

文章编号: 1000-7598 (2011) 05-1465-08

盐岩储气库运营期稳定性评价研究

任 松¹, 李小勇¹, 姜德义¹, 王新胜², 杨春和^{1,3}(1.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; 2.重庆市勘测院, 重庆 400020;
3.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: 针对国内盐岩矿床的特点, 建立了盐岩地下储气库运营期稳定性的多层次、多指标综合评价体系, 并定义了盐岩地下储气库运营期稳定性等级标准。根据试验数据和数值模拟结果, 构建了各评价指标的评分模型, 得出了各评价等级相应评价指标的量值。采用 AHP 方法分析得到了描述层和指标层参数的权重。分别应用可拓法和模糊综合评价法对西气东输工程金坛储气库西 1 库进行运营期稳定性评价, 两种方法评价结果一致, 并与实际情况吻合, 表明建立的盐岩地下储气库运营期稳定性的多层次、多指标综合评价体系能客观反应储库的实际稳定情况, 具有较高的推广价值。

关 键 词: 盐岩储气库; 稳定性; 评价体系; 可拓法; 模糊综合评价

中图分类号: TU 354

文献标识码: A

Evaluating stability of salt rock gas storage during operation period

REN Song^{1,2}, LI Xiao-yong¹, JIANG De-yi¹, WANG Xin-sheng², YANG Chun-he^{1,3}

(1. Key Laboratory for the Exploitation of Southwestern Resources & the Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Chongqing Survey Institute, Chongqing 400020, China; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China.)

Abstract: Based on the features of Chinese salt rock bed, the comprehensive evaluation system of the stability of rock salt gas storage with multilevel and multi-index has been set up; and the assessment class level of the stability of rock salt gas storage during the operation period also has been defined. According to the test data and the result of numerical simulating, the scoring models of evaluation indices are built and the value of the corresponding evaluation indices for every assessment class is got. The weight of the describing layer and the index layer has been obtained by analytic hierarchy process. Both the extension evaluation and the fuzzy comprehensive evaluation have been used to evaluate the stability of Jintan Xi-1 salt rock gas storage of the West-to-East Natural Gas Transmission Project. And the results of the two above methods are consistent, just like the real situation, which show that it is of great worth to set up the comprehensive evaluation system of the stability of rock salt gas storage with multilevel and multi-index.

Key words: rock salt gas storage; stability; evaluation system; extension evaluation; fuzzy comprehensive evaluation

1 引 言

20 世纪 70 年代中东石油禁运引起的能源危机, 促使欧美各国加紧进行能源战略储备。由于盐岩具有非常低的渗透率、良好的蠕变行为和损伤自愈合等特性, 被广泛作为能源储存介质。目前, 全世界共有盐岩地下储库 44 座, 在国外已经运行近 50 年, 运行经验表明, 储库稳定性成了安全运营的关键^[1]。储库失稳将会导致储库失效、油气泄露以及地表沉降等事故。如美国 Eminence 盐岩地下储库在运行期

间由于蠕变容积损失 40%而失效; Barbers' Hill 盐岩地下储库产生裂缝导致 LPG 泄露 40%, 泄露气体运移, 在附近居民区发生爆炸。

国内外学者对盐岩溶腔的稳定性进行了深入的研究。德国 Rokahr 等^[2]用数值方法分析地下储室的安全性。加拿大 Dusseult 等^[3-5]对于盐岩溶腔处置固体有毒及放射性物质的安全可靠作了深入研究。余海龙等^[6]通过相似材料试验研究盐岩溶腔的稳定性。吴文等^[7]在理论分析和数值模拟基础上提出了盐岩矿床地下储库稳定性评价标准。杨春和等^[8]

收稿日期: 2010-09-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973) (No. 2009CB724606); 国家创新研究群体基金 (No. 50921063); 国家自然科学基金资助项目 (No. 51074198); 中央高校基本科研业务费 (No. CDJZR10240017); 重庆市科委自然科学基金计划 (No. 2010BB6044)。

第一作者简介: 任松, 男, 1975 年生, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程力学方面的教学和科研工作。E-mail: rs_rwx@cqu.edu.cn

对我国盐岩能源地下储存进行了可行性研究。姜德义等^[9]应用突变理论研究溶腔稳定性。但盐岩地下储库的不可见性和腔体形状的控制性，使其稳定性的评价较为困难。

综上所述，目前对盐岩地下储库运营期稳定研究，多集中在盐岩本构模型及数值计算方法等方面。对于采用安全系统科学理论建立的盐岩地下储库运营期稳定性的多层次、多指标综合评价体系尚未见报道。基于此，本文应用安全系统科学理论建立盐岩地下储气库运营期稳定性的多层次、多指标综合评价体系。采用可拓法和模糊综合评价法对同一地下储气库进行评价，以检验评价体系的可靠性。

2 盐岩地下储气库运营期稳定性评价体系

2.1 体系设计及评价指标

充分考虑盐岩地下储气库运营期稳定性的内在特征、外界环境构成要素，将盐岩地下储气库运营期稳定性评价分解为若干个评价层来考虑，采用自下而上的层次设计方法，基于相关理论成果，结合工程实际，合理、有效地确定其下层各评价子项目，形成一个包含多个评价子项目的多层次评价系统，由底层到中层再到顶层进行深入细致地研究。顶层为盐岩地下储气库运营期稳定性，称为目标层。中间层为描述盐岩地下储气库状态的项目，称为描述层。底层为盐岩地下储气库运营期稳定性评价的指标及其指标的表征量，称为指标层。评价体系及评价指标详见图 1。

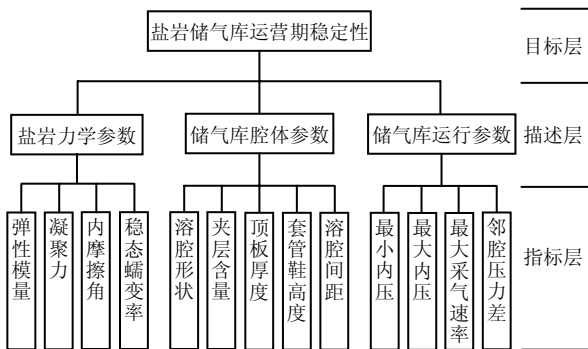


图 1 盐岩地下储气库运营期稳定性评价体系及评价指标
Fig.1 Evaluation system of stability of rock salt gas storage during operation period

2.2 稳定性等级标准及指标评分方法

结合相关行业安全等级分类，将盐岩地下储气库运营期稳定性分为 5 个评价等级：I 级为不稳定、II 级为基本稳定、III 级为较稳定、IV 级为稳定、

V 级为很稳定。以百分制分别对应分值为：

- I 级：[0, 60)； II 级：[60, 70)；
- III 级：[70, 80)； IV 级：[80, 90)；
- V 级：[90, 100]。

为减小主观性，不采用专家打分的方式，而主要根据试验和数值模拟结果构建各参数的评分模型。

2.2.1 盐岩力学参数评分模型

根据中国科学院武汉岩土力学研究所对云应和金坛盐矿盐样进行的单轴、三轴压缩和蠕变试验结果^[10-11]，构建盐岩力学参数各指标的评分模型如表 1 所示。

表 1 盐岩力学参数各指标评分模型
Table 1 Scoring model of salt rock mechanical parameters

| 指标 | 分值计算方法 | | |
|---|---------------------------------|---|---------------------------|
| 弹性模量 E /GPa | $0 \leq E < 5$ | $5 \leq E < 20$ | $E \geq 20$ |
| 得分 | $12E$ | $(-8E^2 + 320E + 1300)/45$ | 100 |
| 凝聚力 c /MPa | $0 \leq c < 1$ | $1 \leq c < 5$ | $c \geq 5$ |
| 得分 | $60c$ | $-2.5c^2 + 25c + 37.5$ | 100 |
| 内摩擦角 φ /(°) | $0 \leq \varphi < 30$ | $30 \leq \varphi < 50$ | $\varphi \geq 50$ |
| 得分 | $\varphi^2/15$ | $-0.1\varphi^2 + 10\varphi - 150$ | 100 |
| 稳态蠕变率 $\dot{\epsilon}_s$ /(10^{-4} /h) | $0 \leq \dot{\epsilon}_s < 3$ | $3 \leq \dot{\epsilon}_s < 6$ | $\dot{\epsilon}_s \geq 6$ |
| 得分 | $-40\dot{\epsilon}_s^2/9 + 100$ | $20\dot{\epsilon}_s^2/3 - 80\dot{\epsilon}_s + 240$ | 0 |

2.2.2 储气库腔体参数评分模型

应用 FLAC^{3D} 模拟计算储气库腔体流变 30 年后的体积收敛率 ($\Delta V/V$)，规定溶腔形状指标得分为 $100(1 - \Delta V/V)$ 。数值模拟表明，刚度大于盐岩而流变能力小于盐岩的泥岩夹层对储气库溶腔具有抑制变形的作用，但夹层含量太高，会影响储气库的密闭性和增加水溶建腔难度。盐岩具有良好的蠕变特性，预留一定厚度的顶板盐岩层，可以消弱溶腔变形对上部岩层及地表的影响，美国能源部规定回采厚度和溶腔最大直径之比为 10，荷兰亨格勒地区规定顶板厚度仅为 5 m^[12]。为防止套管由于盐岩蠕变承受较大的拉应力而破坏，套管鞋应距腔顶一定的距离，由套管钢材屈服强度和弹性模量计算其所能承受的应变变形，根据流变模拟结果确定最小套管鞋高度。对于储气库群，溶腔间距太大会浪费盐岩资源，间距太小则可能发生失稳破坏，假设储气库运行对围岩造成的影响范围分为塑性破坏区、中等程度扰动区和轻微扰动区厚度相同的 3 部分，为保证单个腔体互不影响，根据数值模拟的塑性区半径，确定溶腔安全间距，设安全系数 r_3 为溶腔间距和溶腔直径之比，德国一般取 $r_3 = 1.5 \sim 3.0$ ，美国一般取

$r_3=1.75\sim 2.5$ 。综合以上分析，并结合我国多为薄层状盐岩的实际，储气库腔体参数各指标评分模型见表 2。

表 2 储气库腔体参数指标评分模型

Table 2 Scoring model of gas storage cavity parameters

| 指标 | 分值计算方法 | | | |
|----------|--------------------------|--------------------|---------------------------|----------------|
| 夹层含量 Q | $0 \leq Q < 10$ | $10 \leq Q < 20$ | $Q \geq 20$ | |
| 得分 | $0.4C^2 - 8C + 100$ | $-0.6C^2 + 12C$ | 0 | |
| 顶板厚度 | $0 \leq r_1 < 0.5$ | $0.5 \leq r_1 < 1$ | $1 \leq r_1 < 2$ | $r_1 \geq 2$ |
| 得分 | $50\cos[\pi(2r_1+1)]+50$ | 100 | $50\cos[\pi(r_1+1)]+50$ | 0 |
| 套管鞋高度 | $0 \leq r_2 < 1$ | $1 \leq r_2 < 1.5$ | $1.5 \leq r_2 < 2.5$ | $r_2 \geq 2.5$ |
| 得分 | $50\cos[\pi(r_2+1)]+50$ | 100 | $50\cos[\pi(r_2+0.5)]+50$ | 0 |
| 溶腔间距 | $0 \leq r_3 < 2$ | $2 \leq r_3 < 3$ | $3 \leq r_3 < 5$ | $r_3 \geq 5$ |
| 得分 | $50\cos[\pi(0.5K+1)]+50$ | 100 | $50\cos[\pi(K+1)/2]+50$ | 0 |

注： r_1 为顶板厚度和溶腔直径比值； r_2 为套管鞋实际高度与模拟高度比值， r_3 为溶腔间距和溶腔直径之比。

2.2.3 储气库运行参数评分模型

储气库运行 5 年后体积收缩率应控制在 5% 以内，最大、最小内压比值范围是 2:1~6:1，据此确定最小内压与最大内压^[13]。储气库一年注采气周期下体积应变不应超过 3%^[14]，由此计算储气库最大采气降压速率。储气库多采用并联操作，即任意时刻邻腔压力差均为 0，最有利于储气库稳定。综合以上分析，储气库运行参数各指标评分模型见表 3。

表 3 储气库运行参数指标评分模型

Table 3 Scoring model of gas storage operating parameters

| 指标 | 分值计算方法 | | |
|-----------------------------|----------------------------|----------------------------------|-------------|
| 最小内压 U_{21} | $r_4 < 0.6$ | $0.6 \leq r_4 \leq 1.8$ | $r_4 > 1.8$ |
| 得分 | 0 | $50\cos(5\pi r_4/3)+50$ | 0 |
| 最大内压 U_{22} | $r_5 < 0.5$ | $0.5 \leq r_5 \leq 1.5$ | $r_5 > 1.5$ |
| 得分 | 0 | $50\cos(2\pi r_5)+50$ | 0 |
| 最大采气速率 U_{23} | $r_6 < 0.6$ | $0.6 \leq r_6 \leq 1.4$ | $r_6 > 1.4$ |
| 得分 | 0 | $50\cos(2.5\pi r_6 - 0.5\pi)+50$ | 0 |
| 邻腔运行压力差 U_{21}/MPa | $0 \leq \Delta P \leq 8$ | $\Delta P > 8$ | |
| 得分 | $50\cos(\pi\Delta P/8)+50$ | 0 | |

注： r_4 、 r_5 、 r_6 分别为储气库最小内压、最大内压和最大采气速率的运行值与模拟值之比； ΔP 为邻储气库动态运行压力差。

2.3 评价等级对应指标的量值

根据以上评分标准，可以计算出 5 个评价等级的对应指标量值，见表 4~6。

由于表 4~6 中各指标单位不统一，采用极差法对数据进行无量纲化处理，对数值越大越有利于稳定的指标，采用式 (1) 进行计算：

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{i\min}}{X_{i\max} - X_{i\min}} \quad (1)$$

对数值越小越有利于稳定的指标，采用式 (2) 进行计算：

$$X'_{ij} = \frac{X_{i\max} - X_{ij}}{X_{i\max} - X_{i\min}} \quad (2)$$

式中： X'_{ij} 为极差化后的数据； X_{ij} 为原始数据； $X_{i\max}$ 、 $X_{i\min}$ 分别为第 i 行数据的最大值与最小值。

表 4 各评价等级盐岩力学参数指标量值范围

Table 4 Values of mechanical index for each assessment class

| 评价等级 | 弹性模量 E/GPa | 凝聚力 c/MPa | 内摩擦角 $\varphi/^\circ$ | 稳态蠕变率 $\dot{\epsilon}_s/(10^{-4}/\text{h})$ |
|------|---------------------|--------------------|-----------------------|---|
| I | 0~5.0 | 0.00~1.00 | 0~30.0 | 6.0~3.0 |
| II | 5.0~7.0 | 1.00~1.54 | 30.0~32.7 | 3.0~2.6 |
| III | 7.0~9.4 | 1.54~2.17 | 32.7~35.9 | 2.6~2.1 |
| IV | 9.4~12.5 | 2.17~3.00 | 35.9~40.0 | 2.1~1.5 |
| V | 12.5~20.0 | 5~3.00 | 50~40.0 | 1.5~0 |

表 5 各评价等级岩储气库腔体参数指标量值范围

Table 5 Values of cavity index for each assessment class

| 评价等级 | 溶腔形状 $\Delta V/V$ | 夹层含量 Q | 顶板厚度 | 套管鞋高度 | 溶腔间距 |
|------|-------------------|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| I | 1~0.4 | 100~10.0 | 0~0.28 或 2~1.44 | 0~0.56 或 2.5~1.94 | 0~1.13 或 5~3.87 |
| II | 0.4~0.3 | 10.0~5.0 | 0.28~0.32 或 1.44~1.40 | 0.56~0.63 或 1.94~1.87 | 1.13~1.26 或 3.87~3.74 |
| III | 0.3~0.2 | 5.0~2.9 | 0.32~0.35 或 1.40~1.30 | 0.63~0.70 或 1.87~1.80 | 1.26~1.41 或 3.74~3.59 |
| IV | 0.2~0.1 | 2.9~1.3 | 0.35~0.40 或 1.30~1.20 | 0.70~0.80 或 1.80~1.70 | 1.41~1.59 或 3.59~3.41 |
| V | 0~0.1 | 0~1.3 | 0.40~0.50 或 0.50~1.20 | 0.80~1.25 或 1.25~1.70 | 1.59~2.5 或 2.5~3.41 |

表 6 各评价等级岩储气库运行参数指标量值范围

Table 6 Values of operating index for each assessment class

| 评价等级 | 最小内压 | 最大内压 | 最大采气速率 | 邻腔压力差 /MPa |
|------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------|
| I | 0~0.94 或 2.40~1.46 | 0~0.78 或 2.00~1.22 | 0~0.83 或 2.0~1.18 | 4.0~5.0 |
| II | 0.94~0.98 或 1.46~1.42 | 0.78~0.82 或 1.22~1.18 | 0.83~0.85 或 1.18~1.15 | 3.0~4.0 |
| III | 0.98~1.02 或 1.42~1.38 | 0.82~0.85 或 1.18~1.15 | 0.85~0.88 或 1.15~1.12 | 2.0~3.0 |
| IV | 1.02~1.08 或 1.38~1.32 | 0.85~0.90 或 1.15~1.10 | 0.88~0.92 或 1.12~1.08 | 1.0~2.0 |
| V | 1.08~1.20 或 1.20~1.32 | 0.90~1.00 或 1.00~1.10 | 0.92~1.00 或 1.00~1.08 | 0~1.0 |

表 4~6 中各指标无量纲化处理，结果如表 7~9 所示。

表 7 无量纲化后各评价等级盐岩力学参数指标量值范围
Table 7 Dimensionless values of mechanical index for each assessment

| 评价等级 | 弹性模量 E / GPa | 凝聚力 c / MPa | 内摩擦角 $\varphi / (^{\circ})$ | 稳态蠕变率 $\varepsilon_s / (10^{-4}/\text{h})$ |
|------|--------------------------|-------------------------|--------------------------------|---|
| I | 0.00~0.25 | 0.00~0.20 | 0.00~0.60 | 0~0.50 |
| II | 0.25~0.35 | 0.20~0.31 | 0.60~0.65 | 0.50~0.57 |
| III | 0.35~0.47 | 0.31~0.40 | 0.65~0.72 | 0.57~0.65 |
| IV | 0.47~0.63 | 0.40~0.60 | 0.72~0.80 | 0.65~0.75 |
| V | 0.63~1.00 | 0.60~1.00 | 0.80~1.00 | 0.75~1 |

表 8 无量纲化后各评价等级岩储气库腔体参数指标量值范围

Table 8 Dimensionless values of cavity index for each assessment class

| 评价等级 | 溶腔形状 | 夹层含量 | 顶板厚度 | 套管鞋高度 | 溶腔间距 |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| I | 0.00~0.60 | 0.00~0.90 | 0.00~0.56 | 0.00~0.45 | 0.00~0.45 |
| II | 0.60~0.70 | 0.90~0.95 | 0.56~0.64 | 0.45~0.50 | 0.45~0.50 |
| III | 0.70~0.80 | 0.95~0.97 | 0.64~0.70 | 0.50~0.56 | 0.50~0.56 |
| IV | 0.80~0.90 | 0.97~0.99 | 0.70~0.80 | 0.56~0.64 | 0.56~0.64 |
| V | 0.90~1.00 | 0.99~0.00 | 0.80~1.00 | 0.64~1.00 | 0.64~1 |

表 9 无量纲化后各评价等级岩储气库运行参数指标量值范围

Table 9 Dimensionless values of operating index for each assessment class

| 评价等级 | 最小内压 | 最大内压 | 最大采气速率 | 邻腔压力差 |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| I | 0.00~0.78 | 0.00~0.78 | 0.00~0.83 | 0.00~0.20 |
| II | 0.78~0.82 | 0.78~0.82 | 0.83~0.85 | 0.20~0.40 |
| III | 0.82~0.85 | 0.82~0.85 | 0.85~0.88 | 0.40~0.60 |
| IV | 0.85~0.90 | 0.85~0.90 | 0.88~0.92 | 0.60~0.80 |
| V | 0.90~1.00 | 0.90~1.00 | 0.92~1.00 | 0.80~1.00 |

2.4 确定评价指标权重

根据国外储气库建设经验和盐岩专家的建议^[5, 11], 采用 AHP 对描述层中盐岩力学参数、储气库腔体参数和储气库运行参数进行两两比较, 构建判断矩阵 M 。利用 Matlab 软件的 $[V, D] = \text{eig}(M)$ 命令确定指标权重 W , 并进行一致性检验。同理确定指标层中各子指标在描述层中的权重, 计算结果详见表 10。

3 金坛西 1 储气库稳定性可拓法评价

基于物元的可拓法可以解决岩体工程稳定性评价过程中常见的矛盾相容、定量与定性共存等问题, 得到了较为广泛的应用。

3.1 可拓法及评价步骤

可拓法是基于物元的评价方法, 物元是其逻辑细胞。其评价步骤如下:

(1) 确定经典域

物元表示为

$$R = (N, C, V) \tag{3}$$

表 10 指标权重取值
Table 10 Values of weights of indices

| 描述层 | W_i | 指标层 | W_{ij} |
|---------|---------|-----------------------|----------|
| 盐岩力学参数 | 0.333 4 | 弹性模量 E | 0.250 0 |
| | | 凝聚力 c | 0.250 0 |
| | | 内摩擦角 φ | 0.250 0 |
| | | 稳态蠕变率 ε_s | 0.250 0 |
| 储气库腔体参数 | 0.333 3 | 溶腔形状 | 0.285 3 |
| | | 夹层含量 | 0.139 4 |
| | | 顶板厚度 | 0.194 9 |
| | | 套管鞋高度 | 0.095 1 |
| | | 溶腔间距 | 0.285 3 |
| 储气库运行参数 | 0.333 3 | 最小内压 | 0.363 6 |
| | | 最大内压 | 0.181 8 |
| | | 最大采气速率 | 0.363 6 |
| | | 邻腔压力差 | 0.091 0 |

式中: N 为事物的名称; C 为特征; V 为量值。事物可以有 n 个特征 c_1, c_2, \dots, c_n 和相应的量值 v_1, v_2, \dots, v_n 。

经典域为物元中 V 的量值范围。

(2) 确定节域

节域表示为

$$R_p = (P, C_i, V_{pi}) \tag{4}$$

式中: P 为全部评价等级; $V_p = (a_{pi}, b_{pi})$, ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) 为评价指标 C_i 在 P 条件下所取的量值范围。

(3) 确定待评物元

待评物元表示为

$$R = (N, C_i, V_i) \tag{5}$$

式中: N 为待评对象; C_i 评价指标, ($i = 1, 2, 3, \dots, n$); V_i 为对应评价指标的取值。

(4) 计算单指标关联度

单指标关联度指待评价对象的第 i 个 ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) 指标关于分类等级 j ($j = 1, 2, 3, 4, \dots, m$) 的关联度, 用式 (6) ~ (8) 计算。

当 $\rho[v_i(t), v_{pi}] - \rho[v_i(t), v_{0ij}] = 0$ 时

$$K_j(v_i) = \frac{\rho[v_i(t), v_{0ij}]}{\rho[v_i(t), v_{pi}] - \rho[v_i(t), v_{0ij}]} \tag{6}$$

当 $\rho[v_i(t), v_{pi}] - \rho[v_i(t), v_{0ij}] \neq 0$ 时

$$K_j(v_i) = -\rho[v_i(t), v_{0ij}] - 1 \tag{7}$$

$$\left. \begin{aligned} \rho[v_i(t), v_{0ij}] &= \left| v_i - \frac{a_{0ij} + b_{0ij}}{2} \right| - \frac{b_{0ij} - a_{0ij}}{2} \\ \rho[v_i(t), v_{pi}] &= \left| v_i - \frac{a_{pi} + b_{pi}}{2} \right| - \frac{b_{pi} - a_{pi}}{2} \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

其中, K 为单指标关联度; $(a_{0ij}, b_{0ij})(j=1, 2, 3, 4, \dots, m, m$ 为评价等级) 为评价指标 C_i 在所有条件下的量值范围。

(5) 计算多指标综合关联度

多指标综合关联度表征评价对象关于各评价等级的归属程度, 用式 (9) 计算。

$$K_j(N) = \sum_{i=1}^n \alpha_i K_j(v_i) \quad (9)$$

式中: $j=1, 2, 3, \dots, m$; α_i 为指标 C_i 的权重系数, 权重系数之和必须等于 1。

(6) 确定评价等级和级别变量特征值

在 $K_j(N)$ 中, 最大的 $\max_j [K_j(N)]$ 所属的稳定性等级 j 即为待评价对象的稳定性等级。

待评价对象级别变量特征值由式 (10) 计算。

$$j^* = \frac{\sum_{j=1}^m j K'_j(N)}{\sum_{j=1}^m K'_j(N)} \quad (10)$$

式中: $K'_j(N) = \frac{K_j(N) - \min_j K_j(N)}{\max_j K_j(N) - \min_j K_j(N)}$, 其中 $j=1, 2, 3, \dots, m$ 。

3.2 金坛西 1 储气库运营期稳定性待评物元

金坛西 1 储气库为我国最早的 4 个盐岩地下储气库之一, 目前已经安全运营 3 年, 储库稳定。其盐岩力学参数、储气库腔体参数和运行参数详见表 11。表中的无量纲化值即为西 1 储气库稳定性待评物元。

表 11 运营期西 1 储气库稳定性评价指标取值
Table 11 Values of parameters about Xi-1 gas storage during operation period

| 描述层 | 指标层 | 相应值 | 无量纲化值 |
|---------|---|------|-------|
| 盐岩力学参数 | 弹性模量 E/GPa | 18.5 | 0.66 |
| | 凝聚力 c/MPa | 1.2 | 0.24 |
| | 内摩擦角 $\varphi/^\circ\text{C}$ | 40 | 0.80 |
| | 稳态蠕变率 $\dot{\epsilon}_s / (10^{-4}/\text{h})$ | 4.8 | 0.20 |
| 储气库腔体参数 | 溶腔形状 | 0.18 | 0.82 |
| | 夹层含量 | 3 | 0.97 |
| | 顶板厚度 | 0.38 | 0.76 |
| | 套管鞋高度 | 0.75 | 0.60 |
| 储气库运行参数 | 溶腔间距 | 1.70 | 0.68 |
| | 最小内压 | 0.83 | 0.69 |
| | 最大内压 | 0.57 | 0.57 |
| | 最大采气速率 | 0.85 | 0.85 |
| | 邻腔压力差 $/\text{MPa}$ | 1.75 | 0.65 |

3.3 西 1 储气库可拓法评价及结果

西 1 储气库稳定性评价可拓评价由两部分组

成: 描述层和目标层可拓评价, 描述层可拓评价是目标层可拓评价的前提和基础。

3.3.1 描述层可拓评价

应用编制的可拓法评价计算程序, 进行可拓法评价的 4、5、6 步, 西 1 储气库描述层可拓评价过程及评价结果 (见表 12~14)。

表 12 盐岩力学参数可拓评价计算结果
Table 12 Evaluation results of the rock salt mechanical index by extension

| 等级 | 单指标关联度 | | | | 综合关联度 |
|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 弹性模量 | 凝聚力 | 内摩擦角 | 稳态蠕变率 | |
| I | -0.642 11 | -0.559 52 | -0.849 32 | -0.200 00 | -0.562 74 |
| II | -0.604 65 | -0.506 67 | -0.803 57 | 0.200 00 | -0.428 72 |
| III | -0.546 67 | -0.403 22 | -0.710 53 | -0.058 82 | -0.429 81 |
| IV | -0.370 37 | -0.193 55 | -0.450 00 | -0.272 73 | -0.224 89 |
| V | 0.370 37 | -0.139 53 | 0.450 00 | -0.404 07 | -0.069 19 |

注: 弹性模量、凝聚力、内摩擦角、稳态蠕变率权重分别为 0.25、0.25、0.25、0.25; 级别变量特征值为 4.187。

表 13 储气库腔体参数可拓评价计算结果
Table 13 Evaluation results of the rock salt gas storage cavity index by extension

| 等级 | 单指标关联度 | | | | | 综合关联度 |
|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 溶腔形状 | 夹层含量 | 顶板厚度 | 套管鞋高度 | 溶腔间距 | |
| I | -0.550 00 | 0.500 00 | -0.358 21 | -0.326 92 | -0.440 00 | -0.313 66 |
| II | -0.400 00 | -0.500 00 | -0.140 00 | -0.125 00 | -0.300 00 | -0.308 59 |
| III | -0.100 00 | -0.666 67 | 0.411 76 | 0.333 33 | -0.066 67 | -0.028 53 |
| IV | 0.200 00 | -0.750 00 | -0.188 68 | -0.222 22 | 0.200 00 | -0.048 33 |
| V | -0.307 69 | -0.812 50 | -0.376 81 | -0.363 64 | -0.222 22 | -0.372 46 |

注: 溶腔形状、夹层含量、顶板厚度、套管鞋高度、溶腔间距的权重分别为 0.285 3、0.139 4、0.194 9、0.095 1、0.285 3; 级别变量特征值为 3.180。

表 14 储气库运行参数可拓评价计算结果
Table 14 Evaluation results of the rock salt gas storage operating index by extension

| 等级 | 单指标关联度 | | | | 综合关联度 |
|-----|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 最小内压 | 最大内压 | 最大采气速率 | 邻腔压力差 | |
| I | -0.625 | -0.358 21 | 0.230 77 | -0.300 00 | -0.235 76 |
| II | -0.500 | -0.188 68 | -0.230 77 | 0.250 00 | -0.277 26 |
| III | -0.250 | 0.230 77 | -0.375 00 | -0.125 00 | -0.196 68 |
| IV | 0.500 | -0.065 22 | -0.500 00 | -0.416 67 | -0.049 77 |
| V | -0.250 | -0.348 48 | -0.545 45 | -0.562 50 | -0.403 77 |

注: 最小内压、最大内压、最大采气速率、邻腔压力差的权重分别为 0.363 6、0.181 8、0.363 6、0.090 9; 级别变量特征值为 2.873。

3.3.2 目标层可拓评价

由以上的计算, 可以得出 3 个描述物元 (盐岩力学参数, 储气库腔体参数, 储气库运行参数) 的级别变量特征值分别为 4.187、3.180、2.873。把描述物元对应于 5 个等级进行均匀取值, 分别对应于 (0, 1)、(1, 2)、(2, 3)、(3, 4)、(4, 5)。

分别计算单指标关联度和综合关联度。目标物元可拓法评价结果见表 15。

表 15 目标层可拓评价结果
Table 15 Evaluation results of object layer by extension

| 等级 | 单指标关联度 | | | 综合 关联度 |
|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 盐岩力学参数 | 储气库腔体参数 | 储气库运行参数 | |
| I | -0.800 00 | -0.550 00 | -0.462 50 | -0.604 17 |
| II | -0.733 33 | -0.400 00 | -0.283 33 | -0.472 22 |
| III | -0.600 00 | -0.100 00 | 0.150 00 | -0.183 33 |
| IV | -0.200 00 | 0.200 00 | -0.065 22 | -0.021 74 |
| V | 0.200 00 | -0.307 69 | -0.348 48 | -0.152 06 |

注：盐岩力学参数、储气库腔体参数、储气库运行参数的权重分别为 0.333 3、0.333 3、0.333 4。级别变量特征值为 3.853。

从表 15 可知，金坛西 1 储气库稳定性综合评价的级别变量特征值为 3.853，运营期储气库处于 IV 级，为稳定状态。

4 金坛西 1 储气库稳定性模糊综合评价

模糊综合评价是利用隶属函数作为桥梁将模糊性加以量化，适用于评价具有模糊的非量化因素的对象，在岩体工程稳定性评价中得到了较为广泛的应用。

4.1 模糊综合评价及评价过程

对于给定对象的模糊综合评价，设给定 2 个有限论域：

$$\left. \begin{aligned} \text{因素集合: } U &= \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_m\} \\ \text{评价集合: } V &= \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

其中：元素 $U_i (i=1, 2, \dots, m)$ 是影响评价对象的若干因素。 $V_i (i=1, 2, \dots, n)$ 是若干可能做出的判断结果。令：

$$B = AR \quad (12)$$

式中： A 为因素权重集 $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$ ，表示各评价指标对于评价结果的影响程度； R 为综合评价矩阵，描述因素集 U 与评价集 V 之间的关系； B 为模糊综合评价集，表示最终评价结果的集合。

在储气库评价体系设计中，将评价对象分为了指标层、描述层和目标层，因此，需要进行多级模糊综合评价。

多级模糊评价就是先把评价的某一事物的多种因素按其属性分为若干类大因素，然后对每一类大因素进行初级的综合评价，最后再对初级评价的结果，进行高一级的综合评价，其过程如下：

(1) 确定因素集 U ，按其不同属性分成若干互不相交的因素子集 $U = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_m\}$ ，评价集 $V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\}$ 。

(2) 对每个 $U_k (k=1, 2, \dots, n)$ 进行初级综合评价。根据 $U_k = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_{knk}\}$ 中各因素的作用大小，赋予相应的权重 A_k ， $A_k = \{a_{k1}, a_{k2}, a_{k3}, \dots, a_{knk}\}$ 且 $\sum_{i=1}^{n_k} a_{ki} = 1$ ；对 U_k 中的每个因素 u_{knk} 按照评价集 $V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\}$ 的等级评定出 u_{knk} 对 V_j 的隶属度 $r_{kij} (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)$ ，由此组成单因素评价矩阵 R_k 。然后可以得出 U_k 的一级综合评价结果：

$$B_k = A_k R_k = \{b_{k1}, b_{k2}, \dots, b_{knk}\}, (k=1, 2, \dots, n) \quad (13)$$

(3) 对 U 进行综合评价，将 U 中的 n 个元素 $U = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_m\}$ 看为是 U 上的 n 个单因素，按各 U_k 在 U 中所起作用的大小确定权重 A_k ， $A_k = \{a_{k1}, a_{k2}, a_{k3}, \dots, a_{kn}\}$ ；由各 U_k 的评价结果 $B_k (k=1, 2, \dots, n)$ ，得出总的的评价矩阵：

$$R = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \dots & b_{nm} \end{bmatrix} \quad (14)$$

则得出 U 的综合评价：

$$B = AR = A \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_n \end{bmatrix} = (b_1, b_2, \dots, b_m) \quad (15)$$

4.2 西 1 储气库模糊综合评价及结果

西 1 储气库运营期稳定性评价指标取值见表 11。根据各指标评分模型计算得到各指标分值，将其代入以下梯形分布隶属函数^[15]：

$$f_1(u_{ij}) = \begin{cases} 1 & (90 \leq u_{ij} \leq 100) \\ \frac{u_{ij} - 80}{90 - 80} & (80 \leq u_{ij} < 90) \\ 0 & (u_{ij} < 80) \end{cases}$$

$$f_2(u_{ij}) = \begin{cases} \frac{100 - u_{ij}}{100 - 90} & (90 \leq u_{ij} \leq 100) \\ 1 & (80 \leq u_{ij} < 90) \\ \frac{u_{ij} - 70}{80 - 70} & (u_{ij} < 80) \\ 0 & (u_{ij} < 70) \end{cases}$$

$$f_3(u_{ij}) = \begin{cases} 0 & (90 \leq u_{ij} \leq 100) \\ \frac{90 - u_{ij}}{90 - 80} & (80 \leq u_{ij} < 90) \\ 1 & (70 \leq u_{ij} < 80) \\ \frac{u_{ij} - 60}{70 - 60} & (60 \leq u_{ij} < 70) \\ 0 & (u_{ij} < 60) \end{cases}$$

$$f_4(u_{ij}) = \begin{cases} 0 & (80 \leq u_{ij} \leq 100) \\ \frac{80 - u_{ij}}{80 - 70} & (70 \leq u_{ij} < 80) \\ 1 & (60 \leq u_{ij} < 70) \\ \frac{u_{ij} - 50}{60 - 50} & (50 \leq u_{ij} < 60) \\ 0 & (u_{ij} < 50) \end{cases}$$

$$f_5(u_{ij}) = \begin{cases} 0 & (70 \leq u_{ij} \leq 100) \\ \frac{70 - u_{ij}}{70 - 60} & (60 \leq u_{ij} < 70) \\ 1 & (0 \leq u_{ij} < 60) \end{cases}$$

得到各指标对 V_j 的隶属度及模糊关系矩阵 R 。进而得到综合评价矩阵 $B = WR$ 。最后，求得储气库运营期稳定性的综合得分 $M = BV^T$ 。评价结果见表 16。

表 16 西 1 储气库模糊综合评价结果
Table 16 Results of Xi-1 gas storage by fuzzy comprehensive evaluation

| 描述层 | 权重 | 指标层 | 权重 | Z_{ij} | Z_i | Z |
|---------|---------|--------------------|---------|----------|-------|-------|
| 盐岩力学参数 | 0.333 4 | 弹性模量 E | 0.250 0 | 99.60 | 80.97 | |
| | | 凝聚力 c | 0.250 0 | 64.84 | | |
| | | 内摩擦角 ϕ | 0.250 0 | 90.00 | | |
| | | 稳态蠕变率 ϵ_s | 0.250 0 | 74.40 | | |
| 储气库腔体参数 | 0.333 3 | 溶腔形状 | 0.285 3 | 79.72 | 69.07 | 80.34 |
| | | 夹层含量 | 0.139 4 | 99.89 | | |
| | | 顶板厚度 | 0.194 9 | 50.60 | | |
| | | 套管鞋高度 | 0.095 1 | 100.00 | | |
| | | 溶腔间距 | 0.285 3 | 49.21 | | |
| 储气库运行参数 | 0.333 3 | 最小内压 | 0.363 6 | 88.30 | 91.00 | |
| | | 最大内压 | 0.181 8 | 96.31 | | |
| | | 最大采气速率 | 0.363 6 | 95.83 | | |
| | | 邻腔压力差 | 0.091 0 | 100.00 | | |

由表可知，金坛西 1 储气库稳定性综合模糊评价得分为 80.10，处于 IV 级，为稳定状态，与可拓法评价结果一致。

5 结 论

(1) 根据试验和数值模拟结果构建各参数的评分模型，可显著减小专家打分的主观性。

(2) 西 1 库运营期稳定性可拓法评价级别变量特征值为 3.853，处于 IV 级，储库状态稳定。

(3) 西 1 库运营期稳定性多级模糊综合评价得分为 80.10，处于 IV 级，储库状态稳定。

(4) 可拓评价法与模糊综合评价法评价结果一致，并与实际相符，表明建立的多层次、多指标综合评价体系能客观反应储库的实际稳定情况，具有推广应用价值。

参 考 文 献

- [1] 宋桂花, 李国韬, 温庆河, 等. 世界盐穴应用历史回顾与展望[J]. 天然气工业, 2004, 24(9): 116—118.
SONG Gui-hua, LI Guo-tao, WEN Qing-he, et al. Historical review and prospect of worldwide salt caves using[J]. *Natural Gas Industry*, 2004, 24(9): 116—118.
- [2] STAUDTMEISTER K, ROKAHR R B. Rock mechanical design of storage caverns for natural gas in rock salt mass[J]. *Int. J. of Rock Mech. & Min. Sci.*, 1997, (34): 3—4.
- [3] LEMIEUX B, DAVIDSON B, DUSSEAULT M B. Mechanical behavior of waste blends for salt cavern disposal[J]. *Int. J. of Rock Mech. & Min. Sci.*, 1998, 35: —4.
- [4] DUSSEAULT M, DAVIDSON B, SANTAMARINA J C. Potential for salt solution cavern placement of engineered radioactive wastes[C]//Proceedings of International Conference on Deep Geological Disposal of Radioactive Waste. Canada: Winnipeg, 631—639.
- [5] DAVIDSON B, DUSSEULT M, LEMIEUX B. An examination of the research, development, design, and implementation issues related to solution cavern disposal of toxic industrial wastes[C]//Solution Mining Research Institute Proceedings. [S. l.]: [s. n.], 1997: 197—198.
- [6] 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.
YÜ Hai-long, TAN Xue-shu, LI Tong-lin, et al. Design of analogous model on the stability of salt rock cavity[J]. *Xi'an University of Science & Technology Journal*, 1994, 14(4): 311—317.

- [7] 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. Investigations 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.
- [8] 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.
- [9] 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]. 岩土力学, 2005, 26(07): 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(07): 1099—1103.
- [10] 陈锋. 盐岩力学特性及其在储气库建设中的应用研究[博士学位论文 D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006.
- [11] 刘江. 层状盐岩力学特性试验研究及其理论分析[硕士学位论文 D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006.
- [12] 康志强, 冯夏庭, 周辉. 基于层次分析法的可拓学理论在地下洞室岩体质量评价中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增 2): 3687—3693.
KANG Zhi-qiang, FENG Xia-ting, ZHOU Hui. Application of extenics theory to evaluation of underground cavern rock quality based on stratification analysis method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(Supp. 2): 3687—3693.
- [13] 闵文飞, 许俊杰, 扬晓鸿. 多层次模糊综合评判在选煤工艺流程选择中的应用[J]. 煤炭学报, 2002, 27(2): 201—205.
MIN Wen-fei, XU Jun-jie, YANG Xiao-hong. Selection of coal preparation flow sheet by multi-stage comprehensive fuzzy evaluation method[J]. **Journal of China Coal Society**, 2002, 27(2): 201—205.
- [14] 谈小龙, 徐卫亚, 梁桂兰. 可拓方法在岩石边坡整体安全评价中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(12): 2503—2509.
DAN Xiao-long, XU Wei-ya, LIANG Gui-lan. Application of extension method to comprehensive safety evaluation of rock slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(12): 2503—2509.
- [15] 任松, 王新胜, 姜德义, 等. 隧道长期安全监测及评价模型[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2009, 32(11): 1345—1351.
REN Song, WANG Xin-sheng, JIANG De-yi. Monitoring and evaluation model of tunnel long-term safety[J]. **Journal of Chongqing University (Natural Science)**, 2009, 32(11): 1345—1351.
- [143] 杨天鸿, 于庆磊, 陈仕阔, 等. 范各庄煤矿砂岩岩体结构数字识别及参数表征[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(12): 2482—2489.
YANG Tian-hong, YU Qing-lei, CHEN Shi-kuo, et al. Rock mass structure digital recognition and hydro-mechanical parameters characterization of sandstone in Fangezhuang coal mine[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(12): 2482—2489.
- [144] YANG T H, XU T, TANG C A. The deformation mechanism of a layered creeping coal mine slope and the associated stability assessments[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(3): 525—525.

上接第 1451 页

ZHUN Chuan-yun, LU Wen-bo, DONG Zhen-hua. Rock slope safety criterion summary of blasting vibration[J]. **Blasting**, 1997, 14 (4): 13—17.

[141] 刘美山. 特高陡边坡开挖爆破技术及其对边坡稳定性的影响[博士学位论文 D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2007.

[142] 姜福兴, 叶根喜, 王存文, 等. 高精度微震监测技术在煤矿突水监测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1932—1938.

JIANG Fu-xing, YE Genxi, WANG Cun-wen, et al. Application of high-precision microseismic monitoring technique to water inrush monitoring in coal mine[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(9): 1932—1938.