

盐岩能源地下储备库群风险综合评价 与管理体系

张 宁¹,张强勇²,李 媛³,马林建¹

(1. 中国人民解放军理工大学爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室,南京 210007; 2. 山东大学岩土与结构工程研究中心, 济南 250061; 3. 中铁十六局集团有限公司,北京 100018)

[摘要] 利用盐岩洞穴进行能源地下储备是我国能源储备的重点战略部署方向。我国盐岩地层埋深浅,呈层状分布,且夹层较多,地质条件相对复杂,增加储库灾变的可能性,因此建立一套盐岩能源地下储备库群风险综合评价和管理体系尤显重要。根据盐岩地下储库群灾变事故的统计结果,获取了盐岩地下储库的主要风险因子,对库群风险进行了辨识。建立了盐岩地下库群风险评价方法和风险分级标准,通过数值模拟方法对失效概率进行了核算,评价了金坛盐岩库群风险等级,并通过模型试验对结果进行了验证,开发了基于计算机网络的盐岩地下库群风险信息管理与评估系统,建立了盐岩能源地下储备库群风险综合评价和管理体系。

[关键词] 风险综合评价和管理体系;盐岩;能源地下储备库群

[中图分类号] TU452 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)10-0080-11

1 前言

利用盐岩洞穴进行能源地下储备是国际上通行的能源储备方式之一,是我国能源地下储备的重点部署方向。我国能源储备有待发展,能源盐岩地下储库群大规模兴建已经启动,江苏金坛盐岩储库群已形成规模,湖北云应、重庆万州和河南平顶山等盐岩矿区的库群建设也已纳入规划。相对其他储存介质,盐岩能源地下储备库安全性较好,国外盐岩地下储库灾变事故还是时有发生。与国外盐丘中建设的库群相比,我国岩盐地层埋深较浅、成层分布、夹层较多,地质条件相对复杂,薄夹层的存在增大了形成油气渗漏通道的风险,储库密集增加了单洞垮塌引发连锁性库群灾变的可能,埋深较浅加剧了地表沉降。我国能源地下储库建设多位于人口稠密、经济较为发达地区,灾变事故将严重影响能源安全和公共安全^[1]。因此建立一套盐岩能源地下储备库群风险综合评价和管理体系尤显重要。

风险评价与管理的数理概念早在七八百年前阿拉伯数字传入西方时即已出现,现在已广泛应用于自然科学、社会科学、工程技术、工农业生产和军事技术中,并且正广泛地与其他学科互相渗透或结合,成为管理科学的重要组成部分^[2]。自20世纪70年代以后,岩土工程的风险分析与管理科学取得了较大的进展,部分已经在工程项目上得到应用^[3]。Einstein指出了岩土工程风险分析的特点和应遵循的理念^[4]。在此基础上岩土工程的风险理论和应用均得到了长足的发展,其中国际隧协还于2004年撰写了《Guidelines for Tunneling Risk Management》,为隧道工程的风险管理提供了参照标准和方法^[5]。

依托国家重点基础研究发展计划《能源储备地下库群灾变机理与防护理论研究》,在杨春和等人^[6]在盐岩介质力学和库群建设技术研究的基础上,李媛等人通过故障树的方法对盐岩地下油气储库运营期风险进行了定性的研究,对储库运营期的风险因子进行了辨识^[7]。井文君等人采用基于事故统计

[收稿日期] 2013-03-20

[基金项目] 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)资助项目(2009CB724607);国家自然科学基金委员会创新研究群体科学基金项目(51021001)

[作者简介] 张 宁(1986—),男,山东济南市人,博士,主要研究方向为盐岩储库风险评估;E-mail:znbzj@163.com

的方法对盐岩地下油/气储库风险进行了评价,得到了储备库重大事故的发生概率、风险等级、事故类型以及引发事故的主要原因^[8]。贾超等人曾对盐岩储气库运营期时变可靠度进行了计算分析,得出了储库可靠指标随时间的变化规律及风险发生水平,拟合出满足工程可靠度要求的体积收敛率限值与储气内压的关系式^[9]。本文借鉴和采用以上课题组成果,整合建立了盐岩能源地下储备库群风险综合评价和管理体系。

2 风险事故统计与风险因子辨识

2.1 风险事故统计

为分析能源盐岩地下储库建设和运营风险因子,汇总全球盐岩矿区建设和储库运营中的主要灾变事故进行分析,共48起储气库事故被收录在内,其中51%发生在欧洲,48%在北美,1%位于其他地区^[10]。收集数据分为工程资料和灾变信息两部分。工程资料部分主要包括以下4部分:a. 工程概况:主要包括地点、客户、甲方、建造时间、运营时间等信息(运营压力);b. 储气库信息:溶腔形状及体积;c. 地质信息:主要包括地质地层信息,地下水概况,地应力情况;d. 备注。灾变信息主要包括以下两个部分:a. 灾变概况:时间,特性,破坏区域;b. 发生原因。统计得到能源盐岩地下库群的灾变类型、阶段、部位及影响半径概率分布如下。

1) 地表塌陷占灾变事故总数的33%,气体泄漏和爆炸占33%,溶腔过度收敛和地表过度沉降占17%,气体泄漏占13%,溶腔破损占4%。发生频率以地表塌陷和泄漏爆炸居首。

2) 盐岩地下库群主要灾变部位为溶腔腔体、顶板、套管、管道和地面设备等部位,其中顶板问题最多占34%,其次套管破坏占33%,然后溶腔问题占25%,地面设备和管道发生破坏的情况较少,分别占6%和2%。

3) 气体泄漏和爆炸、溶腔过度收敛和地表过度沉降发生在运营期,地表塌陷、溶腔破损的储库的全寿命周期均有可能发生。77%的事故发生在运营期,19%的事故发生在造腔期,4%的事故发生在废弃期。

4) 地表塌陷危害半径一般在3.5~300 m之间,天然气泄漏和爆炸事故影响范围较大,在0~11 265 m之间。

5) 油气泄漏引起的爆炸对地面设施危害较大,

且较易造成人员伤亡,最大伤亡人数为12人。地表塌陷灾变危害则主要体现在对地面结构破坏,如损毁建筑、切断交通等。

该统计结果可为盐岩储库风险因子辨识提供依据;风险损失估算提供经验;为风险定量分级提供权重。

2.2 风险因子辨识

通过对国外盐岩地下库群灾变事故的统计,加上对层状盐岩地下油气储库规划、设计、施工到运营阶段全寿命周期内的风险类型、事故发生的原因深入分析,经过系统筛选、分类基础,结合国内学者的理论研究和意见咨询,根据金坛储库实际地质条件和设计施工过程中存在的因素,辨识出符合我国特色的能源盐岩地下库群全寿命周期的风险因子图(见图1)^[11]。

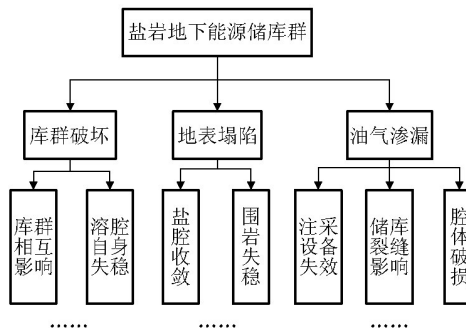


图1 能源盐岩地下库群全寿命周期风险因子图(部分)
Fig.1 Risk events and risk factors of the salt rock underground storage (partly)

3 风险评价体系

3.1 风险分析方法和分级标准

风险分级方法根据风险的基本定义： $R=P \times C$ （ P 为风险项发生的概率， C 为损失量）进行设计。美国国防部1993年《系统安全计划要求M: 1-STD-882C》^[12]提出量化风险的常规步骤:a. 对工程的风险损失评分;b. 对工程的风险概率评分;c. 根据损失评分值与概率分值,把风险值放入风险评估矩阵进行风险分级。根据上述步骤和已有的定量、半定量以及定性研究成果,制定了我国层状盐岩地下储气库风险严重度分类和风险评估矩阵,如表1和表2所示。

3.2 失效概率和损失计算和估算方法

盐岩地下库群的风险分级需要获取风险事故

表1 风险严重度分类

Table 1 The classification of the serious disasters

描述语	分类	定义
可忽略的	I	对储库运营阶段的整体稳定性、密闭性、安全性要求影响可忽略,只需常规监测即可
边际的	II	对储库在运营阶段的整体稳定性、密闭性、安全性需加以考虑,重点加强对储库失效部位的监测
严重的	III	对储库在运营阶段的整体稳定性、密闭性、安全性影响严重,需加以决策,制定严格的监控预警
灾难性的	IV	对储库运营阶段的整体稳定性、密闭性、安全性影响非常严重,如有必要需立即停止储库运营,规避或启动储库预案措施

表2 风险评估矩阵

Table 2 Risk assessment matrix

风险的频率/%	风险严重程度			
	可忽略的(I)	边际的(II)	严重的(III)	灾难性的(IV)
(A)频繁($X \geq 10$)	1A	2A	3A	4A
(B)可能($10 > X \geq 1$)	1B	2B	3B	4B
(C)偶尔($1 > X \geq 0.1$)	1C	2C	3C	4C
(D)很少($0.1 > X \geq 0.01$)	1D	2D	3D	4D
(E)几乎不能($0.01 > X$)	1E	2E	3E	4E
风险性指标	风险决策准则			
I : 2A, 4B, 4C, 4A, 3B, 3A	红色预警:必须避免的,停止运作,立即改正			
II : 4D, 2C, 3D, 2B, 3C	橙色预警:不希望的,必须采取工程控制措施			
III : 4E, 2E, 2D, 3E, 1A, 1B	黄色预警:可接受的,但须改变工程运行调度方式			
IV : 1C, 1D, 1E	可接受的,不需采取控制措施			

的失效概率和损失值,损失估计多借助专家评判的方法获取,失效概率计算则依据可靠度理论和蒙特卡洛分析等方法获得。

3.2.1 片帮破坏失效概率的计算方法

盐岩地下储气库围岩片帮破坏(见图2)是造成储气库溶腔破损的重要因素之一, Hansen对10组取自不同地区的天然盐岩进行了单轴压缩试验,试验数据表明盐岩的片帮破坏形式均满足莫尔-库伦破坏准则^[13]。参照莫尔-库伦破坏准则建立盐岩地下储库的功能函数如式(1)所示

$$Z = g_x(X_1, X_2) = X_1 + p \tan X_2 - R_{mc} q \quad (1)$$

式(1)中,随机变量 X_1 、 X_2 分别为粘聚力 c 、剪切角 ϕ ,式中

$$R_{mc} = \frac{1}{\sqrt{3} \cos \phi} \sin(\Theta + \frac{\pi}{3}) + \frac{1}{3} \cos(\Theta + \frac{\pi}{3}) \tan \phi \quad (2)$$

式中 Θ 为lode角, $\cos(3\Theta) = (r/q)^3$; p 为等效压力, $p = -1/3 \text{trace}(\sigma)$; q 为mises应力, $q = (3/2(S:S))^{1/2}$ 。 r 为第三应力不变量, $r = (9/2(S:S:S))^{1/3}$; S 为偏应力, $S = \sigma + pI$ 。



图2 深部盐岩片帮破坏示意图

Fig.2 The schematic diagram of deep salt rock cavern slabbing failure

本文采用改进的一次二阶矩法计算了盐岩地下储库片帮破坏的可靠指标 β 和失效概率 P_f ,该方法通过获得功能函数面 $G(Y)$ 上寻找一个点 Y^* ,使该点与均值点的距离最短,从而得到盐岩储气库可靠指标,然后根据可靠指标的累计概率分布函数得到盐岩储库的失效概率值^[14]。具体计算步骤如图3所示。通过图3所示的计算流程对ABAQUS进行二次开发,从而获得盐岩地下储库片帮失效概率的计算手段。

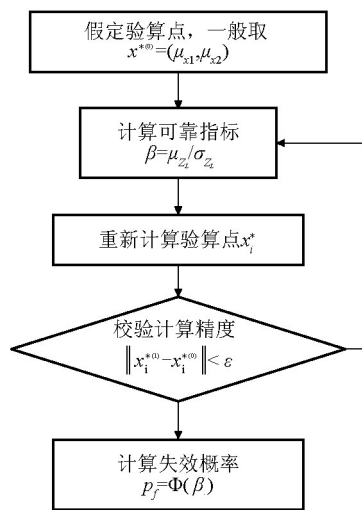


图3 储气库片帮破坏失效概率计算流程

Fig.3 The calculate process of the slabbing failure probability

3.2.2 渗漏失效概率的计算方法

为了确保盐岩储气库的密闭性,必须限制储气库的最大储存压力,其准则是在最大内压作用下不能增加盐岩的渗透率。在储气库内,溶腔内压力过高,将导致盐岩的平均应力增高,当平均应力达到某一个极限值时,盐岩就会发生损伤破坏,盐岩的损伤起始临界值与盐岩储气库所处的应力状态有关。一些研究者提出了各自的盐岩损伤扩容边界线^[15],如式(3)所示

$$\sqrt{J_2} = \alpha_1 \sigma_m - \alpha_2 \sigma_m \quad (3)$$

式(3)中, $\sigma_m = 1/3(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ 为平均应力, $J_2 = 1/6[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]$ 为偏应力第二不变量。为确保储气库的密闭性,确保储气库不会因围岩发后拉伸破坏而泄露,必须使储气库围岩的最大主应力小于盐岩的抗拉强度,否则溶腔发生破损亦会造成渗漏。根据以上损伤扩容边界方程及最大拉应力准则建立功能函数如式(4)所示

$$G = \min[\alpha_1 \sigma_m - \alpha_2 \sigma_m - \sqrt{J_2}, (\sigma_1 - \sigma_t)] \quad (4)$$

当 $G > 0$ 时,可保障盐岩储库的密闭性,当 $G < 0$ 时,盐岩发生损伤,其渗透性增加,可能造成储气库漏气而丧失储气库的密闭性。本文采用有限元软件 ANSYS 中提供的响应面法,输入各随机变量在特定时间点的随机值,拟合结构正常使用极限状态响应面,然后在拟合的响应面上执行 Monte-Carlo 抽样,抽样次数为 10 万次,最终得到盐岩储库溶腔渗漏失效概率。

3.2.3 溶腔过度收敛失效概率的计算方法

盐岩储气库在构造应力的作用下,盐岩储气库发生蠕变变形,使储气库产生体积收敛。较强的收敛率必将引起储存库容积的减少,导致天然气储存库储存效率下降,当储存库的体积收敛超过某一极限值时,储存库就不再适合天然气储存。因此,层状盐岩中天然气地下储存库在运营过程中必须对体积收敛做出预测,分析储存库的长期储存能力。盐岩储气库的可用性准则是其体积收敛减少量不影响储存库的正常使用,引起的地面沉降不对地面构筑物产生过大的影响。因此,时变可靠度计算的功能函数即选择为盐腔体积收缩率的函数。定义如下

$$G = \Delta V/V - 30\% \quad (5)$$

对于上述功能函数在特定时间点的失效概率计算,计算方法同上节。

3.2.4 库区地表沉降风险概率的计算方法

本文采用有限差分法计算了盐岩地下储库溶腔的体积收缩率,SRAGA SCHOBER 矿山法计算了地表沉降量,拟合两者的结果得到了地表沉降量和盐岩蠕变参数的关系式,同时也可作为地表设施失效概率的功能函数,根据地表建筑物的安全规范,采用蒙特卡洛法对失效概率进行了计算。具体计算方法及计算步骤如下所示。

1) 溶腔收敛体积计算。德国克劳斯达尔大学 Sraka Schober 认为地下矿层被开采后都会留有开采空间,地表下沉是开采空间向地表传播扩散的结果,开采空间的存在就是引起下沉的根源^[16],盐岩储气库在构造应力的作用下,盐岩储气库发生蠕变变形,使储气库产生体积收敛,进而引起地表沉降,地表沉降值大小与溶腔体积收敛程度有关,因此预测沉降须首先预测溶腔的体积收敛。目前预测溶腔体积收敛的通行做法是:根据盐矿地区盐岩性质选取适当的蠕变模型,通过有限元或有限差分等手段对溶腔的体积收敛性进行预测。

2) 地表沉降预测方法。根据图4地下开采引起的地表下沉传播影响可用来描述。开采引起的地表下沉函数可表达为

$$S(x, y, z) = \iiint_{\Omega} Q(\xi, \zeta, \eta) F(X, Y, Z) d\Omega \quad (6)$$

为了预测开采引起的地表下沉,就应分别研究下沉根源函数 $Q(\xi, \zeta, \eta)$ 和下沉传播影响函数 $F(X, Y, Z)$ 以及开采空间 Ω 的几何形状。由于下沉根源函数有着明确的物理意义,因下沉的机理不同

而不同,对它的研究要针对具体的开采对象和地质采矿条件,是个十分专业化的问题。本文在地表沉降预测时则采用了通用预测模型。

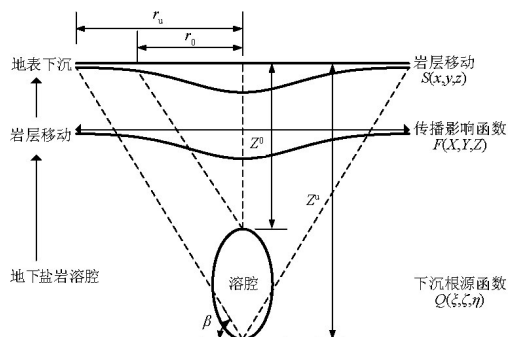


图4 盐岩地下储气库地下开采引起的地表下沉传播影响图
Fig.4 Influence diagram of the ground sedimentation caused by the salt rock underground gas storage cavern volume converge

图4中, β 为影响角; r_u 为影响半径; r_0 影响内径; Z^0 为盐穴顶部距地面的高度; Z^u 为盐穴底部距地面的高度。

目前我国溶腔通行设计模型为椭球形,设溶腔原始体积为 V_0 ,溶腔的体积收敛率为 λ , A 为椭球的长半轴; B 为短半轴。推导得到盐岩地下油气储库地表沉降的预计模型^[17]

$$S(d) = \lambda \frac{\pi B^2 V_0}{Z_0 Z_u} \int_{Z^0}^{Z^u} F(X, Y, Z) \left(1 - \frac{(Z - Z_u)^2}{A^2}\right) dz \quad (7)$$

3) 风险概率计算方法。盐岩地下储库主要作用是调节城市能源供给,一般建设于城市郊区,因

此盐岩地下储库上方的地面一般建设有各种公共设施,如建筑物、地下管道、桥梁和道路铁路交通设施等。盐岩储气库的体积收缩引发的地面沉降对地面构筑物产生影响。当沉降量达到一定值时会伴生地裂缝,导致建筑物开裂、地下管道破裂、破坏桥梁和道路铁路交通设施,因此可将式(8)作为蒙特卡洛模拟的功能函数

$$G = S(d) - S_{\max} \quad (8)$$

式(8)中, $S(d)$ 由拟合所得溶腔体积收缩率与蠕变参数关系式代入公式(8)得到,是沉降量与蠕变参数的函数; S_{\max} 为最大容许沉降量。

将式(8)作为功能函数,对盐岩地下储库引发地表沉降对地面设施造成的风险概率进行了蒙特卡洛模拟,最终可得到盐岩储库溶腔地表沉降引发地面设施失效的概率。

4 风险信息管理与风险评价系统

为及时采集盐岩地下库群风险信息、实时评估库群风险、管理调控库群的建设和运营。课题组开发了盐岩地下库群风险信息管理和风险评价系统,系统可用于用途:a. 盐岩地下库群风险信息管理;b. 盐岩地下库群综合风险等级的评价;c. 针对盐岩库群不同类型风险,制订对应的管理与控制措施;d. 库群风险超前预报,防患风险于未然。系统主要由数据库系统和客户端两部分构成。数据库系统主要实现风险信息的存储及管理,客户端则主要用于实现数据采集、风险评价、风险管理等功能,本系统主要数据流如图5所示。

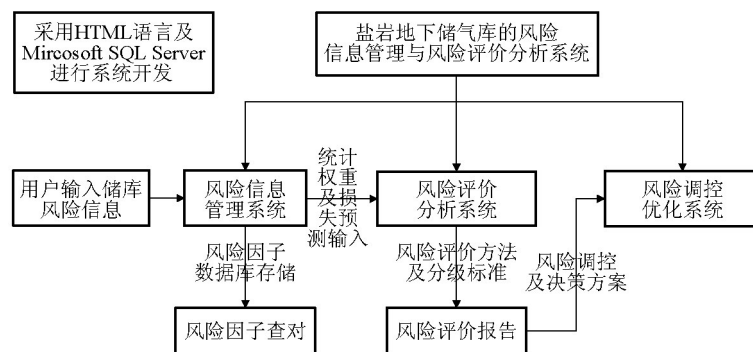


图5 程序数据流图

Fig.5 Program data flow chart

系统通过用户录入的方式采集盐岩储库群基本风险信息,用于风险因子分析;然后将本文所述

的统计权重及现场工作人员对风险后果的预估通过上文所述风险评价方法及分级标准生成风险评

估报告,最后根据报告结果及预定的风险管理调控及决策方案确定最后的风险处理方法,系统的操作界面如图6所示。

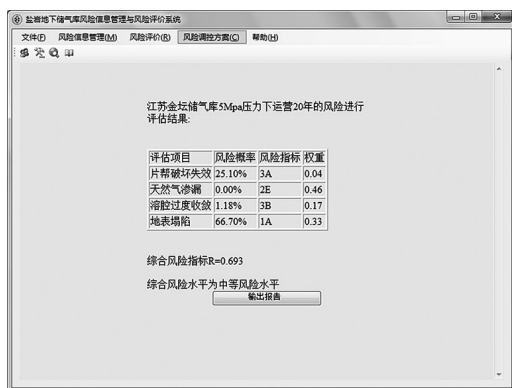


图6 风险综合评价结果界面

Fig.6 Comprehensive risk assessment interface

5 风险综合评价体系的应用及试验校验

5.1 金坛盐岩地下储气库风险评价

5.1.1 工程概况

金坛盐矿位于江苏省常州市的金坛市西北,是我国首座建设的盐岩能源地下储备库群。造腔区域盐岩层厚度为200层厚3.0 m,顶板和底板各有98.095 m的泥岩层,溶腔腔体为标准椭球体,轴长分别为70 m、30 m、30 m,位于盐岩层中间,覆盖层厚度为900 m。地层分布及溶腔形状如图7所示。

泥岩为弹塑性材料,盐岩夹层及盐岩材料为弹塑性流变材料,材料参数在文献[18]中获取。因数据不充分,材料参数的分布特性根据经验进行了取

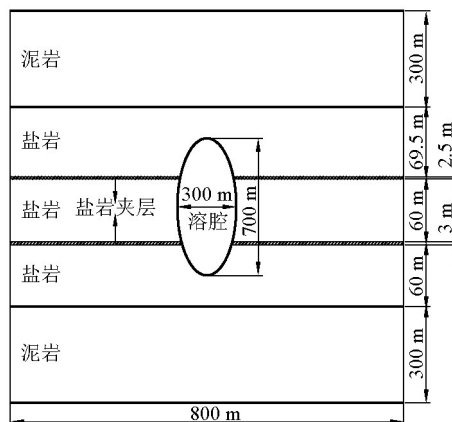


图7 金坛盐岩储气库地层分布

Fig.7 The geology distribution of the Jintan salt rock underground gas storage cavern

值,材料的弹性参数及分布如表3所示,塑性参数及分布如表4所示。

5.1.2 风险指标计算结果

1)片帮破坏失效概率。盐岩储库运营压力为5 MPa时失效概率分布见图8。此时储库溶腔下部夹层处失效概率最大为34.5%;其次是溶腔的上部夹层处失效概率为25%;然后为溶腔腰部失效概率为15.4%,溶腔顶部和底板失效概率均小于0.0001%。可以认为盐岩储库腔体片帮破坏失效概率较大的部位依次是溶腔的下部夹层,上部夹层和腔体腰部。

金坛矿区的盐岩和盐岩夹层采用经典的Norton Power-Law模型,该模型的流变速率如下

$$\dot{\epsilon}_{cr}^s = Aq^n \quad (9)$$

式(9)中, A, n 为材料参数,蠕变参数及分布如表5所示。

表3 弹性参数及分布表

Table 3 Elastic parameters and distribution

随机变量	弹性模量/ GPa			泊松比		
	泥岩	盐岩	夹层	泥岩	盐岩	夹层
平均值	10	18	4	0.27	0.3	0.3
变异系数	0.1	0.1	0.1	—	—	—
标准差	1	1.8	0.4	—	—	—
分布形式	正态	正态	正态	—	—	—

表4 塑性参数及分布表

Table 4 Plastic parameters and distribution

随机变量	黏聚力/GPa			内摩擦角/(°)		
	泥岩	盐岩	夹层	泥岩	盐岩	夹层
平均值	1	0.5	1	35	40	40
变异系数	0.1	0.1	0.1	—	—	—
标准差	0.1	0.05	0.1	—	—	—
分布形式	正态	正态	正态	—	—	—

表5 蠕变参数及分布表

Table 5 Creep coefficients and distribution

随机变量	A		n	
	盐岩	夹层	盐岩	夹层
平均值	1.20E-07	6.00E-06	3.5	3.5
变异系数	0.1	0.1	0.07	0.07
标准差	1.20E-06	6.00E-07	0.25	0.25
分布形式	正态	正态	正态	正态

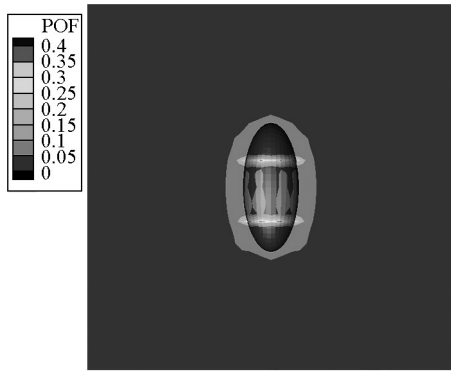


图8 金坛盐岩储气库片帮破坏失效概率云图
Fig.8 The contour of failure probability for the slide damage of the salt rock gas storage cavern

盐岩储库运营压力3~10 MPa时,盐岩储气库溶腔失效概率随压力变化曲线见图9。由图9可以看出,盐岩储库运营压力在3~10 MPa之间时,随着运营压力的增大,储库片帮破坏失效概率降低。但当储库运营气压达到6 MPa之后,盐岩储气库溶腔周边失效概率最大值小于6.7%。对于非承重自稳地下建筑体,可容许的安全指标为1.2,可容许失效概率为11.5%^[9],因此当运营气压大于6 MPa时,盐岩地下储气库的片帮失效概率在可容许范围之内。

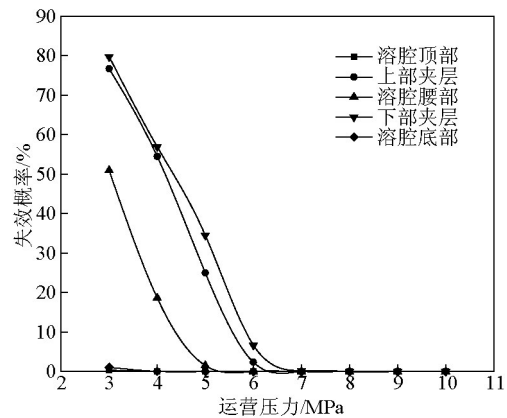


图9 盐岩储气库不同部位剪切失效概率随气压变化曲线

Fig.9 The failure probability for the slide damage of the different parts changes along with the pressure changes

2)溶腔渗漏失效概率分析。盐岩地下储库运营压力在3~10 MPa下渗漏失效概率变化曲线见图10。由图10可以看出,储库溶腔渗漏失效概率较大的部位依次是:上夹层、溶腔腰部、顶部、下夹层和溶腔底部。当储库运营压力达到20 MPa时,盐岩储库腔体周边高压下发生渗漏的最大失效概率超过可接受范围,因此当运营压力小于19 MPa时,盐岩储气库可安全运营。

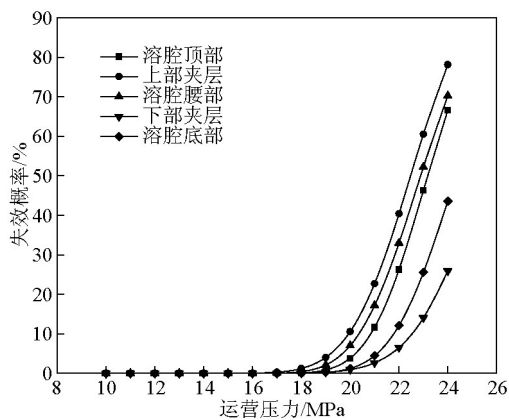


图10 盐岩储气库不同运营压力下不同部位的溶腔渗漏失效概率

Fig.10 The failure probability for the leakage of the different parts changes along with the pressure changes

3)溶腔过度收敛失效概率分析。低压运营30年盐岩储库溶腔过度收敛失效概率随时间变化曲线见图11。由图11可以看出,运营压力6 MPa时,运营30年后盐岩储气库蠕变收敛失效概率为32%,运营压力7 MPa时,运营30年盐岩储气库蠕变收敛失效概率为0.9%,可以保证溶腔30年内盐岩地下储库溶腔不发生蠕变体积收缩破坏。

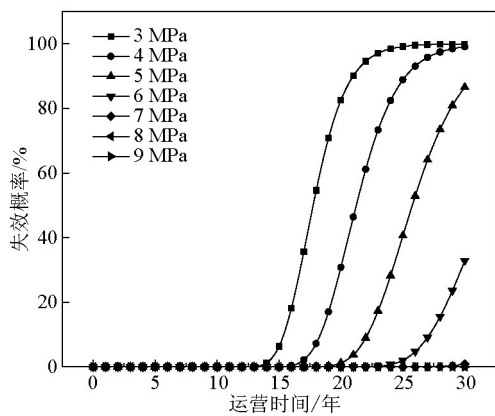


图11 不同内压下盐岩储气库蠕变收敛失效概率随时间变化曲线

Fig.11 The failure probability for the cavern creep converge under different pressure changes along with time changes

4)溶腔过度收敛失效概率分析。假设某建筑物距离储库中心500 m,计算得到盐岩地下储气库不同运营气压下,该建筑物沉降随时间变化曲线如图12所示。

示。该建筑物的失效概率随时间变化如图13所示。

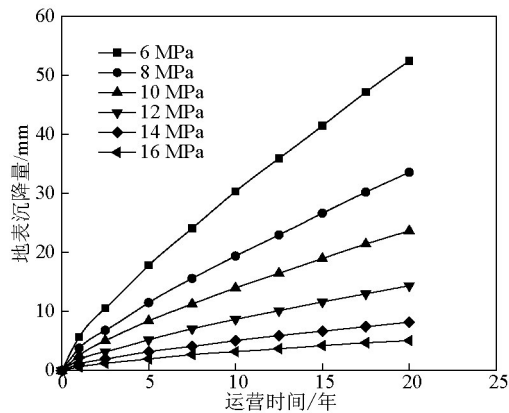


图12 金坛盐岩储气库地表沉降随时间变化曲线

Fig.12 The ground sedimentation of the Jitan underground salt rock cavern changes along with the time

由图12可以看出,该建筑物的沉降量随着内压的增大而减小,当盐岩地下储气库在6 MPa下运营气压沉降量最大,运营20年后该建筑物的沉降量可达52.5 mm。由图13可以看出,该储库平均气压6 MPa时,运营17.5年后,失效概率超过许可范围,地表设施将发生失效破坏。当运营气压大于8 MPa运营时,地表沉降对该建筑物造成的失效概率接近零。该储库设计运营压力为6~16 MPa,平均运营压力约在11 MPa左右,因此该盐岩地下储气库的在设计压力下运营20年对地表建筑物的影响在可容许范围之内。

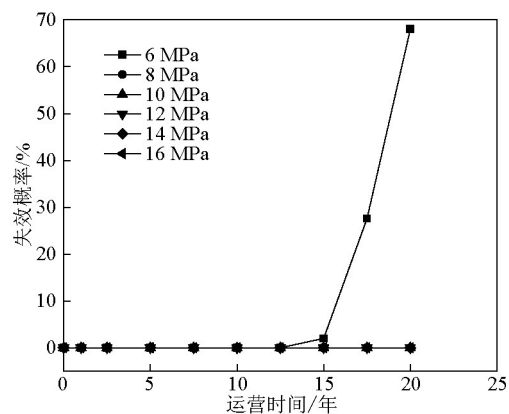


图13 金坛盐岩储气库地表沉降引发地表设施失效概率随时间变化曲线

Fig.13 The failure probability of ground facility caused by the sedimentation of the Jitan underground salt rock cavern changes along with the time

5) 库群失压跨塌风险。金坛盐岩地下储库三储腔失效概率云图(见图14)。由图14可以看出,当盐岩储气库储腔突然失压时,该腔周边失效概率影响十分的明显,夹层及溶腔腰部片帮失效概率尤其较大,失压前溶腔周边最大失效概率为 $1.10e^{-16}$,失压后腔体局部部位失效概率高达95%,失压对储腔影响极大,但其影响范围较小,而对其他溶腔的影响较小,因此当储库间距大于1.5倍洞径时,个别储腔的失压对其他储腔的稳定性影响不大。

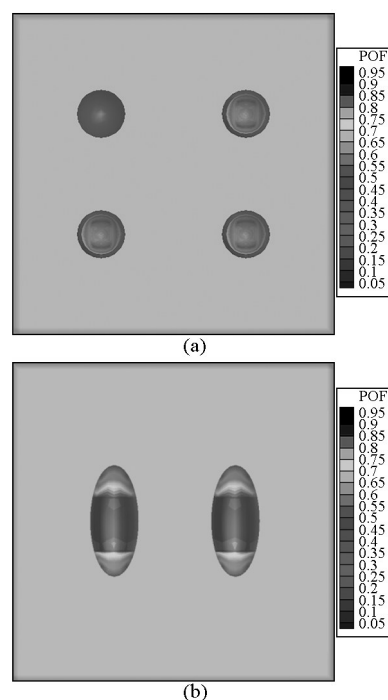


图14 三个储腔失压下失效概率分布
Fig.14 The failure probability distribution when three salt caverns lose pressure

5.1.3 金坛储库综合分析和评价结果

将不同风险事故的损失指标通过专家评判获取,不同风险事故的权重通过统计数据获得,在储库不同运营状态下,将不同风险事故的损失指标、风险失效概率、权重录入风险信息管理和评价系统,指标录入金坛储库风险综合评价结果如图6所示。

5.2 库群风险的模型试验校验

为校验风险评估结果的可用性,进行了江苏金坛储库4个储腔的运行的相似模型试验。选取模型几何相似比尺 $C_L=200$,容重相似比尺(盐岩 $C_\gamma=1$,泥岩 $C_\gamma=1.15$,盐岩夹层 $C_\gamma=1.11$),应力相似比尺 $C_\sigma=$

$C_\gamma C_L$ (盐岩 $C_\sigma=200$,泥岩 $C_\sigma=230$,盐岩夹层 $C_\sigma=222$),应变相似比尺 $C_\epsilon=222$,时间相似比尺 $C_T=14.14$ 。模型尺寸为 $2\text{ m}\times 2\text{ m}\times 2\text{ m}$,模型洞腔长轴70 cm、短轴30 cm。模型顶部按上覆岩层重量施加均匀荷载,模型前后、左右4个侧面按静水压力状态施加梯度荷载,模型底部按初始地应力施加均匀荷载,模型腔体内部放置乳胶气囊施加内压。地质力学模型试验系统采用自主研发的高地应力真三维加载模型试验系统^[20]。地质力学模型材料采用文献[21]研制的满足盐岩储库介质流变相似特性的模型相似材料。

储气库群极端高压和低压的影响分析,图15为采气降压过程中洞腰径向应变时效变化曲线;图16为注气升压过程中洞腰径向位移时效变化曲线。

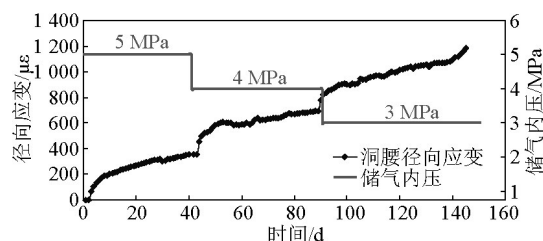


图15 采气降压过程中洞腰径向应变时效变化曲线

Fig.15 Aging changing curves of the radial strain during the process of gas extraction

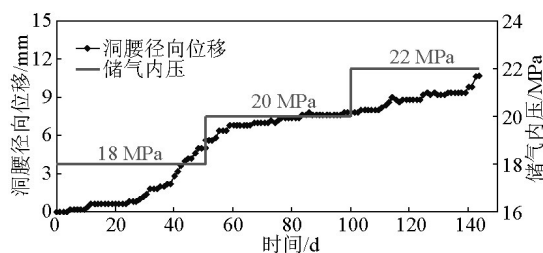


图16 注气升压过程中洞腰径向位移时效变化曲线

Fig.16 Aging changing curve of the radial displacement during the process of gas injection

由图15可知,当储库内压降低到3 MPa时,洞腔径向应变出现明显加速蠕变趋势,因此,为保证储库运行安全,建议储气库群的最低运行气压应大于3 MPa。由图16可知,当储库内压增大到22 MPa时,洞腔径向位移出现明显加速蠕变趋势,因此,为保证储库运行安全,建议储气库群的最高运行气压应小于22 MPa。

洞腔失压对储库运行安全稳定的影响,图17为2#洞腔失压时其洞腰径向位移和径向应变时效变化曲线。同时,图17为2#洞腔失压时失效概率变化情况。

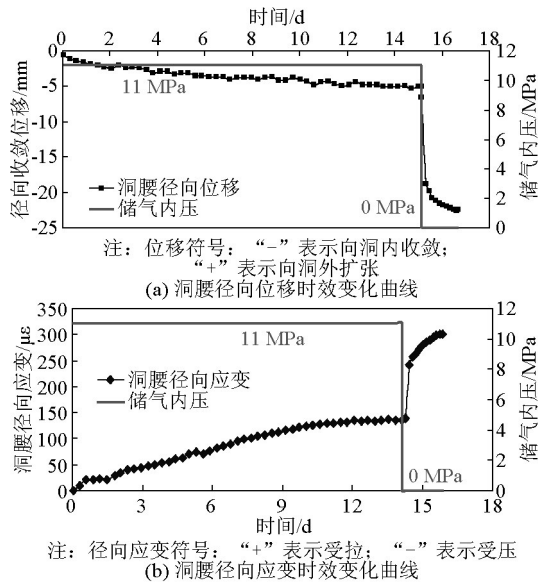


图17 2#洞腔失压其洞腰径向位移和径向应变时效变化曲线

Fig.17 Aging changing curves of the radial displacement and radial strain when 2# cavern loses pressure

由图17可知,洞腔在失压前的恒压状态运行时,洞周径向位移和径向应变随时间增加而逐渐增大,表现出明显的时效蠕变现象。当盐腔突然失压时,洞周径向位移和径向应变瞬间显著增大,可见腔体突然失压将对储库的运行安全造成及其不利的影响,为保证储气库的运营安全,应最大限度防止储气库出现失压。以上两个模型试验结果和风险评价的理论值一致,验证了盐岩库群安全运营范围。

6 结语

本文研究了能源盐岩地下库群风险评价方法及分级标准,根据提出的基于改进一次二阶矩法的盐岩地下储库片帮破坏风险失效概率的计算方法、盐岩地下储库的渗漏风险失效概率的计算方法、盐岩地下储库体积过度收敛风险失效概率的计算方法,以及储库区域地表沉降风险失效概率的计算方法,整合建立了一套较为完善的能源盐岩地下库群

风险评价和管理体系,并在金坛盐岩储库群中进行了应用,模型试验的验证结果表明该体系具有实用的价值。

尽管能源盐岩地下库群风险评价和管理方面已经取得了一些成果,但在储库介质材料强度随运行时间的退化功能函数、层状盐岩介质物理力学参数的概率分布特征和变化规律、层状盐岩的强度破坏概率分析模型,以及全面的风险规避与管理的原则与方法等方面还有待于进一步的研究。

参考文献

- [1] 贾超,张强勇,张宁,等.盐岩地下储气库风险分级机制初探[J].岩土力学,2009,12(30):3621-3626.
- [2] Bernstein P L. 与天为敌:风险探索传奇[M].穆瑞年译.北京:机械工业出版社,2007.
- [3] Cooper D, Chapman C. Risk analysis for large projects: Models, Methods and Cases [M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2002: 303-313.
- [4] Einstein H H. Risk and risk analysis in rock engineering [J]. Tunneling & Underground Space Technology, 1996, 11 (2): 141-155.
- [5] Søren Degn Eskesen, Per Tengborg, Jørgen Kampmann, et al. Guidelines for tunnelling risk management [J]. Tunneling & Underground Space Technology, 2004, 19(3): 217-237.
- [6] 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.
- [7] 李媛,张强勇,贾超,等.盐岩地下油气储库运营期风险的故障树分析[J].岩土力学,2011,32(4):1125-1130.
- [8] 井文君,杨春和,陈峰,等.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.
- [9] 贾超,刘家涛,张强勇,等.盐岩储气库运营期时变可靠度计算及风险分析[J].岩土力学,2011,32(5):1479-1484.
- [10] 张宁.深部层状盐岩地下储气库的风险评价与分析研究[D].济南:山东大学,2012.
- [11] 李媛,张强勇,贾超,等.盐岩地下油气储库运营期风险的故障树分析[J].岩土力学,2011,32(4):1125-1137.
- [12] 陶履彬,李永盛.工程风险分析理论与实践[M].上海:同济大学出版社,2006:145-151.
- [13] Hansen F D, Mellegard K D, Senseny P E. Elasticity and strength of ten natural rock salts [C]// Proceeding of the 1st Conference on Mechanical behavior of salt. Clausthal: Trans, Techn, 1984: 71-83.
- [14] 刘宁.可靠度随机有限元法及其工程应用[M].北京:中国水利水电出版社,2001:56-58.
- [15] Ratigan J L. The influence of seal design on the development of the disturbed rock zone in the WIPP alcove seal tests [R]. Topical Report RSI-0400, 1991.
- [16] Schober F. Die Berechnung von Bodenbewegungen fiber kaver nenanigen HohMiumenunter Beachtung der globalen Volumen konvergenz [D]. Clausthal: TU Clausthal, 1982.
- [17] 张宁,张强勇,段抗,等.盐岩地下储气库地表沉降风险失效概率的计算分析[J].岩石力学与工程学报,2012,31(S2): 3757-3762.
- [18] 谭贤君,陈卫忠,杨建平,等.盐岩储气库温度-渗流-应力-损伤耦合模型研究[J].岩土力学,2009,12(30):86-94.
- [19] 高谦,吴顺川,万林海,等.土木工程可靠性理论及其应用

[M]. 北京:中国建材出版社,2007:267-268.
[20] 张强勇,陈旭光,林波,等.高地应力真三维加载模型试验系统的研制及其应用[J].岩土工程学报,2010,32(10):1588-

1593.
[21] 张强勇,刘德军,贾超,等.盐岩油气储库介质地质力学模型相似材料的研制[J].岩土力学,2009,30(12):3582-3586.

Salt rock underground energy storage integrated risk assessment and management system

Zhang Ning¹, Zhang Qiangyong², Li Yuan³, Ma Linjian¹

(1. State Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Explosion and Impact, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China; 2. Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 3. China Railway 16th Bureau Group Co. Ltd, Beijing 100018, China)

[Abstract] The underground energy storage utilizing salt rock caverns is the national key strategic development of energy reserves. Salt mines in China are characterized as shallow burial, stratified distribution and multiple interlayers, that increasing the possibility of storage disasters. Therefore, establishing a synthetic evaluation system for the risk of underground salt rock energy storage is of a great necessity. Based on the statistical analysis of salt rock underground storage risk events, the main risk factors have been attained and the risk of underground storage has been identified. Accordingly, the underground storage risk assessment method and criterion have been set, the risk probability is calculated by the numerical simulation to assess the risk level of Jintan salt rock storage, and a model test has been conducted to verify the result, Underground Salt Rock Gas Storage Risk Information Management and Assessment has been developed via computer network technology, and salt rock underground energy storage risk integrated assessment and management system has been established.

[Key words] integrated risk and management assessment; salt rock; underground energy storage