

文章编号: 1000-7598 (2014)增 2-0379-07

盐岩地下储气库套管运行安全的可靠性分析研究

向 文, 张强勇, 蔡 兵

(山东大学 岩土与结构工程研究中心, 济南 250061)

摘 要: 盐岩因其具有良好的蠕变特性、低渗透性以及损伤自我恢复特性成为国际上公认的最理想能源地下存储介质。在盐岩地下储气库运营过程中储库套管受到储气内压、材料参数和几何尺寸等不确定性因素的影响, 为了评价这些随机风险因素对储库套管结构运行安全的影响, 建立了盐岩储气库的套管结构模型和基于 Von Mises 屈服准则的套管结构功能函数, 根据建立的结构模型和结构功能函数, 应用响应面法结合蒙特卡洛抽样计算获得储库在高压和低压运行条件下套管结构可靠度的变化规律。可靠性分析表明, 为保证套管运行安全, 储库最低运行内压应大于 3 MPa, 最高运行内压应小于 22 MPa, 套管靴距离储库腔顶的距离应大于 10 m, 并应适当加大套管的壁厚和减小套管的内径。

关 键 词: 盐岩储气库; 套管结构; 结构功能函数; 随机变量; 可靠度

中图分类号: TD 821

文献标识码: A

Reliability analysis of casing of underground salt rock gas storage during operation period

XIANG Wen, ZHANG Qiang-yong, CAI Bing

(Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: Salt rock is internationally recognized as the most ideal energy underground storage medium because of its good creep properties, low permeability and damage recovery characteristics. Casing structure of gas storage in underground salt rock is affected by internal pressure, material parameters and geometric size of casing which are uncertain during the operation process of gas storage. In order to evaluate effects of these random risk factors on operation safety of casing structure, a mechanical model and the structure function of casing based on Von Mises yield criterion have been established. According to the established mechanical model and structure function, the change laws of reliability of gas storage casing under the high pressure and low pressure conditions are obtained through the response surface combined with Monte Carlo sampling. Reliability analysis shows that the minimum operating pressure of gas storage should be greater than 3 MPa, the maximum operating pressure of gas storage should be less than 22 MPa, the distance between the casing shoe and the gas storage cavity should be more than 10 m. In order to ensure the safety operation of the gas storage casing, it is very important to appropriately increase the casing wall thickness and decrease the diameter of casing.

Key words: gas storage of salt rock; casing structure; structural performance function; random variable; reliability

1 引 言

在众多的地下存储介质中, 盐岩因其具有良好的蠕变特性、低渗透性以及损伤自我恢复特性成为国际上公认的最理想能源地下存储介质^[1-3]。西方发达国家诸如美国、德国、法国等都已建起了大量的盐岩地下油气库群, 用于国家能源战略储备。美国 90%、德国 50%、法国 30%的石油储存于盐岩库群中, 美国 20%、德国 40%、法国 20%的天然气储

存于盐岩库群中, 近年来, 我国也已经开始盐岩地下能源存储的选址及建设工作。在地下盐岩油气储备过程中, 油气套管将油气传输到地面, 是钻井和运营过程中井壁的支撑结构, 油气套管在整个油气储库运营安全中扮演着及其重要的角色, 它是油气储库运营安全的一个重要设备。

由于盐岩储库地层地质与力学特性的复杂性, 加之储库运营时间较长, 在运营过程中, 由于套管破损造成油气储库失效的事件层出不穷。目前套管

收稿日期: 2014-03-12

基金项目: 国家自然科学基金(No. 41172268, No. 51279093); 国家重点基础研究发展计划项目(No. 20097CB724607); 国家科技重大专项(No. 2011ZX05014)。

第一作者简介: 向文, 女, 1966 年生, 博士研究生, 副教授, 主要从事岩土工程的教学与科研工作。E-mail: xwen@sdu.edu.cn

破损的问题仍然没有得到很好的解决, 套管失效的规模和速度日益增大。据统计, 到 2003 年底, 我国的大庆、华北、吉林、中原、江汉等油气田套损总数已达 2.87 万多口, 造成直接经济损失近 430 亿元^[4]。由于套管损坏问题是油气生产和储备过程中的关键环节, 具有重要地位。一些学者结合岩石力学、弹塑性力学理论建立了套管损坏数学模型。前苏联学者 Khnalaf^[5]通过试验研究了深部盐岩层塑性流动损坏套管的机制, 揭示出盐膏岩层蠕变行为及其套损机制。Cheatham^[6]、Hackney^[7]、Greener^[8]等分别结合工程实际问题对盐膏层流变地层套管损坏机制进行了探讨, 提出了盐膏层套管防挤毁方法。Pattillo^[9]、Sweatman^[10]等考虑水泥环封固套管的整体力学性能, 从室内试验、理论分析和数值模拟等角度就受均匀荷载和非均匀荷载情况下盐膏层套管受力状态进行了分析。20 世纪 80 年代中后期, 我国许多学者针对油田套管破损问题也开展了细致研究。李子丰等^[11]应用岩石蠕变力学理论, 分析了油井套管外挤力与时间的关系。窦益华等^[12]开展了一系列的蠕变试验, 得出黏弹性围岩中套管外挤力的时变公式。练章华等^[13]建立了地层-水泥环-套管相互作用的弹塑性有限元模型。曾义金等^[14]在考虑盐岩力学特性的基础上, 研究分析了固井后套管挤毁损坏的原因, 并提出能够分析盐岩蠕变应力的物理计算模型。闫相祯等^[15]在考虑泥岩力学特性基础上, 分析了由泥岩蠕变引起套管损坏机制。李军等^[16]采用声发射方法对套管损坏进行监测, 利用声发射信号变化趋势来监测套管是否变形。

由于地下储库套管在运行过程中受到的影响因素较多, 在荷载、材料参数、几何尺寸等方面均存在较大的不确定性, 关于套管在地层特性、运行条件和材料参数等随机因素影响下的可靠性分析研究成果尚不多见。因此, 本文对盐岩储气库套管在高压和低压条件下的运行安全可靠进行了分析评价, 获得具有工程指导意义的建议和结论, 为盐岩地下储库套管结构的运行安全控制提供了重要的理论依据。

2 套管结构模型

为分析套管结构的可靠性, 首先建立了套管、水泥环和盐岩介质的组合结构模型, 如图 1 所示。

为分析套管、水泥环和盐岩介质三者的相互作用, 假设: (1) 盐岩、水泥环和套管材料各向同性; (2) 套管-水泥环-盐岩结构承受均匀地应力; (3) 在均匀地应力条件下, 盐岩-水泥环-套管组合结构

相互之间接触紧密, 并且套管和水泥环之间黏结较好。

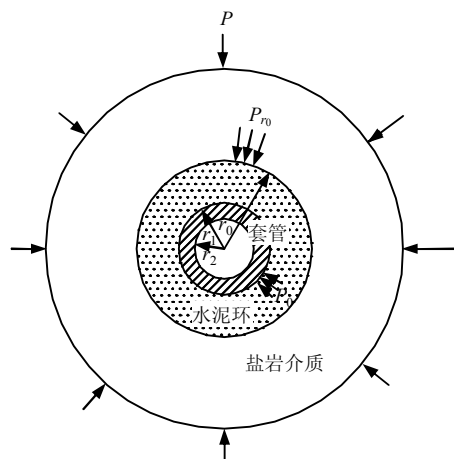


图1 盐岩套管组合结构模型

Fig.1 Combined structural model for rock salt casing

套管所受的外载主要来自于水泥环的蠕变挤压, 而水泥环所受到的蠕变挤压主要是由于盐岩的蠕变引起。套管的破坏主要以屈服破坏为主, 采用 Von Mises 屈服准则:

$$\sigma_s = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (1)$$

式中: σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为第一、二、三主应力。

当套管受到的挤压应力大于其屈服强度时, 即会发生屈服破坏。由于套管半径相对于高度极小, 可以将盐岩-水泥环-套管组合体简化为平面应变问题。

根据文献[17-18], 在均匀地应力作用下套管外壁由于盐岩蠕变所产生的附加荷载随时间变化公式为

$$P_{r0}(t) = \left\{ A_0 + B_0 \exp \left[\frac{-ak}{\frac{2}{3}\eta(1-2\mu)} t - C_0 \exp \left(\frac{-a(k_s + k)}{2\eta} \right) t \right] \right\} \sigma_H \quad (2)$$

式中: k 为地层刚度系数, $k = \frac{E}{a(1+\mu)}$; a 为套管

外半径; E 为盐岩弹性模量; μ 为盐岩泊松比; σ_H 为地应力; η 为盐岩的黏性系数; A_0 、 B_0 、 C_0 为系数; k_s 为套管均匀刚度系数。

3 套管结构可靠性分析方法

结构可靠度是指在规定的时间内与条件下结构完成预定功能的概率。在工程结构可靠性分析中, 结构的极限状态一般由功能函数加以描述, 有 n 个随

机变量影响结构的可靠度时结构的功能函数为

$$Z = g(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (3)$$

式中: $x_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ 为 n 个随机变量。

工程分析中功能函数仅与荷载效应 S (内力、位移等) 和抗力 R (极限强度) 随机变量有关, 可以将结构某一极限状态的功能函数表示为

$$Z = g(R, S) = R - S \quad (4)$$

式中: R 为结构抗力随机过程; S 为结构荷载效应随机过程, 其为结构中一个荷载或多个荷载的线性或非线性函数。

结构在设计基准期 T 内的可靠度 P_r 为

$$P_r = P\{Z(t) > 0, t \in [0, T]\} = P\{R(t) > S(t), t \in [0, T]\} = \Phi(\beta) \quad (5)$$

式中: β 为可靠度指标。

式(5)表示结构在设计基准期内每一时刻 t_i 的抗力都大于荷载效应, 结构才能处于可靠状态。

对于盐岩地下储气库套管结构来说, 本文基于 Von Mises 屈服准则建立套管结构的功能函数:

$$Z = \sigma_s - \sigma \quad (6)$$

式中: σ 为套管最大应力; σ_s 为套管屈服强度。

当 $G > 0$ 时, 套管结构可靠; 当 $G < 0$ 时, 套管结构失效破坏。

由于套管结构功能函数为隐式表达式, 无法采用求解显示功能函数的一阶 2 次矩法求解可靠度, 本文采用响应面法结合蒙特卡洛抽样来计算套管结构的可靠度。

响应面法是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 (见图 2), 它以有限元为基础, 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, 再结合蒙特卡洛方法可大大提高计算效率。对于地下储库工程, 利用有限元数值分析模型, 重复有限次计算, 可得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, 用响应面函数相当近似地代表真实的极限状态函数关系。

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 2 次多项式形式:

$$G'(\{x\}_{i=1}^n) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} x_i x_j \quad (7)$$

式中: a_0, a_i, a_{ij} 为待定系数。

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} 。

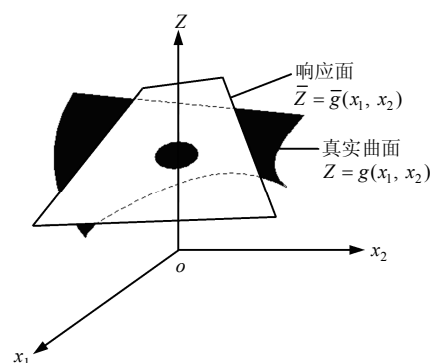


图 2 响应面示意图

Fig.2 Sketch of response surface

4 高压和低压条件下套管可靠性分析

4.1 计算模型

本文选取江苏金坛盐岩地下油气储库为背景工程进行分析, 根据储气库工程地质条件, 建立套管三维数值计算模型, 见图 3。由于套管为轴对称结构, 为了简化计算, 选取 1/4 结构体, 计算区域为 $25 \text{ m} \times 25 \text{ m} \times 200 \text{ m}$, 盐岩地层厚度取为 25 m 。模型上表面荷载为上覆地层的重量, 等效荷载根据地层实际厚度及其平均密度求得为 16 MPa , 下表面施加固定约束, 外表面为对称法向约束。盐岩蠕变特性是盐岩的重要特性之一, 为了研究套管结构在盐岩蠕变应力作用下的可靠性, 套管水泥环外壁所受的盐岩蠕变等效荷载 p_0 按照式 (2) 进行施加。由于套管壁厚相对于模型尺寸较小, 为提高计算精度, 套管模型采用壳单元, 水泥环和盐岩采用实体单元。计算模型共产生 50 821 个节点, 共剖分了 63 685 个单元。套管数值计算模型见图 3。

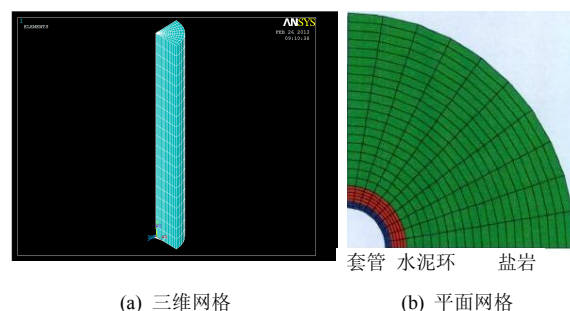


图 3 套管结构数值计算模型

Fig.3 Numerical computation model of casing structure

4.2 随机变量的选取

根据套管结构的功能函数 $Z = \sigma - \sigma_s$, 确定 Z

为套管结构的随机输出变量。在储气库套管运营过程中,影响套管运行安全的主要因素有储库内压、钢管内径、钢管壁厚、水泥环厚度、盐岩弹性模量、

钢管弹性模量、水泥环弹性模量、钢管屈服强度等因素,以这些因素作为计算的随机输入变量,并假定这些随机变量为正态分布。表 1 为随机输入变量值。

表 1 随机输入变量

Table 1 Random input variables

变量	工作内压 / MPa	钢管内径 / m	钢管壁厚 / m	水泥环厚度 / m	盐岩弹性模量 / MPa	钢管弹性模量 / MPa	水泥环弹性模量 / MPa	钢管屈服强度 / MPa
均值	高压、低压	0.079	0.011	0.035	18×10^9	2.1×10^{11}	1×10^{10}	3.79×10^8
变异系数/%	10	10	10	10	10	10	10	10

由于套管结构功能函数为隐式表达形式,可采用响应面法结合蒙特卡洛抽样来计算储库套管结构的可靠度。具体计算过程是: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 1 000 000 次,从而计算得到储库套管结构的可靠度^[19]。下面针对套管在高压、低压条件下的可靠性加以分析。

4.3 高压条件下套管可靠性分析

图 4 为高压 $P = 22$ MPa 条件下套管失效的相关性分布。由图可见,在高压运行状态下储库的套管失效与储库内压成正相关,与套管壁厚成负相关。储库内压越大,套管壁厚越薄,套管越容易产生破坏失效,因此,为了保证套管运行安全,应尽可能降低储气内压,并增大套管的壁厚。

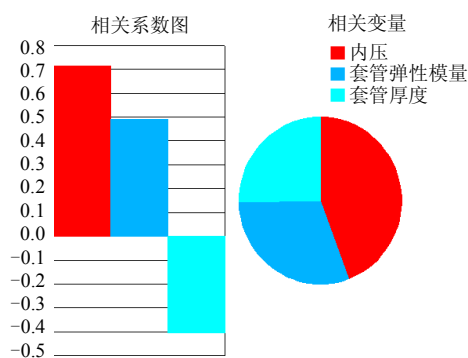


图 4 高压下套管失效的相关性分布

Fig.4 Relevance distribution of casing failure under high pressure

图 5 为高压(22 MPa)条件下套管的极限状态响应面。由图可见,样本点大部分较好地附着在响应面上,说明构造的极限状态响应面基本合理。

图 6 为高压条件下套管可靠度指标变化曲线。由图可见,(1)距离套管底部越近,套管可靠度指标越小,为防止套管因储库蠕变挤压而产生失效破坏,建议套管底部距离储库腔顶距离不小于 10 m;

(2)随着储库运行内压的增加,套管可靠度指标显著减小,为确保套管运行安全,建议储库最高内压应小于 22 MPa。

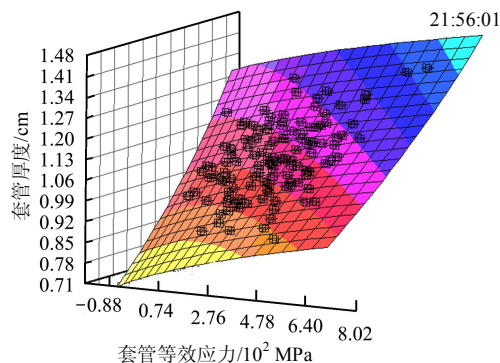


图 5 高压下套管的极限状态响应面

Fig.5 Limit state response surface of casing under high pressure

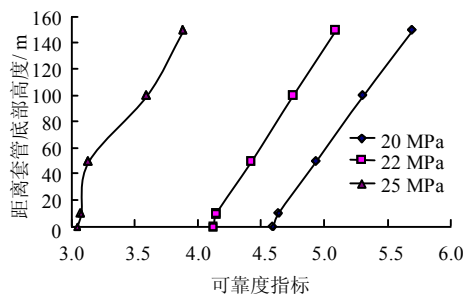


图 6 高压下套管可靠度指标变化曲线

Fig.6 Change curves of reliability index for casing under high pressure

4.4 低压条件下套管可靠性分析

图 7 为低压 $P = 4$ MPa 条件下套管失效的相关性分布图。由图可见,低压运行状态下套管失效与套管内径成正相关,与储库内压和套管厚度等成负相关,可见储气内压越小、套管壁厚越薄、套管内径越大,套管越容易产生失效破坏。因此,在低压状态下,为保证套管运行安全,应尽可能提高储气内压、加大管厚和减小管径。图 8 为低压(4 MPa)

下套管的极限状态响应面。图 9 为低压条件下套管可靠度指标变化曲线。

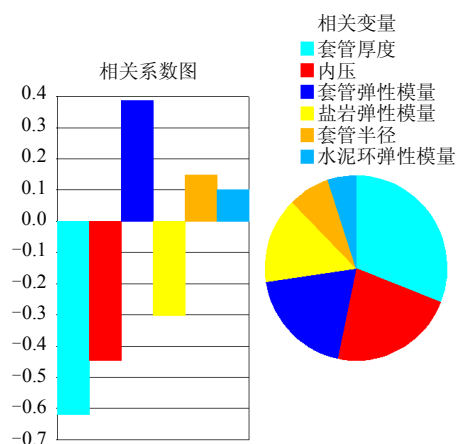


图 7 低压下套管失效的相关性分布

Fig.7 Relevance distribution of casing failure under low pressure

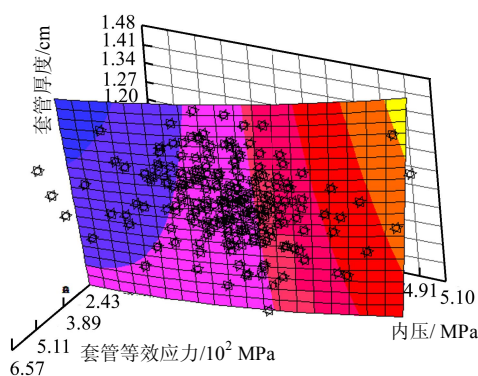


图 8 低压下套管的极限状态响应面

Fig.8 Limit state response surface of casing under low pressure

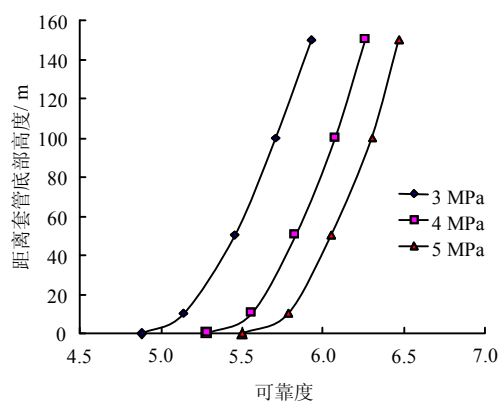


图 9 低压下套管可靠度指标变化曲线

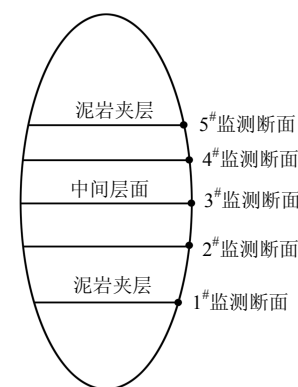
Fig.9 Change curves of reliability index for casing under low pressure

由图可见，（1）距离套管底部越近，套管可靠度指标越小，为防止套管因储库蠕变挤压而产生失效破坏，建议套管底部距离储库腔顶距离不小于 10 m；（2）随着储库运行内压的减少，套管可靠

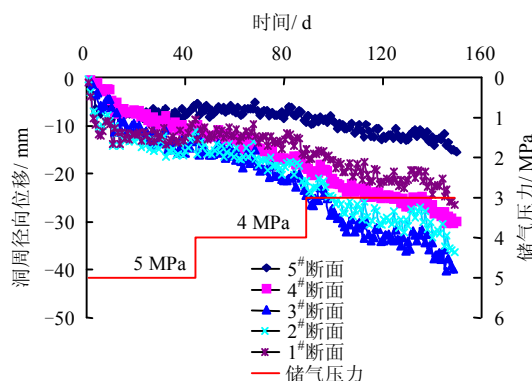
度指标显著减小，为确保套管运行安全，建议储库最低运行内压应大于 3 MPa。

5 研究成果的试验验证

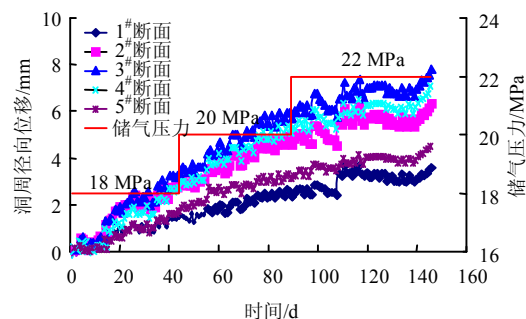
段抗等^[20]开展了盐岩地下储气库注采气套管运行安全的物理模型试验，研究表明，（1）储气内压是影响储库套管运营安全的重要因素，当储库内压降低到 3 MPa 或储库内压增大到 22 MPa 时，洞腔径向收敛位移或径向扩张位移出现明显加速蠕变现象，见图 10。



(a) 模型试验监测断面



(b) 低压运行过程中洞周径向收敛位移变化曲线



(c) 高压运行过程中洞周径向扩张位移变化曲线

图 10 储库洞周径向位移随内压变化的时效曲线

Fig.10 Aging curves of radial displacement of gas storage along with the internal pressure

因此，为保证储库套管运行安全，储库的最低运行气压应大于 3 MPa，最高运行气压应小于 22 MPa。

MPa; (2) 套管所受蠕变挤压应力随储库内压的减小和运行时间的增加而显著增大, 套管底部所受的蠕变挤压应力明显大于套管顶部所受的蠕变挤压应力 (见图 11)。为保证储库套管系统运行安全, 套管底部距离储库腔顶的距离不小于 10 m, 可见本文研究结论与套管模型试验研究成果基本一致, 表明本文建立的盐岩地下储气库套管运行安全的可靠性分析方法和得到的研究结论是合理可靠的。

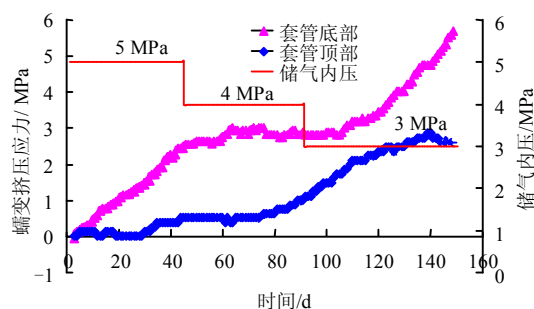


图 11 套管蠕变挤压应力随内压变化的时效曲线
Fig.11 Aging curves of creep extrusion stress of casing along with the internal pressure

6 结 论

(1) 针对套管结构所荷载荷和自身属性参数的随机性, 建立了盐岩储气库套管结构力学模型和套管结构功能函数, 通过响应面法结合蒙特卡洛抽样计算获得高压和低压条件下影响套管运行安全的主要随机变量的相关性以及套管可靠度的变化规律。

(2) 高压运行状态下套管失效与储库内压成正比相关, 与套管壁厚成负相关。储库内压越大, 套管壁厚越薄, 套管可靠度指标越小, 套管越容易产生失效破坏。

(3) 低压运行状态下套管失效与套管内径成正比相关, 与储库内压和套管壁厚成负相关。储库内压越小、套管壁厚越薄、套管内径越大, 套管可靠度指标越小, 套管越容易产生破坏。

(4) 为保证盐岩地下储气库套管结构的运行安全, 应有效控制储库内压和套管距离储库腔顶的距离以及套管的壁厚和内径。可靠性计算分析表明: 为保证套管运行安全, 储库最低运行内压应大于 3 MPa, 最高运行内压应小于 22 MPa, 套管底部距离储库腔顶的距离应大于 10 m, 并应适当加大套管的壁厚和减小套管的内径。

本文研究结论与套管运行的物理模型试验研究结论基本一致, 说明本文建立的盐岩地下储气库套管运行安全的可靠性分析方法和得到的研究成果是合理可靠的, 研究成果为盐岩地下储库套管结构的

运行安全管理与控制提供了重要的理论依据。

参 考 文 献

- [1] 杨春和, 李银平, 陈锋, 等. 层状盐岩力学理论与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [2] 陈锋, 杨春和, 白世伟. 盐岩储气库蠕变损伤分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(6): 945—949.
CHEN Feng, YANG Chun-he, BAI Shi-wei, et al. Investigation on creep damage of natural gas storage in salt rock layer[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(6): 945—949.
- [3] 梁卫国, 杨春和, 赵阳升. 层状盐岩储气库物理力学特性与极限运行压力[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 22—27.
LIANG Wei-guo, YANG Chun-he, ZHAO Yang-sheng. Physico-mechanical properties and limit operation pressure of gas deposit in bedded salt rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(1): 22—27.
- [4] 王鸿君. 套管损坏机制及预防措施研究[硕士学位论文 D]. 成都: 西南石油大学, 2005.
- [5] KHNALAF F. Increasing casing collapse resistance against salt-induced loads[J]. *Society of Petroleum Engineers*, 1985, 12(2): 259—265.
- [6] CHEATHAM J B. Behavior of casing subjected to salt loading[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1964, 16(9): 452—457.
- [7] HACKNEY R M. A new approach to casing for salt formation[J]. *Society of Petroleum Engineers*, 1985, 1(4): 656—661.
- [8] GREENER J M. Improvements for drilling moving salt formations[J]. *Society of Petroleum Engineers*, 1990, 14(2): 323—326.
- [9] PATTILLO P D, LAST N C, ASBILL W T. Effect of non-uniform loading on conventional casing collapse resistance[J]. *Society of Petroleum Engineers*, 1992, 2(4): 127—133.
- [10] SWEATMAN R, FAUL R, BALLEW C. New solutions for subsalt-well lost circulation and optimized primary cementing[J]. *Society of Petroleum Engineers*, 1993, 5(6): 135—140.
- [11] 李子丰, 杨敏嘉, 李邦达. 油井套管损坏的机制分析[J]. 石油钻采工艺, 1985, 4(1): 47—53.
LI Zi-feng, YANG Min-jia, LI Bang-da. The damage

- mechanism analysis on oil well casing[J]. **Oil Drilling & Production Technology**, 1985, 4(1): 47—53.
- [12] 窦益华. 固井水泥石蠕变试验研究[J]. 石油钻采工艺, 1989, 41(3): 41—49.
- DOU Yi-hua. Creep experimental study on grouting cement stone[J]. **Oil drilling & Production Technology**, 1989, 41(3): 41—49.
- [13] 练章华, 韩建增, 董事尔, 等. 基于数值模拟的复杂地层套管破坏机制研究[J]. 天然气工业, 2002, 22(1): 48—51.
- LIAN Zhang-hua, HAN Jian-zeng, DONG Shi-er, et al. Study on failure mechanism of casing in complex strata based on numerical simulation[J]. **Natural Gas Industry**, 2002, 22(1): 48—51.
- [14] 曾义金, 杨春和, 陈锋, 等. 深井石油套管盐膏层蠕变挤压应力计算研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 595—598.
- ZENG Yi-jin, YANG Chun-he, CHEN Feng, et al. Numerical analysis of creep pressing stress of casing in deep salt rock stratum[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(4): 595—598.
- [15] 闫相祯, 杨秀娟, 冯耀荣, 等. 蠕变地层套管外载计算的位移反分析法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2006, 30(1): 102—106.
- YAN Xiang-zhen, YANG Xiu-juan, FENG Yao-rong, et al. Displacement inverse analysis of casing external loads of creep stratum[J]. **Journal of China University of Petroleum**, 2006, 30(1): 102—106.
- [16] 李军, 陈勉, 柳贡慧, 等. 利用声发射原理进行套管损坏实时监测实验研究初探[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(2): 233—236.
- LI Jun, CHEN Mian, LIU Gong-hui, et al. Real-time monitoring test of casing damage with acoustic emission technology[J]. **Petroleum Exploration and Development**, 2006, 33(2): 233—236.
- [17] 郭印同. 盐膏岩地层油气井套管损坏机制研究[博士学位论文 D]. 武汉: 中国科学院研究生院, 2010.
- [18] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 北京: 人民教育出版社, 1982.
- [19] 蔡兵. 盐岩地下储库套管运行安全风险评价与分析研究[硕士学位论文 D]. 济南: 山东大学, 2013.
- [20] 段抗, 张强勇, 向文, 等. 盐岩地下储气库注采气套管运行安全的物理模型试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1605—1612.
- DUAN Kang, ZHANG Qiang-yong, XIANG Wen, et al. Physical model test on operational safety of injection and recovery casing of underground salt rock gas storages[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(6): 1605—1612.

上接第 378 页

- [12] 高盟, 高广运, 冯世进, 等. 基坑开挖引起紧贴运营地铁车站的变形控制研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 818—823.
- GAO Meng, GAO Guang-yun, FENG Shi-jin, et al. Control of deformation of operating subway station induced by adjacent deep excavation[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(6): 818—823.
- [13] 唐长东, 杨小平, 刘庭金. 紧贴地铁车站单侧深基坑的施工方案对比研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(5): 1121—1126.
- TANG Zhang-dong, YANG Xiao-ping, LIU Ting-jin. Study on construction scheme of one-side foundation pit engineering adjacent to metro station[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2013, 9(5): 1121—1126.
- [14] 李志高, 曾远, 刘国彬. 邻近地铁车站基坑开挖位移传递规律数值模拟[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 3104—3108.
- LI Zhi-gao, ZENG Yuan, LIU Guo-bin. Numerical simulation of displacement transfer law of excavation adjacent metro station[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(11): 3104—3108.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/50108—2008 地下工程防水技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.