

文章编号: 1000-582X(2011)12-144-07

## 盐岩地下储库运行期失效概率分析

刘 健, 宋 娟, 张强勇, 贾 超, 李术才

(山东大学 土建与水利学院, 山东 济南 250061)

**摘 要:** 基于响应面法, 以有限元为基础, 将极限状态曲面近似表示为随机变量的显式, 结合蒙特卡罗方法提高失效概率的计算效率; 储库整体属于串并联结构体系, 根据失效准则确定失效概率最大的单元, 以此为基础确定系统的失效模式, 计算体系失效概率及可靠度。以金坛盐岩地下储气库为例, 计算结果表明腔体中部失效概率随储气内压增大逐渐减小, 内压达到一定数值时失效概率又逐渐增大; 腔体上部及下部失效概率随内压增大逐渐增大。运行条件下, 储库失效主要为内压较大时上部及下部结构的剪切失效。因此, 运行过程中应对储气内压严格控制。

**关键词:** 盐岩; 地下储库; 响应面法; 失效概率; 可靠度

**中图分类号:** TU457

**文献标志码:** A

### Analysis of salt rock underground deposit failure probability in operation period based on response surface method

LIU Jian, SONG Juan, ZHANG Qiang-yong, JIA Chao, LI Shu-cai

(School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, P. R. China)

**Abstract:** For the safety of salt rock underground deposit, uncertainties and their influences are considered, and failure probability during operation period is analyzed. Based on finite element model, equation of limit state surface is transformed into explicit equation by response surface method. Combined with Monte Carlo method, computation efficiency is improved. The deposit could be simulated as a series-parallel system. The element with highest failure probability is determined first, then failure mode and system reliability are computed. Taking Jintan underground gas deposit as an example, the analysis indicates that as storage pressure increases, failure probability of middle part of deposit decreases firstly, then increases gradually when storage pressure accumulates to a certain extent. The failure probabilities of upper part and underside of deposit increase as storage pressure increases. During operation period, controlled failure mode is shear failure of upper part and underside of deposit under high storage pressure. In conclusion, the storage pressure during operation period should be controlled strictly.

**Key words:** salt rock; underground deposit; response surface method; failure probability; reliability

盐岩由于具有孔隙率低、渗透率小、损伤自恢复和塑性变形能力大等优良特性, 被认为是石油、天然

气地下储备的理想场所。近年来, 由于国家能源安全的迫切需求, 中国已开始盐岩地下能源储库的选

收稿日期: 2011-07-08

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)计划资助项目(2009CB724607); 国家科技支撑计划资助项目(2006BAJ05A12)

作者简介: 刘 健(1975-), 男, 山东大学副教授, 博士, 主要从事结构可靠度分析及安全监控等方向研究, (E-mail)lj75@sdu.edu.cn。

址及建设工作<sup>[1]</sup>。

尽管相对于其它储存围岩体,盐岩油气地下储库具有较好的安全性,但近 30 年来,国外盐岩地下储库灾难性事故,如油气渗漏、溶腔失效和库区地表沉陷等时有发生,且事故突发性强、破坏力大,对安全及环境产生了巨大影响<sup>[2]</sup>。与国外建造在地层结构简单的巨厚盐岩层中的储库相比,中国的盐岩层一般盐层薄、夹层多、品位低、地下油气储库地质条件相对复杂,地下储库运营过程中的失效概率高,失效后果严重<sup>[3]</sup>。由于盐岩地下储库工程的特殊性,在荷载、材料参数、计算模型、几何尺寸和初始条件及边界条件等众多方面均存在较大的不确定性。因此,应采用概率设计方法,充分考虑各不确定因素对输出结果的影响,针对储库稳定性、可用性等工程特性进行运行期失效概率分析,以保证工程安全。

由于盐岩地下储库的复杂性,功能函数难以用明确显式表达,给失效概率的分析带来困难,而常规蒙特卡罗等方法计算结构失效概率时模拟数目会相当大,占用大量机时<sup>[4]</sup>。响应面法以有限元为基础,采用有限次试验,通过回归拟合将极限状态曲面原函数关系近似表示为随机变量的显式,结合其他失效概率计算方法可大大提高计算效率<sup>[5-6]</sup>。响应面法在杆系、边坡等结构中已有较多应用,文中将其引入结构及失效模式复杂的地下储库中,并与系统可靠性分析结合,以江苏金坛天然气储库为例,根据工程特点建立其计算模型,将其模拟为串并联系统,进行失效概率分析。

## 1 响应面法(RSM)

### 1.1 基本原理及计算方法

大型复杂结构的内力和位移一般要用有限元法进行分析,当对结构或构件进行可靠度分析时,所建立的极限状态方程也不再是一个显式表达式,从而造成了迭代求解可靠度的困难。响应面法是近年来发展起来的处理此类问题的一种有效方法,通过一系列确定性试验拟合一个响应面来模拟真实的极限状态曲面。对于地下储库工程,利用有限元分析模型,重复有限次计算,得到关于基本随机变量的不确定性响应—结构内力或位移的点估计,然后用响应面函数去拟合这些点,使得在所求区间内,可以用响应面函数相当近似地代表真实的函数关系。

选择响应面的表达式时,一方面要求尽可能地逼近真实曲面;另一方面则要求尽可能简单。在实际应用中,通常采用二次多项式形式<sup>[7]</sup>:

$$G'(\{x\}_{i=1}^n) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} x_i x_j, \quad (1)$$

其中, $a_0, a_i, a_{ij}$ 是待定系数,共有  $n+1+\frac{n(n+1)}{2}$  个。

为了得到响应面表达式中的待定系数,需要选择足够的展开点来计算极限状态函数  $G(\{x\}_{i=1}^n)$  的值,进而通过联立方程组求解待定系数  $a_0, a_i, a_{ij}$ 。

随着随机变量数目的增加,计算量将变得非常庞大,因此在实际计算过程中不需要在整个空间上使用响应面  $G'(\{x\}_{i=1}^n)$  和精确的失效界面  $G(\{x\}_{i=1}^n)$  相吻合,只需在验算点附近一致即可,因为这一区域对结构总的失效概率贡献最大。若已知各基本随机变量的分布类型和分布参数,则可以首先以均值点为中心,展开点的选择范围则取为  $\mu_{x_i} \sim \mu_{x_i} \pm f\sigma_{x_i}$ , 其中  $\mu_{x_i}, \sigma_{x_i}$  分别为随机变量  $x_i$  的均值和标准差,一般  $f$  可根据  $3\sigma$  原则选取。

取若干组展开点后可以计算极限状态函数的近似表达式  $G'(\{x\}_{i=1}^n)$ , 第一次得到的结果在验算点附近可能与真实的极限状态函数  $G(\{x\}_{i=1}^n)$  的拟合程度并不是很好,这时可根据  $G'(\{x\}_{i=1}^n)$  计算近似的验算点,然后以近似验算点为中心展开点,重复上述计算过程,直到达到精度要求为止,迭代计算的逼近过程如图 1、图 2 所示<sup>[8]</sup>。

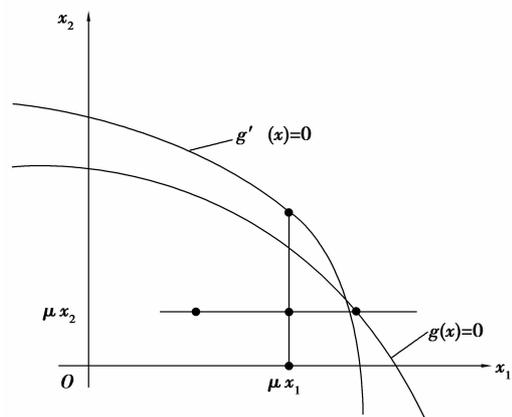


图 1 均值处的样本点

其中,曲线为真实的失效界面,直线为拟合的失效界面;“○”表示展开点。在随机变量比较多的情况下,涉及到交叉项的响应面法的计算量比较大,可根据实际情况忽略响应面展开式中的交叉项,简化计算。

有效地选择生成响应面的试验点不仅可以提高试验效率,减少设计试验点的数量,而且能够更加准确地拟合出响应面函数。生成响应面的试验点由试

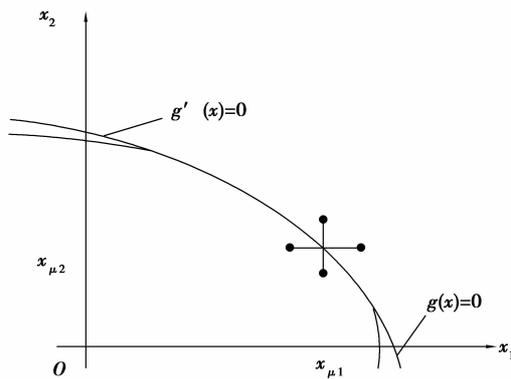


图2 设计验算点处的样本点

验设计确定,通常采用正交设计的方法,主要包括中心复合设计和 Box-Behnken 矩阵设计等。

### 1.2 响应面拟合的基本步骤

1) 选取形式较为简单,能反映原极限状态方程主要特点的响应面函数形式。

2) 根据一定的准则和所选响应面的形式,选取一定数量的试验点,假定迭代点  $X^{(1)} = (x_1^{(1)}, \dots, x_i^{(1)}, \dots, x_n^{(1)})$ ,初次计算一般取平均值点。

3) 利用试验(复杂结构的可靠度分析一般采用数值模拟试验,通常采用确定性有限元分析方法),对这些试验点(结构设计方案)进行结构分析计算其功能函数

$$Z' = g(x_1^{(1)}, \dots, x_i^{(1)}, \dots, x_n^{(1)}), \quad (2)$$

$$Z' = g(x_1^{(1)}, \dots, x_i^{(1)} \pm f\sigma_i, \dots, x_n^{(1)}), \quad (3)$$

得到  $2n+1$  个点估计值,式中系数  $f$  在第一轮估计中取 2 或 3,在以后的迭代过程计算中取 1,  $\sigma_i$  为  $x_i$  的均方差<sup>[6]</sup>。

4) 根据试验点的分析结果,采用适当的方法(如最小二乘法或解方程法等)确定出响应面函数的待定系数  $a_0, b_i, c_i$ 。

在拟合响应面以后,采用蒙特卡罗方法求解系统的失效概率。

## 2 盐岩地下储库系统可靠性分析

盐岩地下储库系统的失效可以看成由若干失效模式组成,而任一失效模式的发生都将导致系统的整体破坏。因此,结构体系可看成由失效模式组成的串联系统。对于某一失效模式而言,当失效模式中的所有单元全部失效时,该失效模式才会发生,因此,失效模式可看成是由失效单元组成的并联系统,整个结构体系成为失效单元组成的并联子系统(失效模式)的串联系统<sup>[9]</sup>。

结构体系可靠度的计算通常很困难,因此寻求可靠度(失效概率)的近似值是必要的,其中可靠度(失效概率)的下界和上界具有很大的工程意义<sup>[10-13]</sup>。

假设结构体系的各失效模式为正相关,即失效模式发生的事件  $E_i$  和  $E_j$  的相关系数  $\rho_{ij} > 0$ 。这意味着  $Pr(E_j | E_i) \geq Pr(E_j)$ , 或  $Pr(\bar{E}_j | \bar{E}_i) \geq Pr(\bar{E}_j)$ , 因此,  $Pr(\bar{E}_i, \bar{E}_j) \geq Pr(\bar{E}_i)Pr(\bar{E}_j)$ , 进而

$$Pr(\bar{E}) = Pr(\bar{E}_1 \bar{E}_2 \dots \bar{E}_m) \geq \prod_{i=1}^m Pr(\bar{E}_i), \quad (4)$$

由于对任何  $i$ , 有  $\bar{E} = \bar{E}_1 \bar{E}_2 \dots \bar{E}_m - \bar{E}_i$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ), 所以

$$Pr(\bar{E}) \leq \min_{1 \leq i \leq m} Pr(\bar{E}_i), \quad (5)$$

记第  $i$  个失效模式的可靠概率为  $p_{ri} = Pr(\bar{E}_i)$ , 失效概率为  $p_{fi} = Pr(E_i)$ , 由式(4)、(5), 得宽界限法(一阶界限)的结构体系的可靠概率为

$$\prod_{i=1}^m p_{ri} \leq p_r \leq \min_{1 \leq i \leq m} p_{ri}, \quad (6)$$

相应的体系失效概率为

$$\max_{1 \leq i \leq m} p_{fi} \leq p_f \leq 1 - \prod_{i=1}^m (1 - p_{fi}). \quad (7)$$

显然,宽界限公式(6)或式(7)没有考虑失效模式之间的相关性。

根据概率论中任意  $m$  个事件的和的公式,有

$$\begin{aligned} Pr(E) &= \sum_{i=1}^m Pr(E_i) - \sum_{1 \leq i < j \leq m} Pr(E_i E_j) \\ &+ \sum_{1 \leq i < j < k \leq m} Pr(E_i E_j E_k) + \dots + (-1)^{m-1} Pr(\bigcap_{i=1}^m E_i), \end{aligned} \quad (8)$$

注意到  $Pr(E_i E_j) \geq Pr(E_i E_j E_k) \geq \dots$ , 若仅保留上式中的  $Pr(E_i) - Pr(E_i E_j)$  项, 则有

$$Pr(E) \geq Pr(E_i) + \sum_{i=2}^m \max \left[ Pr(E_i) - \sum_{j=1}^{i-1} Pr(E_i E_j), 0 \right], \quad (9)$$

由于

$$Pr(E) \leq \sum_{i=1}^m Pr(E_i) - \sum_{i=2}^m \max_{j < i} Pr(E_i, E_j). \quad (10)$$

记 2 个失效模式同时失效的概率为  $p_{fij} = Pr(E_i E_j)$ , 由式(9)和式(10), 得窄界限法(二阶界限)的体系的失效概率为

$$\begin{aligned} p_{f1} + \sum_{i=2}^m \max \left( p_{fi} - \sum_{j=1}^{i-1} p_{fij}, 0 \right) &\leq p_f \\ &\leq \sum_{i=1}^m p_{fi} - \sum_{i=2}^m \max_{j < i} p_{fij}. \end{aligned} \quad (11)$$

还可推导二阶以上的体系失效概率  $p_f$  的上、下界限。因二阶及二阶以上  $p_f$  的上、下界与各个失效模式的排序有关,按  $p_{f1} \geq p_{f2} \geq \dots \geq p_{fm}$  的顺序排列可使上下界区间较窄。

并联体系只有一种失效模式,其体系失效概率的界限法计算公式相应为

$$\prod_{i=1}^q p_{fi} \leq p_f \leq \min_{1 \leq i \leq q} p_{fi}, \quad (12)$$

$$\prod_{i=1}^q p_{fi} \leq p_f \leq \min_{1 \leq i, j \leq q} p_{fij}。 \quad (13)$$

### 3 金坛地下储气库概率设计分析

#### 3.1 概率设计

借助大型通用有限元软件 ANSYS 中较为成熟的可靠度设计(Prob Design)模块<sup>[14]</sup>,编制了 APDL 分析程序,实现基于数值模拟技术的可靠度分析,可解决下列问题。

根据模型中输入参数的不确定性计算待求结果变量的不确定程度,可用于确定随机变量对分析结果的影响程度,确定由于输入参数的不确定性导致的结构失效概率值;已知容许失效概率确定结构行为的容许范围如最大变形、最大应力等,判断对输入结果和失效概率影响最大的参数;计算输入结果相对于输入参数的灵敏度;确定输入变量、输出结果变量之间的相关系数等。

#### 3.2 计算模型

以金坛盐岩地下储气库为例,进行了其运行期可靠度计算分析。岩盐层段岩性主要为盐岩、含泥盐岩和泥岩等,盐矿岩盐层总厚度平均 148.68 m,含盐量 54%~91%,各矿层平均含盐量为 77.02%~79.7%,最高达 96.1%,属于高品位工业盐层<sup>[1]</sup>。储库洞腔按椭球体考虑,埋深在地表以下 900 m,储腔的长短轴之比为 0.6,储腔长轴为 100 m,短轴为 60 m。

在进行概率分析之前,对所建立的数值计算模型进行了合理的简化处理:1)将各复合岩层均近似视为各向同性均质连续体;2)假设各复合岩层之间是牢固粘结的,即各复合岩层之间的位移连续。

对于单一洞室而言,模型尺寸必须足够大,方能消除模型尺寸效应的影响。在实际数值计算中,建立了  $\frac{1}{4}$  的三维计算模型。考虑储库为单腔情况,计算区域设定为一长方体。数值计算模型如图 3 所示。

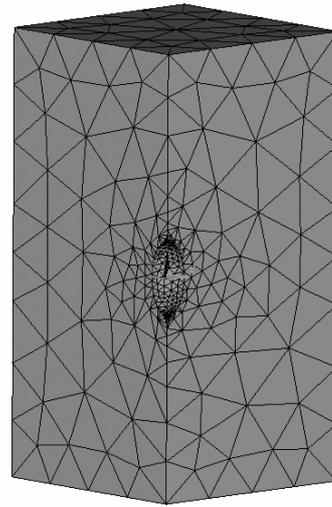


图 3 金坛地下储库数值计算模型

#### 3.3 计算条件

1)地应力。从现有盐岩矿区的地质资料可知,矿区岩层及其覆岩和底板岩层均为水平或近水平,地质构造应力不大,因此计算原岩应力的垂直分量时按上覆岩层厚度,根据地层平均密度计算得等效荷载。在模型中,荷载仅考虑岩层的自重应力和天然气内压,不考虑充气过程。

2)边界条件。金坛盐矿层埋深在 850~1 200 m 之间,计算模型取上覆岩层为 900 m。储库顶部岩性主要为含膏泥岩、云质泥岩、钙质泥岩和粉砂质泥岩等。岩石物理及力学性能好,分布稳定。模型的上表面为均布应力边界条件,以模拟该地质体上部边界至地表范围内的地质体部分的岩体自重作用;在模型的左、右、前、后面及下部边界均采用了沿相应法线方向上的零位移约束,认为不允许其产生法线方向的移动。

#### 3.4 失效模式及失效准则

盐岩地下储库的失效模式是复杂的多失效模式,主要包括顶板受拉破坏,底板受拉破坏,储存库腔壁的破坏(拉伸和剪切破坏出现片帮、蠕变破裂),盐岩层与夹层交界面的破坏(交界面之间的过大的层面滑动),气体顺交界面渗透等<sup>[3]</sup>。储库整体属于串联结构体系,任一种失效模式都会导致系统的失效,但是由于每一失效模式均由部分单元失效构成,因此在串联结构体系中包含并联结构。根据失效准则确定失效概率最大的单元,以此为中心搜寻可靠度小于工程要求的单元,确定系统的失效模式,计算体系失效概率及可靠度。

根据工程特点,考虑运行期主要破坏形式,采用摩尔-库伦准则作为计算单元失效准则,其强度屈服函数为

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\varphi + 2c \sqrt{N_\varphi}, \quad (14)$$

$$f_t = \sigma_t - \sigma_3, \quad (15)$$

式中: $N_\varphi = (1 + \sin\varphi)/(1 - \sin\varphi)$ ;  $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$  分别为最大和最小主应力; $\sigma_t$  为盐岩/泥岩的抗拉强度。 $f_s = 0$  时,将发生剪切破坏; $f_t = 0$  时,发生拉伸破坏。

### 3.5 材料参数及随机变量的选取

材料参数取值参考金坛盐岩地下储库勘察资料,见表 1。

表 1 盐岩地下储库材料参数表

材料	$E/\text{Pa}$	$\varphi/(\text{°})$	$C/\text{Pa}$	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\nu$
盐岩	18e9	45	1e6	2.3e3	0.3

根据工程实际及工程对稳定性、可用性等要求,取盐岩弹性模量  $E$ 、内摩擦角  $C$ 、粘聚力  $\varphi$  为随机变量。随机变量分布均假设为高斯正态分布,变异系数  $\delta$  均取 0.1<sup>[15]</sup>。

## 4 失效概率分析

根据工程实际,利用窄界限法计算运行期不同储气内压情况下储库失效概率及可靠度,部分数据见表 2。不同内压条件下,储腔腔周单元失效概率变化曲线见图 4。

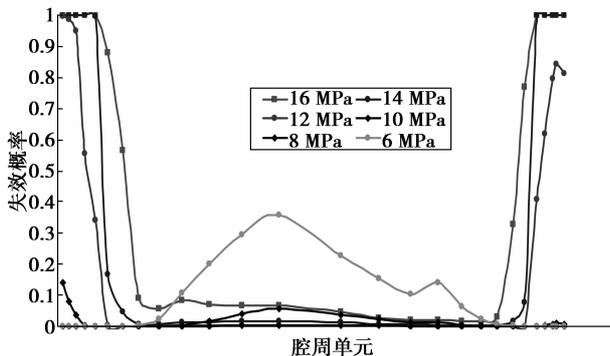


图 4 不同内压储库腔周单元失效概率变化曲线

分别计算储腔腔体上部、中部、下部失效概率及可靠指标随运行期压力变化情况(取窄界限中间值),见图 5、图 6、图 7。

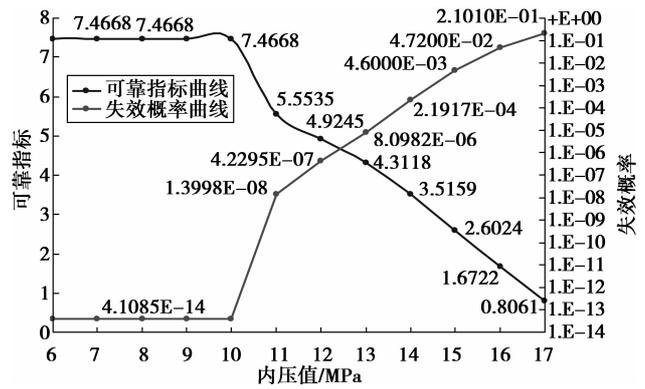


图 5 储腔上部结构可靠指标随内压变化曲线

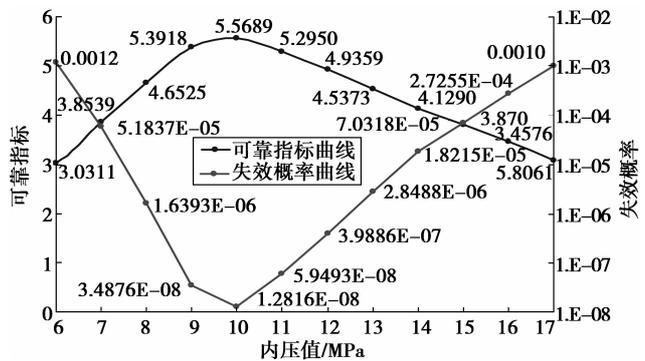


图 6 储腔中部结构可靠指标随内压变化曲线

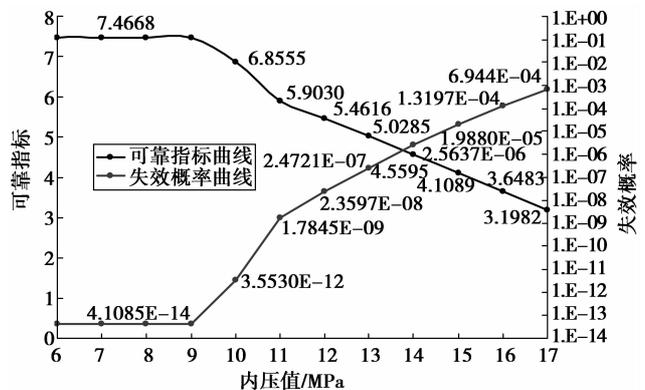


图 7 储腔下部结构可靠指标随内压变化曲线

由图 4 可知,当储库运行压力较低( $<10$  MPa)时,储腔中部失效概率大于上下部。当工作压力为 10 MPa 时,整个储腔可靠性最高。随内压继续增大,失效部位主要发生在储腔上下部,且失效范围明显增大,表明储气内压偏高或偏低时对储库安全均有一定影响,且影响位置不同。内压较大时储腔上下部失效概率较高,而内压较小时需储腔中部失效概率较高。正常运行压力下,储库失效模式均为剪切失效。

表 2 不同内压储腔不同部位失效概率及可靠指标

内压值/MPa	最大失效 区域位置	失效概率(窄界限法)			可靠指标(窄界限法)			失效模式
		下限	上限	中间值	下限	上限	中间值	
6	腔体上部	3.1443e-43	8.2169e-14	4.1085e-14	13.734 7	7.375 0	7.466 8	剪切失效
	腔体中部	1.9171e-07	0.002 4	0.001 2	5.077 0	2.815 3	3.031 1	剪切失效
	腔体下部	1.2295e-45	8.2169e-14	4.1085e-14	14.130 6	7.375 0	7.466 8	剪切失效
8	腔体上部	1.2252e-50	8.2169e-14	4.1085e-14	14.919 8	7.375 0	7.466 8	剪切失效
	腔体中部	1.0846e-15	3.2786e-06	1.6393e-06	7.931 3	4.507 6	4.652 5	剪切失效
	腔体下部	1.9756e-55	8.2169e-14	4.1085e-14	15.6390	7.3750	7.4668	剪切失效
10	腔体上部	5.3162e-27	8.2169e-14	4.1085e-14	10.696 0	7.375 0	7.466 8	剪切失效
	腔体中部	6.0657e-25	2.5631e-08	1.2816e-08	10.247 6	5.446 9	5.568 9	剪切失效
	腔体下部	1.9330e-39	7.1060e-12	3.5530e-12	13.087 8	6.755 7	6.855 5	剪切失效
12	腔体上部	4.3764e-10	8.4547e-07	4.2295e-07	6.130 6	4.787 2	4.924 5	剪切失效
	腔体中部	2.1658e-22	7.9773e-07	3.9886e-07	9.663 0	4.798 9	4.935 9	剪切失效
	腔体下部	8.7445e-22	4.7194e-08	2.3597e-08	9.519 0	5.337 2	5.461 6	剪切失效
14	腔体上部	6.2706e-05	3.7564e-04	2.1917e-04	3.835 3	3.370 1	3.515 9	剪切失效
	腔体中部	1.5917e-16	3.6430e-05	1.8215e-05	8.209 5	3.966 8	4.129 0	剪切失效
	腔体下部	8.1220e-14	5.1275e-06	2.5637e-06	7.376 6	4.411 7	4.559 5	剪切失效
16	腔体上部	0.044 2	0.050 3	0.047 2	1.703 8	1.642 2	1.672 2	剪切失效
	腔体中部	3.8550e-11	5.4510e-04	2.7255e-04	6.506 2	3.266 2	3.457 6	剪切失效
	腔体下部	3.9125e-09	2.6394e-04	1.3197e-04	5.772 2	3.466 2	3.648 3	剪切失效

由图 5~图 7 可知,随储腔运行内压的变化,储腔不同部位的失效概率变化趋势差异明显。对上下部结构而言,随内压增加到一定程度,其失效概率逐渐增大,可靠度降低。相比较而言上部结构失效概率增加更明显,对安全性影响更大。

对于储腔中部,随储腔运行内压的变化,其失效概率先逐渐减小,内压增大到一定程度后,失效概率逐渐增大,即运行压力偏高或偏低都会增加失效概率,但其可靠指标数值要大于上下部位。综合比较,高内压时储腔安全性由上部和下部结构控制,结构易在储腔端部发生剪切失效。实际工程中储库上部与套管结构连接,更应注意由于接触部位破坏引起的油气泄露。低内压时失效概率较大的位置为储腔中部。

当失效模式为拉伸破坏时,计算结果表明储腔内压由 6 MPa 增大至 16 MPa 时,其失效概率均很小,储腔不会发生拉伸破坏。当内压值达到 17 MPa 时,储腔中才有明显的拉破单元出现,位置仍在腔体的上部和下部,且随内压增大失效概率明显增大。但当考虑 2 种失效模式为串联体系时,结构可靠性由高失效概率者决定,所以储库运行条件下主要以剪切破坏为主。

工程实际中,储库内压一般为地层竖向压力的一半,即  $\gamma h/2=10.35$  MPa,与计算结果 10 MPa 左右储库可靠性最高较为吻合。金坛储气库已于 2007 年 9 月正式投入运行,注气时最大工作压力为 14 MPa,采气时最大工作压力为 7 MPa。根据计算结果,工作条件下最大失效概率为  $2.1917e-04$ ,储库处于安全状态。储库运行 2 年多,未出现安全问

题,验证了计算结果。

## 5 结 论

1) 基于响应面法,以有限元为基础,将极限状态曲面原函数关系近似表现为随机变量的显式,结合蒙特卡罗方法可大大提高失效概率的计算效率;

2) 储库可作为串并联结构体系进行分析,根据失效准则可确定失效概率最大的单元,确定系统的失效模式,并计算体系失效概率及可靠度。

3) 实例分析表明,腔体中部失效概率随储气内压增大逐渐减小,内压达到一定数值时失效概率又逐渐增大;储气内压增大到一定数值后,腔体上部及下部失效概率逐渐增大。运行条件下,储库失效主要为内压较大时上部及下部结构的剪切失效。

4) 工程应用中应对运行期储气内压严格控制,内压过大或过小都不利于储库安全,尤其是当储库内压较大时,储腔发生剪切破坏和拉伸破坏的失效概率增加显著,产生安全隐患。

5) 盐岩具有较明显的蠕变特性,且温度对其蠕变影响较大,同时不同溶腔形状、地应力方向和大小及岩土性质等对储库设计及运行有较大影响。下一步计算分析将重点考虑这些因素对储库失效概率的影响。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] STORMONT J C. In situ gas permeability measurements to delineate damage in rock salt [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(7):1055-1064.
- [3] 杨春和. 深部盐岩层地下石油储备中的基础性研究-国家自然科学基金资助项目结题报告[R]. 武汉: 武汉岩土所, 2008.
- [4] 赵国藩, 金伟良, 贡金鑫. 结构可靠度理论[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [5] BUCHER C G, BOURGUND U. A fast and efficient response surface approach for structural reliability problems[J]. Structural Safety, 1990, 7(1):57-66.
- [6] RAJASHEKHAR M R, ELLINGWOOD B R. A new look at the response surface approach for reliability analysis[J]. Structural Safety, 1993, 12(3):205-220.
- [7] 徐军, 郑颖人. 可靠度响应面有限元及其工程应用[J]. 地下空间, 2001, 21(5):354-360.  
XU JUN, ZHENG YING-REN. Reliability response surface FEM and its application in engineering [J]. Underground Space, 2001, 21(5):354-360.
- [8] KIM S H, NA S W. Response surface method using vector projected sampling points[J]. Structural Safety, 1997, 19(1):3-19.
- [9] 张明. 结构可靠度分析-方法与程序[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [10] DITLEVSEN O. Narrow reliability bounds for structural system[J]. Structural Mechanical, 1979, 4 (1):117-122.
- [11] KAMINSKI M M, SZAFRAN J. Random eigenvibrations of elastic structures by the response function method and the generalized stochastic perturbation technique [J]. Archives of civil and mechanical engineering, 2009, 9(4):5-32.
- [12] EAMON C. D, RAIS-ROHANI M. Integrated reliability and sizing optimization of a large composite structure [J]. Marine structures, 2009, 22 (2): 315-334.
- [13] SONG J, KANG W H. System reliability and sensitivity under statistical dependence by matrix-based system reliability method[J]. Structural safety, 2009, 31(2): 148-156
- [14] 张胜民. 基于有限元软件 ANSYS 7.0 的结构分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [15] 张继周, 缪林昌. 岩土参数概率分布类型及其选择标准[J]. 岩石力学与工程报, 2009, 28(2):3526-3532.  
ZHANG JI-ZHOU, MIAO LIN-CHANG. Types and selection criteria of probability distribution of rock and soil parameters[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2009, 28(2):3526-3532.

(编辑 陈移峰)

(上接第 143 页)

## 参考文献:

- [1] 刘海京, 夏才初, 罗鑫, 等. 隧道病害研究现状与进展[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(5):947-953.  
LIU HAI-JING, XIA CAI-CHU, LUO XING, et al. Studies on tunnel damage [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3 (5): 947-953.
- [2] ZHENG J Y, LIU H J, ZOU Z L. Defects inspection and cause analysis of six tunnels in Chongqing [J]. Advanced Materials Research, 2011, 261-263: 1261-1264.
- [3] US Department of Transportation. Highway and rail transit tunnel maintenance and rehabilitation manual[S]. New York: US Department of Transportation, 2004.
- [4] 侯建斌. 公路隧道病害治理研究[D]. 西安: 长安大学, 2007.
- [5] 王勇. 寒冷地区公路隧道病害处治技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- [6] 关宝树. 隧道工程维修管理要点集[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [7] 杨彦民, 焦建宏. 2001 年全国公路隧道学术会议论文集: 青海大坂山公路隧道设计[C]. 厦门: [出版者不详], 2001.
- [8] 铁道部第十六工程局第一工程处. 青海省国道 227 线大坂山隧道工程病害处治工程竣工报告[R]. 西宁: 铁道部第十六工程局第一工程处, 2008.
- [9] 刘海京, 郑佳艳, 涂耘, 等. 大坂山高寒隧道病害检测与状态评定[J]. 公路交通技术, 2009(6):120-124.  
LIU HAI-JING, ZHENG JIA-YAN, TU YUN, et al. Diseases detection and status assessment for high and cold tunnels in Daban mountain [J]. Technology of Highway and Transport, 2009(6):120-124.
- [10] 重庆交通科研设计院. 大坂山隧道病害处治施工图设计[C]. 重庆: [出版者不详], 2007.
- [11] 郑佳艳, 刘海京, 林志. 大坂山高寒隧道渗漏水处治及保温设计与施工[C]. 兰州: 2009 年全国公路隧道学术会议, 2009.
- [12] LIU H J, ZHENG J Y, LIN Z. The rehabilitation project of highland road tunnel [J]. Advanced Materials Research, 2011, 255-260: 1048-1051.
- [13] ZHANG X F, LAI Y M, YU W B, et al. Forecast and analysis of refreezing in Fenghuoshan permafrost tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(24):4170-4178.
- [14] ZHANG, D H, WANG M S, REN S Q. Experimental study on temperature and response of seasonal active layer of tunnels surrounding rock in permafrost region on Qinghai-Tibet plateau[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3):614-619.
- [15] JIANG Y Y, WANG M S, WANG X H, et al. Research on construction technology and plans of tunnels in the plateau permafrost region[J]. Journal of the China Railway Society, 2006, 28(2):67-73.

(编辑 陈移峰)