

文章编号: 1009-6094(2016)04-0032-06

盐岩储库建腔期安全评价模型研究*

任松¹ 刘伟莎¹ 陈结^{1,2} 郑彬彬¹ 陈佐柏³

(1 重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 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; 3 中石油西南油气田公司重庆气矿气田开发工艺研究所, 重庆 400021)

摘要: 盐岩储库建腔期事故发生的频度甚至高于运营期, 如何对建腔期储库进行风险分析和安全评价已成为储库建设面临的首要问题。建立了盐岩储库建腔期地下系统故障树模型和多层次、多指标安全评价体系, 并根据试验和数值模拟结果构建了各评价指标的评分模型。结合工程实际, 用模糊灰关联分析法对金坛某储气库进行了安全评价, 得出等级为IV级稳定。为了进一步确保建腔期储库的安全性, 用三角模糊数表示基本事件失效概率可能性分布函数, 通过计算各最小割集所代表的故障模式与顶上事件的灰色关联度, 得出腔体埋深过浅、人为操作不当、夹层垮塌、顶板预留岩层厚度过薄、内管临界流速小于卤水流速、自激振动和动力失稳等是可能导致金坛某储气库建腔期事故的主要因素。

关键词: 安全工程; 盐岩储库; 建腔期; 安全评价指标体系; 模糊灰关联分析

中图分类号: X93

文献标识码: A

DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2016.04.006

0 引言

盐岩具有渗透率低、损伤自恢复和塑性变形能力大等优良特性, 成为能源地下储备的理想场所。但近30年来, 盐岩地下油气储库灾难事故时有发生, 而且相对于国外地层结构简单的巨厚盐丘中的储备库, 我国的盐岩层具有夹层数目多、夹层厚度薄、埋藏浅等特点, 在这种复杂的地质条件下建库难度大、风险高, 因此有必要对整个储库建腔系统进行风险分析与安全评价。

关于风险分析方法及其应用的研究有很多。Faber^[1]系统阐述了风险分析常用的方法和在土木工程中的应用。Kwangho等^[2]对地下洞室的风险分析进行了初步研究。Ju等^[3]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系统的稳定性进行了分析。蒲伟等^[4]运用模糊综合评价法对锅炉的焊缝质量进行了安全评定, 建立了一套完整的焊接管理评价体系。李媛等^[5]应用故障树分析方法对储库运营期事故进行研究, 建立了故障树模型。杨春和等^[6]通过对盐岩-泥岩界面的直剪试验, 得出盐岩-泥岩界面不是普通意义上的弱面, 而是强面, 这对盐岩腔体的密闭性和稳定性是有利的。冯运卿等^[7]选取相应的铁路安全评价指标, 运用熵权法和灰色关联分析理论对我国铁

路安全进行了评价, 得出了我国铁路整体安全度已经达到较高水平的结论。吴文等^[8]系统地提出了盐岩中能源储存库稳定性研究的内容和评判标准。姜德义等^[9-10]采用层次分析法和灰色关联分析理论, 提出了储库运营期稳定性灰色关联评价模型。

国内外学者对储库运营期稳定性等方面开展了大量的研究, 但对多夹层盐岩储库水溶建腔期系统安全性的研究甚少。盐岩储库水溶建腔过程是一个动态变化的过程, 盐岩储库建腔期地下系统是具有灰色性、模糊性等特点的不确定性复杂系统, 单独采用传统的故障树分析方法难以得到令人满意的结果。因此, 本文首先建立储库建腔期故障树模型和多层次、多指标安全评价体系, 然后采用基于故障树的模糊灰关联综合分析方法对盐岩储库建腔期地下系统进行风险因素分析和安全评价, 识别可能导致储库建腔期事故的最主要因素, 以为储气库建腔期的安全评价及施工提供参考。

1 盐岩储库建腔期故障树模型

通过对盐岩储库水溶建腔原理和建腔工艺及方法的分析可知: 地下在建腔体是建腔的产物; 注采套管是地下腔体连通地面用于注入淡水和保护液及采出卤水的输送通道; 套管鞋对生产套管与腔体起到了连接密封的作用, 保证腔体内卤水和保护液不沿着生产套管外壁泄漏。基于以上分析找出对储库建腔期安全性造成影响的风险因素, 按照故障树基本流程建立储库建腔期地下系统故障树模型, 如图1所示, 假设各基本事件相互独立。

其中 T 为盐岩地下储库建腔期事故; A_1 为腔体失稳, A_2 为套管失效, A_3 为套管鞋密封失效; B_1 为腔体顶板失稳, B_2 为腔体形状失控, B_3 为腔体侧壁失稳, B_4 为堵管, B_5 为管柱弯曲变形、破损及拖箍, B_6 为顶板岩层溶穿; C_1 为腔体顶板大变形, C_2 为围岩蠕变量过大, C_3 为管柱组合不合理。各基本事件即风险因素的含义见表1。

2 盐岩储库建腔期安全评价数学模型

2.1 安全评价体系及指标

根据盐岩储库建腔期故障树模型, 得出21个可能导致建腔期事故发生的基事件, 按照这些基事件的性质, 将盐岩储库建腔期地下系统分为腔体单元、套管单元和套管鞋单元3个评价单元。只有3个单元同时满足安全性要求才能保证储库建腔的成功。建立的盐岩储库建腔期安全评价指标体系见图2。

2.2 安全等级分类标准

参考《石油行业安全生产标准化——井下作业实施规范》^[11]中安全等级实行百分制的分类标准, 将盐岩储库建腔期地下系统的安全性评价分为5个级别, 见表2。

2.3 指标评分模型构建

1) 腔体单元评分模型。

盐岩力学参数各指标评分模型主要根据对云应和金坛盐矿盐样的单轴、三轴和蠕变试验结果构建^[12-13]。夹层对储库腔体具有抑制变形的作用, 但盐岩中所含夹层质量分数太大, 会影响储库的密闭性, 并增加储库水溶建腔的难度, 分析夹层对水溶建腔的影响因素, 构建夹层参数的评分模型。腔体结

* 收稿日期: 2014-09-23

作者简介: 任松, 教授, 博士, 从事岩土工程力学研究, rs_rwx@cqu.edu.cn。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2009CB724606); 国家自然科学基金项目(51304256)

构参数评分模型主要考虑倒梨形状的腔体高径比对腔体安全性的影响,并结合已有的研究和数值模拟结果进行构建^[14]。腔体单元各指标评分模型见表3~5。

2) 套管单元评分模型。

一般情况下,水溶建腔过程中卤水流速大于套管临界流速,因此建腔内管非常容易失稳,则套管临界流速与液体流速比值得分0。

假设每次控制夹层垮塌而未让套管砸中的概率为 P 腔

表1 盐岩储库建腔期风险因素及基本事件失效概率可能性分布函数
Table 1 Salt rock storage risk factors and failure probability distribution functions of basic events during construction period

符号	盐岩储库建腔期风险因素	失效概率可能性分布函数 $P = (a, m, b)$
X_1	腔体间距太小	(0.000 08, 0.000 2, 0.000 32)
X_2	腔体埋深过浅	(0.035, 0.06, 0.085)
X_3	顶板预留岩层厚度太薄	(0.09, 0.15, 0.21)
X_4	盐岩弹性模量太小	(0.001 4, 0.003 0, 0.004 6)
X_5	顶板跨距太大	(0.002 7, 0.003 8, 0.004 9)
X_6	腔体内外压力差过大	(0.000 35, 0.000 8, 0.001 25)
X_7	正反循环方式不合理	(0.000 08, 0.000 2, 0.000 32)
X_8	油垫层位置控制不合理	(0.000 7, 0.001 5, 0.002 3)
X_9	夹层垮塌	(0.09, 0.15, 0.21)
X_{10}	矿柱宽度过小	(0.000 7, 0.001 5, 0.002 3)
X_{11}	盐岩稳态蠕变率过大	(0.035, 0.06, 0.085)
X_{12}	腔体高径比不合适	(0.000 08, 0.000 2, 0.000 32)
X_{13}	两口距及中间管位置不合理	(0.000 35, 0.000 8, 0.001 25)
X_{14}	管柱提升次数过少	(0.000 35, 0.000 8, 0.001 25)
X_{15}	围岩强度低	(0.018, 0.032, 0.046)
X_{16}	软弱夹层多	(0.025, 0.05, 0.075)
X_{17}	内管临界流速小于卤水流速	(0.09, 0.15, 0.21)
X_{18}	套管鞋高度不足	(0.000 08, 0.000 2, 0.000 32)
X_{19}	自激振动和动力失稳	(0.028, 0.05, 0.072)
X_{20}	人为操作不当	(0.035, 0.06, 0.085)
X_{21}	套管鞋处最大工作压力大于地层破裂压力	(0.000 7, 0.001 5, 0.002 3)

体围岩中夹层层数为 n ,则套管不被垮塌夹层砸中的概率为 P^n 。结合事故统计结果分析,每次控制夹层垮塌而未让套管砸中的概率 P 为 0.75,则夹层层数的评分为

$$M = 0.75^n \times 100 \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

3) 套管鞋单元评分模型。

套管鞋失效是影响建腔过程的重要因素,根据数值模拟结果构建套管鞋单元评分模型,见表6。

表2 安全等级
Table 2 Safety level

等级	等级	对应分值
I	不稳定	[0, 60)
II	基本稳定	[60, 70)
III	较为稳定	[70, 80)
IV	稳定	[80, 90)
V	很稳定	[90, 100]

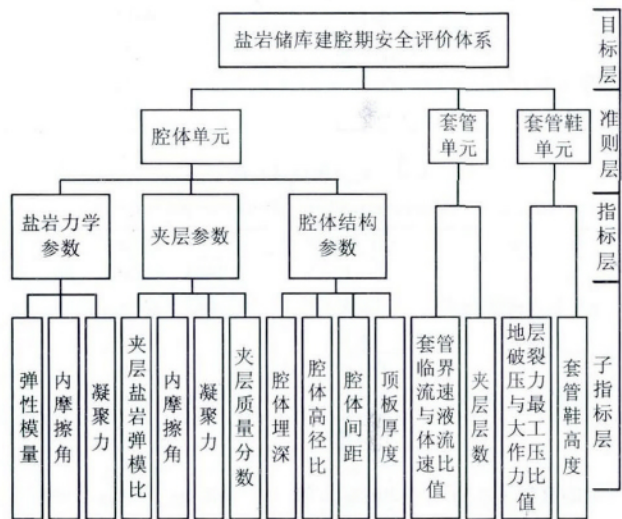


图2 盐岩储库建腔期安全评价体系
Fig. 2 Safety evaluation system for salt rock storage during construction period

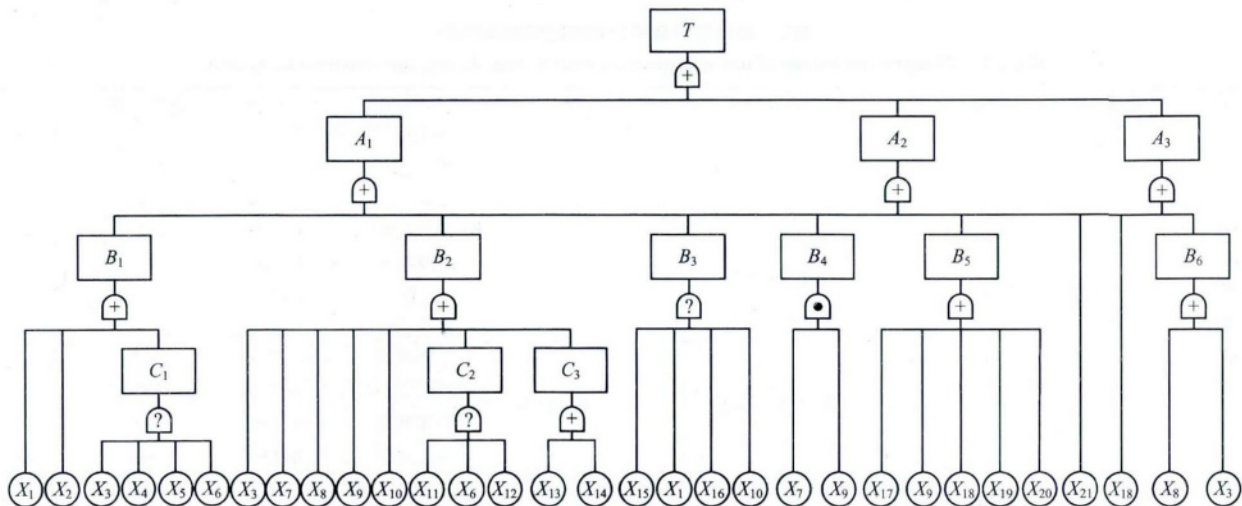


图1 储库建腔期地下系统故障树模型
Fig. 1 Fault tree model of an underground salt rock storage during construction period

2.4 评价指标权重

采用层次分析法对准则层中腔体单元、套管单元、套管鞋单元进行两两比较,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。同理确定指标层和子指标层的权重,计算结果见表 7。

3 模糊灰关联安全评价

3.1 模糊灰关联评价步骤

1) 确定评判矩阵。

表 3 盐岩力学参数评分模型

Table 3 Scoring model for salt rock mechanical parameters

指标	分类情况	得分
弹性模量 E/GPa	$0 \leq E < 5$	$12E$
	$5 \leq E < 20$	$(-8E^2 + 320E + 1300) / 45$
	$E \geq 20$	100
凝聚力 c/MPa	$0 \leq c < 1$	$60c$
	$1 \leq c < 5$	$-2.5c^2 + 25c + 37.5$
	$c \geq 5$	100
内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	$0 \leq \varphi < 30$	$\varphi^2 / 15$
	$30 \leq \varphi < 50$	$-0.1\varphi^2 + 10\varphi - 150$
	$\varphi \geq 50$	100

表 4 夹层参数评分模型

Table 4 Scoring model for interlayer parameters

夹层指标	分类情况	得分
夹层盐岩弹模比 K	$1 \leq K < 4$	$(-160K^2 + 800K - 100) / 9$
	$4 \leq K < 5$	$60K^2 - 600K + 1500$
	$K \geq 5$	0
凝聚力 c_i/MPa	$0 \leq c_i < 1$	$60c_i$
	$1 \leq c_i < 5$	$-2.5c_i^2 + 25c_i + 37.5$
	$c_i \geq 5$	100
内摩擦角 $\varphi_i/(\circ)$	$0 \leq \varphi_i < 30$	$\varphi_i^2 / 15$
	$30 \leq \varphi_i < 50$	$-0.1\varphi_i^2 + 10\varphi_i - 150$
	$\varphi_i \geq 50$	100
夹层质量分数 $Q/\%$	$0 \leq Q < 10$	$0.4Q^2 - 8Q + 100$
	$10 \leq Q < 20$	$-0.6Q^2 + 12Q$
	$Q \geq 20$	0

注: $K = E_i/E_s$, E_i 为夹层的弹性模量, E_s 为盐岩的弹性模量。

表 7 储库建腔期评价体系的权重及得分

Table 7 Weights and values of the storage evaluation system during the construction period

目标层	准则层	权重	指标层	权重	子指标层	权重	建腔参数	得分
盐岩储库建腔期安全评价体系	腔体单元	0.7	盐岩力学参数	0.333 4	弹性模量	0.333 4	13	91.3
					内摩擦角	0.333 3	1.2	71.1
					凝聚力	0.333 3	40	90
			夹层参数	0.333 3	夹层盐岩弹模比	0.250 0	3.25	90
					内摩擦角	0.250 0	0.5	30
					凝聚力	0.250 0	30	60
	套管单元	0.15	腔体结构参数	0.333 3	夹层含量	0.250 0	1.35	89.93
					腔体埋深	0.229 7	1.25	93.75
					腔体高径比	0.320 1	520	40
			套管鞋单元	0.15	腔体间距	0.320 2	2	100
					顶板厚度	0.130 0	10	19
					套管临界流速与液体流速比值	0.5		0
				夹层层数	0.5	3	42.18	
				套管鞋高度	0.5	1.772	77.2	
				地层破裂压力与最大工作压力比值	0.5	1	100	

标准序列为盐岩储库建腔期地下系统安全性的 5 个评价等级^[15-16],表示为 $U_0 = (U_{01}, U_{02}, \dots, U_{0n})$, n 为因素数。

表 5 腔体结构参数评分模型

Table 5 Scoring model for cavity structure parameters

分类情况	得分	
$H \leq 400$	0	
腔体埋深 H/m	$400 \leq H < 700$	$(H - 400) / 3$
	$700 \leq H < 900$	100
	$900 \leq H < 1300$	$-1.429 \times 10^{-4}H^2 + 6.857 \times 10^{-2}H + 154$
$H \geq 1300$	0	
$P \leq 0.5$	0	
腔体高径比 P	$0.5 \leq P < 2.5$	$-400P^2 / 9 + 1600P / 9 - 700 / 9$
	$2.5 \leq P < 3$	$-1600P / 9 + 1600 / 3$
$P \geq 3$	0	
腔体间距 j	$0 \leq j < 2$	$50\cos[\pi(0.5j + 1)] + 50$
	$2 \leq j < 3$	100
	$3 \leq j < 5$	$50\cos[\pi(j + 1) / 2] + 50$
	$j \geq 5$	0
顶板厚度 r	$0 \leq r < 0.5$	$50\cos[\pi(2r + 1)] + 50$
	$0.5 \leq r < 1$	100
	$1 \leq r < 2$	$50\cos(\pi r) + 50$
$r \geq 2$	0	

注: j 为溶腔间距与溶腔直径之比; $L = rD$, 其中 L 为顶板厚度, r 为顶板厚度和腔体直径之比, D 为储库最大直径。

表 6 套管鞋单元指标评分模型

Table 6 Scoring model for casing shoe unit indicator

指标	分类情况	得分
地层破裂压力与最大工作压力比值 A	$A < 1$	0
	$1 \leq A < 2$	$(A - 1) \times 100$
	$A \geq 2$	100
套管鞋高度 C	$0 \leq C < 1$	$50\cos[\pi(C + 1)] + 50$
	$1 \leq C < 1.5$	100
	$1.5 \leq C < 2.5$	$50\cos[\pi(C + 0.5)] + 50$
$C \geq 2.5$	0	

注: $h = Ch'$, 其中 h 为套管鞋实际高度, h' 为数值模拟确定的套管鞋高度。

参评序列为各指标的得分,表示为 $U_j = (U_{j1}, U_{j2}, \dots, U_{jn})$ $j=1, 2, \dots, m$ 其中 m 为参评序列数。

2) 原始数据序列无量纲化。

$$Z_{ji} = \frac{U_{ji}}{U_p} \quad U_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{ji} \quad i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m \quad (2)$$

对数据进行无量纲处理后可得矩阵

$$\begin{pmatrix} Z_{01} & Z_{02} & \dots & Z_{0n} \\ Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ Z_{m1} & Z_{m2} & \dots & Z_{mn} \end{pmatrix}$$

3) 计算关联系数。

a. 计算差序列。

$$\nabla_{ji} = |Z_{0i} - Z_{ji}| \quad i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m \quad (3)$$

b. 求最大差与最小差。

$$a = \max_j \max_i \nabla_{ji} \quad b = \min_j \min_i \nabla_{ji} \quad (4)$$

c. 求关联系数。

$$\varepsilon_{0ji} = \frac{b + \rho a}{\nabla_{ji} + \rho a} \quad i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m \quad (5)$$

式中 ρ 为分辨系数 $\rho \in (0, 1)$ 取 $\rho = 0.5$ 。

由此可得到评判矩阵 R 。

$$R = (\varepsilon_{0ji}) = \begin{pmatrix} \varepsilon_{011} & \varepsilon_{012} & \dots & \varepsilon_{01n} \\ \varepsilon_{021} & \varepsilon_{022} & \dots & \varepsilon_{02n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \varepsilon_{0m1} & \varepsilon_{0m2} & \dots & \varepsilon_{0mn} \end{pmatrix}$$

4) 灰色模糊综合评判。

评价指标权重向量 $W = (W_1, W_2, \dots, W_n)$ 由表 7 得到, 结合评判矩阵求出综合评判向量, 即

$$B = WR = (b_1, b_2, \dots, b_n) \quad (6)$$

将综合评判指标向量归一化, 即

$$V_i = \frac{b_i}{\sum_{j=1}^n b_j} \quad (7)$$

最后根据最大隶属度原则确定盐岩储库建腔期安全状况评价等级。

3.2 金坛某储气库的评价及结果

金坛某储气库建腔参数和各指标得分见表 7。

1) 单因素模糊评判。

以“腔体结构参数”为例, 表 8 显示了腔体结构参数指标的参评序列和标准序列。

其中, 标准序列取平均值: I级为 30, II级为 65, III级为 75, IV级为 85, V级为 95。由式(2)~(5) 计算得出评判矩阵为

$$R = (\varepsilon_{0ji}) = \begin{pmatrix} 0.824 & 0.633 & 0.549 & 0.484 & 0.433 \\ 0.429 & 0.631 & 0.728 & 0.862 & 1.000 \\ 0.409 & 0.586 & 0.668 & 0.776 & 0.928 \\ 0.797 & 0.465 & 0.415 & 0.376 & 0.343 \end{pmatrix}$$

根据式(6)和(7)得模糊评判向量为 $B_3 = (0.174, 0.184, 0.194, 0.212, 0.236)$, 安全等级为V级很稳定。

同理, 得出其他指标层的模糊综合评判向量。盐岩力学参数的安全评价结果为 $B_1 = (0.110, 0.194, 0.223, 0.240, 0.233)$, 为IV级稳定。夹层参数的安全评价结果为 $B_2 = (0.181, 0.201, 0.200, 0.214, 0.204)$, 为IV级稳定。套管评价指标体系安全评价结果为 $A_2 = (0.269, 0.212, 0.190, 0.172, 0.157)$, 为I级不稳定。套管鞋评价指标体系安全评价结果为 $A_3 = (0.114, 0.188, 0.233, 0.231, 0.234)$, 为V级很稳定。

2) 二级综合评价。

按照上述对储库各指标层的模糊评价方法, 可得出腔体单元的评价结果为

$$V_1 = W_1 C_1 = (0.3334, 0.3333, 0.3333) \begin{pmatrix} 0.110 & 0.194 & 0.223 & 0.240 & 0.233 \\ 0.181 & 0.201 & 0.200 & 0.214 & 0.204 \\ 0.174 & 0.184 & 0.194 & 0.212 & 0.236 \end{pmatrix} = (0.155, 0.193, 0.206, 0.222, 0.224)$$

安全等级为V级很稳定。

同理可得储库建腔期地下系统整体的安全评价结果为 $V = (0.166, 0.195, 0.208, 0.216, 0.215)$, 安全等级为IV级稳定, 与该储库建腔周期内未发生大事故的实际情况相符。

3.3 金坛某储气库影响因素危险性分析

盐岩储库建腔期地下系统的最终评价结果为稳定, 但某些风险因素的发生会导致较为严重的后果, 对这些危险因素的识别和重点管理是安全评价和安全防控的重点工作之一。因此, 最后利用模糊灰关联分析方法对故障树基本事件的模糊重要度进行分析, 找出导致顶上事件发生可能性较大的故障事件, 即系统的薄弱环节, 为预防事故的发生提供依据^[17]。

1) 结构函数和最小割集。

故障树的结构函数为 $\Phi = X_1 + X_2 + X_3 + X_7 + X_8 + X_9 + X_{10} + X_{13} + X_{14} + X_{17} + X_{18} + X_{19} + X_{20} + X_{21} + X_6 X_{11} X_{12}$ 。

可见故障树总共有 15 个最小割集, 即 $F_1 = \{X_1\}$, $F_2 = \{X_2\}$, $F_3 = \{X_3\}$, $F_4 = \{X_7\}$, $F_5 = \{X_8\}$, $F_6 = \{X_9\}$, $F_7 = \{X_{10}\}$, $F_8 = \{X_{13}\}$, $F_9 = \{X_{14}\}$, $F_{10} = \{X_{17}\}$, $F_{11} = \{X_{18}\}$, $F_{12} = \{X_{19}\}$, $F_{13} = \{X_{20}\}$, $F_{14} = \{X_{21}\}$, $F_{15} = \{X_6 X_{11} X_{12}\}$ 。

2) 确定基本事件失效概率的可能性分布。

表 8 参评序列和标准序列

Table 8 Participating sequence and standard sequence

指标层	子指标层	参评序列	I	II	III	IV	V
腔体结构参数	腔体埋深	40	[0, 60)	[60, 70)	[70, 80)	[80, 90)	[90, 100)
	腔体高径比	93.75	[0, 60)	[60, 70)	[70, 80)	[80, 90)	[90, 100)
	腔体间距	100	[0, 60)	[60, 70)	[70, 80)	[80, 90)	[90, 100)
	顶板厚度	19	[0, 60)	[60, 70)	[70, 80)	[80, 90)	[90, 100)

由于缺乏大量统计数据,基本事件失效概率精确值难以确定。为解决这一问题,用定义在 [0, 1] 上某范围内的可能性分布代替失效概率的唯一数值,因此问题转换为在给出基本事件失效概率可能性分布的前提下,计算顶上事件失效概率的可能性分布^[18]。

$P_i = (a_i, m_i, b_i)$ 为基本事件失效概率的可能性分布,即三角模糊数。一个三角模糊数 P 的隶属度函数具有如下形式。

$$\mu_P(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{m-a} & a \leq x \leq m \\ \frac{b-x}{b-m} & m \leq x \leq b \\ 0 & x > b \end{cases} \quad (8)$$

根据工程经验及各指标得分,并利用文献[19]提供的世界盐岩储备库重大事故整理数据,可获得各风险因素的近似失效概率,基于这个值建立用三角模糊数表示的各基本事件的失效概率可能性分布函数,见表 1。

3) 计算顶上事件失效概率的可能性分布。

三角模糊数的模糊运算法则为

$$P_{\text{and}} = \prod_{i=1}^n P_i = \left(\prod_{i=1}^n a_i, \prod_{i=1}^n m_i, \prod_{i=1}^n b_i \right) \quad (9)$$

$$P_{\text{or}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i) = \left(1 - \prod_{i=1}^n (1 - a_i), 1 - \prod_{i=1}^n (1 - m_i), 1 - \prod_{i=1}^n (1 - b_i) \right) \quad (10)$$

根据式(9)和(10)计算得出顶上事件失效概率可能性分布函数为: $P_T = (0.319\ 976, 0.487\ 936, 0.620\ 888)$ 。

4) 计算基本事件的模糊重要度。

三角模糊数中值的计算式为

$$Z = \begin{cases} a + \sqrt{\frac{(m-a)(b-a)}{2}} & m-a > b-m \\ b + \sqrt{\frac{(b-m)(b-a)}{2}} & m-a < b-m \end{cases} \quad (11)$$

基本事件 X_i 的模糊重要度为

$$e_i = Z_T - Z_{T_i} \quad (12)$$

式中 Z_T 为顶上事件失效概率可能性分布函数的中值; Z_{T_i} 为基本事件 X_i 不发生时,顶上事件依然发生的失效概率可能性分布函数的中值。

根据式(12)计算得到各基本事件的模糊重要度所构成的集合为: $\{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7, e_8, e_9, e_{10}, e_{11}, e_{12}, e_{13}, e_{14}, e_{15}\} = \{0.000095, 0.031251, 0.087061, 0.000095, 0.000720, 0.087061, 0.000720, 0.000382, 0.000382, 0.087061, 0.000095, 0.025670, 0.031251, 0.000720, 0.000000\}$ 。

5) 确定参评序列和标准序列。

以 15 个最小割集作为参评序列,标准序列为均值化处理后的基本事件的模糊重要度。即标准序列为: $X_0 = \{0.004042, 1.329603, 3.704093, 0.004042, 0.003063, 3.704093, 0.003063, 0.016253, 0.016253, 3.704093, 0.004042, 0.109215, 1.329603, 0.003063, 0.000000\}$ 。

6) 计算关联系数和灰色关联度。

按照 3.1 节的算法求得关联系数 $\gamma[U_{0i}, U_{ki}]$ 后,计算最

小割集 γ_k 的灰色关联度。

$$\gamma_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \gamma[U_{0i}, U_{ki}] \quad (13)$$

由式(13)计算出各最小割集的灰色关联度所组成的集合为 $\{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_{15}\} = \{0.783434, 0.824458, 0.811526, 0.783434, 0.783384, 0.811526, 0.783384, 0.784057, 0.784057, 0.811526, 0.783434, 0.788672, 0.824458, 0.783384, 0.783227\}$, 则最小割集的灰色关联度的排列顺序为 $\gamma_2 = \gamma_{13} > \gamma_3 = \gamma_6 = \gamma_{10} > \gamma_{12} > \gamma_8 = \gamma_9 > \gamma_1 = \gamma_4 = \gamma_{11} > \gamma_5 = \gamma_7 = \gamma_{14} > \gamma_{15}$ 。

灰色关联度越大,表示最小割集导致顶上事件发生的可能性越大。由此可知,腔体埋深过浅、人为操作不当、夹层垮塌、顶板预留岩层厚度过薄、内管临界流速小于卤水流速、自激振动和动力失稳等是影响盐岩储库安全性的主要危险因素,应严格按照一定标准或采取一定措施来预防事故的发生。

4 结 论

1) 根据建立的储库建腔期地下系统故障树模型得出 21 个基本事件,建立了盐岩储库建腔期地下系统的多层次、多指标安全评价体系。

2) 根据试验和数值模拟结果构建了各评价指标的评分模型,评分模型的建立可显著减小专家打分的主观性。

3) 金坛某储气库的灰色模糊综合评价结果为 IV 级稳定,与实际运行情况相符,表明用建立的多层次、多指标综合评价体系对储库建腔期进行安全评价是可行的。

4) 采用三角模糊数表示基本事件失效概率可能性分布函数,得到最容易导致建腔期储库失效的故障模式:腔体埋深过浅、人为操作不当、夹层垮塌、顶板预留岩层厚度过薄、内管临界流速小于卤水流速、自激振动和动力失稳等。这些因素应成为安全预防工作的重点。

References(参考文献):

- [1] FABER M H. *Risk and safety in civil engineering* [R]. Zurich, Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology, 2001.
- [2] KWANGHO Y, YEONJUN P, JUN S L. Risk analysis for determination of a tunnel support pattern[J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2005, 20: 479-486.
- [3] 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.
- [4] PU Wei(蒲伟), QING Li(卿黎), NIU Ben(牛犇). Application of fuzzy comprehensive evaluation method to safety evaluation of the boiler welding seams[J]. *Journal of Safety and Environment(安全与环境学报)*, 2014, 14(4): 115-119.
- [5] LI Yuan(李媛), ZHANG Qiangyong(张强勇), JIA Chao(贾超), et al. Fault tree analysis of salt cavern storage during its operational period[J]. *Rock and Soil Mechanics(岩土力学)*, 2011, 32(4): 1125-1131.
- [6] YANG Chunhe(杨春和), LI Yinping(李银平), QU Dan'an(屈丹安), et al. Advances in researches of the mechanical behaviors

- of bedded salt rocks [J]. *Advances in Mechanics* (力学进展), 2008, 38(4): 484-494.
- [7] FENG Yunqing(冯运卿), LI Xuemei(李雪梅), LI Xuewei(李学伟). Comprehensive evaluation method for the railway safety based on the entropy method and the grey relation analysis [J]. *Journal of Safety and Environment* (安全与环境学报), 2014, 14(2): 73-79.
- [8] WU Wen(吴文), HOU Zhengmeng(侯正猛), YANG Chunhe(杨春和). 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* (岩石力学与工程学报), 2005, 24(14): 2497-2505.
- [9] JIANG Deyi(姜德义), HUO Yan(霍琰), REN Song(任松), et al. Application of the grey theory on the salt rock gas storage's stability evaluation [J]. *China Mining Magazine* (中国矿业), 2011, 20(3): 122-125.
- [10] REN Song(任松), LI Xiaoyong(季小勇), JIANG Deyi(姜德义), et al. Evaluating stability of salt rock gas storage during operation period [J]. *Rock and Soil Mechanics* (岩土力学), 2011, 32(5): 1465-1472.
- [11] AQ 2041—2012 *Standardization for work safety of petroleum industries conduction rule of downhole operation* (石油行业安全生产标准化——井下作业实施规范) [S].
- [12] CHEN Feng(陈锋). *The mechanical behavior of salt rock and its application on the natural gas construction* (盐岩力学特性及其在储库建设中的应用研究) [D]. Beijing: Chinese Academy of Science, 2006.
- [13] LIU Jiang(刘江). *Experimental investigation and theoretic analysis on the mechanical properties of layered rock salt* (层状盐岩力学特性试验研究及其理论分析) [D]. Beijing: Chinese Academy of Science, 2006.
- [14] YANG Chunhe(杨春和), LI Yinping(李银平), CHEN Feng(陈锋). *Mechanics theory and engineering of layered rock salt* (层状盐岩力学理论与工程) [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [15] CAO Shugang(曹树刚), XU Ameng(徐阿猛), LIU Yanbao(刘延保), et al. Comprehensive assessment of security in coal mines based on grey relevance analysis [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering* (采矿与安全工程学报), 2007, 24(2): 141-145.
- [16] CHEN Yang(陈杨), WANG Weimin(王为民), JIANG Dongfang(姜东方), et al. Safety assessment of the CNG station in city based on faulty tree and fuzzy-grey theory [J]. *Journal of Safety Science and Technology* (中国安全生产科学技术), 2011, 7(4): 123-129.
- [17] ZHOU Zhen(周真), MA Dezhong(马德仲), YU Xiaoyang(于晓洋), et al. Application of fuzzy grey relational analysis in fault tree analysis [J]. *Electric Machines and Control* (电机与控制学报), 2012, 16(3): 60-64.
- [18] LI Qing(李青), LU Tingjin(陆廷金), LI Ningping(李宁萍), et al. Fuzzy fault-tree analysis with triangular fuzzy number and its application [J]. *Journal of China University of Mining & Technology* (中国矿业大学学报), 2000, 29(1): 56-59.
- [19] JING Wenjun(井文君). *Risk analysis research of oil and gas storage caverns in lacustrine deposit salt rock* (湖相沉积盐岩地下油气储库风险分析研究) [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science, 2013.

A comprehensive evaluation model for the safety of the salt-rock gas storage in the construction process

REN Song¹, LIU Wei-sha¹, CHEN Jie^{1,2}, ZHENG Bin-bin¹, CHEN Zuo-bo³

(1 State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2 State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Science, Wuhan 430071, China; 3 PetroChina Southwest Oil and Gas Field Company, Institute of Chongqing Gas Field Development Technology, Chongqing 400021, China)

Abstract: This paper is attempting to analyze and identify the potentially risk factors in the construction period in the storage place by way of establishing a fault tree model for the underground salt rock gas storage. We have also studied the nature of the so-called salt rock as a kind of ideal place for the underground storing gasoline and natural gas. So far as we know, little research has been done on how to get rid of such accidents though the so-called salt rock collapse can be taken as a kind of serious disasters in the coal mining production. To solve the aforementioned problem, we have quoted 21 basic events that are likely to cause such underground salt rock gas storage failure during the construction period and then established a multi-level, multi-index safety evaluation model in accordance with the different characteristic features of such events. For the research purpose, we have also set up the scoring models for the various evaluation indicators on the basis of the experimental and numerical simulation results with the hierarchy analysis method being applied to the various evaluation indicator weights derived and fuzzy-gray relational analysis used for the safety evaluation on the gas storage space in Jintan. To make sure the safety of the salt rock gas storage further during the construction period, we have also conducted a risk analysis of the influential factors and examined its stability by level IV-th grade, with the triangular fuzzy numbers to denote the distribution functions of the failure probability of basic events for the shortage of the accurate probability evaluation. In addition, we have derived the main factors that could lead to the accidents during the construction period at the gas storage at Jintan while working out the gray degree of the correlation data between the various minimum cutting sets and the top events, such as the shallow cavity depth, the unreasonable distance of two nozzle and the position of intermediate tube, the thin top-roof rock layer thickness, the large pressure difference between the inside and outside of cavity, the small pillar width, the inappropriate height to diameter ratio of the cavity. All the above preventive measures can be oriented and adopted in hoping to prevent the likely occurring failure accidents.

Key words: safety engineering; salt rock storage; construction period; safety evaluation system; fuzzy correlation analysis

CLC number: X93 **Document code:** A

Article ID: 1009-6094(2016)04-0032-06