岩地下储气库腔体收缩风险分析

井文君¹, 程林², 杨春和^{1,3}, 徐玉龙¹, 张玉军¹, 施锡林¹

(1. 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, 湖北 武汉 430071; 2. 中国石油西气东输管道公司, 上海 200122; 3. 重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 由于腔体收缩导致的储气库可用体积减少是盐岩地下储气库在运营阶段的常见风险类型之一, 严重时会造成腔体围岩破损甚至坍塌破坏, 引发重大事故灾害。针对盐岩地下储气库在运营过程中可能发生的腔体收缩事故, 通过力学分析推导出无限、理想盐岩体中恒定内压下球形腔体在盐岩稳态蠕变阶段的体积收缩率公式, 并结合腔体收缩风险的分级标准建立盐岩介质中球形腔体的体积收缩的极限状态方程; 然后通过可靠度分析法计算各参数为正态随机分布时腔体收缩各级风险的发生概率, 分析地应力与腔体内压差值与各级风险发生概率之间的变化规律; 最后讨论若将围岩的弹性变形、初始蠕变变形以及加速蠕变变形考虑在内时对计算结果的影响, 为我国盐岩储气库的运营管理提供理论参考。

关键词: 岩石力学; 风险分析; 盐岩地下储气库; 腔体收缩; 可靠度

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2012)增 2 - 3673 - 08

VOLUME SHRINKAGE RISK ANALYSIS OF SALT ROCK CAVERN GAS STORAGE BASED ON RELIABILITY METHOD

JING Wenjun¹, CHENG Lin², YANG Chunhe^{1,3}, XU Yulong¹, ZHANG Yujun¹, SHI Xilin¹

(1. *State Key of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China*; 2. *Petro China West East Gas Pipeline Company, Shanghai 200122, China*; 3. *Key Laboratory for Exploitation of Southwestern Resources and Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China*)

Abstract: Effective volume reduction resulted by cavern shrinkage is one of the common risk types in the operation phase of salt cavern gas storage. Cavern shrinkage risk will lead to damage or collapse of cavern wall rock, even serious accidents. Aimed at the possible cavern shrinkage risk during operation phase of salt cavern gas storage, volumetric shrinkage formula of steady state creep phase is derived on the condition of spherical cavern with constant internal pressure in the limitless and ideal salt rock. Combined with the cavern shrinkage risk classification of salt cavern gas storage, the limit state equation of cavern volume shrinkage is created. On the assumption that every random variable in the limit state equation follows normal distribution, probability of risk occurrence under different levels is calculated using reliability analysis. Then the change regularity of stress-difference between grostress and internal pressure and risk probability of every level is analyzed. Lastly, the elastic deformation, initial creep deformation and accelerated creep deformation are taken into consideration and the calculations result is discussed. The research results can provide theoretical reference for the operation

收稿日期: 2011 - 09 - 25; **修回日期:** 2011 - 11 - 26

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2009CB724602, 2009CB724603); 国家自然科学基金资助项目(41272391)

作者简介: 井文君(1986 -), 女, 2008年毕业于山东大学城市地下空间工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩土工程风险分析方面的研究工作。
E-mail: sdujwj@163.com

management of salt cavern gas storage.

Key words: rock mechanics; risk analysis; underground salt cavern gas storage; cavern volume shrinkage; reliability

1 引言

盐岩由于其低渗透性和良好的蠕变特性，在国际上被公认为是能源储备的理想介质。我国已在江苏金坛、湖北云应、河南平顶山等多个盐矿规划了单腔数量超过 100 的大型盐岩地下储备库群，其中江苏金坛已经开始建设并有部分已投入运营，最终将建成拥有 120 个单腔的大型密集储气库群。我国盐岩地下储库群大规模兴建已经开始^[1]。

盐岩良好的蠕变特性能够适应运营过程中存储压力的变化，使腔体有良好的稳定性，但同时也会导致腔周盐岩不断向腔内移动，储气库腔体的有效空间不断减少，称为腔体收缩事故。该类事故不仅会使储气库的使用价值和经济效益降低，严重时还可能引发腔体围岩坍塌破坏从而导致腔体失效或地表塌陷，造成巨大的经济损失。据统计，自 20 世纪 50 年代起国外有记载的盐岩地下储备库重大事故共有 28 起，其中由于腔体蠕变过量而引发的腔体失效事故和地面沉陷事故就有 8 起，占总事故数的 28.57%^[2]。因此，针对盐岩储气库进行腔体收缩规律以及相应的风险分析研究、有效地控制腔体的体积收缩率不仅可以有效降低储气库的建设成本、提高经济效益，更是储气库安全运营的需要。

目前在盐岩地下储备库的风险研究方面，国外主要集中在事故原因的分析上，以 D. J. Evans^[3]为首的英国地质研究协会在一份报告中对各类地下能源储备设施(包括盐岩地下储备库)进行了介绍和分析，并对地下能源储备设施中曾发生过的各类事故作了简要归纳总结，P. Berest 等^[4-6]曾分别对盐岩地下储备库的火灾爆炸类事故进行了分析，重点在事故原因上，总的看法基本一致，并指出尽管盐穴作为地下储库的安全性比地面结构优良，但事故仍不可避免；国内关于盐岩储库的风险研究刚刚起步，针对盐岩储库灾害分析的 973 项目《能源储备地下库群灾变机制与防护理论研究》已在储库群的可靠度分析和风险机制等方面取得了一些成果^[7-13]。总的来说，国内外在盐岩地下储备库的风险分析方面，研究还不够深入和系统，目前多停留在定性分析的层面上。但是，国内外专家、学者已经在在盐

岩的力学特性^[1, 14-17]、本构模型^[1, 18-20]、地下储库的可用性^[21]、稳定性^[22-23]等方面进行了大量研究，为开展盐岩地下储库的风险分析奠定了研究基础。因此，分析盐岩地下储库各类事故发生的力学机制、对各类事故的发生概率和后果损失进行定量评价是现阶段盐岩储库风险研究的关键问题。

本文以恒压运行条件下的球形腔体为例，在力学分析的基础上建立盐岩介质中球形腔体的体积收缩的极限状态方程，将可靠度分析法与风险理论相结合，在考虑各参数随机性的前提下分析腔体体积收缩各级风险的发生概率，并揭示相关规律，为指导我国盐岩地下储气库的运营和管理提供理论依据。

2 盐岩介质中球形腔体收缩的力学分析

2.1 力学模型建立

假定围岩体是无限大、均质、各向同性的理想流变介质——盐岩，岩体中的原始地应力为 p_0 。马林建等^[24]研究表明，由于盐岩具有良好的蠕变作用，岩层水平低应力不断增大直至与垂直地应力相等，最终使得深部岩体(433.2 m 以下)处于静水压力状态，因此模型(见图 1)中考虑地应力以均匀外压 p_0 作用于球形腔体的理想情况。岩体内瞬时开挖半径

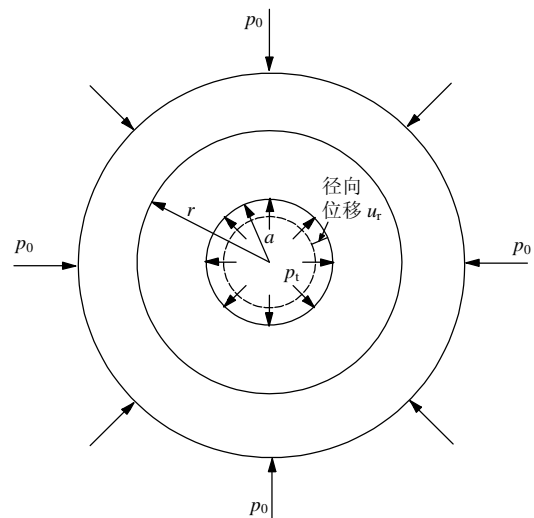


图 1 盐岩介质中球形腔体受力模型图
Fig.1 Mechanical model of spherical cavern in salt rock

为 a 的球形腔体，并同时在腔体内壁上作用均布的球形孔压力 p_t (p_t 可以是随时间变化的，本文将 p_t 视为储气库腔体在周期循环运行压力作用下的腔体内压均值，并假设为常量)。当 $p_t < p_0$ 时，球形腔体的围岩将先发生弹性变形，随着时间的推移逐渐进入蠕变变形期。盐岩的总变形量可划分为 4 个部分：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。在长期变形的情况下，弹性变形、初始蠕变变形与稳态蠕变变形相比很小^[1]，且初始蠕变阶段和加速蠕变阶段的时间很短。本文主要分析盐岩地下储气库长期运营期间的体积收缩风险，因此在腔体体积收缩率公式的推导过程中只考虑盐岩的稳态蠕变变形，用稳态蠕变率来衡量，而弹性变形、初始蠕变变形和可能的加速蠕变变形本节暂不考虑，在下文中再予以讨论。

2.2 基本方程及边界条件

球坐标系中围岩单元的应力状态见图 2。

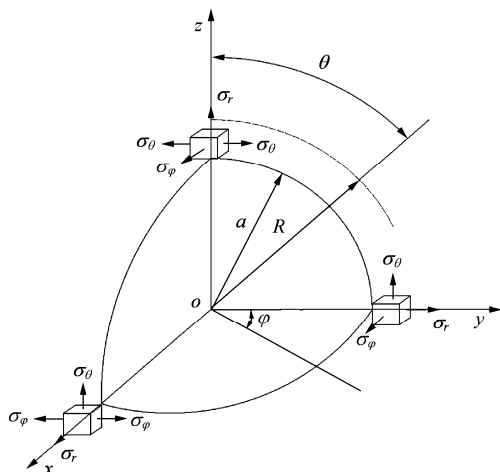


图 2 球坐标系中的围岩单元应力状态示意图

Fig.2 Element stress state of surrounding rock in spherical coordinate

该模型的几何形状、受力情况均对称于某一点 (设为原点)，为球对称问题，有如下关系： $u_r = u_r(r)$ ， $u_\theta = u_\phi = 0$ ， $\gamma_{\theta\phi} = \gamma_{r\phi} = \gamma_{r\theta} = 0$ ， $\tau_{\theta\phi} = \tau_{\phi\theta} = \tau_{r\phi} = \tau_{\phi r} = \tau_{r\theta} = \tau_{\theta r} = 0$ ，其余的应力分量和应变分量仅为 r 的函数，且 $\varepsilon_\theta = \varepsilon_\phi = \varepsilon_t$ ， $\sigma_\theta = \sigma_\phi = \sigma_t$ 。

则球坐标下应力张量和应变张量分别表示为

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_r & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_t & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_t \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \frac{du}{dr} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{u}{r} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{u}{r} \end{bmatrix} \quad (2)$$

采用球坐标的平衡微分方程为

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{2(\sigma_r - \sigma_t)}{r} = 0 \quad (3)$$

式中： σ_r ， σ_t 分别为径向应力和环向应力。

几何方程为

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{du_r}{dr} \\ \varepsilon_t &= \frac{u_r}{r} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中： u_r 为径向位移。

式(4)若以径向位移的时间导数表示则为

$$\left. \begin{aligned} \dot{\varepsilon}_r &= \frac{dv}{dr} \\ \dot{\varepsilon}_t &= \frac{v}{r} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中： v 为腔体径向位移的速度。

盐岩的稳态蠕变率符合 Norton Power 本构模型 的描述^[1]，盐岩蠕变由 Mises 应力 $q = \sqrt{3J_2}$ (J_2 为应力偏量第二不变量， $J_2 = 1/2 S_{ij} S_{ij}$) 激活，稳态蠕变率计算公式如下：

$$\dot{\varepsilon}_{cr} = Aq^n \quad (6)$$

式中： A ， n 均为材料常数。

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如下：

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{cr} \frac{\partial q}{\partial S_{ij}} = \dot{\varepsilon}_{cr} \frac{3}{2} \frac{S_{ij}}{q} \quad (7)$$

应力边界条件为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r(a) &= -p_t \\ \sigma_r(\infty) &= -p_0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中： p_0 为岩体中的初始地应力； p_t 为腔体内气体压力，以拉应力为正。

2.3 体积收缩率的解析表达式

由盐岩的蠕变本构方程式(7)可得

$$\left. \begin{aligned} \dot{\varepsilon}_r &= A(\sigma_r - \sigma_t)^n \\ \dot{\varepsilon}_t &= -\frac{1}{2} A(\sigma_r - \sigma_t)^n \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

则得到

$$\dot{\epsilon} = -2\dot{\epsilon} \quad (10)$$

由式(5)和(10)联立, 且令在腔体边缘(即 $r = a$ 处), 变形速率 $v = v_0$, 可得

$$v = v_0 \left(\frac{a}{r} \right)^2 \quad (11)$$

联立式(3), (5), (10), (11), 且考虑边界条件式(8)可推得

$$v_0 = -\frac{aA}{2} \left[\frac{3}{2n} (p_0 - p_t) \right]^n \quad (12)$$

则恒定内压下盐腔的年体积收缩率公式为

$$\frac{\dot{V}}{V} = -\frac{4\pi a^2 v_0}{\frac{4}{3}\pi a^3} = \frac{3}{2} A \left[\frac{3}{2n} (p_0 - p_t) \right]^n \quad (13)$$

式中: \dot{V} 为体积收缩量对时间的导数, 即年体积收缩量。在不考虑温度影响的条件下, 式(13)与 D. J. Evans^[3]提到的球形腔体体积收缩率公式相一致。

由式(13)可见, 除盐岩本身的蠕变特性外, 腔体收缩率的大小主要取决于地应力与腔体内压的差值 $p_0 - p_t$, 而不是单独由地应力 p_0 或腔体内压 p_t 控制。

3 基于可靠度理论的腔体收缩风险分析

3.1 腔体收缩风险等级划分

根据目前国际上普遍接受的标准, 认为当溶腔体积收缩达到 30% 时, 盐岩腔体丧失使用功能, 并可能发生储库垮塌破坏, 因此确定 30% 为最大可允许的溶腔体积收缩率。考虑一般储气库的可用性要求腔体运行 30 a 的体积收缩率不超过 30%, 将盐岩地下储气库在运营期的腔体收缩风险分为 4 级^[9], 等级划分见表 1。

表 1 盐岩储气库腔体收缩风险等级划分

Table 1 Cavern shrinkage risk classification of salt rock cavern gas storage

风险等级	风险后果	风险水平	风险描述	体积收缩率/%	年体积收缩率/%
I	可忽略	可接受	发生可接受的变形或损伤, 功能正常发挥	≤10	≤0.33
II	较轻	轻度	处于轻微变形损伤状态, 主要功能不受影响	10~20	0.33~0.67
III	较严重	重度	处于严重变形损伤状态, 主要功能受到损害	20~30	0.67~1.00
IV	非常严重	灾难性	可能发生储库坍塌破坏, 完全丧失储气功能	≥30	≥1.00

3.2 腔体收缩极限状态方程

根据推得的腔体年体积收缩率式(13)以及腔体收缩风险的等级划分, 建立盐岩腔体收缩的极限状态方程如下:

$$Z = g(X) = g(A, n, p_0, p_t) =$$

$$V_s - \frac{3}{2} A \left[\frac{3}{2n} (p_0 - p_t) \right]^n = 0 \quad (14)$$

式中: V_s 为年体积收速率限值, 由表 1 可知, 进入 I, II, III, IV 级腔体收缩风险的年体积收缩率限值分别为 0.00%, 0.33%, 0.67%, 1.00%。

极限状态方程表示 n 维基本随机变量空间中的 $n-1$ 维超曲面, 称为极限状态面或失效面。当 $Z > 0$ 时, 表示腔体收缩量未达到所定义的某一风险等级, 定义为可靠域, 概率用可靠概率 P_s 表示; 当 $Z = 0$ 时, 表示腔体收缩量恰好达到某一风险等级的限值; 当 $Z < 0$ 时, 表示腔体收缩量达到了某一风险等级, 可能引发相应的风险后果, 影响腔体的正常运行, 定义为失效域, 概率用失效概率 P_f 表示。

3.3 参数随机条件下的腔体收缩风险计算

结构可靠度分析的主要问题就是处理结构的随机信息以确定结构的失效概率。极限状态方程式(14)中包含 4 个基本变量, 分别为盐岩的蠕变计算参数 A, n , 原地应力 p_0 以及腔体内压 p_t 。以上 4 个基本变量均没有概率统计分析资料, 因此除平均值外, 标准差和变异系数均是笔者在理论分析基础上的假定值。

以某个地下 1 000 m 埋深处的球形腔体为例, 分析各参数为随机变量时的腔体收缩失效概率及其变化规律。蠕变参数以江苏金坛储气库盐岩蠕变试验结果为例, A, n 分别取 6×10^{-6} 和 3.5^[11], 根据试验结果和统计分析, 盐岩的蠕变计算参数 A 和 n 的取值集中、离散性较低, 标准差分别取 6×10^{-7} 和 0.35, 变异系数为 0.1; 腔体处的原始地应力值取上覆岩层自重约 23 MPa, 但考虑到这只是估计值, 且未考虑到腔体处的构造应力, 因此标准差取 4.6, 变异系数为 0.2; 腔体设计值内压分别取 8, 10, 12, 14, 16 MPa 五个工况进行计算分析, 但是在恒定内压条件下运行的储气库其一段时间内腔体的内压也是有小幅变化的, 取变异系数 0.1。假设以上 4 个基本变量均服从正态分布。各随机变量及分布特征参数选取见表 2。

表 2 储气库体积收缩可靠度计算随机变量及分布特征参数

Table 2 Random variable and distribution characteristics parameters of cavern shrinkage reliability computation

项目	$A(\text{MPa}^{-3.5} \cdot \text{a}^{-1})$	n	P_0/MPa	P_t/MPa
平均值	6×10^{-6}	3.50	23.0	8 10 12 14 16
变异系数	0.1	0.10	0.2	0.1
标准差	6×10^{-7}	0.35	4.6	0.8 1 1.2 1.4 1.6
分布形式	正态分布	正态分布	正态分布	正态分布

极限状态方程的梯度为

$$\nabla g(A, n, p_0, p_t) = \begin{bmatrix} -\frac{3}{2} \left[\frac{3}{2n} (p_0 - p_t) \right]^n \\ \frac{3}{2} A \left[\frac{3}{2n} (p_0 - p_t) \right]^n \\ -\frac{9}{4} A \left[\frac{3}{2n} (p_0 - p_t) \right]^{n-1} \\ \frac{9}{4} A \left[\frac{3}{2n} (p_0 - p_t) \right]^{n-1} \end{bmatrix} \quad (15)$$

采用通用性较强的设计验算点法^[25]计算腔体收缩的可靠度和失效概率。通过 Matlab 编程计算得到的腔体内压分别为 8, 10, 12, 14 以及 16 MPa 时, 即地应力与腔体内压差分别为 15, 13, 11, 9, 7 MPa 时腔体收缩风险等级为 I, II, III, IV 级的可靠指标及失效概率见表 3。

为验证计算结果的可信性, 保持表 2 中的其他数据不变, 只相应改变各参数分布的变异系数和标准差, 设计 2 组对比参数进行计算: 第一组 4 个参数的变异系数分别取值 0.05, 0.05, 0.10, 0.05, 标准差随之相应变化; 第二组 4 个参数的变异系数分别取值 0.15, 0.15, 0.30, 0.15, 标准差随之相应变化。计算结果表明: 随着各参数的变异系数的变化, 各级风险的发生概率值发生了变化, 但总体的风险发生条件和发展趋势变化不大, 且变异系数越小, 各级风险随地应力与腔体内压差值的变化趋势越显著。这说明变异系数和标准差的假定值对计算出的风险发生概率的具体值有较大影响, 但不影响腔体收缩各级风险发生条件、发展趋势的分析和预测, 满足初步分析的要求。

3.4 计算结果分析

分别从以下 2 个角度对计算结果进行分析, 总结出具有一般性的规律, 并对储气库运营和管理提出有利于降低风险发生概率的指导意见。

表 3 不同腔体内压设计值时腔体收缩的可靠指标和失效概率

Table 3 Cavern shrinkage reliability indices and failure probability under different internal pressures

腔体内压设计值 P_t/MPa	地应力与腔体内压差值 $(P_0 - P_t)/\text{MPa}$	风险等级	可靠指标	失效概率/%
8	15	I	-3.212 6	99.93
		II	-0.554 6	71.04
		III	0.108 2	45.69
		IV	0.618 0	26.83
10	13	I	-2.761 6	99.71
		II	-0.090 4	53.60
		III	0.605 3	27.25
		IV	1.164 0	12.22
12	11	I	-2.313 9	98.97
		II	0.367 4	35.67
		III	1.099 8	13.57
		IV	1.723 1	4.24
14	9	I	-1.871 8	96.94
		II	0.816 5	20.71
		III	1.590 5	5.59
		IV	2.305 1	1.06
16	7	I	-1.437 3	92.47
		II	1.254 8	10.48
		III	2.076 3	1.89
		IV	-	0.00

注: 失效概率表示储气库发生 I, II, III, IV 级腔体收缩风险的概率。

(1) 同一等级风险在不同的地应力与腔体内压差值下的发生概率分析(见图 3)。

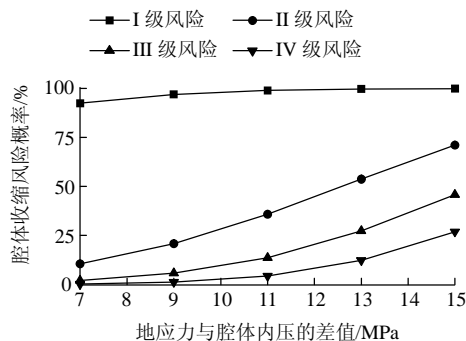


图 3 同一等级风险在不同的地应力与腔体内压差值下的发生概率图

Fig.3 Risk of the same level occurrence probability under different stress-differences between grostress and internal pressure

① 随着地应力与腔体内压差值的增大，腔体体积收缩每一等级风险发生的概率均逐渐增大，且 II, III 级风险的增大幅度较大，I 和 IV 级风险的增大幅度很小。

② 对于不同的地应力与腔体内压差值，发生 I 级腔体收缩风险的概率均在 90% 以上，属于极可能发生的风险，但该类风险不影响储气库正常功能的发挥，可不采取工程控制措施。

③ II 和 III 级腔体收缩风险的发生不影响储气库主要功能或对主要功能损害较小，应采取一定的工程控制措施，其发生概率随地应力与腔体内压差值的增大有较大幅度的增大。当该压力差值从 7 MPa 增大到 15 MPa 时，II 和 III 级风险的发生概率分别从 10.48% 和 1.89% 增大到 71.04% 和 45.69%，从可能发生的风险变为极可能发生的风险，说明在运营期间适当地减小地应力与腔体内压的差值，增大腔体的运行压力，可有效地控制腔体的收缩风险。

④ IV 级腔体收缩风险属于不可接受的风险。该类风险的发生会导致腔体功能失效或垮塌破坏，在地应力与腔体内压差值为 15 和 13 MPa 时的发生概率分别为 26.83% 和 12.22%。而在该应力差值为 11 MPa 或更小时，发生概率则均小于 5%，虽属于可能发生的风险，但发生概率大大降低了，因此储气库在运营期间应尽量使地应力与腔体内压差值保持在较低的范围，减小腔体的低压运行时间，从而降低腔体发生 IV 级收缩风险的概率。

(2) 相同的地应力与腔体内压差值下不同等级风险的发生概率分析(见图 4)。

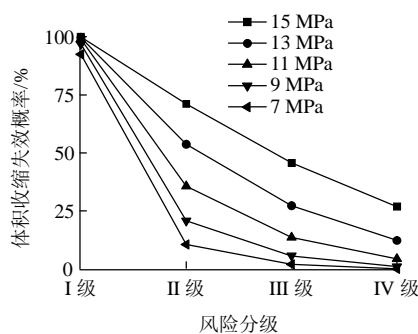


图 4 相同的地应力与腔体内压差值下不同等级风险的发生概率图

Fig.4 Risk of different level occurrence probabilities under the same stress-difference between ground stress and internal pressure

① 对于每一级腔体收缩风险，地应力与腔体内压差值越大，即腔体内压越低，其发生概率均越大。

② 地应力与腔体内压差值为 15 MPa 时，腔体收缩风险从 I 级到 IV 级的发生概率逐渐降低，可视为线性减小。该压力差值为 13, 11 和 9 MPa 时，I, II, III, IV 级腔体收缩风险的发生概率逐渐降低，但降低的速率逐次减小，即降低趋势越来越不明显。当地应力与腔体内压差值为 7 MPa 时，各级腔体收缩风险的发生概率也是逐渐降低，但主要是从 I 级风险到 II 级风险的发生概率下降明显，从 92.47% 降至 10.48%，而 III, IV 级风险的发生概率均小于 2%，可见在地应力与腔体内压差值较低，即腔体内压较高时，储气库发生较高腔体收缩风险的概率极低，有利于控制腔体收缩。

③ 用增大腔体内压、减小地应力与腔体内压差值的方法降低腔体收缩风险的发生概率是有效的，但主要针对 II, III 级和 IV 级风险效果显著。对于 I 级腔体收缩风险，只要腔体内压小于该处原地应力值，该类风险的发生概率极大，而 IV 级腔体收缩风险是应该极力避免的风险，在设计腔体的最小运行压力时就应该使其发生概率控制在可接受范围内。

4 讨论

进一步讨论考虑围岩弹性变形、初始蠕变变形以及加速蠕变变形对腔体体积收缩率的影响。

(1) 考虑弹性变形

假设腔体内压在腔体开挖完成后立即施加，腔周产生的瞬时弹性位移计算过程如下：

弹性本构方程为

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r^e &= \frac{1}{E}(\sigma_r^e - 2\mu\sigma_t^e) \\ \varepsilon_t^e &= \frac{1}{E}[(1-\mu)\sigma_t^e - \mu\sigma_r^e] \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

平衡方程和几何方程分别同式(3)和(4)，应力边界条件同式(8)。结合式(3)，(4)，(16)可得

$$\left. \begin{aligned} -\sigma_r^e &= p_0 + (p_t - p_0)\left(\frac{a}{r}\right)^3 \\ -\sigma_\theta^e &= p_0 - \frac{1}{2}(p_t - p_0)\left(\frac{a}{r}\right)^3 \\ u_r^e &= -\frac{1+\mu}{2E}(p_0 - p_t)\frac{a^3}{r^2} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

盐岩的弹性参数取 $\mu = 0.3$ ， $E = 13\ 000$ MPa，腔体内压取 $p_t = 8$ MPa，原地应力 $p_0 = 23$ MPa 时，腔周边缘 $r = a$ 处产生的弹性位移为

$$u_r^0 = -7.5 \times 10^{-4} a \quad (18)$$

弹性变形使腔体产生的体积收缩率为

$$\frac{\Delta V}{V} = -\frac{4\pi a^2 u_r^0}{\frac{4}{3}\pi a^3} = 0.00225 = 0.225\% \quad (19)$$

可见, 当地应力与腔体内压差值很大时, 由围岩弹性变形引发的体积收缩率相比于盐岩稳定蠕变引起的体积收缩率仍然很小。若将其考虑在腔体体积收缩率里面, 对每一级风险的发生概率影响很小, 可忽略不计。且一般来说, 该体积收缩部分在腔体水溶造腔期间便已基本完成, 不考虑在运营时期的腔体收缩量。

(2) 考虑初始蠕变变形

一般来说, 盐岩在初始蠕变阶段蠕变速率很大, 远大于稳态蠕变速率^[26], 盐岩变形很快。若是考虑盐岩的初始蠕变阶段, 在该时间段内围岩的初始蠕变速率大于稳态蠕变速率, 因此围岩的变形量也大于相同时间内以稳态蠕变速率计算得到的变形量, 腔体的体积收缩率应比计算值大, 腔体收缩风险概率也应大于计算值。但由于该阶段时间较短, 一般发生在水溶造腔期间, 因此对运营时期的腔体收缩影响不大。

(3) 考虑加速蠕变变形

一般盐岩储气库设计运行年限为 30 a, 在该年限内, 距腔周一定距离以内的围岩极有可能进入加速蠕变阶段。盐岩在该阶段内的蠕变速率迅速增大, 远大于其稳态蠕变速率。若将加速蠕变阶段考虑到腔体的体积收缩分析中, 则该情况下的腔体体积收缩率较前文理论计算值有所增大, 增加量的多少主要与腔体内压有关, 腔体内压越低, 腔周围岩进入加速蠕变阶段的时间越早, 围岩在加速蠕变阶段的变形时间越长, 变形量越大。相应的, 腔体围岩变形量增大, 腔体收缩各级风险的发生概率也会增大。

5 结 论

(1) 随着地应力与腔体内压差值的增大, 腔体体积收缩各等级风险发生的概率均逐渐增大, 可见降低地应力与腔体内压的差值可使每一级风险的发生概率降低。

(2) 对于不同的地应力与腔体内压差值, 发生 I 级腔体收缩风险的概率均在 90% 以上, 属于极可能发生的风险, 对于该类风险, 只要腔体内压小于岩体中原地应力值, 其发生几乎是必然的, 但该类风险不影响储气库正常功能的发挥, 可不采取工程防

护措施。

(3) II 和 III 级腔体收缩风险的发生概率随地应力与腔体内压差值的增大有较大幅度的增大, 从可能发生的风险变为极可能发生的风险, 因此用减小地应力与腔体内压差值的方法降低 II 和 III 级风险的发生概率效果显著。

(4) IV 级风险在地应力与腔体内压差值较大时, 属于可能发生的风险, 而在该应力差值较小时发生概率则接近于 0, 属于不可能发生的风险, 但该类风险会造成灾难性后果, 因此储气库在运营期间应尽量减小低压运行时间, 从而降低腔体发生 IV 级收缩风险的概率, 并且在设计腔体的最小运行压力时使其发生概率控制在可接受范围内。

(5) 考虑围岩弹性变形、初始蠕变变形以及加速蠕变变形对运营期储气库腔体体积收缩率的影响: 计算表明, 围岩弹性变形引起的腔体体积收缩率远小于稳态蠕变引起的体积收缩率, 且围岩的弹性变形和初始蠕变变形在漫长的储气库造腔阶段均已完成, 对运营期的腔体收缩变形影响可忽略; 而若是腔周围岩在运营期进入加速蠕变阶段, 则各级腔体收缩风险的发生概率均有所增大。

参考文献(References):

- [1] 杨春和, 李银平, 陈 锋. 层状盐岩力学理论与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 76.(YANG Chunhe, LI Yinping, CHEN Feng. Mechanics theory and engineering of bedded salt rock[M]. Beijing: Science Press, 2009: 76.(in Chinese))
- [2] 井文君, 杨春和, 陈 锋. 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))
- [3] EVANS D J. An appraisal of underground gas storage technologies and incidents, for the development of risk assessment methodology[R]. Nottingham, British: British Geological Survey, 2008.
- [4] BEREST P, BROUARD B. Safety of salt caverns used for underground storage[J]. Oil and Gas Science and Technology, 2003, 58(3): 361 - 384.
- [5] THOMS R L, GEHLE R M. A brief history of salt cavern use[C]// Proceedings of the 8th World Salt Symposium. [S.l.]: [s.n.], 2000: 207 - 214.
- [6] EHGARTNER B, NEAL J, HINKEBEIN T. Gas releases from salt[R]. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories, 1998.
- [7] 张强勇, 陈旭光, 张 宁, 等. 交变气压风险条件下层状盐岩地下储气库注采气大型三维地质力学试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(12): 2 410 - 2 419.(ZHANG Qiangyong, CHEN

- Xuguang, ZHANG Ning, et al. Large scale three-dimensional geomechanical model test of gas injection and extraction process for salt rock gas storage under condition of alternating gas pressure risk[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(12): 2 410 - 2 419.(in Chinese)
- [8] 贾超, 刘家涛, 张强勇, 等. 盐岩储气库运营期时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 - 1 484.(in Chinese))
- [9] 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))
- [10] 刘健, 宋娟, 张强勇, 等. 地下储库材料参数概率分布估计及体系可靠度分析[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(9): 76 - 79.(LIU Jian, SONG Juan, ZHANG Qiangyong, et al. Estimation of material parameters probability distribution and analysis of system reliability for underground deposit[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(9): 76 - 79.(in Chinese))
- [11] 井文君, 杨春和, 陈锋. 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))
- [12] 井文君, 杨春和, 陈锋, 等. 层状盐岩中储备库油气渗漏风险的故障树分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1 869 - 1 875.(JING Wenjun, YANG Chunhe, CHEN Feng, et al. Oil and gas leakage risk analysis of underground storage caverns in bedded salt rock using fault tree analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(6): 1 869 - 1 875.(in Chinese))
- [13] 井文君, 杨春和, 孔君凤, 等. 盐岩地下储备库引发地表沉陷事故的风险分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(增 2): 544 - 550.(JING Wenjun, YANG Chunhe, KONG Junfeng, et al. Risk analysis of ground subsidence accidents caused by underground storage caverns in salt rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Supp.2): 544 - 550.(in Chinese))
- [14] CHAN K S, BODNER S R, FOSSUM A F, et al. A damage mechanics treatment of creep failure in rock salt[J]. International Journal of Damage Mechanics, 1997, 6(2): 121 - 152.
- [15] 吴文, 侯正猛, 杨春和. 盐岩的渗透特性研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(7): 746 - 749.(WU Wen, HOU Zhengmeng, YANG Chunhe. Investigations on permeability of rock salt[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(7): 746 - 749.(in Chinese))
- [16] LI Y P, YANG C H. On fracture saturation in layered rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(6): 936 - 941.
- [17] 高小平, 杨春和, 吴文. 岩盐时效特性实验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(5): 559 - 561.(GAO Xiaoping, YANG Chunhe, WU Wen. Experimental studies on time depended properties of rock salt[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(5): 559 - 561.(in Chinese))
- [18] CHAN K S, BRODSKY N S, FOSSUM A F, et al. Damage-induced non-associated inelastic flow in rock salt[J]. International Journal of Plasticity, 1994, 10(6): 623 - 642.
- [19] HEUSERMANN S, ROLFS O, SCHMIDT U. Nonlinear finite element analysis of solution mined storage caverns in rock salt using the LUBBY2 constitutive model[J]. Computers and Structures, 2003, (8/11): 629 - 638.
- [20] 范庆忠, 高延法. 软岩蠕变特性及非线性模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 391 - 396.(FAN Qingzhong, GAO Yanfa. Study on creep properties and nonlinear creep model of soft rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(2): 391 - 396.(in Chinese))
- [21] 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): 4 409 - 4 417.(YANG Chunhe, LIANG Weigu, 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): 4 409 - 4 417.(in Chinese))
- [22] 尹雪英, 杨春和, 陈剑文. 金坛盐矿老腔储气库长期稳定性数值模拟[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))
- [23] 丁国生, 杨春和, 张保平, 等. 盐岩地下储库洞收缩变形分析[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(1): 80 - 84.(DING Guosheng, YANG Chunhe, ZHANG Baoping, et al. Shrinkage analysis of salt cavern storage[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(1): 80 - 84.(in Chinese))
- [24] 马林建, 刘新宇, 马淑娜, 等. 深部盐岩含夹层地层初始地应力场模拟分析[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2009, 10(6): 604 - 609.(MA Linjian, LIU Xinyu, MA Shuna, et al. Numerical analysis of in-situ ground stress in deep rock salt stratum containing mudstone inter-layers[J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science, 2009, 10(6): 604 - 609.(in Chinese))
- [25] 张明. 结构可靠度分析——方法与程序[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 22 - 26.(ZHANG Ming. Structural reliability analysis—methods and procedures[M]. Beijing: Science Press, 2009: 22 - 26.(in Chinese))
- [26] 杨春和, 陈锋, 曾义金. 盐岩蠕变损伤关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(11): 1 602 - 1 604.(YANG Chunhe, CHEN Feng, ZENG Yijin. Investigation on creep damage constitutive theory of salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(11): 1 602 - 1 604.(in Chinese))