

文章编号: 1000 - 7598 (2014) 04 - 1194 - 09

# 变权和相对差异函数在盐穴储气库腔体稳定性评价中的应用

李浩然<sup>1</sup>, 杨春和<sup>1,2</sup>, 陈 锋<sup>1</sup>, 马洪岭<sup>1</sup>, 井文君<sup>3</sup>, 徐玉龙<sup>1</sup>

(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, 武汉 430071;

2. 重庆大学 西南资源开发与环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044

3. 中国石油大学(华东) 储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266555)

**摘 要:** 盐岩地下储气库腔体以钻井水溶方式开采, 溶腔形态可见性差、形态发展可控性难度高, 针对畸形溶腔进行科学的稳定性评价是保证其安全运营的重要手段。将变权和相对差异函数理论引入到盐岩溶腔的安全评价中, 建立适用于盐穴储气库畸形单腔的稳定性评价模型, 首次以溶腔声纳测腔数据为基础, 建立三维真实仿真模型并进行数值模拟, 将数值模拟结果作为评价指标的评分依据, 最后应用该方法对金坛储气库某腔体进行稳定性评价, 并针对评价结果提出安全改善措施。研究表明, 用变权方法对评价指标权重进行处理后得到的结果更加合理, 通过将该方法与其他安全评价方法计算结果进行对比, 证明了该模型在盐岩储气库畸形溶腔的稳定性评价中具有较好的适用性。

**关 键 词:** 变权; 相对差异函数; 盐穴储气库; 畸形腔体; 稳定性评价

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

## Application of variable weight theory and relative difference function to evaluating stability of salt cavern for underground gas storage

LI Hao-ran<sup>1</sup>, YANG Chun-he<sup>1,2</sup>, CHEN Feng<sup>1</sup>, MA Hong-ling<sup>1</sup>, JING Wen-jun<sup>3</sup>, XU Yu-long<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071,

China; 2. Key Laboratory for Exploitation of Southwestern Resources and Environmental Disaster Control Engineering of Ministry of Education, Chongqing

University, Chongqing 400044, China; 3. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266555, China)

**Abstract:** The underground gas storage in salt caverns, mined by drilling and water dissolving solution, has low visibility and high difficulty of cavern form controllability, so it is a very significant measure to carry out scientific stability evaluation on deformed gas storage for ensuring its safe operation. In this study, the variable weight theory and relative difference function are introduced to build the assessment model which can be suitable for salt cavern stability assessment. Based on the sonar data of salt cavern shape, the 3D model is built up firstly in numerical simulation calculation, and the simulation results are used as the marking standard of relational assessment index. This model is applied to the stability assessment process of some salt cavern in Jintan; and improving measures for safety are carried out on the basis of assessment results. By a comparison of these results with some others, it is shown that the stability assessment model is more reasonable, as the evaluation index weight has been recalculated by variable weight theory; and this method has relatively better applicability in cavern stability assessment of gas storage in salt cavern.

**Key words:** variable weight; relative difference function; salt cavern gas storage; deformed cavern; stability evaluation

## 1 引 言

盐岩由于具有较低的渗透率(小于  $10^{-20} \text{ m}^2$ )<sup>[1-2]</sup>和良好的蠕变性, 而被公认为是能源地下存储的理想介质, 盐穴地下储气库已经成为国家能源战略储

备计划的重要组成部分<sup>[3]</sup>。尽管相对于其他储存方式, 盐穴地下储气库具有较好的安全性, 但近几十年来, 国外盐岩地下储气库重大事故时有发生, 参考整理相关事故的文献资料发现<sup>[4-9]</sup>, 从 1954 ~ 2004 年间, 世界上现存的 74 座盐穴储气库共发生

收稿日期: 2013-05-07

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(No. 2009CB724602, No. 2009CB724603); 国家自然科学基金资助项目(No. 41272391)。

第一作者简介: 李浩然, 男, 1987 年生, 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: hl87@126.com

了28起重大事故,其中油气渗漏事故17起,地面沉降事故5起,腔体失效事故6起,已经造成大量的人员、经济和环境损失,以美国Moss Bluff储气库事故为例,2004年8月19日该储气库发生天然气泄漏并引发大火,火势持续4d,燃烧半径122m,4800m范围内居民转移,直接经济损失3600万美元。事故教训表明,盐穴腔体失稳将会引起储气库失效、油气泄漏以及地表沉陷等一系列事故,盐岩溶腔的稳定性是确保安全运营的关键,因此,对盐穴腔体进行科学的稳定性评价是保证储气库安全运营的必要手段。

关于地下储气库盐腔的稳定性研究,国内外学者开展了大量工作,已经取得了一些有益成果。德国学者Staudtmeister等<sup>[10]</sup>将数值模拟的方法应用于地下洞室的可靠性分析;邓检强等<sup>[11]</sup>对双锥形盐腔和椭圆形盐腔的力学稳定性进行了对比研究;杨强等<sup>[12]</sup>以能量判据为基础,研究了盐矿油气储库群的整体稳定性和失稳破坏演化规律;余海龙等<sup>[13]</sup>通过相似材料模拟的手段对盐岩溶腔的稳定性作了深入分析;姜德义等<sup>[14]</sup>将突变理论应用到溶腔稳定性评价中。

目前针对盐穴腔体稳定性的评价方法和标准,各国尚未形成统一的规范,相关文献也比较少见,只有个别学者做了一些基础工作,例如吴文等<sup>[15]</sup>提出了盐岩储库的稳定性研究内容和判别准则;任松等<sup>[16]</sup>建立了储气库运营期稳定性的多层次、多指标综合体系;井文君等<sup>[17-18]</sup>利用故障树理论和统计分析的方法对储气库的致灾因子进行了研究。总的来说,国内外针对盐岩地下储气库的稳定性评价方法和标准的研究较少,尚属于起步阶段。

我国盐矿地质条件复杂,矿层层数多、单层厚度薄,矿床中含有大量难溶夹层,如硬石膏层,钙芒硝层、泥岩层等,在水溶造腔的过程中,难溶夹层的滞后溶蚀会导致腔体内流场紊乱,腔体形状很难控制,形态失控严重时会导致腔体报废<sup>[19-20]</sup>。此外,水溶造腔腔体形态可见性差、工艺要求高,这些因素共同作用造成部分盐穴溶腔呈现不规则形态发展。目前的稳定性评价工作大都将溶腔近似看作规则形状的椭球体或圆柱体,这种近似忽略了盐腔形状对腔体稳定性的影响,造成腔体稳定性评价结果偏优,腔体形状越是不规则,误差越大。

基于上述的研究现状,本文将变权理论和相对差异函数引入到盐穴储气库腔体稳定性评价体系中,弥补了以往评价方法的不足。本文首次以溶腔声纳测腔数据为基础,建立真实腔体仿真模型并对

其进行有限元分析,将数值模拟结果作为相关因素的评分依据;结合金坛储气库的具体实例,详细地给出盐穴储气库单腔稳定性的评价方法和步骤,并针对评价结果提出确保盐腔安全运营的相关措施,为保证储库安全运营提供依据,也为盐岩地下储气库群的稳定性评价打下基础。

## 2 变权和相对差异函数理论

### 2.1 变权理论

在安全评价体系中,各个影响因素相互作用,一个级别很差的指标会对评价结果产生严重影响,所以评价指标常权处理是不合理的。变权理论是李洪兴<sup>[21]</sup>的因素空间理论的重要建模原理之一,刘文奇<sup>[22]</sup>在其基础上引入均衡函数,得出更为明确的变权公式:

$$\omega_i(x_1, \dots, x_m) = \frac{\omega_i^{(0)} x_i^{\alpha-1}}{\sum_{k=1}^m \omega_k^{(0)} x_k^{\alpha-1}} \quad (1)$$

式中: $\omega_i$ 为第*i*个因素的变权权重; $\omega_i^{(0)}$ 为第*i*个因素的常权权重; $x_i$ 为第*i*个评价因素的指标值。 $\alpha$ 的取值在0~1之间, $\alpha$ 越小,表明系统对各个影响因素的均衡性要求越苛刻; $\alpha$ 越大,表明系统对各个影响因素的均衡性要求越放松。当 $\alpha=1$ 时,等同于常权模式。在某个安全评价体系中,如果一个有缺陷的因素对系统的安全性产生重大影响,表示该系统对各个因素的均衡性要求较高,这时一般取 $\alpha < 0.5$ ;相反如果系统对各个因素的均衡性要求较低,这时一般取 $\alpha > 0.5$ 。考虑到盐岩地下储气库的特殊性和重要性,本着保守和理性的原则,同时参考相关文献的取值经验<sup>[23-24]</sup>,本文计算时 $\alpha=0.2$ 。变权理论可以有效地解决个别指标缺陷而引起的评价不合理现象,在其他领域的安全评价中已经取得了较好应用<sup>[22-23]</sup>。

### 2.2 相对差异函数

#### 2.2.1 相对差异度

设论域*U*上的一个模糊概念*A*,对于*U*中的任意一个元素*u*( $u \in U$ ),在相对隶属度函数连续数轴的任一点上,对*u*表示吸引性质*A*的相对隶属度为 $\mu_A(u)$ ,对*u*表示排斥*A<sup>c</sup>*的相对隶属度为 $\mu_{A^c}(u)$ 。 $D_A(u)$ 为*u*对*A*的相对差异度为

$$D_A(u) = \mu_A(u) - \mu_{A^c}(u) \quad (2)$$

#### 2.2.2 安全等级隶属度的确定

安全评价指标体系中某个子系统包含*m*个影响因素,每个因素可以分为*K*个安全等级。设

$[a, b]_{ij}$  为标准值区间,  $[c, d]_{ij}$  为上下界区间。M 为吸引域区间  $[a, b]_{ij}$  中  $D_A(u) = 1$  的点值。各个区间的取值根据具体评价情况确定, 各个参数之间的关系见图 1。

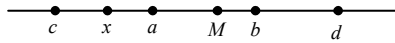


图 1 点 x、M 与区间  $[a, b]$ 、 $[c, d]$  的位置关系图  
Fig.1 Positional relationship of x、M with  $[a, b]$ 、 $[c, d]$

x 为 X 区间内的任意点的量值, 则 x 落入 M 点左侧时, 其相对差异函数模型为<sup>[24]</sup>

$$D_A(u) = \left[ \frac{x-a}{M-a} \right]^\beta, x \in [a, M] \quad (3)$$

$$D_A(u) = -\left[ \frac{x-a}{c-a} \right]^\beta, x \in [c, a] \quad (4)$$

x 落入 M 点右侧时, 其相对差异函数模型为<sup>[24]</sup>

$$D_A(u) = \left[ \frac{x-b}{d-b} \right]^\beta, x \in [M, b] \quad (5)$$

$$D_A(u) = -\left[ \frac{x-b}{d-b} \right]^\beta, x \in [b, d] \quad (6)$$

式中:  $\beta$  为非负指数, 通常可取为 1, 表示相对差异函数模型为线性模型。  $D_A(u)$  确定之后, 相对隶属度  $\mu_A(u)$  为

$$\mu_A(u) = (1 + D_A(u))/2 \quad (7)$$

$\mu_A(u)$  表示第 i 个因素隶属于第 j 个等级的相对隶属度  $\mu_A(u)_{ij}$ , 从而求得相对隶属度矩阵  $[\mu_A(u)_{ij}]_{m \times k}$ 。

### 3 盐岩溶腔稳定性评价模型

#### 3.1 风险因子的辨识

风险因子辨识是安全稳定性评价的第一步, 它是对可能引发事故的各个因素进行全面识别和系统归纳; 风险因子辨识要根据工程项目的具体特点,

采取有针对性、目的性的手段进行辨识。盐岩属于一类特殊的岩体, 储气库稳定性评价标准与其他岩体有所差别<sup>[26-27]</sup>, 一般岩体的稳定性评价是在地质学定性分析的基础上进行岩石力学定量分析, 很少考虑岩体的大范围蠕变, 而盐岩作为气体存储的理想介质的本质原因就在于其良好的蠕变行为, 此外, 储气库周期性地变换腔体内压也是其有别于其他岩体结构稳定性评价的另一特点, 因此, 在储气库的稳定性评价中, 要充分考虑盐岩的蠕变参数和储气库的运行参数的影响。目前, 针对盐岩储气库的稳定性评价, 各国尚未形成统一的标准和设计规范。本文通过对国内外盐岩储库相关事故资料的调查与统计, 深入分析事故原因, 结合国内外学者的理论研究和意见咨询, 对运营期盐穴储气库单腔失稳事故进行了详细的风险因子归类, 评价体系及指标见图 2。

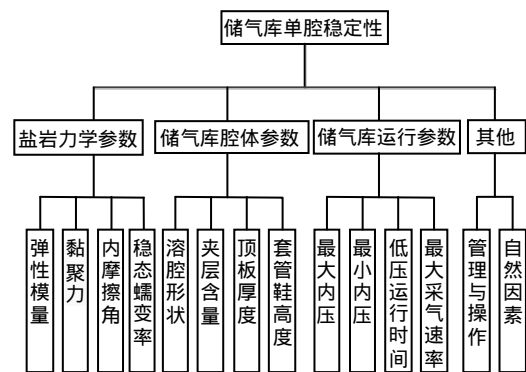


图 2 盐岩地下储气库单腔稳定性评价体系  
Fig.2 Stability assessment system of single salt cavern gas storage

#### 3.2 影响因子评分模型

本文采用百分制对各个影响因素进行评分, 通过对大量盐岩试样单轴、三轴压缩以及蠕变试验结果的回归分析, 综合专家意见及腔体有限元分析结论, 在文献[10]的基础上, 补充完善了个别指标的评分体系, 最终得到盐岩力学参数、储气库腔体参数、储气库运行参数以及其他参数评分模型, 见表 1~4。

表 1 盐岩力学参数评分模型  
Table 1 Scoring model of rock mechanical parameters

弹性模量 E		黏聚力 c		内摩擦角 $\phi$		稳态蠕变率 $\epsilon_s$	
值/GPa	得分	值/GPa	得分	值/(°)	得分	值/(10 <sup>-4</sup> /h)	得分
[0, 5)	12E	[0, 1)	60c	[0, 30)	$\phi^2/15$	[0, 3)	$-40 \epsilon_s^2/9+100$
[5, 20)	$(-8E^2+320E+1300)/45$	[1, 5)	$-2.5c^2+25c+37.5$	[30, 50)	$-0.1\phi^2+10\phi-150$	[3, 6)	$20 \epsilon_s^2 - 80 \epsilon_s + 240$
20	100	5	100	50	100	6	0

表 2 储气库腔体参数评分模型  
Table 2 Scoring model of gas storage cavity parameters

$V$		夹层含量 $Q$		$r_1$		$r_2$	
值/%	得分	值/%	得分	值	得分	值	得分
5	100	[0, 10)	$0.4Q^2 - 0.8Q + 100$	(0, 0.5]	$50 \cos[\pi(r_2+1)] + 50$	[0, 1)	$50 \cos[\pi(r_2+1)] + 50$
(5, 20]	$-0.07V^2 + 0.09V + 101.25$	[10, 20)	$-0.6Q^2 + 12Q$	(0.5, 1]	100	(1, 1.5]	100
(20, 35]	$-0.17V^2 + 7.09V + 0.65$	20	0	(1, 2]	$50 \cos[\pi(r_1+1)] + 50$	(1.5, 2.5]	$50 \cos[\pi(r_2+0.5)] + 50$
>35	0			>2	0	>2.5	0

注： $V$ 表示最小设计压力下流变 30 a 的腔体体积收缩率； $r_1$ 为顶板厚度与溶腔直径的比值； $r_2$ 为套管鞋实际高度与设计高度的比值。

表 3 储气库运行参数评分模型  
Table 3 Scoring model of gas storage operating parameters

$r_3$		$r_4$		$r_5$		$r_6$	
值	得分	值	得分	值	得分	值	得分
<0.6	0	<0.8	0	<1	100	<0.6	0
[0.6, 1.8]	$50 \cos(5\pi r_3/3) + 50$	[0.8, 1)	$-25(10 r_4^2 + 25 r_4 - 11)$	[1, 1.6)	$231 r_5^2 - 714 r_5 + 580$	[0.6, 1.4]	$50 \cos(2.5\pi r_6 - 0.5\pi) + 50$
>1.8	0	1	100	1.6	0	>1.4	0

注： $r_3$ 、 $r_4$ 、 $r_5$ 、 $r_6$ 分别为储气库腔体最大内压、最小内压、低压运行时间、最大采气速率的实际运行值与设计值之比。

表 4 其他参数评分模型  
Table 4 Scoring model of other parameters

管理与操作		自然因素	
评分	得分	评分	得分
优秀	90 ~ 100	优秀	90 ~ 100
良好	80 ~ 90	良好	80 ~ 90
一般	70 ~ 80	一般	70 ~ 80
及格	60 ~ 70	及格	60 ~ 70
不及格	0 ~ 60	不及格	0 ~ 60

泥岩 4 个部分；接着采用四面体单元对整体模型进行网格剖分，共得到大约  $120 \times 10^4$  个单元，为了便于对腔体四周的破坏情况进行分析，对腔体附近区域网格进行了加密处理；最后，将建好的模型导入到 FLAC<sup>3D</sup> 软件进行数值计算。

## 4 工程算例

### 4.1 工程概况

金坛储气库某腔体盐岩层分布于下第三系阜宁组上部，盐层段为 983 ~ 1 217.8 m，厚度为 234.8 m，该层段共存在 11 层泥质夹层，最大厚度为 2.8 m，最小厚度为 0.8 m，累计厚度为 17.6 m，其中 4 个夹层穿过溶腔，泥质夹层所占比例为 7.5%，腔体高度为 156 m。由于该盐层段夹层层数多，单层厚度薄，难溶夹层的存在增大了水溶建腔的难度，腔体形状难以控制，声纳测腔结果表明，该溶腔形状极不规则，见图 3。

### 4.2 数值模拟

#### 4.2.1 建立模型

依据该井的地质条件和三维声纳测腔数据，采用 Ansys 软件进行腔体建模，设计模型尺寸为 600 m × 600 m × 800 m，模型顶部位于地下 -600 m 位置，共考虑 800 m 厚度的地层信息。首先，依据盐穴腔体的声纳测腔数据，采用取点、连线、建面、生体的方式建立腔体的真实形状模型；然后加入 800 m 厚度的地层信息与腔体进行布尔运算，将布尔运算得到的各个部分进行分组，得到腔体、盐体、夹层和

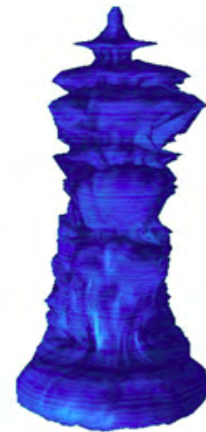


图 3 腔体声纳测试三维图

Fig.3 Three dimensional graph of salt cavern sonar test

考虑到腔体的最大半径小于 50 m，模型宽度为 600 m，模型底端距离腔体下端大于 200 m，故将模型四周及底部分别设置为固定水平和垂直方向的位移边界条件。取模型上覆岩体的平均密度为  $2.3 \text{ g/cm}^3$ ，根据反演分析，上覆 600 m 厚度的岩层重量简化为模型上表面的等效荷载为 13.8 MPa，故在模型上表面施加应力边界条件 13.8 MPa，计算模型力学示意图见图 4。图 5 ~ 6 分别为模型网格剖面图及整体效果图。

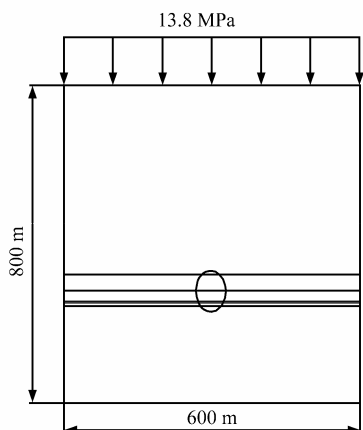


图4 计算模型力学示意图

Fig.4 Mechanical schematic of calculated model

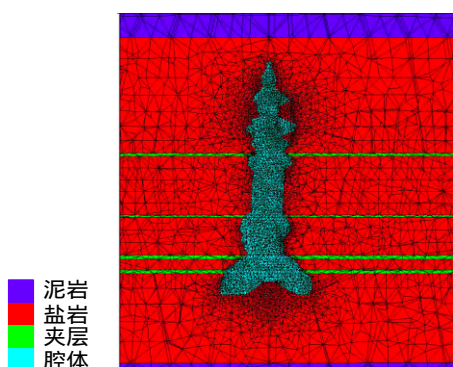


图5 模型网格纵剖面示意图

Fig.5 Longitudinal profile of model grid

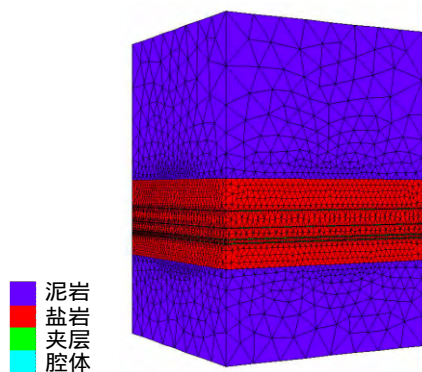


图6 模型整体网格剖分图

Fig.6 Grid subdivision graph of integrated model

4.2.2 计算模型与参数

流变分析中盐岩和夹层采用幂指数本构模型，泥岩采用经典的 Maxwell 流变本构模型。根据大量泥岩、岩盐试样的单轴、三轴、蠕变试验结果，确定该井的力学参数（见表 5）。蠕变参数  $A$ 、 $n$  是与岩石种类和成分有关的常数，通过对流变试验进行回归分析得到  $A = 3.6 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-3.5} \text{ year}^{-1}$ ， $n = 3.5$ 。

4.2.3 计算过程

在计算分析中，采用先加载，后开挖的数值模

拟顺序进行分析。不考虑水溶开采过程中洞室围岩的变形。当模型初始应力稳定后，一次性开挖腔体模拟盐穴成洞，并施加天然气内压，继续计算至所需时间。

表 5 数值模拟力学参数

Table 5 Mechanical parameters of numerical simulation

岩性	弹性模量 /GPa	泊松比	凝聚力 /MPa	内摩擦角 /( $^{\circ}$ )	抗拉强度 /MPa
盐岩	13	0.30	2.5	30	1.2
泥岩	10	0.27	2.5	35	1.2
泥岩夹层	4	0.30	2.0	30	0.5

4.2.4 溶腔形状指标的确定

本文通过最小设计压力下流变 30 a 的体积收缩率来确定溶腔形状指标值。腔体收缩的根本原因是盐岩的蠕变，其本质就是盐岩晶体内部的错位运动或者耗散过程。盐岩储气库在运行过程中，腔体内部压力小于地层的水平和竖向压力，压力差的存在促使盐层不断向腔内滑动，压力差越大，盐岩在相同时间段内的变形量越大；时间越长，盐腔的有效体积损失也越大。本文计算了腔体内压在 7 ~ 17 MPa 的情况下，流变 30 a 的腔体的体积收缩率，见图 7。

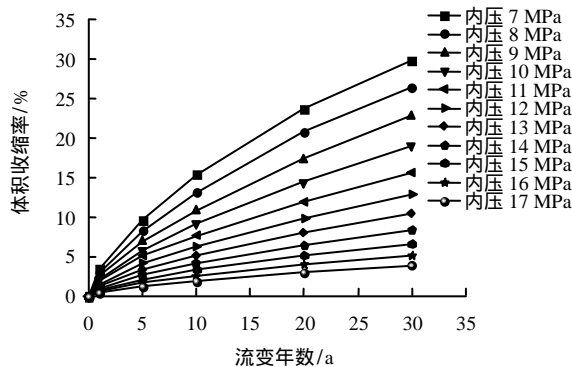


图7 腔体体积收缩率与时间关系曲线

Fig.7 Curves between volume shrinkage rate of cavern and time

经过计算得出，当腔体内压恒为最小设计压力 7 MPa 时，流变 30 a 后腔体体积收缩率为 29.8%，将该值代入储气库腔体参数评分模型中，确定 级指标溶腔形状的得分值为 61。

数值模拟结论不仅可以确定溶腔形状的指标值，还可以分析腔体周围塑性区，指导储气库的溶腔压力设计。腔体内压越低，腔体的体积收缩率越大，腔体的稳定性系数也就越低；随着腔体内压的升高，腔体的体积收缩率降低，稳定性系数增高，

但储气库的经济性和适用性将会降低。因此，要在确保盐腔安全稳定的基础上，设计选择较低的最小储气压力，以提高储库的利用价值，数值模拟结论将会提供重要的参考依据，本文 4.6 节将会具体分析。

4.3 计算评价指标权重

在盐穴储气库单腔稳定性评价过程中，各个评价指标的重要程度是不同的，科学地确定指标权重影响着评价结果的准确性和客观性。本文采用层次分析法对 4 个 级指标进行两两比较，构造评价矩阵，解出判断矩阵的最大特征值及其对应的特征向量，对其进行一致性检验；同理确定各个 级指标的常权重，计算结果见表 6。

依据参数评分模型确定每个影响因素的指标值，利用变权公式(1)计算出 级指标的变权权重。以储气库的腔体参数中的溶腔形状为例，指标值为 61，常权重为 0.34，变权处理后的权重变为 0.39，可以看出，如果指标的得分值偏低，经过变权处理后，权重将会有较大提高，所有 级指标的变权权重见表 6。

表 6 评价指标权重

Table 6 Weights of evaluation indexes at all levels

级指标	级指标	指标值	常权	变权
盐岩力学参数 0.30 (权重)	弹性模量	91	0.27	0.25
	凝聚力	84	0.20	0.20
	内摩擦角	76	0.20	0.21
	稳态蠕变率	81	0.33	0.34
储气库腔体参数 0.35 (权重)	溶腔形状	61	0.34	0.39
	夹层含量	63	0.23	0.25
	顶板厚度	91	0.29	0.24
	套管鞋高度	88	0.14	0.12
储气库运行参数 0.30 (权重)	最小内压	92	0.33	0.31
	最大内压	88	0.17	0.16
	低压运行时间	76	0.27	0.29
	最大采气速率	81	0.23	0.24
其他 0.05 (权重)	管理与操作	92	0.80	0.80
	自然因素	95	0.20	0.20

4.4 构造安全评价隶属度矩阵

结合评价对象，取各个指标的安全评价等级论域为  $U=(\text{很好、较好、一般、差、很差})$ ，以数值 1~5 表示这 5 个等级，分别构造各级评价指标标准值区间矩阵和变动区间矩阵

$I_{ab} = [[a, b]_{i1} [a, b]_{i2} [a, b]_{i3} [a, b]_{i4} [a, b]_{i5}]$  ,  
 $I_{cd} = [[c, d]_{i1} [c, d]_{i2} [c, d]_{i3} [c, d]_{i4} [c, d]_{i5}]$  , 根据对指标  $i$  的物理分析与实际情况，确定指标  $i$  级的  $M$  矩阵，分别如下。

$$I_{ab} = \begin{bmatrix} [100,90] & [90,80] & [80,70] & [70,60] & [60,0] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ [100,90] & [90,80] & [80,70] & [70,60] & [60,0] \end{bmatrix}$$

$$I_{cd} = \begin{bmatrix} [100,80] & [100,70] & [90,60] & [80,0] & [70,0] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ [100,80] & [100,70] & [90,60] & [80,0] & [70,0] \end{bmatrix}$$

$$M = \begin{bmatrix} 100 & 90 & 75 & 60 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 100 & 90 & 75 & 60 & 0 \end{bmatrix}$$

根据上述各个指标的取值，将每个指标的特征值利用式(3)~(6)处理后并归一化，得到各个指标的安全隶属度向量。例如“储气库腔体参数”下属的 4 个 级指标 ( $i=1, 2, 3, 4$ ) 的安全隶属度矩阵为

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.000 & 0.000 & 0.035 & 0.655 & 0.310 \\ 0.000 & 0.000 & 0.111 & 0.630 & 0.259 \\ 0.550 & 0.450 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.286 & 0.643 & 0.071 & 0.000 & 0.000 \end{bmatrix}$$

应用公式  $B_i = \delta_i \cdot R_i$ ，代入变权向量得到储气库腔体参数的安全等级隶属度向量  $B'_{p2}$ ；用级别特征值来判断评价结果的优劣，得到变权情况下的级别特征值  $H'_{p2}$ 。

$$B'_{p2} = [0.166 \ 3 \ 0.185 \ 2 \ 0.499 \ 0 \ 0.413 \ 0 \ 0.185 \ 7]$$

$$H'_{p2} = [1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5] B_{p2}^T = 3.266 \ 4$$

从上述结果可以看出，储气库腔体参数的安全级别特征值为 3.266 4，处于 级一般水平，利用常权向量计算得到的级别特征值为 3.077 9，安全等级同样为 级，但偏向于 级较好水平；显然，变权处理后的安全评价要求更为严格，同理，分别求出其他一级指标的安全级别特征值为 2.205 1、2.106 7 和 1.370 0。

4.5 评价结果分析

通过对 、 级指标的安全等级评价计算，可以分别得到 4 个 级指标的安全隶属度向量；进而得到该腔体的稳定性评价的安全隶属度矩阵  $R$ ，

$$R = \begin{bmatrix} 0.187 \ 8 & 0.450 \ 8 & 0.329 \ 9 & 0.031 \ 5 & 0.000 \ 0 \\ 0.166 \ 3 & 0.185 \ 2 & 0.49 \ 9 & 0.413 \ 0 & 0.185 \ 7 \\ 0.243 \ 3 & 0.413 \ 5 & 0.299 \ 7 & 0.043 \ 5 & 0.000 \ 0 \\ 0.630 \ 0 & 0.370 \ 0 & 0.000 \ 0 & 0.000 \ 0 & 0.000 \ 0 \end{bmatrix}$$

通过进一步计算得到该盐穴腔体的平均隶属度向量  $B = \delta \cdot R = [0.219 \ 0 \ 0.342 \ 6 \ 0.206 \ 3 \ 0.167 \ 0 \ 0.065 \ 0]$ ，安全级别特征值  $H = [1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5] \cdot B^T = 2.516 \ 5$ ，该

腔体的安全稳定性等级为 级一般水平, 在腔体运行过程中要加强监测和管理。

本文将计算结果与未知测度评价法、可拓物元评价法的评价结果进行对比分析, 见表 7, 可以看出, 三者的级别特征值相差不大, 且可拓物元评价法与本文的评价结果更为接近和一致, 证明变权和差异函数模糊评价法具有良好的客观性和准确性。相对差异函数理论较好地处理了指标区间选值的问题, 评价指标变权处理提高了评价结果的可靠度, 通过变权和相对差异函数理论得到的级别特征值略高于其他两种评价方法, 表明该方法对系统的安全性要求更为严格, 我国的盐穴储气库研究处于起步阶段, 腔体稳定性评价方法的选择要偏向于谨慎和保守, 确保安全第一设计运营理念, 因而该方法可以更好地适用于盐穴储气库畸形单腔稳定性评价中。

表 7 不同评价方法的评价结果  
Table 7 Results of different evaluation methods

评价方法	级别特征值	评价等级	评判结果
变权差异函数模糊综合评价法	2.516 5		较好
未知测度评价法	2.416 1		较好
可拓物元评价法	2.498 6		较好

为了分析研究腔体形状对盐腔稳定性的影响, 突出真实腔体数值模拟的必要性, 本文依据同样的地质条件, 建立同体积的规则倒梨形(高径比 7:3)腔体模型进行数值计算, 分别采用常权模糊综合评价法和变权差异函数模糊综合评价法对其安全稳定性进行分析, 得到评价结果见表 8。对比分析数据可以看出, 无论采用何种方法, 真实腔体的评价级别特征值明显高于规则腔体的级别特征值, 这充分表明, 若采用规则形状的腔体代替真实腔体进行安全分析, 所得结果将会存在偏优的误差。此外, 从表 8 中可以看出, 当对规则腔体进行安全稳定性分析时, 常权方法和变权方法所得到的级别特征值相差很小, 而对真实畸形腔体进行安全稳定性分析时, 两种方法得到的级别特征值具有一定的偏差, 表明当腔体呈现不规则形态时, 针对真实畸形腔体进行安全稳定性分析具有充分的必要性。

表 8 不同形状腔体的评价结果  
Table 8 Evaluation results of different shape salt caverns

评价方法	级别特征值
常权模糊综合评价法(规则腔体)	2.104 7
变权差异函数模糊综合评价法(规则腔体)	2.131 2
常权模糊综合评价法(真实腔体)	2.430 2
变权差异函数模糊综合评价法(真实腔体)	2.516 5

#### 4.6 溶腔稳定性改善措施

金坛储气库盐腔的安全稳定性评价结果等级为 级。盐岩的力学参数为客观存在, 溶腔参数也无法改变, 因此, 要针对那些权重较大、得分较低的可控参数采取措施, 加强人为管理与操作水平, 以保证腔体的安全运营。

(1) 提高运营期盐穴腔体的最小运营压力。数值模拟结果表明, 在 7 MPa 内压状况下腔体不规则部位形成了大量的塑性区, 且区域较大, 局部位置可能发生垮塌, 建议该储气库运行初期(3 a 内)最小运行压力提高至 8 MPa; 运行 3 a 后, 由于储气库自身地质结构作用、盐岩蠕变和损伤修复, 腔体会向更加稳定的局部形态调整, 再结合蠕变模拟计算结果, 考虑蠕变许可的条件下, 再恢复原设计的最低运行压力 7 MPa。计算分析得出, 在其他参数不变的情况下, 最小压力从 7 MPa 提高至 8 MPa 以后, 储气库运行参数的安全级别特征值由 2.143 4 变为 2.046 7, 腔体安全稳定性级别特征值由 2.516 5 变为 2.487 5。

(2) 储气库低压运行时间越长, 溶腔体积收缩越大; 减少低压运行时间, 可以提高盐腔的稳定性, 以便延长储气库的使用年限, 建议该储气库的低压运行时间小于设计值的 0.9 倍。此时, 在其他参数不变的条件下, 储气库运行参数的安全级别特征值可由 2.143 4 变为 1.610 4, 腔体安全稳定性级别特征值由 2.516 5 变为 2.356 6。

(3) 降低最大采气速率。采气速率越大, 腔体内压变化越迅速, 越不利于盐腔的稳定性, 鉴于该腔体的实际情况, 建议适度降低该盐腔的采气速率。

(4) 进一步加强安全管理水平, 深化员工操作培训, 提高作业水平; 这些工作对盐岩地下储气库的安全运营起着重要作用, 作业水平从根本上影响着评价体系的每一个指标水平, 特别是溶腔形状, 建腔操作的规范性和工艺水平决定着盐岩溶腔的形态发展, 而科学有效的管理工作是储气库安全运营的保障。

## 5 结 论

(1) 盐穴腔体的稳定性受到诸多因素的制约, 当腔体形状水平很差时, 无论采用何种算子, 其影响都会被其他因素中和, 用变权方法对评价指标权重进行处理后得到的评价结果更加合理; 用相对差异函数来确定隶属度向量是可行的, 并且具有易调节、物理意义明确等优点。将变权和相对差异函数理论应用到盐穴储气库畸形单腔的稳定性评价中,

可以提高评价结果的可靠性,具有较强的理论和实际意义。

(2) 本文首次以盐腔声纳测腔数据为基础,建立真实溶腔三维仿真模型,并对其进行有限元分析,相比以前将盐腔近似看作椭球体,真腔数值模拟结果更为准确客观,将流变 30 a 的腔体收缩率作为腔体形状的评分依据,可以极大地减少人为主观性。

(3) 将建立的稳定性评价模型应用到金坛储气库某腔体的稳定性评价中,详细地给出了盐穴储气库单腔稳定性的评价方法和步骤。经过分析得到该盐腔的稳定性评价结果等级为 Ⅱ 级,属于较好水平,鉴于个别指标的安全级别特征值偏低,结合该腔体的实际情况,提出相应的技术措施以确保盐腔的安全运营。

### 参 考 文 献

- [1] BEREST P, BROUARD B, DURUP G. Behavior of sealed solution-mined cavern[C]//Proceedings of EURock'96 on Performance in Rock Mechanics and Rock Engineering. Rotterdam: A.A. Balkema, 1996: 1127 - 1131.
- [2] CONSENZA P H, GHOREYCHI M, BAZARGAN-SABET B, et al. In situ rock salt permeability measurement for long term safety assessment of storage[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1999, 24(1): 509 - 526.
- [3] 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 Chun-he, LIANG Wei-guo, WEI Dong-hou, 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.
- [4] BEREST P, BROUARD B. Safety of salt caverns used for underground storage[J]. *Oil & 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 8th World Salt Symposium, 2000, (1 - 2): 207 - 214.
- [6] NEAL J T, MAGORIAN T R. Geologic site characterization (GSC) principles derived from storage and mining projects in salt, with application to environmental surety[J]. *Environmental Geology*, 1997, 29(3 - 4): 165 - 175.
- [7] TOMASKO D, ELCOCK D, VEIL J, et al. Risk analyses for disposing of nonhazardous oil field wastes in salt caverns[C]//International Petroleum Environmental Conference, San Antonio: [s. n.], 1997.
- [8] SOVACOOOL B K. The costs of failure: A preliminary assessment of major energy accidents, 1907-2007[J]. *Energy Policy*, 2008, 36(5): 1802 - 1820.
- [9] DIETERT J A, PURSELL D A. Underground Natural Gas Storage[R]. Houston: Simmons & Company International, 2000.
- [10] STAUDTMEISTER K, ROKAHR R B. Rock mechanical design of storage caverns for natural gas in rock salt mass[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, (34): 3 - 4.
- [11] 邓检强, 吕庆超, 杨强, 等. 变形稳定理论在盐岩储气库优化设计中的应用[J]. *岩石力学*, 2011, 32(增刊 2): 507 - 513.  
DENG Jian-qiang, LÜ Qing-chao, YANG Qiang, et al. Application of deformation stability theory to optimization design of gas storage in salt rock[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(Supp. 2): 507 - 513.
- [12] 杨强, 邓检强, 吕庆超, 等. 基于能量判据的盐岩库群整体稳定性分析方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(8): 1513 - 1521.  
YANG Qiang, DENG Jian-qiang, LÜ Qing-chao, et al. Global stability analytical method of cavern group in salt rock based on energy criterion[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(8): 1513 - 1521.
- [13] 余海龙, 谭学术, 李通林, 等. 岩盐溶腔稳定性的相似模拟设计原则和依据[J]. *西安科技学院学报*, 1994, 14(4): 311 - 317.  
YU Hai-long, TAN Xue-shu, LI Tong-lin, et al. Design of analogous model on the stability of salt rock cavity[J]. *Journal of Xi'an University of Science & Technology*, 1994, 14(4): 311 - 317.
- [14] 姜德义, 任松, 刘新荣, 等. 岩盐溶腔顶板稳定性突变理论分析[J]. *岩石力学*, 2005, 26(7): 1099 - 1103.  
JIANG De-yi, REN Song, LIU Xin-rong, et al. Stability analysis of rock salt cavern with catastrophe theory[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(7): 1099 - 1103.
- [15] 吴文, 侯正猛, 杨春和. 盐岩中能源(石油和天然气)地下储存库稳定性评价标准研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(14): 2497 - 2505.  
WU Wen, HOU Zheng-meng, YANG Chun-he. Investigation on evaluating criteria of stabilities for energy (petroleum and natural gas) storage caverns in rock salt[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(14): 2497 - 2505.
- [16] 任松, 李小勇, 姜德义, 等. 盐岩储气库运营期稳定性评价研究[J]. *岩石力学*, 2011, 32(5): 1465 - 1472.  
REN Song, LI Xiao-yong, JIANG De-yi, et al. Evaluating stability of salt rock gas storage during operation



- period[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(5): 1465 - 1472.
- [17] 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): 1869 - 1875.  
JING Wen-jun, YANG Chun-he, 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): 1869 - 1875.
- [18] 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): 1787 - 1793.  
JING Wen-jun, YANG Chun-he, CHEN Feng. Risk assessment of salt cavern oil/gas storage based on accident statistical analysis[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(6): 1787 - 1793.
- [19] 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.
- [20] 李银平, 杨春和, 施锡林. 盐穴储气库造腔控制与安全评估[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [21] 李洪兴. 因素空间理论与知识表示的数学框架——变权综合原理[J]. **模糊系统与数学**, 1995, 9(3): 1 - 9.  
LI Hong-xing. Factor spaces and mathematical frame of knowledge representation—variable weights analysis[J]. **Fuzzy Systems and Mathematics**, 1995, 9(3): 1 - 9.
- [22] 刘文奇. 均衡函数及其在变权综合中的应用[J]. **系统工程理论与实践**, 1997, 17(4): 58 - 64.  
LIU Wen-qi. Balanced function and its application to variable weight synthesizing[J]. **System Engineering-Theory & Practice**, 1997, 17(4): 58 - 64.
- [23] 国威, 潘晓东, 蒋曙豪. 基于相对差异函数的隧道群交通安全评价[J]. **同济大学学报(自然科学版)**, 2013, 41(1): 101 - 105.  
GUO Wei, PAN Xiao-dong, JIANG Shu-hao. Relative difference function-based traffic safety assessment of tunnel groups[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 2013, 41(1): 101 - 105.
- [24] 赵然杭, 陈守煜. 模糊可变评价模型在评价农村水利现代化中的应用[J]. **水利学报**, 2008, 39(2): 218 - 223.  
ZHAO Ran-hang, CHEN Shou-yu. Application of fuzzy variable set model to evaluation of rural hydro modernization[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2008, 39(2): 218 - 223.
- [25] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [26] DANTUTA F. Geomechanical research of the rock salt in aspects of its utilizations for building underground storages[J]. **Rozprawy Monografie**, 1994, 19: 9 - 56.
- [27] JERIC M L. Rock mechanics in salt mining[M]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1994.

### 上接第 1130 页

- [8] 王尚庆, 徐进军, 罗勉. 三峡库区白水河滑坡险情预警方法研究[J]. **武汉大学学报·信息科学版**, 2009, 34(10): 1218 - 1221.  
WANG Shang-qing, XU Jin-jun, LUO Mian. Study of warning of dangerous state of Baishuihe landslide in Three Gorges Reservoir Area[J]. **Geomatics and Information Science of Wuhan University**, 2009, 34(10): 1218 - 1221.
- [9] 卢书强, 易庆林, 易武, 等. 三峡库区卧沙溪滑坡变形失稳机制分析[J]. **中国地质灾害与防治学报**, 2013, 24(2): 21 - 25.  
LU Shu-qiang, YI Qing-lin, YI Wu, et al. Analysis on deformation and failure mechanism of Woshaxi landslide in the Three Gorges Reservoir Area[J]. **The Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 2013, 24(2): 21 - 25.
- [10] DU J, YIN K L, LACASSE S. Displacement prediction in colluvial landslides, Three Gorges Reservoir, China[J]. **Landslides**, 2013, 10(2): 203 - 218.
- [11] 汪发武, 张业明, 王功辉, 等. 三峡库区树坪滑坡受库水位变化产生的变形特征[J]. **岩土力学与工程学报**, 2007, 26(3): 509 - 517.  
WANG Fa-wu, ZHANG Ye-ming, WANG Gong-hui, et al. Deformation features of Shuping landslide caused by water level changes in Three Gorges Reservoir area, China[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(3): 509 - 517.
- [12] WANG, F W, ZHANG Y M, HUO, Z T, et al. Movement of the Shuping landslide in the first four years after the initial impoundment of the Three Gorges Dam Reservoir, China[J]. **Landslides**, 2008, 5(3): 321 - 329.
- [13] 三峡大学土木与建筑学院. 三峡库区秭归县树坪滑坡专业监测新增应急监测钻探暨补充地质勘察报告[R]. 宜昌: 三峡大学土木与建筑学院, 2010.
- [14] 湖北省地质环境总站. 湖北省三峡库区后续地质灾害防治秭归县树坪滑坡勘查报告[R]. 武汉: 湖北省地质环境总站, 2013.
- [15] 湖北省岩崩滑坡研究所. 三峡库区秭归县典型滑坡专业监测预警成果报告[R]. 宜昌: 湖北省岩崩滑坡研究所, 2013.
- [16] 中华人民共和国国土资源部. DZ/T0218 - 2006 滑坡防治工程勘查规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [17] 三峡库区地质灾害防治工作指挥部. 三峡库区地质灾害防治工程地质勘察技术要求[S]. 宜昌: 三峡库区地质灾害防治工作指挥部, 2012.