

文章编号: 1000-7598 (2011) 08-1125-07

# 盐岩地下油气储库运营期风险的故障树分析

李 媛<sup>1</sup>, 张强勇<sup>1</sup>, 贾 超<sup>2</sup>, 刘 健<sup>2</sup>, 李术才<sup>1</sup>, 杨春和<sup>3</sup>(1. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 济南 250061; 2. 山东大学 土建与水利学院, 济南 250061;  
3. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071)

**摘 要:** 盐岩以其良好的蠕变特性、低渗透性和损伤自我恢复性而被广泛用于地下油气能源储备, 虽然目前国内外对盐岩力学特性的研究成果较多, 但关于盐岩地下油气储库风险分析的研究报道却尚不多见。为了探讨盐岩地下油气储库运营期的风险机制, 以江苏金坛盐岩地下油气储库为示范工程, 对储库运营期的风险因子进行了辨识。应用故障树分析方法对储库运营期事故进行研究, 建立了储库运营期腔体失效、地表沉陷、油气渗漏的故障树模型。通过对运营期故障树最小割集和结构重要度的分析, 将储库运营期的风险因子按其影响程度进行了排序, 并对故障树分析方法进行了评价, 所得结论为进一步开展储库风险评估与控制提供了指导意见。

**关 键 词:** 盐岩地下油气储库; 风险因子; 故障树模型; 最小割集; 结构重要度

**中图分类号:** TU 473

**文献标识码:** A

## Fault tree analysis of salt cavern storage during its operational period

LI Yuan<sup>1</sup>, ZHANG Qiang-yong<sup>1</sup>, JIA Chao<sup>2</sup>, LIU Jian<sup>2</sup>, LI Shu-cai<sup>1</sup>, YANG Chun-he<sup>3</sup>

(1. Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 3. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** Based on the good characters of creep property, low permeability and self-healing of damage, salt rock has been widely used in energy storage of oil and gas. Nowadays, most researches are concerned on the mechanical properties of salt rock at home and abroad; but the studies about risk analysis of the salt cavern storage are still few. So in order to explore the risk mechanism of salt cavern during the operational period, with the demonstration project of the Jintan oil-gas storage of salt rock in Jiangsu Province, the risk factors during the operational period are identified. Fault tree analysis (FTA) is applied to establishing the analytical models for cavern failure, surface subsidence and storage leakage. Then the minimal cut sets and structure importance are used to sort the risk factors for their influence level. At last, FTA is evaluated to provide guidance for further risk assessment and control during the operational period.

**Key words:** salt cavern storage of oil and gas; risk factors; fault tree models; minimal cut sets; structure importance

## 1 引 言

众所周知, 能源储备是国民经济持续稳定发展的重要保障, 而地下储库以其安全经济的优点被国际上许多国家广泛用于能源的储备。随着对地下存储介质认识研究的日益进展, 目前, 由于盐岩良好的蠕变、低渗透率及损伤自我恢复特性, 而被公认为能源贮存、高放射核废料永久性处置的最理想介质<sup>[1-2]</sup>。据统计, 世界上 90% 的能源储存在盐岩介质或报废的盐矿井中, 正是基于盐岩地下能源储库这种巨大的工程应用背景和我国大量能源安全储备

的现状, 近年来, 我国也已开始了盐岩地下能源储备的选址及建设工作。

然而当盐岩地下储库因其独有的优点被国内外广泛应用于能源储备的同时, 各种危险事故也伴随其中, 例如 1980 年, 美国得克萨斯州的 Barber 盐丘 1 个储存液化石油气的盐穴, 由于套管腐蚀发生气体沿土壤运移渗漏, 最终在 Mont Belvieu 附近的一个居民区发生爆炸<sup>[3]</sup>。1992 年, 位于美国得克萨斯州修斯顿西北约 113 km 处的 Brenham 盐丘, 由于控制系统失效导致储气库溢满, 最终使液化石油气渗漏到地表, 酿成严重的爆炸事故<sup>[3]</sup>。1978 年

收稿日期: 2010-04-27

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) (No. 2009CB724607); 国家自然科学基金项目资助 (No. 40772173); 山东省自然科学基金项目资助 (No. Y2007F52); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目资助 (No. NCET-08-0336)。

第一作者简介: 李媛, 女, 1984 年生, 硕士, 主要从事盐岩地下油气储库灾变风险分析与评估研究。E-mail: liyuan071823@sohu.com

9月21日,美国路易斯安那州的 West Hackberry 储库,由于阀门松动失效,导致油气渗漏,最终造成井喷而引起大火<sup>[4]</sup>。1970—1980年,位于法国的 Tersanne 储库,由于蠕变导致腔体收缩,在运行了6a后有效体积损失了60%,同时导致了地面几乎以1cm/a的速度发生沉降<sup>[4]</sup>。2001年,美国堪萨斯州哈钦森市 Yaggy 储气库因腔体密闭性失效,导致气体渗漏,多次引起火灾事故,致多人伤亡<sup>[4]</sup>。近30年来,油气渗漏、腔体失效和库区地表沉陷事故在国内外盐岩地下储库运营中时有发生,不仅影响储库的安全运营,造成了重大的财产和环境危害,而且给社会公共安全和能源储备安全都带来了严重的威胁。因此,本文着重对这3个风险事故进行运营期的风险因子辨识,为下一步的风险分析及评价管理提供理论基础。

目前,国内外针对风险分析的方法主要有专家评议法、蒙特卡罗模拟法、模糊数学法、事件树法(ETA)、故障树法(FTA)、层次分析法(AHP)等。例如,Sturk等<sup>[5]</sup>以斯德哥尔摩的环路隧道工程为例,介绍了智暴法、层次分析法和故障树分析法在大型地下工程决策分析和风险评估中的应用;You等<sup>[6]</sup>基于蒙特卡罗模拟法获得了隧道安全因素的概率分布,从而对地下洞室风险分析进行了初步的研究;Lin等<sup>[7]</sup>在传统故障树分析的基础上,采用模糊集理论和概率论相结合的方法,对某人机交互系统的稳定性进行了分析;黄宏伟等<sup>[8]</sup>利用故障树分析方法对复合式土压平衡盾构刀盘的失效模式和影响因素进行了分析;凌玉华<sup>[9]</sup>以层次分析法为基础,利用专家调查和模糊综合判断相结合的方法对地铁车站施工方案进行了优选。纵观国内外的风险

管理研究,风险分析已成为不同行业风险评估中不可或缺的一部分。虽然各项工程建设的风险管理工作已得到科研人员越来越多的重视,但针对盐岩地下储库风险分析的研究成果和相关研究报道十分少见。因此,本文以江苏金坛盐岩地下油气储库为示范工程,采用故障树分析法,通过风险因子的辨识,建立了盐岩地下储库运营期风险的故障树模型,分析了风险因子的重要程度,为开展储库运营期风险评价提供了指导意见。

## 2 盐岩地下储库运营期的风险辨识

风险辨识是风险分析的基础和前提条件,只有全面了解、正确掌握风险事故和引起这种风险事故发生的风险因子,风险的分析、评估和控制才能具有真正的现实意义。

首先,将盐岩地下油气储库的风险定义为:在盐岩地下油气储库全寿命期内,在各种不确定性因素的影响下,盐岩地下油气储库遭受损伤破坏致使其功能不能按预定要求发挥的可能性及产生的不良或不利后果。

该定义包括了2个因素:①油气储库发生灾害的可能性,即失效概率;②油气储库发生灾害产生的不良或不利后果,即经济损失。同时包含了4个内容:①对象:盐岩地下储气库;②时间:全寿命期;③原因:不确定性因素;④后果:经济损失。

根据储库风险定义,将储库的全寿命期分为规划、设计、施工和运营4个主要阶段。本文重点对运营期发生的风险事故进行辨识。从已有资料显示,国内外储库运营期事故主要集中于腔体失效、油气渗漏和地表沉陷,如表1所示。

表1 国内外部分能源储库事故

Table 1 Parts of accidents of the salt cavern at home and abroad

| 事故名称 | 案例                                | 事故后果   | 事故原因      |
|------|-----------------------------------|--|-----------|
| 腔体失效 | 美国 Eminence 天然气储库(1970—1972年)     | 腔体收缩40%  | 蠕变        |
|      | 美国 Stratton Ridge 天然气储库(1990年)    | 腔体失效,弃用  | 蠕变        |
|      | 德国 Kiel 101 天然气储库(1967年)          | 40d后体积收缩12.3%,5个月后又损失了1900m <sup>3</sup>         | 蠕变        |
|      | 法国 Tersanne 天然气储库(1970—1980年)     | 有效体积损失60%,地面沉降10mm/a                             | 蠕变        |
| 地表沉陷 | 美国 Big Hill 石油储库(1989—1999年)      | 地面沉降91.4mm/a                                     | 蠕变,顶板垮塌   |
|      | 美国 West Hackberry 石油储库(20世纪70年代)  | 地面沉降76.2mm/a                                     | 蠕变,腔体收敛   |
|      | 美国 Bryan Mound(1982—1998年)        | 地面沉降36mm/a                                       | 蠕变,腔体变形收敛 |
|      | 云南三水隔坑盐矿                          | 地面塌陷   | 上覆岩体沿断层滑动 |
|      | 中国安徽定远盐矿(2005年12月和2006年3月)        | 地面塌陷面积分别为8300m <sup>2</sup> 和40000m <sup>2</sup> | 上覆层厚度过薄   |
| 油气渗漏 | 美国 West Hackberry 石油储库(1978年)     | 大火   | 井控阀松动     |
|      | 美国 Brenham 液化石油气储库(1992年)         | 大火,爆炸  | 控制系统失效    |
|      | 加拿大 Fort-Saskatchewan 乙烷储库(2001年) | 火灾,持续8d  | 两洞室连接管道失效 |
|      | 美国 Yaggy 天然气储库(2001年)             | 大火,爆炸  | 套管弯曲失效    |
|      | 美国 Moss Bluff 储气库(2004年)          | 大火,持续4d  | 采卤管腐蚀受损   |

根据国内外相关资料的调查与研究，在分析了表 1 中储库腔体失效、地表沉陷和油气渗漏事故发生的机制和原因后，通过专家调查和风险源辨识，得到表 2 所示的盐岩地下储库运营期主要风险因子。

表 2 运营期风险因子

Table 2 Risk factors during the operational period

| 因素       | 运营期风险因子        | 故障树底事件符号 |
|----------|----------------|----------|
| 压力       | 相邻盐腔储气压力差过大    | $X_1$    |
|          | 储气允许压力过低       | $X_6$    |
|          | 储气允许压力过高       | $X_{12}$ |
|          | 注采气压变化频繁       | $X_{13}$ |
|          | 储气稳压时间过长       | $X_{14}$ |
|          | 储气稳压时间过短       | $X_{15}$ |
|          | 井口压力控制不当       | $X_{16}$ |
| 储库<br>介质 | 矿柱中间部位超过长期强度   | $X_2$    |
|          | 侧壁存在裂隙         | $X_4$    |
|          | 盐岩强度较低         | $X_5$    |
|          | 顶底板水平状岩体       | $X_7$    |
|          | 侧壁垂直层状岩体       | $X_8$    |
|          | 盐岩蠕变变形         | $X_{10}$ |
|          | 泥岩蠕变变形         | $X_{11}$ |
|          | 夹层层数多          | $X_{17}$ |
|          | 夹层蠕变变形         | $X_{18}$ |
|          | 夹层层厚小          | $X_{19}$ |
| 夹层强度较小   | $X_{20}$       |          |
| 设备       | 盐岩与泥岩交接面损伤     | $X_{23}$ |
|          | 注采阀门超过使用年限     | $X_{24}$ |
|          | 注采阀门损坏         | $X_{25}$ |
|          | 注采设备腐蚀受损       | $X_{26}$ |
|          | 套管鞋破损          | $X_{27}$ |
|          | 注采设备疲劳受损       | $X_{28}$ |
|          | 套管鞋高度不足        | $X_{29}$ |
| 其他       | 盐腔设计间距太小       | $X_3$    |
|          | 盐腔与围岩的温度、压力场扰动 | $X_9$    |
|          | 上覆岩层移动         | $X_{21}$ |
|          | 顶部预留盐层厚度过薄     | $X_{22}$ |
|          | 人为操作不当         | $X_{30}$ |

### 3 储库运营期风险故障树分析

#### 3.1 故障树分析流程

故障树分析 (Fault tree analysis, 简称 FTA) 是一种推理演绎的方法，利用特定含义的符号所构成的树形图表示可能发生的事故与事故原因之间的逻辑关系。通过对故障树进行分析，不仅能得出导致事故发生的各种直接和间接原因，而且还能揭示事故的潜在发生机制，便于及时提出事故防范的措施，避免事故的发生<sup>[10-13]</sup>。故障树分析的基本流程图如图 1 所示。

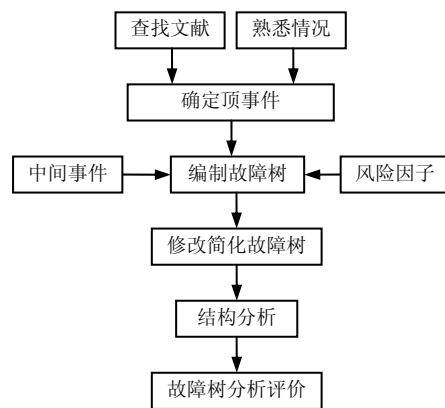


图 1 故障树分析基本流程  
Fig.1 Flow chart of FTA

#### 3.2 运营期故障树模型的建立

风险因子的辨识，仅能给出导致事故发生的风险原因，无法给出风险因子对事故发生的因果关系与影响大小。而故障树分析是从结果到原因的逻辑关系分析，可借助故障树的结构重要度描述风险因子对事故的影响程度。因此，基于前述对风险因子的辨识，按照故障树分析基本流程，建立储库运营期腔体失效、地表沉陷、油气渗漏的故障树模型，如图 2 所示。图中各基本事件相互独立，底事件编号与表 2 中的风险因子对应。

#### 3.3 故障树的最小割集

故障树结构分析的主要任务就是找出会导致顶事件发生的数目不可再少的底事件组合，即最小割集。因为从理论上讲，如果能保证每个最小割集中的底事件至少有 1 个不发生，则顶事件就不发生。因此，找出故障树的最小割集对于消除潜在事故颇有意义。本文采用布尔代数法计算最小割集如下：

$$\begin{aligned}
 T &= A_1 + A_2 + A_3 = (B_1 + B_2) + (B_3 + B_4) + \\
 &\quad (B_5 + B_6 + B_7) = \\
 &\quad [(X_1 + X_2 + X_3) + (C_1 + C_2 + C_3)] + \\
 &\quad [(X_6 + X_{13} + E_2 + X_9 + X_{10} + X_{11}) + \\
 &\quad (X_{21} + D_1 + D_2 + X_{22})] + [(C_4 + C_5 + C_6) + \\
 &\quad (C_9 + X_3 + X_{12} + X_{16} + D_4) + \\
 &\quad (C_6 + X_{29} + C_7 + X_{30})] = \\
 &\quad [(X_1 + X_2 + X_3) + (X_4 + X_5 + X_6 + D_3 + \\
 &\quad X_9 + X_5 + D_4 + X_{10} + X_{11} + D_1 + D_2)] + \\
 &\quad [(X_6 + X_{13} + X_{14} + X_{15} + X_9 + X_{10} + X_{11}) + \\
 &\quad (X_{21} + X_7 X_5 + X_8 X_5 + X_{22})] + \\
 &\quad [(X_{18} X_{13} + X_{13} X_{23} + X_{13} X_{20}) + \\
 &\quad (X_1 + X_2 + X_3 + X_{12} + X_{16} + X_{17} + X_{18} + \\
 &\quad X_{19} + X_{20}) + (X_{24} + X_{25} + X_{29} + X_{26} + \\
 &\quad X_{27} + X_{28} + X_{30})] =
 \end{aligned}$$

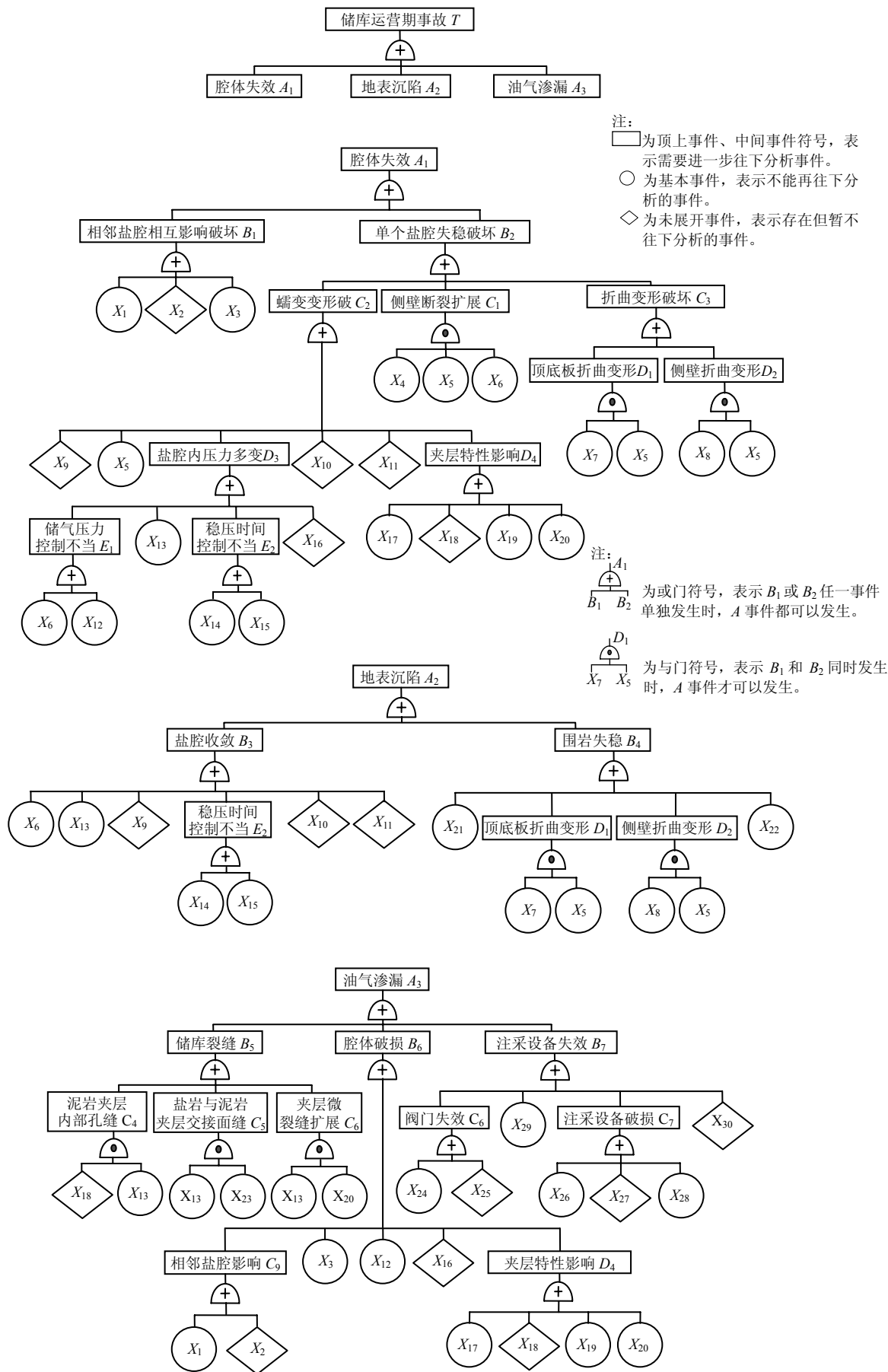


图 2 盐岩地下油气储库运营期故障树

Fig.2 FTA model for the salt cavern during operational period

$$\begin{aligned}
 & [(X_1 + X_2 + X_3) + (X_4 + X_5 + X_6 + E_1 + X_{13} + \\
 & E_2 + X_{16} + X_9 + X_5 + X_{17} + X_{18} + X_{19} + X_{20} + \\
 & X_{10} + X_{11} + X_7 X_5 + X_8 X_5)] + \\
 & [(X_6 + X_{13} + X_{14} + X_{15} + X_9 + X_{10} + X_{11}) + \\
 & (X_{21} + X_7 X_5 + X_8 X_5 + X_{22})] + \\
 & [(X_{18} X_{13} + X_{13} X_{23} + X_{13} X_{20}) + \\
 & (X_1 + X_2 + X_3 + X_{12} + X_{16} + X_{17} + X_{18} + \\
 & X_{19} + X_{20}) + \\
 & (X_{24} + X_{25} + X_{29} + X_{26} + X_{27} + X_{28} + X_{30})] = \\
 & [(X_1 + X_2 + X_3) + (X_4 + X_5 + X_6 + X_6 + \\
 & X_{12} + X_{13} + D_{14} + X_{15} + X_{16} + X_9 + X_5 + \\
 & X_{17} + X_{18} + X_{19} + X_{20} + X_{10} + X_{11} + \\
 & X_7 X_5 + X_8 X_5)] + \\
 & [(X_6 + X_{13} + X_{14} + X_{15} + X_9 + X_{10} + X_{11}) + \\
 & (X_{21} + X_7 X_5 + X_8 X_5 + X_{22})] + \\
 & [(X_{18} X_{13} + X_{13} X_{23} + X_{13} X_{20}) + \\
 & (X_1 + X_2 + X_3 + X_{12} + X_{16} + X_{17} + X_{18} + \\
 & X_{19} + X_{20}) + (X_{24} + X_{25} + X_{29} + X_{26} + \\
 & X_{27} + X_{28} + X_{30})] = \\
 & X_1 + X_2 + X_3 + X_5 + X_6 + X_9 + X_{10} + X_{11} + \\
 & X_{12} + X_{13} + X_{14} + X_{15} + X_{16} + X_{17} + X_{18} + \\
 & X_{19} + X_{20} + X_{21} + X_{22} + X_{24} + X_{25} + X_{26} + \\
 & X_{27} + X_{28} + X_{29} + X_{30} + X_5 X_7 + X_5 X_8 + \\
 & X_{18} X_{13} + X_{23} X_{13} + X_{20} X_{13} + X_4 X_5 X_6
 \end{aligned} \tag{1}$$

由上述求解结果可知，运营期风险事故故障树最小割集有 32 个，即  $\{X_1\}$ 、 $\{X_2\}$ 、 $\{X_3\}$ 、 $\{X_5\}$ 、 $\{X_6\}$ 、 $\{X_9\}$ 、 $\{X_{10}\}$ 、 $\{X_{11}\}$ 、 $\{X_{12}\}$ 、 $\{X_{13}\}$ 、 $\{X_{14}\}$ 、 $\{X_{15}\}$ 、 $\{X_{17}\}$ 、 $\{X_{18}\}$ 、 $\{X_{19}\}$ 、 $\{X_{20}\}$ 、 $\{X_{21}\}$ 、 $\{X_{22}\}$ 、 $\{X_{24}\}$ 、 $\{X_{25}\}$ 、 $\{X_{26}\}$ 、 $\{X_{27}\}$ 、 $\{X_{28}\}$ 、 $\{X_{29}\}$ 、 $\{X_{30}\}$ 、 $\{X_5, X_7\}$ 、 $\{X_5, X_8\}$ 、 $\{X_{18}, X_{13}\}$ 、 $\{X_{23}, X_{13}\}$ 、 $\{X_{20}, X_{13}\}$ 、 $\{X_{20}, X_{13}\}$ 、 $\{X_4, X_5, X_6\}$ 。

导致顶事件发生的最小割集有 3 种类型：一阶最小割集 26 个，例如  $\{X_{10}\}$ ，表示  $X_{10}$ （盐岩蠕变变形）出现时，会引起盐腔蠕变变形破坏、盐腔收敛，地表沉陷事故的发生；二阶最小割集 5 个，例如  $\{X_5, X_7\}$ ，表示  $X_7$ （顶底板水平状岩层）和  $X_5$ （盐岩强度较小）同时发生时，便会引起顶底板弯曲变形，继而导致盐腔的失效；三阶最小割集 1 个，即  $\{X_4, X_5, X_6\}$ ，表示  $X_4$ （侧壁存在裂隙）、 $X_5$ （盐岩强度较低）和  $X_6$ （储气允许压力过低）同时发生时，就会引起侧壁的断裂扩展，继而威胁盐腔的稳定。

### 3.4 故障树的结构重要度

故障树的结构重要度，就是不考虑底事件的发生

概率，仅从故障树的结构上分析各底事件的发生对顶上事件的影响程度。故障树是由众多的底事件所构成的逻辑关系树形图，每一个底事件对顶上事件的发生都有一定的影响，但影响程度却不尽相同。当由于缺少底事件发生概率数据而无法精确计算事故发生的大小时，结构重要度的分析便可以直观地反映出在故障树结构中各底事件对顶事件的影响程度，从而为风险评价提供理论依据。

结构重要度的分析是通过比较各底事件结构重要系数  $I_i$ ，评价底事件对顶上事件的影响程度，即重要系数越大的，对顶上事件的影响程度越大，越应该引起重视。目前应用最多的就是利用最小割集近似判断各底事件的结构重要系数，因此，由上文求得的最小割集，按如下基本思想<sup>[12]</sup>对各底事件的结构重要系数进行分析：

(1) 阶数越小的最小割集是顶事件越重要的故障模式，其结构重要系数越大。

(2) 出现在同一割集中的所有底事件结构重要系数相同。相同阶数的最小割集中底事件按出现的次数排列，出现次数多的底事件是最小割集中最不可靠、最不安全的因素，结构重要系数也越大。

如：一阶最小割集中， $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_9$ 、 $X_{10}$ 、 $X_{11}$ 、 $X_{12}$ 、 $X_{14}$ 、 $X_{15}$ 、 $X_{16}$ 、 $X_{17}$ 、 $X_{19}$  所代表的各底事件在故障树结构中分别出现了 2 次； $X_{21}$ 、 $X_{22}$ 、 $X_{24}$ 、 $X_{25}$ 、 $X_{26}$ 、 $X_{27}$ 、 $X_{28}$ 、 $X_{29}$ 、 $X_{30}$  所代表的各底事件分别出现了 1 次。则有  $I_1 = I_2 = I_3 = I_9 = I_{10} = I_{11} = I_{12} = I_{14} = I_{15} = I_{16} = I_{17} = I_{19} > I_{21} = I_{22} = I_{24} = I_{25} = I_{26} = I_{27} = I_{28} = I_{29} = I_{30}$ 。

二阶最小割集中，底事件  $X_7$  和  $X_8$  分别出现了两次，而底事件  $X_{23}$  只出现了 1 次，则  $I_7 = I_8 > I_{23}$ 。

(3) 当 2 个底事件分别出现在阶数不同的 2 个最小割集中，但在各自最小割集中重复出现的次数相等，则在阶数小的最小割集中出现的底事件结构重要系数大。即： $I_1 = I_2 = I_3 = I_9 = I_{10} = I_{11} = I_{12} = I_{14} = I_{15} = I_{16} = I_{17} = I_{19} > I_7 = I_8$ ； $I_{21} = I_{22} = I_{24} = I_{25} = I_{26} = I_{27} = I_{28} = I_{29} = I_{30} > I_{23} > I_4$ 。

(4) 若 2 个底事件，1 个在阶数小的最小割集中出现次数少，1 个在阶数多的最小割集中出现次数多，或者其他更复杂的情况时，可用下列近似判别式计算结构重要系数：

$$\sum I(i) = \sum_{X_i \in K_j} \frac{1}{2^{n_i-1}} \tag{2}$$

式中： $I(i)$  为底事件  $X_i$  的结构重要系数的近似判别值； $X_i \in K_j$ ，为底事件  $X_i$  属于  $K_j$  的最小割集； $n_i$

为底事件  $X_i$  所在最小割集中包含底事件的个数。

例如：底事件  $X_{21}$  在一阶最小割集中出现了 1 次，底事件  $X_7$  在二阶最小割集中出现了 2 次，则  $I_{21} = 1$ ， $I_7 = 1/2$ ，故  $I_{21} > I_7$ 。

$X_5$ 、 $X_6$ 、 $X_{13}$ 、 $X_{18}$ 、 $X_{20}$  所代表的各底事件，因为在 3 种最小割集中均有出现且情况复杂，因此，可用式 (2) 计算， $I_5 = 9/4$ ， $I_6 = 5/4$ ， $I_{13} = 5/2$ ， $I_{18} = 3/2$ ， $I_{20} = 3/2$ ，即  $I_{13} > I_5 > I_{18} = I_{20} > I_6$ 。

综合上述分析，按各底事件的结构重要系数对盐岩地下储库运营期故障树进行底事件结构重要度排序， $I_{13} > I_5 > I_{18} = I_{20} > I_6 > I_1 = I_2 = I_3 = I_9 = I_{10} = I_{11} = I_{12} = I_{14} = I_{15} = I_{16} = I_{17} = I_{19} > I_{21} = I_{22} = I_{24} = I_{25} = I_{26} = I_{27} = I_{28} = I_{29} = I_{30} > I_7 = I_8 > I_{23} > I_4$ 。

其中对盐岩地下储库运营安全影响较大的前 17 个底事件如表 3 所示。

表 3 对盐岩地下储库运营安全影响较大的 17 个风险因子  
Table 3 The former seventeen risk factors influencing the operational security of salt cavern storage

| 序号 | 风险因子           | 序号 | 风险因子     |
|----|----------------|----|----------|
| 1  | 注采气压变化频繁       | 10 | 盐岩蠕变变形   |
| 2  | 盐岩强度较低         | 11 | 泥岩蠕变变形   |
| 3  | 夹层强度较小         | 12 | 储气允许压力过高 |
| 4  | 夹层蠕变变形         | 13 | 储气稳压时间过长 |
| 5  | 储气允许压力过低       | 14 | 储气稳压时间过短 |
| 6  | 相邻盐腔储气压力差过大    | 15 | 井口压力控制不当 |
| 7  | 矿柱中间部位超过长期强度   | 16 | 夹层层数多    |
| 8  | 盐腔设计间距太小       | 17 | 夹层层厚小    |
| 9  | 盐腔与围岩的温度、压力场扰动 |    |          |

### 3.5 故障树分析评价

(1) 由故障树分析可知，上述故障树包含了 30 个逻辑门，其中逻辑或门 22 个，占了总数的 73%。根据或门的定义可知，大部分的单个基本事件都有输出。所以，从与门、或门的比例可知，各风险因子对运营期风险事故的发生均有影响。

(2) 故障树分析中有 32 个最小割集，就表示顶事件运营期风险事故的发生有 32 种可能，虽然影响程度各异，但对于储库的正常运营，专家与施工人员还是 need 提高警惕。

(3) 从位居结构重要度前 17 个底事件可以看出，储库自身介质的特性与功能要求决定了储库的安全、正常使用，从而影响着其他风险事故的发生与归避。

(4) 设备原因是导致油气泄漏的主要风险因素，围岩失稳是导致地表沉陷的主要风险因素，虽然在影响运营期风险事故中，重要程度不如储库自身介

质特性的程度大，但作为分项事故的风险因素，却不可不引起重视。

## 4 结 论

(1) 对盐岩地下油气储库运营期主要风险事故的种类进行了总结，并对影响事故发生风险因子进行了辨识和归类。

(2) 根据对风险因子的辨识，建立了运营期储库腔体失效、地表沉陷、油气泄漏的故障树模型。

(3) 通过故障树分析方法，对 32 个最小割集进行了结构重要度分析，获得了运营期风险因子对于盐岩地下油气储库影响程度的排序。

(4) 盐岩地下油气储库运营期风险分析是个综合系统的过程，下一步在实际应用中，可结合国外储库失效案例，借助风险评估模型与风险因素发生概率进行综合分析，以得到更准确的评价结果。

## 参 考 文 献

- [1] THOMS R L, GEHLE R M. A brief history of salt cavern use[C]//The 8th World Salt Symposium. Netherlands: Elsevier Science, 2000: 207-214.
- [2] 吴文, 杨春和, 侯正猛. 盐岩中能源(石油和天然气)地下储存力学问题研究现状及其发展[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊 2): 5561-5568.  
WU Wen, YANG Chun-he, HOU Zheng-meng. Investigations on studied situations associated with mechanical aspects and development for underground storage of petroleum and natural gas in rock salt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Supp. 2): 5561-5568.
- [3] 宋桂华, 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.
- [4] BÉRREST P, BROUARD B. Safety of salt caverns used for underground storage[J]. Oil & Gas Science and Technology - Rev, IFP, 2003, 58(3): 361-384.
- [5] STURK R, OLSSON L, JOHANSSON J. Risk and decision analysis for large underground projects, as applied to the stockholm ring road tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1996, 11(2): 157-164.

- [6] TAKEMIYA H. Field vibration mitigation by honeycomb WIB for pile foundations of a high-speed train viaduct[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2004, 24(1): 69—87.
- [7] JU S H, LIN H T. Analysis of train-induced vibrations and vibration reduction schemes above and below critical Rayleigh speeds by finite element method[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2004, 24(12): 993—1002.
- [8] 高广运, 李志毅, 冯世进. 分层地基列车运行引起的地面振动分析[C]/第7届全国土动力学学会论文集. 北京: 清华大学出版社, 2006: 388—392.
- [9] 高广运, 彭争光, 李志毅. 磁悬浮列车产生的地面振动及其对周围环境的影响[J]. **工业建设与设计**, 2005, (4): 7—9.  
GAO Guang-yun, PENG Zheng-guang, LI Zhi-yi. Ground vibration and the influence on environment by magnetic-levitating train[J]. **Construction & Design for Project**, 2005, (4): 7—9.
- [10] 陈建国, 肖军华, 李前进, 等. 提速列车荷载作用下铁路路基动力特性的研究[J]. **岩土力学**, 2009, 30(7): 1944—1950.  
CHEN Jian-guo, XIAO Jun-hua, LI Qian-jin, et al. Dynamic responses of existing-railway surbgrade with train speed increasing[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(7): 1944—1950.
- [11] 邓亚虹, 夏唐代, 陈敬虞. 车辆荷载作用下隔震沟隔震效率影响因素分析[J]. **岩土力学**, 2007, 28(5): 883—888.
- [12] 卢正, 姚海林, 骆行文, 等. 公路交通荷载作用下分层地基的三维动响应分析[J]. **岩土力学**, 2009, 30(10): 2965—2970.  
LU Zheng, YAO Hai-lin, LUO Xing-wen, et al. 3D dynamic responses of layered ground under vehicle loads[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(10): 2965—2970.
- [13] 张剑锋. 弹性波数值模拟的非规则网格差分法[J]. **地球物理学报**, 1998, 41(增刊): 357—366.  
ZHANG Jian-feng. Non-orthogonal grid finite-difference method for numerical simulation of elastic wave propagation[J]. **Acta Geophysica Sinica**, 1998, 41(Supp.): 357—366.
- [14] ZHANG J F, LIU T L. P-SV-wave propagation in heterogeneous media: Grid method[J]. **Geophysical Journal International**, 1999, 136(2): 431—438.
- [15] LIAO Z P. Extrapolation non-reflecting boundary conditions[J]. **Wave Motion**, 1996, 24(2): 117—138.
- [16] SHRIVASTAVA R K, KAMESWARA RAO N S V. Response of soil media due to impulse loads and isolation using trenches[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2002, 22(8): 695—702.

---

#### 上接第 1130 页

- [6] YOU K, PARK Y, LEE J S. Risk analysis for determination of a tunnel support pattern[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2005, 20(5): 479—486.
- [7] LIN C T, WANG M J J. Hybrid fault tree analysis using fuzzy sets[J]. **Reliability Engineering and System Safety**, 1997, 58(3): 205—213.
- [8] 黄宏伟, 闫玉茹, 胡群芳. 复合式土压平衡盾构刀盘失效风险分析[J]. **岩土力学**, 2009, 30(8): 2324—2330.  
HUANG Hong-wei, YAN Yu-ru, HU Qun-fang. Risk analysis of cutter head failure of composite EPS shield[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(8): 2324—2330.
- [9] 凌玉华. 层次分析法(AHP)在地铁车站施工方案优选中的应用[J]. **电脑知识与技术**, 2009, 5(16): 4264—4266.
- [10] MOHAMMAD M. Risk analysis in engineering techniques, tools and trends [M]. Boca Raton: Taylor & Francis, 2006.
- [11] 史定华, 王松瑞. 故障树分析技术方法和理论[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1993.
- [12] 王长峰. 现代项目风险管理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [13] 陈国华. 风险工程学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.