

文章编号: 1000-7598 (2009) 12-3574-07

金坛盐岩储气库运营模型试验研究

戴永浩¹, 陈卫忠¹, 杨春和¹, 谭贤君¹, 姜小兰²

(1. 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;

2. 长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 武汉 430010)

摘 要: 针对盐岩重度低、低弹强比、高流变性等强度与变形特性, 研制出与金坛盐矿盐岩的力学行为较为相似的材料配方; 采用地质力学模型试验技术, 开展金坛盐岩储气库运行稳定性的模拟试验, 研究腔体在周期性注、采气作用下的变形特点与力学分布规律。根据模型试验结果, 采用盐岩非线性蠕变损伤本构模型, 结合金坛盐岩储气库长期运营进行数值模拟, 并与物理模型试验结果进行对比, 研究分析储气库围岩在循环加卸载下的力学响应特点与盐岩溶腔的长期运营稳定性, 得到了在周期性加卸载作用下腔体围岩蠕变变形的特点与规律, 研究表明相似模型试验技术可以有效地应用于盐岩储气库运营长期稳定性的研究, 其结果对盐岩储气库的建造与运行具有一定的指导意义和工程应用价值。

关 键 词: 盐岩; 储气库; 模型试验; 损伤; 本构模型; 加卸载

中图分类号: TU 458

文献标识码: A

A study of model test of Jintan rock salt gas storage's operation

DAI Yong-hao¹, CHEN Wei-zhong¹, YANG Chun-he¹, TAN Xian-jun¹, JIANG Xiao-lan²

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Key Laboratory of Geomechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: An analogy recipe used for model test studying of rock salt gas storage, which can simulate the features of rock salt such as lower bulk density, lower modular ratio and larger rheology deformation. Using geomechanic model test technique, Jintan salt mine's long-term stability and the cavity's deformation and stress distribution under cyclic internal pressure are studied. A constitutive model which considering damage of rock salt is deduced and employed in Jintan rock salt gas storage's numerical computation. The result from the numerical computation is checked by the one from the model test. The study indicates that the model test technique is very effective in studying of gas storage's long-term stability. The damage evolution of rock salt and the creep deformation of the cavity under cyclic loading-unloading is obtained. The result can be used to guide the constrution and production of gas storage in rock salt in China.

Key words: rock salt; gas stroage; model test; damage; constitutive model; loading-unloading

1 引 言

天然气地下盐岩存储洞室具有强大的中转加压、周转库存和商业储备、以及国家能源战略储备功能; 有利于合理利用和节约能源, 有利于环境保护, 有利于安全; 其建设投资和存储费用低, 周期短。地下盐岩储气库还有其特有的优点, 密封、耐压、注采能力及调峰、应急能力强, 扩建余地大, 需要时垫气绝大部分可以采出, 因此, 盐穴储气库作为油气储气库的主要类型之一, 已经在发达国家

被普遍采用。自美国于 1959 年建成世界上第 1 座盐穴储气库起, 目前世界上有已 40 多座盐穴储气库在运行, 约占世界上盐岩储气库总和的 10%左右, 已成为天然气集输系统的重要组成部分之一。

目前我国尚未建成盐穴地下储气库, 随着“西气东输”工程的进行, 以及我国天然气工业的不断发展, 除金坛盐穴地下储气库外将会有更多的盐穴地下储气库将被建成并投入运行。因而, 盐岩储库设计与运营等相关技术研究显得十分重要与紧迫。

利用水溶法采盐的盐矿的地下盐穴存储天然气

收稿日期: 2009-07-15

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) (No. 2009CB724603); 国家自然科学基金重大国际合作项目 (No. 50720135906); 国家自然科学基金 (No. 40772184) 资助; 中国科学院武汉岩土力学研究所知识创新工程领域前沿项目 (No. 0714011Q01)。

第一作者简介: 戴永浩, 男, 1978 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事岩土力学与地下工程方面的研究工作。E-mail: yhdai@whrsm.ac.cn

对环境保护的有利性和经济性尤为突出。但由于这些洞室不可能像用其他开挖方法形成的洞室, 人员不可能进入洞室; 实施井下测量, 确定其位置、形状和大小, 须在存储设计前采用声纳或其他方法进行。在存储运营中的洞室变形和稳定性, 也只能靠前述方法测定或采用岩石力学数值方法模拟。

目前, 国内外在此方面的研究大多集中在数学模型和数值模拟方面, 在盐岩储库地质力学试验方面很少有人涉足^[1]。模型试验能够直观地模拟岩体的实际工作状态, 能较好地模拟荷载的作用方式及时间效应; 能研究工程的受力全过程, 并且可以同时考虑多种因素及复杂的边界条件等, 正是由于地质力学模型试验技术具有上述独特的优越性, 因而考虑将其应用于盐岩储气库的研究中。

盐岩的蠕变特性对盐岩溶腔长期稳定性和运行寿命有决定性影响。国内外学者对盐岩蠕变本构模型进行了大量的研究^[2-5]。Stead 和 Szczpanik 从试验的角度研究了盐岩蠕变的损伤过程, 并建立相应的盐岩强度理论。Munson 等根据盐岩位错滑移理论建立了针对不同温度、不同应力条件下 M-D 本构模型。Chan 等根据盐岩位错理论建立了盐岩蠕变损伤理论。Hou 和 Wu 提出了考虑盐岩延展性变形、变位、硬化、软化及损伤和损伤恢复的 Hou/Lux 本构模型^[6]。考虑到这些模型较为复杂, 参数较多, 杨春和等提出了扩展幂指数形式的本构模型, 并在云应盐矿得到了较好的应用^[7]。陈卫忠等在 Burgers 模型的基础上, 提出了盐岩非线性蠕变损伤本构模型, 并应用于金坛盐矿储气库的计算分析^[8]。

本文通过盐岩相似材料配方, 开展金坛地下盐岩储库的地质力学模型试验, 同时采用盐岩非线性蠕变损伤本构模型对原型储气库开展数值模拟, 将模型试验结果与数值模拟结果进行对比研究, 分析储气库运行期间腔体围岩的蠕变变形与应力分布规律, 对金坛盐岩储气库运行期腔体围岩稳定性进行评价。

2 工程概况与背景

金坛盐矿位于西气东输输气管线长江三角洲苏南地区, 镇江市以南 50 km 左右, 距西气东输管道丹阳分输站 32 km, 距南京 100 km, 地势平坦, 埋深适中, 多在 800~1 200 m, 地层平缓, 构造简单, 断层封闭性好, 且断层都在盐岩体边部, 对盐岩层建库无影响; 盐岩分布范围大, 约为 60.5 km², 厚度大, 一般为 100 m 以上, 最厚达 200 多米; 盐层含盐率高, 主体部位可达 84.76~93.76%, 夹层少,

厚度小, 有利于溶离建造地下溶腔; 直接顶底板均为含钙芒硝、含膏泥岩或致密泥层, 厚度高, 抗压强度大, 分布稳定, 封闭性好。

目前, 该地区主要有茅兴、茅溪、金冠及荣炳等盐矿。金坛盐矿区已下套管进行采卤生产井 28 口, 分布在茅兴矿区和荣炳~陈家庄地区。已投入开发 10 多年来, 目前开采状况良好, 未发生溶腔垮塌现象。盐穴储气库建设由钻注采井、造腔和地面工程施工 3 个部分组成, 其中造腔阶段耗时最多, 而利用现有采卤溶腔则可大幅度缩短建设地下储气库的时间。对拟选建库地区 13 口井的溶腔进行的声纳测腔数据显示, 目前这 13 口井的溶腔高度为 53.7~117.4 m, 溶腔直径为 61.2~129.5 m, 溶腔高度与溶腔直径的比值为 0.54~1.92。溶腔顶部的盐层厚度 2.0~60.1 m, 采盐溶腔体积为(11.95~32.93)×10⁴ m³。实际测腔结果溶腔高度与溶腔直径的比值较小, 多数小于 1.0, 仅 4 口井比值大于 1.0。

目前, 针对金坛盐岩储气库所进行的研究已有很多^[9-10]。近期的研究有: 2006 年陈峰, 杨春和等针对西 1、西 2、东 1、东 2、岗 1、岗 2 共 6 口井, 通过数值模拟方法开展了腔形优化, 并对围岩塑性区范围与腔体体积变形规律进行了研究; 2007 年陈卫忠, 王者超等选择直溪桥盐矿的西 1 井、西 2 井和西 3 井 3 口盐井作为研究对象, 根据三轴蠕变试验结果建立盐岩非线性蠕变损伤本构模型, 对储库注采过程中的蠕变和损伤演化进行了研究。

3 盐岩储气库模型试验

3.1 盐岩相似材料配方选取

地质力学模型要求满足原型与模型的相似规律, 即必须满足: 模型的几何尺寸、边界条件、荷载及相似材料的重度、强度及变形特性方面的相似。模型和原型在弹性应力状态、弹塑性应力状态、破坏状态均应符合相似条件。材料的重度相同, 可以大大简化模型与实际工程物理参数之间的换算, 并且可以更好地体现自重应力场的影响。因此, 在进行模型试验时, 一般均倾向于使重度能够等于或尽量接近 1。虽然理论上要求相似模型必须满足上述相似准则, 然而试验中往往是不可能的, 也是完全不必要的。因此, 盐岩溶腔稳定性研究的相似模拟试验仅选取几何比, 动力比和时间比等几个主要相似常数满足其主导相似准则即可。

通过对各种岩土相似材料的方案比选, 最终确定采用重晶石粉、石英砂、石膏和膨润土组成的复合材料做为盐岩相似材料。试样加工采用土工专用

脱模器加工,可以保证试样成份和重量完全一样,成样端面平整,避免了传统方法制取试样离散性大的缺点。脱模后试样放入烘房内干燥,烘房温度控制为 42°C , 7 d 后取出试样进行力学性质的测试。

配方试样力学性质测试在中国科学院武汉岩土力学研究所的 RMT150—C 型液压伺服刚性试验机上进行,通过对大量相似材料配方试样的测试,最终得到了与盐岩重度低、低弹强比、高流变性等强度与变形特性较为接近的相似材料配方,其配方组成为:重晶石粉:石英砂:石膏:膨润土 = 60:30:7.5:2.5,水占干材料总重的 15%。所选配方试样重度约为 2.3 g/cm^3 ,弹性模量约为 0.2 GPa ,强度约为 0.5 MPa ,其单轴压缩应力应变曲线如图 1 所示。对比配方试样与盐岩单轴压缩应力应变曲线图可知,所选配方试样具有明显的塑性变形特征,与盐岩应力应变曲线(见图 2)较为相似。所选配方材料重度相似比为: $C_p \approx 1$,几何相似比为 $C_L = 50$,则根据相似准则,应力相似比为 $C_\sigma = C_p C_L \approx 50$,时间相似比为 $C_T = \sqrt{C_p C_L} \approx 7$,应变相似比为 $C_\varepsilon = 1$ 。

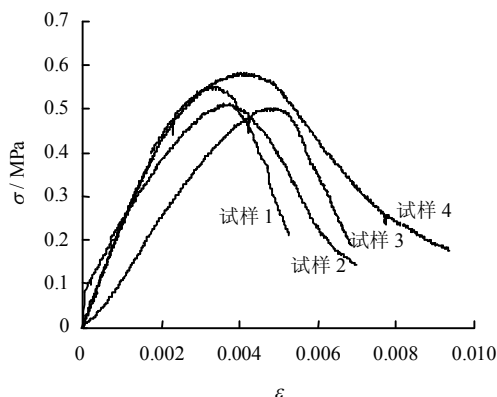


图 1 配方试样单轴压缩应力-应变曲线

Fig.1 Stress-strain curves of model test sample under uniaxial compression

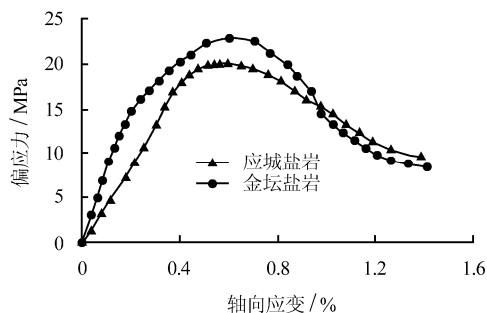


图 2 盐岩单轴压缩应力-应变曲线

Fig.2 Deviatoric stress-axial strain curves of rock salt under uniaxial compression

3.2 储气库运营模型试验

(1) 模型制作

本次试验在长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室地质力学模型试验中心进行。模型尺寸为 $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 0.2\text{ m}$,腔体为 $0.2\text{ m} \times 0.3\text{ m}$ 的椭圆形,则原型盐腔尺寸为 $20\text{ m} \times 30\text{ m}$ 的椭圆形腔体。模型为腔体的水平截面,模型如图 3 所示。

根据所选配方,将原材料在搅拌机内充分搅拌,倒入模具内后置于震动台上震动 $3 \sim 5\text{ min}$,使材料分布均匀,最后将表面修平成型。浇铸好模型在室内采用红外灯照射烘干 7 d 以上,采用兆姆表测量模型干燥程度,直至达到干燥为止。为保证测试结果的可信性和试验结果具有可比性,共制作 2 个模型,每个模型试验周期为 1 个月,全部试验完成需要 2 个月时间。

(2) 腔体内压加压系统

模型腔体内压由气体加压系统(图 4)供给,该系统由气体氮气钢瓶、减压阀、稳压阀、稳流阀、压力表和加压气囊组成。加压气囊由特种乳胶制成,具有良好的延展和变形适应能力,气囊工作内压力 $\geq 300\text{ kPa}$,并且具有良好的气密性。经试验测试,采用本套气体加压系统装置供压,腔体 24 h 压力变化范围不大于 0.05 kPa ,满足试验要求。

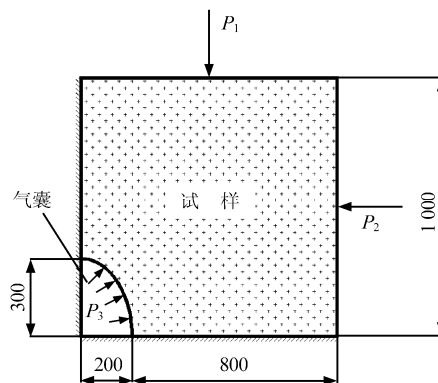


图 3 盐岩储库模型示意图(单位: mm)

Fig.3 Sketch of rock salt gas storage model

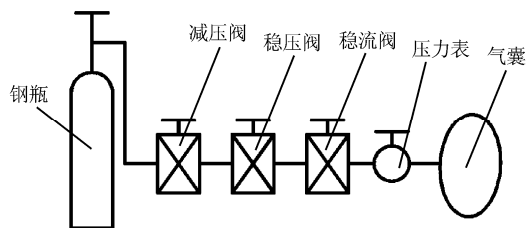


图 4 腔体供气装置示意图

Fig.4 Sketch of gas supply device

(3) 位移监测仪器布置与边界荷载施加

试样表面布设测点, 采用千分表测量位移变化。

共设计 3 条测线, 分别为 A、B、C, 测线间夹角 22.5° , 千分表沿腔体边界成环形布置, 形成 5 个测试环, 环间距离分别为 2、5、10、15、15 cm, 共需安装 15 个千分表, 千分表安装方案见图 5。

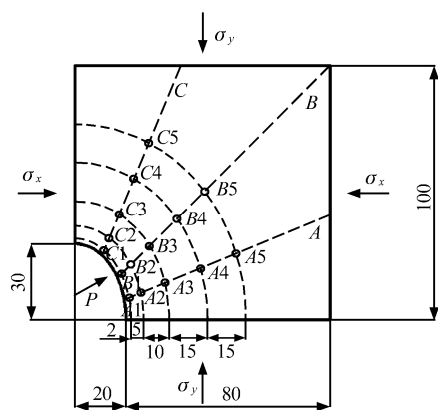


图 5 监测点位布置图 (单位: cm)

Fig.5 Arrangement of monitor points on sample (unit:cm)

试验边界条件: 模型右侧面和顶部施加表面压力, 腔体内壁采用压力气囊加压, 模型左侧面和底部施加边界约束。

模拟盐腔埋深为地下 1 000 m, 初始地应力场按静水应力场, 地应力为 23 MPa, 根据应力相似比尺, 可得

$$\sigma_x = \sigma_y = 0.458 \text{ MPa}$$

盐岩储库腔体压力运行工作过程: 盐腔在成腔的过程中保持工作压力为 12 MPa, 注气时最大工作压力为 14 MPa, 注气时间为 3 个月, 保压 3 个月后采气, 采气时间 3 个月, 采气后储库的工作内压降为 7 MPa。根据储库腔体压力运行过程, 按应力相似比则得到模型腔体压力运行过程为: ①试验开始; ②稳压 0.24 MPa, 保压 6 d; ③ 2d 内压力升高至 0.28 MPa; ④稳压 5 d; ⑤ 5 d 内压力降低至 0.14 MPa; ⑥稳压 5 d; ⑦ 5 d 内压力升高至 0.28 MPa; ⑧稳压 2 d; ⑨试验结束。

模型腔体压力运行过程如图 6 示。

3.3 模型试验结果

根据模拟腔体压力运行曲线, 试验中及时进行腔体内压的补压和卸压, 保证其加卸载过程与设计方

换算, 可得到模型试验所模拟原型储气库的位移, 并绘制出各测点的位移-时间关系曲线, 见图 7 和图 8。从图中可知, 试验中各测量点的变形呈现出较好的规律性, 两个试样的试验结果也较为接近。

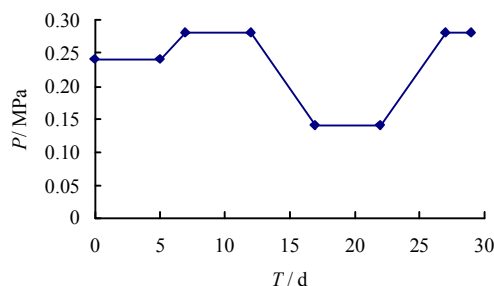


图 6 模型腔体压力运行曲线

Fig.6 Operating gas pressure of model cavern

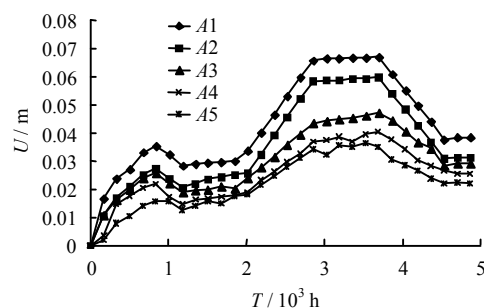


图 7 模型 1 各测点位移-时间关系曲线

Fig.7 Displacement-time curves of measuring points of model No.1

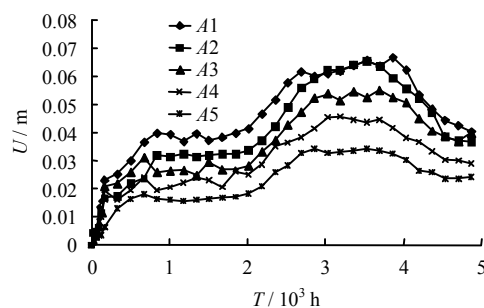


图 8 模型 2 各测点位移-时间关系曲线

Fig.8 Displacement-time relation curves of measuring points of model No.2

4 数值模拟与结果对比分析

为深入研究金坛盐岩储气库腔体变形规律, 本文借助文献[8]所建立的盐岩非线性蠕变损伤本构模型, 对试验模型进行了数值计算。将模型试验结果按相似比换算为原型结果, 并与数值模拟结果进行比较分析, 以期互为验证并发现一些共性的规律。

4.1 盐岩非线性蠕变损伤模型

陈卫忠等(2007 年)根据金坛储气库盐岩三轴蠕变结果,在 Burgers 模型的基础上,提出了盐岩的非线性蠕变损伤本构模型,三维应力状态下其形式为

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon &= \frac{\sigma}{K_2(\varepsilon_c)} + \frac{\sigma}{\eta_2(\varepsilon_c)}t + \frac{\sigma}{K_1(\varepsilon_c)}\left\{1 - e^{-\left[\frac{K_1(\varepsilon_c)}{\eta_1(\varepsilon_c)}t\right]}\right\} \\ D &= 1 - e^{(-m\varepsilon_c)} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: ε 为总应变; ε_c 为蠕变应变; m 为与盐岩有关的参数; K_1 、 K_2 、 η_1 和 η_2 为盐岩蠕变参数。

该模型得到的盐岩蠕变速率与常用的 Burgers 模型、指数模型相比,其结果与盐岩试验数据更为接近,并在金坛盐岩储气库稳定性评价中得到了较好应用。本次数值模拟将继续采用该模型。

4.2 计算参数与边界条件

数值计算模型几何尺寸与模型试验所模拟原型储库尺寸一致,即模型尺寸的 50 倍,其尺寸为左侧面施加竖向位移约束,底面施加横向位移约束,顶面和右侧面施加边界荷载,与模型试验保持一致,边界荷载为 23 MPa。

数值计算盐岩参数取值如表 1、表 2。

表 1 盐岩基本力学参数
Table 1 Basic parameters of rock salt

岩层	弹性模量 / GPa	泊松比	黏聚力 / MPa	摩擦角 /($^{\circ}$)
盐岩	18	0.30	1.0	30

表 2 盐岩蠕变参数取值
Table 2 Creep parameters of rock salt

位置	m	G_{20} / MPa	η_{20} / (MPa/h)	G_{10} / MPa	η_{10} / (MPa/h)
横剖面	7.2	661	129 802	1 245	11 477

4.3 结果对比分析

(1) 位移对比分析

为简化分析,此处仅以模型 1 沿测线 A 上各测点位移结果与数值模拟结果进行对比分析。图 9 为模型 1 测线 A 上各位移测量点模型试验观测值与数值模拟计算值对比图,图中 A10~A50 为数值模拟值,分别对应模型 A1~A5 测点。

从图中可知,在初期稳压阶段(保持在 12 MPa),两者差异较大,这是由于模型试验和数值模拟均不能反映盐岩溶腔过程,没有比较两者的价值,但这不会影响随后对腔体注采气过程的模拟。

当溶腔结束,在第 1 个注气增压阶段(腔体压力由 12 MPa 升到 14 MPa),腔体各测点位移均表现出略有降低;在高压运行期(腔体压力为 14 MPa),位移保持不变或略有升高;在采气阶段(腔体压力由 14 MPa 降为 7 MPa),各测点位移均迅速增加,其增幅最大值为 A1 测点,为 3.6 cm,该阶段位移最大值为 6.73 cm;低压运行阶段,围岩位移继续增加,但增加较为缓慢;注气阶段,围岩位移又迅速减小。

根据模型试验观测结果可知,模拟盐岩相似材料表现出较强的流变性,各测点位移观测结果具有良好的规律性和一致性;模型试验观测值与数值模拟结果均随腔体内压变化而变化,两者变化规律较为吻合。从试验结果可知,模型试验观测位移略大于数值模拟结果,两者最大位移差值约为 1 cm。在试验周期内,没有观测到加速蠕变变形的发生,说明试验材料处于稳态蠕变状态。

数值模拟得到储气库在溶腔完成后、第 1 个采气结束后及完成一个注采循环后位移云图分别见图 10~12。

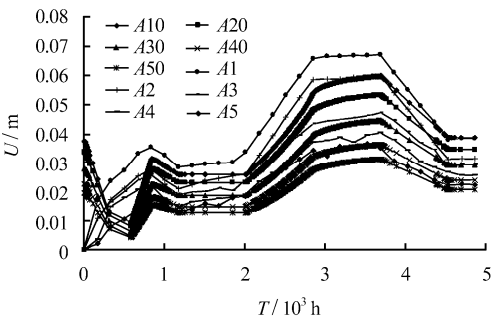


图 9 试验模型 1 测线 A 位移-时间关系曲线
Fig.9 Displacement-time relation curves of 300 measuring points along line A of model No.1

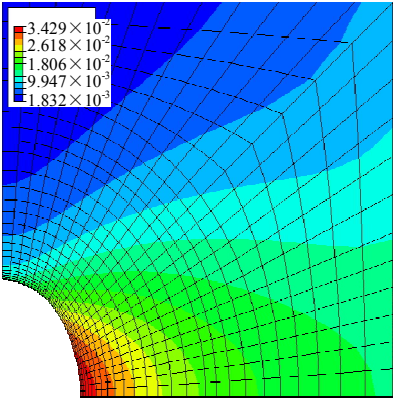


图 10 模型 1 溶腔结束后位移云图
Fig10 Displacement nephogram of model No1. after construction

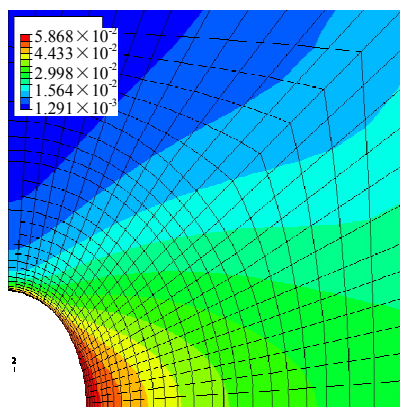


图 11 模型 1 采气后位移云图

Fig.11 Displacement nephogram of model No1. after gas recovery

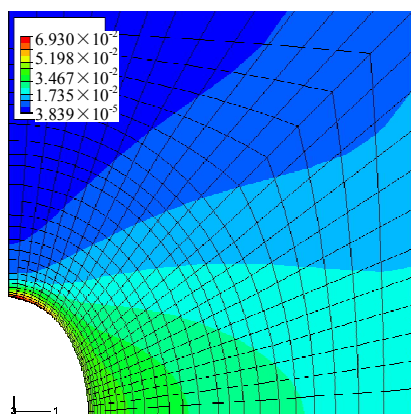


图 12 模型 1 一个注采循环后位移云图

Fig.12 Displacement nephogram of model No1. after one injection-production circle

(2) 位移速率分析

根据模型试验观测结果,可以得到各测点位移速率-时间关系曲线。图 13 为模型 1 测线 A 上各测点位移速率-时间关系曲线图。由于本次模型试验不能模拟溶腔过程,因此对初期稳压阶段位移速率不做分析。从图中可知,在增压和稳压阶段,位移速率接近于 0,且保持不变;在采气降压阶段,位移速率为正值,其值最大,且较为稳定,说明围岩进入稳态蠕变增长阶段,该阶段 A1~A5 各测点位移速率分别约为 0.40、0.38、0.24、0.19、0.18 mm/h;在注气增压阶段,位移速率为负,且保持稳定,说明围岩又被压回,该阶段 A1~A5 各测点位移速率分别为 -0.33、-0.33、-0.24、-0.23、-0.12 mm/h。

(3) 蠕变应变分析

根据模拟数值模拟结果,溶腔完成后,蠕变主要发生在腔体上部局部区域,蠕变应变最大值发生在上部;在升压和稳压阶段,蠕变范围基本不变;经采气结束后,蠕变范围迅速扩大,沿腔体周边分

布,其范围约为 3.5~4.7 m;经低压运行期后,蠕变范围进一步扩大,沿腔体周边分布,其范围达到 4.3~5.87 m,在随后的注气和稳压期,蠕变范围变化较小。

数值模拟得到储气库在溶腔完成后、第 1 个采气结束后及完成一个注采循环后蠕变应变云图分别见图 14~16。

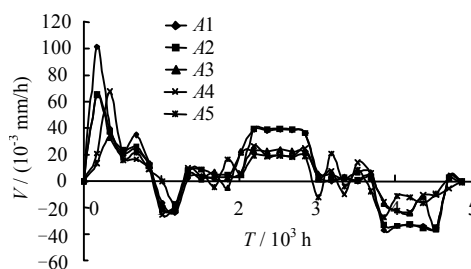


图 13 模型 1 测线 A 位移速率-时间关系曲线

Fig.13 Displacement ratio-time relation curves of model No.1 along measuring line A

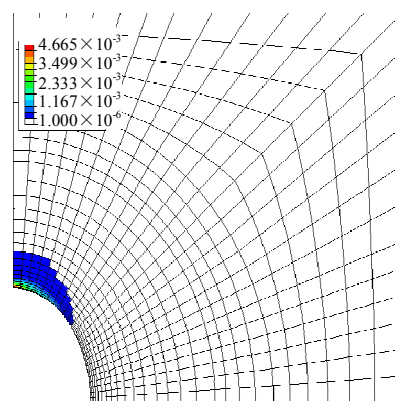


图 14 模型 1 溶腔结束后蠕变应变云图

Fig.14 Creep strain nephogram of model No1. after construction

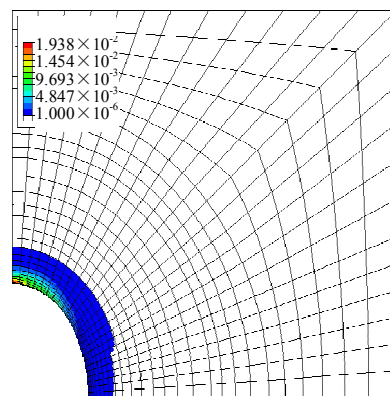


图 15 模型 1 采气后蠕变应变云图

Fig.15 Creep strain nephogram of model No1. after gas recovery

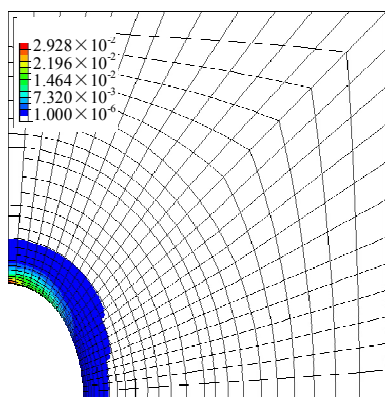


图 16 模型 1 一个注采循环后蠕变应变云图
Fig.16 Creep strain nephogram of model No.1. after one injection-production circle

5 结 论

本文借助地质力学模型试验技术,开展金坛盐岩储气库运营期的相似模型试验,并采用盐岩非线性蠕变损伤本构模型进行原型储气库的数值模拟,通过对比分析试验结果与数值模拟结果,得到了金坛盐岩储气库运营期腔体变形与蠕变规律,主要结论如下:

(1) 采用地质力学相似模拟试验技术,可以较好地反映腔体变形随内压变化的规律,说明地质力学模型试验技术可以应用于解决诸如盐岩储气库此类常规测试手段无法达到的工程问题中。

(2) 模型试验与数值模拟结果均表明,在采气阶段和低压运行阶段,腔体位移迅速增大,蠕变范围增加;模型试验与数值模拟均给出了位移的量化结果,模型试验观测值略大于数值模拟值。

(3) 储气库低压运行压力是决定腔体变形与破坏的关键因素,因此运营期间应控制腔体低压运行压力不低于设计最低值。

致谢: 试验过程中得到了长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室朱杰兵高级工程师的指导与帮助,在此谨致谢意!

参 考 文 献

- [1] 余海龙, 谭学术, 李通林, 等. 盐岩溶腔稳定性的相似模拟设计原则和依据[J]. 西安矿业学院学报, 1994, 14(4): 311—317.
YU Hai-long, TAN Xue-shu, LI Tong-lin, et al. Design of analogous model on the stability of saltrock cavity[J]. *Journal of Xi'an Mining Institute*, 1994, 14(4): 311—317.
- [2] HUNSCHE U, HAMPEL A. Rock salt—the mechanical properties of the host rock material for a radioactive waste repository[J]. *Engineering Geology*, 1999, 52(3/4): 271—291.

- [3] 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.
- [4] 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 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 rocksalt[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(Supp.2): 5561—5568.
- [5] 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. Investigation on creep damage of natural gas storage in salt rock layer[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(6): 945—949.
- [6] 杨春和, 陈锋, 曾义军. 盐岩蠕变损伤关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(11): 1602—1604.
YANG Chun-he, CHEN Feng, ZENG Yi-jun. Investigation on creep damage constitutive theory of salt rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(11): 1602—1604.
- [7] 杨春和, 曾义军, 吴文, 等. 深层盐岩本构关系及其在石油钻井工程中的应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1678—1682.
YANG Chun-he, ZENG Yi-jun, WU Wen, et al. Constitutive relationship of deep salt rock and its application to petroleum drilling engineering[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(10): 1678—1682.
- [8] 陈卫忠, 王者超, 伍国军, 等. 盐岩非线性蠕变损伤本构模型及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 467—472.
CHEN Wei-zhong, WANG Zhe-chao, WU Guo-jun, et al. Nonlinear creep damage constitutive model of rock salt and its application to engineering[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(3): 467—472.
- [9] 李银平, 杨春和. 层状盐岩体的三维 Cosserat 介质扩展本构模型[J]. 岩土力学, 2006, 27(4): 509—513.
LI Yin-ping, YANG Chun-he. Three-dimensional expanded Cosserat medium constitutive model for laminated salt rock[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(4): 509—513.
- [10] 陈锋, 杨春和, 白世伟. 盐岩储气库最佳采气速率数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 57—62.
CHEN Feng, YANG Chun-he, BAI Shi-wei. Investigation on optimized gas recovery velocity of natural gas storage in salt rock layer by numerical simulation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(1): 57—62.