

盐穴地下储气库盐岩力学参数的校准方法

李建君¹ 陈加松¹ 吴斌¹ 汪会盟¹ 王晓刚¹ 敖海兵¹ 陈锋²

1. 中国石油西气东输管道公司储气库项目部 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所

李建君等. 盐穴地下储气库盐岩力学参数的校准方法. 天然气工业, 2015, 35(7): 96-102.

摘要 盐穴地下储气库具有调配灵活、垫层气量需求量少、吞吐能力强等优点,但同时面临着诸如地表沉降、盐岩破坏、气体渗漏以及腔体收缩过快等安全稳定性问题。盐穴稳定性评价中一些关键力学参数的选择和校准极为重要,评价所涉及的岩石力学参数主要包括盐岩弹性参数和黏塑性参数。在盐穴腔体设计阶段,关键的力学参数的选择只能通过室内岩心试验来确定,其数值的大小可能与实际的原岩参数有较大出入,这在其他的地下岩体开挖工程中也经常碰到,需要进一步对盐岩力学参数进行校准。为此,在国内盐穴储气库造腔和注采运行的多年经验和数据积累的基础上,应用造腔和注采运行回归法,利用现场数据校准蠕变参数,建立了盐穴地下储气库岩石力学参数校准的试验方法。应用该方法对江苏金坛盐穴地下储气库的盐岩的弹性和黏塑性参数进行了校准,所获得的力学参数现场应用效果良好。校准后的力学参数对优化已运行腔体注采方案、提高储气库运行经济性和安全性都有重要作用。

关键词 金坛盐穴地下储气库 盐岩力学参数 弹性参数 黏塑性参数 数值模拟 校准方法

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2015.07.015

A calibration method for salt rock mechanics parameters of salt-cavern gas storage

Li Jianjun¹, Chen Jiasong¹, Wu Bin¹, Wang Huimeng¹, Wang Xiaogang¹, Ao Haibing¹, Chen Feng²

(1. Gas Storage Project Department of PetroChina West-to-East Gas Pipeline Company, Zhenjiang, Jiangsu 212000, China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 35, ISSUE 7, pp.96-102, 7/25/2015. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: The salt-cavern gas storage has the advantages of flexible deployment, less cushion gas demand, and strong throughput, etc. However, it also has safety and stability problems, such as surface subsidence, salt rock damage, gas leakage, and cavity shrinkage. The selection and calibration of some key parameters in the stability evaluation of salt-caverns are very important. The rock mechanical parameters in the evaluation mainly include the elastic parameters and the visco-plastic parameters of the salt rocks. During the salt-cavern design stage, the selection of key mechanical parameters can only be determined by laboratory core test. Their values may have a large discrepancy with the actual parameters of the original rocks, which is common in other underground rock excavation engineering, thus the mechanical parameters of salt rocks should be further calibrated. Therefore, based on many years of experiences and data accumulation in the domestic salt-cavern gas storage cavity construction and injection-production operation, with the cavity construction and injection-production operation regression method and on-site data to calibrate creep parameters, a test method for calibrating rock mechanics parameters of salt-cavern gas storage was established. This method was applied to calibrate the elastic and visco-plastic parameters of salt rocks in Jintan salt-cavern gas storage, showing good effects of such mechanics parameters. The calibrated mechanics parameters are very important in optimizing the operating chamber injection scheme, and in improving the economy and safety of the gas storage operation.

Keywords: Jintan salt-cavern gas storage; Mechanics parameters of salt rock; Elastic parameter; Visco-plastic parameter; Numerical simulation; Calibration method

作者简介: 李建君, 1982年生, 工程师; 2008年毕业于清华大学并获硕士学位; 主要从事盐穴地下储气库建设工作。地址: (212000)江苏省镇江市中国石油西气东输管道公司储气库项目部。电话: 13814795191。E-mail: cqklijianjun@petrochina.com.cn

随着西气东输管道及其他管道线路的陆续建成,作为油气管道的配套设施,地下储气库在安全平稳供气、季节调峰以及国家能源战略储备等方面起到重要作用^[1-2]。盐岩因其良好的蠕变性能、超低渗透性、损伤自我恢复性能以及具有一定的地层压力从而成为盐穴储气库的良好介质^[3],盐穴地下储气库具有调配灵活、垫层气量需求少、吞吐能力强等优点,但同时也面临着诸如地表沉陷、盐岩破坏、气体渗漏以及腔体收缩过快等安全稳定性问题,特别是国外一般在巨型盐丘中建设储气库,而我国在地质条件更加复杂的层状盐岩层中建设储气库^[4]。因此开展盐岩的力学研究尤其重要。

国外关于盐岩力学性质的研究开展了半个多世纪,第一次盐岩力学大会在美国举行,此后定期开展盐岩讨论会,会议从理论、模拟方法、实验方法等方面分别对盐岩储气库以及盐岩力学特性进行了探讨,解决了诸多技术问题。我国关于盐岩的力学研究起步较晚但是进展很快。国内学者首先对各盐矿区的盐岩进行了常规的力学试验研究,如陈锋等对江苏金坛^[5]、李银平等对湖北云应^[6-7]、王芝银等对江苏淮安^[8]、梁卫国等对四川同庆^[9-10]等诸多矿区盐岩样品进行了单轴、三轴压缩试验和剪切试验,获得了包括弹性参数、强度参数等在内的基本力学参数。盐岩具有良好的流变特性,杨春和、梁卫国等通过大量的盐岩样品蠕变试验数据^[11-12],认为盐岩蠕变分为瞬时蠕变阶段、稳态蠕变阶段和加速蠕变阶段,并建立了盐岩的蠕变本构方程。关于盐岩储气库的模拟方法目前比较常用的是利用 FLAC3D、Abaqus 等有限元软件进行数值模拟^[13],陈卫忠等利用 Abaqus 软件对金坛废弃盐矿老腔进行了稳定性研究并对储气库的注采压力和套管鞋高度进行了探讨^[14]。杨春和等利用 FLAC3D 软件对金坛不同洞形、不同注采压力下进行了数值模拟和稳定性评价^[3,15],但以上学者的研究多偏重于理论和室内试验研究,未得到现场实际数据验证。

笔者建立了一套盐穴地下储气库力学参数的校准方法,并在此基础上,利用 Abaqus 有限元软件校准了金坛盐穴储气库腔体围岩的力学参数,所得结果可以用于今后盐穴腔体的力学稳定性评价,特别是对优化已运行腔体注采方案、提高运行的经济性与安全性具有重要作用。

1 校准方法

为了确保盐穴地下储气库注采运行的安全,注采方案必须使腔体围岩处于弹性变化范围内,再加上岩

盐的蠕变特性,国际上对盐穴进行稳定性评价时大多采用 Lemetree 蠕变模型^[16],该模型将盐岩的总应变分为弹性应变和黏塑性应变,其应力—应变关系如下:

$$\varepsilon_T = \varepsilon_E + \varepsilon_{VP} = \frac{\sigma}{E} + \varepsilon_{VP} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{VP} = \left(\frac{\sigma}{K}\right)^\beta t^a \exp\left[-A_0\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r}\right)\right] \quad (2)$$

式中 ε_T 为总应变; ε_E 为弹性应变; ε_{VP} 为黏塑性应变; σ 为应力差; E 为杨氏模量; α 、 β 、 K 为 3 个 Lemaetre 参数; t 为时间, d; T 为温度; T_r 为温度基准; A_0 为 Arrhénius 系数。

为了在有限元软件 ABAQUS 使用该模型,需要对模型中的黏塑性应变部分进行进一步简化如下:

$$\varepsilon_{VP}^n(t) = A\sigma_{eq}^n t^m \quad (3)$$

$$A = 10^{-6} \exp\left[-A_0\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r}\right)\right] / K^\beta$$

其中 $m = a - 1$

$$n = \beta$$

式中 A 、 m 、 n 分别为简易蠕变模型中的蠕变参数。

通过现场溶腔试验以及长期注采运行的生产数据来校准弹性模量(E),泊松比(μ),以及黏塑性模型中的 A 参数,黏塑性参数(m 、 n)采用试验值,使得模拟计算与现场实际试验或运行数据相匹配。

1.1 弹性参数确定方法

盐穴储气库腔体在短时间内进行升压和降压操作,并使得压力在较小区间变化,基本上能够保证腔体围岩处于弹性变形状态,可以借此推导围岩的弹性参数。由于受计算机计算能力的限制只能建立轴对称模型来进行模拟计算。因此在试验选井时要选择形状轴对称性较好的腔体。

现场试验最好使用浓卤水来进行,但是由于浓卤水获取困难,且注水升压和排卤降压施工麻烦。因此实际选用造腔排出的淡卤水作为试验工质,这样在计算过程中需要考虑淡卤水继续溶腔带来的影响。

试验的基本原理是向盐穴腔内注入或排出一定体积卤水,腔体的体积变化包括黏塑性变形、弹性变形和腔体溶蚀 3 部分,与腔内卤水的体积变形相等。试验时间较短所以可以忽略与时间相关的黏塑性变形,剩余的弹性变形可以用腔体的弹性压缩系数表示。具体推导如下:

$$\Delta V_{腔} = \Delta V_{蠕} + \Delta V_{弹} + \Delta V_{溶} = \Delta V_{注/排} + \Delta V_{水} \quad (4)$$

式中 $\Delta V_{腔}$ 为腔体体积变化量, m^3 ; $\Delta V_{蠕}$ 为腔体蠕变体积收缩量, m^3 ; $\Delta V_{弹}$ 为腔体弹性体积变化量, m^3 ; $\Delta V_{溶}$ 为注入淡卤水继续造腔体积, m^3 ; $\Delta V_{注/排}$ 为注入

或者排出卤水体积, m^3 ; $\Delta V_{水}$ 为腔内卤水体积变化量, m^3 。

$$\Delta V_{水} = V \times \Delta p / K_v \quad (5)$$

式中 $\Delta V_{水}$ 卤水的压缩量, m^3 ; Δp 为应力增量, MPa; V 为腔内初始卤水体积, m^3 ; K_v 为卤水的体积模量, 取 3.56×10^3 MPa(中科院试验数据, $50\text{ }^\circ\text{C}$ 下)。

$$Z_{腔} = \Delta V_{弹} / (\Delta p \times V) \quad (6)$$

式中 Δp 为应力增量, MPa; V 为溶腔体积, m^3 ; $\Delta V_{弹}$ 为腔体体积弹性变化量(不包括继续造腔体积增加部分), m^3 ; $Z_{腔}$ 为腔体的弹性压缩系数。

$$\gamma_{腔} = \Delta V / V \quad (7)$$

式中 $\gamma_{腔}$ 为腔体收缩率; ΔV 为腔体体积变化量, m^3 ; V 为腔体初始体积, m^3 。

现场试验获得腔体的弹性压缩系数后, 使用 ABAQUS 有限元计算软件对选中的腔体进行校准模拟计算, 从而确定与试验相匹配的弹性参数。

1.2 黏塑性参数确定方法

由于黏塑性参数与时间相关, 因此必须参考较长时间的现场数据。黏塑性参数有 A 、 m 、 n , 通过现场试验确定这 3 个数据非常复杂, 需要大量的运行数据和声呐测量数据支持, 只考虑了保持 m 、 n 值使用室内试验数据不变, 通过现场数据校准 A 值, 使得模拟的腔体收缩率与现场试验或实际运行结果相匹配。具体有以下 2 种方法。

1.2.1 造腔回归法

顾名思义, 造腔回归方法分析的对象是处于造腔

过程中的盐穴腔体, 分析的对象最好是声呐测量完毕后就长期处于停井状态, 腔体内卤水处于饱和状态, 不会进一步溶蚀, 可以排除溶蚀影响。停井时间超过 7 d, 时间越长越好。通过调整 A 值来使得模拟的腔体收缩率与实际的体积收缩率相匹配。

1.2.2 注采运行回归法

该方法需要实际的注采运行数据, 利用数值模拟软件对盐穴腔体长期变形进行模拟, 通过调整 A 值来使得模拟的腔体收缩率与实际的腔体体积收缩率相匹配。该方法需要对注采运行中腔体进行声呐测量, 对比完腔时的声呐测量结果, 计算得到实际的腔体收缩率作为参考。

2 现场试验

水溶造腔是指通过管柱往盐岩层中注入淡水溶解盐岩形成近饱和卤水后排出, 在地下盐岩层中形成的洞穴。造腔的循环方式主要有 2 种: 正循环和反循环(图 1)。正循环造腔是指淡水从溶腔内管进入, 卤水从溶腔内管与外管的环形空间返回地面; 反循环造腔是指淡水从溶腔外管的环形空间进入, 卤水从溶腔内管返回地面。为了有效控制盐腔形态和保护盐岩顶板的密封性, 金坛盐穴储气库从生产套管与溶腔外管的环空中注入柴油阻溶剂, 从而在卤水和腔体顶部之间形成一层保护层, 确保顶部盐层免遭溶蚀破坏。通过对井口注水压力、井口排卤压力、井口油垫压力进行监控可以掌握腔内造腔活动和管线运行情况。

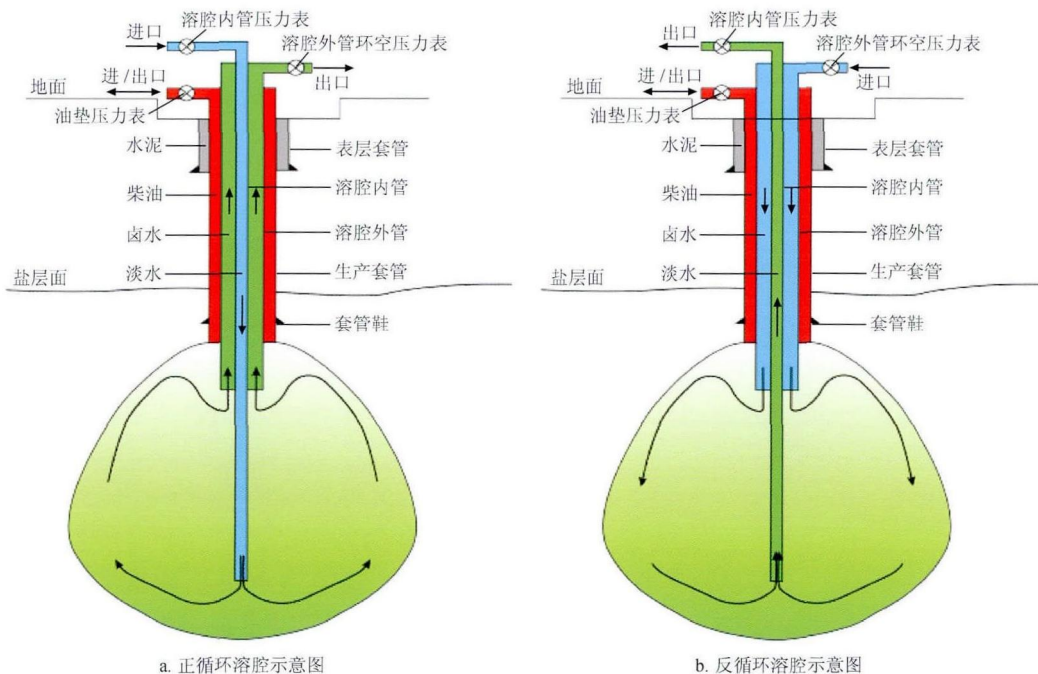


图 1 盐穴地下储气库溶腔示意图

2.1 A腔体的油垫压力升压及降压试验

A腔体在某轮溶腔阶段结束后进行了声呐测腔,测得腔体体积为 $140\,339\text{ m}^3$ 。升压试验中将油垫压力通过注入淡卤水的方式从 4 MPa 升高至 7 MPa ,注入淡卤水量为 284.98 m^3 ,其中注入的淡卤水还可以继续溶腔。降压试验将油垫压力通过排出卤水的方式从 7 MPa 降至 6.45 MPa ,排出卤水量为 56 m^3 ,2次试验的时间都较短,因此可以忽略腔体的蠕变体积收缩变化,近似认为腔体的体积变化值为腔体的弹性收缩变化。关井7 d后油垫压力从 6.45 MPa 升至 6.61 MPa ,其主要原因是由于盐岩的蠕变导致腔体蠕变收缩,卤水压缩使得油垫压力升高。

2.2 B腔体停井期间油垫压力上升试验

B腔体2012年9月2日进行了声呐测腔,腔体体积为 $92\,430.7\text{ m}^3$,从2012年9月15日停井,此时的油垫压力为 3.79 MPa ,到2012年12月30日油垫压力上涨至 7.49 MPa ,其主要原因为腔体周围的盐岩的蠕变性导致腔体体积收缩压缩卤水导致油垫压力上涨。

2.3 C、D腔体两期声呐测腔试验

C、D腔体为同采同注腔组,腔体距离较近,不到 30 m 。2005年1月11日对C、D腔体进行了第一次声呐测腔,测得体积分别为 $105\,664\text{ m}^3$ 和 $129\,830\text{ m}^3$,腔体从2007年6月30日排卤完毕后,腔体停止作业,腔内压力平衡近4个月,2007年10月22日开始注采气运行,工作气压介于 $8\sim 13.5\text{ MPa}$,运行方式为注气1个月,采气2个月,最高压停留3个月,期间伴有一些应急采气等突发状况,2013年6月又进行了一次声呐测腔,C、D腔体的体积分别为 $103\,890\text{ m}^3$ 和 $128\,305\text{ m}^3$,说明

腔体在运行期间存在不同程度的收缩。

3 数据分析

3.1 A腔体计算过程及结果

A腔体计算过程及结果如表1所示。

3.1.1 升压试验腔体弹性压缩系数(Z_1)的计算

①根据地层压力计算注入淡卤水后腔内的压力约为 $15.914\,2\text{ MPa}$,根据式(5),注入腔体内的卤水体积为 283.68 m^3 ;② 4 MPa 时腔体卤水体积为声呐测腔体积,根据式(5),升压至 7 MPa 时腔体内卤水体积变化量为 118.3 m^3 ;③根据现场测得卤水浓度差计算,注入的 284.98 m^3 淡卤水可以继续造腔 17.35 m^3 ;④根据式(4),腔体体积变化量为 165.38 m^3 ;⑤根据式(6), Z_1 为 $0.043\,4\%$ 。

3.1.2 降压试验腔体弹性压缩系数(Z_2)的计算

①根据地层压力计算排出卤水后腔内的压力约为 $15.364\,2\text{ MPa}$,根据式(5),腔体压力下排出的卤水体积为 55.76 m^3 ;② 7 MPa 时腔体卤水体积为 $140\,504.38\text{ m}^3$,降压至 6.45 MPa 时根据式(5),腔体内卤水体积变化量为 21.71 m^3 ;③根据式(4),腔体体积变化量为 34.05 m^3 ;④根据式(6), Z_2 为 0.044% 。

3.1.3 腔体停井期间体积收缩率(γ)的计算

①油垫压力为 6.45 MPa 的腔体体积为 $140\,470.33\text{ m}^3$;②根据式(5),关井7 d后腔内卤水变化量为 6.31 m^3 ;③根据式(7),关井7 d后腔体体积变化量即为卤水体积变化量,为 6.31 m^3 ,其包括蠕变体积变化和弹性体积变化,该段时间内腔体体积收缩率为 $0.004\,5\%$ 。

表1 A腔体现场试验数据计算结果表

试验内容	腔体体积/ m^3	试验前油垫 压力/ MPa	试验后油垫 压力/ MPa	腔内卤水 变化量/ m^3	腔体体积 变化量/ m^3	腔体弹性 压缩系数	腔体体积 收缩率
升压试验	140 339.00	4.00	7.00	165.38	165.38	0.043 4%	0.118 0%
降压试验	140 504.38	7.00	6.45	34.05	34.05	0.044 0%	0.024 2%
停井试验	140 470.33	6.45	6.61	6.31	6.31	—	0.004 5%

3.2 B腔体计算过程及结果

B腔体计算过程及结果如表2所示。

①根据式(5),卤水的变化体积为 96.06 m^3 ;②根

据式(4),腔体的变化体积为卤水的变化体积,结果为 96.06 m^3 ,根据式(7),则腔体的体积收缩率就等于 $0.103\,9\%$ 。

表2 B腔体试验数据计算结果表

声呐体积/ m^3	停井初油垫 压力/ MPa	停井末油垫 压力/ MPa	停井时间/ d	卤水体积 变化量/ m^3	腔体体积 变化量/ m^3	腔体体积 收缩率
92 430.7	3.79	7.49	106	96.06	96.06	0.103 9%

3.3 C、D腔体计算结果

根据 C、D 腔体两期声呐测腔所得体积和式(7)算出腔体体积收缩率,结果如表 3 所示。

表 3 C、D腔体体积收缩计算结果表

腔体	2005 年 声呐测腔 体积/m ³	2013 年 声呐测腔 体积/m ³	运行期间 体积损失 量/m ³	腔体体积 收缩率
C	105 664	103 890	1 774	1.68%
D	129 830	128 305	1 525	1.17%

4 试验数据与数值模拟数据对比

4.1 数值模拟计算模型

根据单个腔体声呐数据及相关地质数据,利用数值模拟软件建立腔体的二维轴对称几何模型,选取腔体的一个纵剖面的一半作为研究对象,计算模型为一个 2 000 m×2 000 m 的正方形,平面为 XY 坐标系平面,竖直方向为 Y 轴,坐标原点为模型顶部左侧顶点,整个模型考虑了 0~2 000 m 的地层信息,考虑到泥岩夹层较少且厚度较薄,因此暂不考虑夹层的影响,其几何模型如图 2 所示,根据腔体的受力情况,分别施加地应力和内部拉张力,地应力场采用三向等压自重应力场,模型底边、左边和右边分别加以法向约束。采用有限元数学方法对建立的物理模型进行模拟计算,需要对几何模型划分网格,网格划分质量的好坏直接决定了模拟的准确度和精度,通常腔体周围的网格需要加密以分析腔体周围的物理过程。

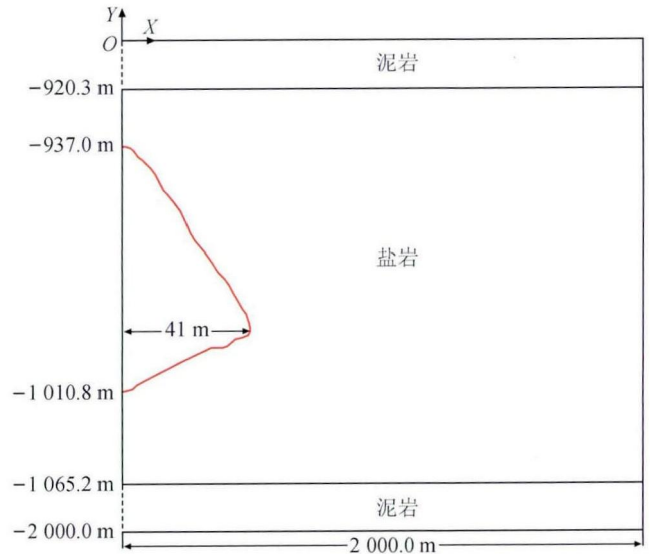


图 2 D腔体计算模型示意图

4.2 盐岩弹性参数校准

A 腔体升压和降压试验过程中由于试验时间极短,因此可以认为是由于盐岩的弹性收缩导致腔体体积发生变化,弹性参数主要为弹性模量(E)和泊松比(μ),根据实验室对盐岩的弹性参数测量结果,弹性模量值介于 2~18 GPa,泊松比取值范围变化不大(0.30~0.35),弹性参数模拟结果如表 4,根据模拟结果泊松比在 0.30~0.35 范围内对模拟结果的影响有限,弹性模量对模拟结果影响较大。因此根据模拟结果与实际数据的契合度,将弹性模量定为 5.8 GPa,泊松比定为 0.35。

表 4 A腔体盐岩弹性参数校准表

项目	弹性模量/ GPa	泊松比	升压腔体弹性 压缩系数	降压腔体弹性 压缩系数	备注
试验结果	2.0~18.0	0.30~0.35	0.043 4%	0.044 0%	根据岩心测试,弹性模量 2~18 GPa,泊松比 0.30~0.35
模拟结果	13.0	0.30	0.016 8%	0.013 3%	中国科学院武汉岩土力学研究所数据
模拟结果	6.0	0.30	0.040 3%	0.042 2%	—
模拟结果	6.0	0.35	0.041 7%	0.043 2%	—
模拟结果	5.8	0.30	0.041 8%	0.043 6%	—
模拟结果	5.8	0.35	0.043 1%	0.044 1%	模拟结果与试验数据符合

4.3 盐岩黏塑性参数校准

4.3.1 A腔体盐岩黏塑性参数校准

盐岩的黏塑性参数主要为 A 、 n 和 m , A 值与岩性矿物组分和温度有关, n 和 m 值与盐岩的矿物组成有关,根据实验室试验结果 A 值变化范围较大数量级介

于 $10^{-6} \sim 10^{-9}$, n 值变化范围较小介于 3~4,此次数值模拟保持 n 、 m 值不变,根据中科院武汉力学所对金坛盐岩岩心的力学试验结果 $n=3.75$, $m=-0.525$,模拟结果如表 5 所示,根据模拟结果, $A=3.0 \times 10^{-7}$, $n=3.75$ 、 m 为 -0.525 时的模拟结果与试验结果契合较好。

表 5 A 腔体盐岩黏塑性参数校准结果表

项目	A	n	m	腔体收缩率	备注
试验结果	$10^{-6} \sim 10^{-9}$	3~4	-0.525	0.004 5%	根据简化公式 1~6 岩心力学试验 A 值范围为 $10^{-6} \sim 10^{-9}$, n 值为 3~4
模拟结果	2.0×10^{-7}	3.75	-0.525	0.000 42%	中国科学院武汉岩土力学研究所利用 Lemaitre 公式 1~5 拟合金坛储气库岩心力学数据的结果
模拟结果	3.0×10^{-7}	3.75	-0.525	0.004 19%	该模拟结果与现场试验结果契合较好

4.3.2 B 腔体试验数据验证盐岩力学参数

为了验证 A 腔体校准出来的盐岩力学参数的准确性和实用性,选取 B 腔体现场试验数据(表 2)进行模拟验证,从表 6 中可以看出模拟处理的腔体体积收缩率与现场试验实际腔体收缩率十分接近,其主要原因是 B 腔体和 A 腔体距离较近,约 250 m 左右,腔体的深度以及腔体周围盐岩的性质变化不大,同时也说明该方法模拟出来的金坛储气库盐岩力学参数具有一

定的实用性和指导意义。

4.3.3 C、D 腔体试验数据验证盐岩力学参数

为了进一步验证校准的盐岩力学参数,选取了距离 A 腔体较远的 C、D 腔体,为同采同注腔体,其现场试验数据如表 3 所示,根据其实际的注采过程进行数值模拟,其模拟结果如表 7 所示,当模拟过程使用 B 和 A 腔体的盐岩力学参数时,腔体收缩率的模拟结果与实际情况存在一些差距,但其结果误差在可接受范

表 6 B 腔体体积收缩模拟结果表

项目	弹性模量/ GPa	泊松比	A	n	m	腔体收缩率	备注
试验结果	—	—	—	—	—	0.103 9%	—
模拟结果	5.8	0.35	3.0×10^{-7}	3.75	-0.525	0.097 1%	模拟结果与 B 腔体现场试验数据近似

表 7 C、D 腔体体积收缩模拟结果

项目	弹性参数		黏塑性参数			腔体收缩率	备注
	E/GPa	μ	A	n	m		
C 试验数据	—	—	—	—	—	1.68%	—
腔体模拟结果	5.8	0.35	3.0×10^{-7}	3.75	-0.525	2.27%	B、A 腔体校准的力学参数
体模拟结果	5.8	0.35	2.0×10^{-7}	3.75	-0.525	1.74%	改变 A 值模拟结果更贴近真实值
D 试验数据	—	—	—	—	—	1.17%	—
腔体模拟结果	5.8	0.35	3.0×10^{-7}	3.75	-0.525	2.17%	B、A 腔体校准的力学参数
体模拟结果	5.8	0.35	2.0×10^{-7}	3.75	-0.525	1.66%	改变 A 值模拟结果更贴近真实值

围内。究其主要原因是 C、D 腔体距离 B 和 A 腔体较远,盐岩层深度相差几十米,盐岩的地层温度以及矿物组成等方面的差别导致其力学性质也存在一些差异。

5 结论

笔者在长期的现场工作经验基础上,搜集了大量的现场试验数据,理论结合实际,总结出一套行之有效的盐穴储气库围岩力学参数校准方法,并基于该方法对金坛盐穴储气库的盐岩力学参数进行了校准,获得了良好的效果。校准后的力学参数对于该储气库以后造腔和长期注采运行有重要的指导意义。

另外,气腔声呐数据获取昂贵,目前国内仅有两个注采运行的腔体进行过声呐测腔,由于声呐数据的不

足,蠕变模型中的黏塑性参数未得到完全校准,目前校准的参数结合室内试验参数已经可以使模拟结果与实际工况良好匹配,今后将在现场数据不断丰富之后作进一步的深入研究。

参 考 文 献

[1] 严铭卿,廉乐明,焦文玲,展长虹,谭羽非.21 世纪初我国城市燃气的转型[J].煤气与热力,2002,22(1):12-14.
Yan Mingqing, Lian Leming, Jiao Wenling, Zhan Changhong, Tan Yufei. The transformation of city gas in China for the beginning of 21st century[J]. Gas & Heat, 2002, 22 (1):12-14.

[2] 李铁,张永强,刘广文.地下储气库的建设与发展[J].油气储运,2000,19(3):1-8.

- Li Tie, Zhang Yongqiang, Liu Guangwen. The construction and development of the underground gas storage[J]. Gas Storage and Transportation, 2000, 19(3): 1-8.
- [3] 杨春和, 梁卫国, 魏东吼, 杨海军. 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): 4410-4417.
- Yang Chunhe, Liang Weiguo, Wei Donghou, Yang Haijun. 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] 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.
- Yang Chunhe, Li Yinping, Chen Feng. Bedded salt rock mechanic and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [5] 陈锋. 盐岩力学特性及其在储气库建设中的应用研究[D]. 武汉: 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2006.
- Chen Feng. Study on the salt rock mechanic behavior and its application to the construction of gas storage[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2009.
- [6] 李银平, 杨春和, 罗超文, 屈丹安. 湖北省云应地区盐岩溶腔型地下能源储库密闭性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2430-2436.
- Li Yinping, Yang Chunhe, Luo Chaowen, Qu Dan'an. Research on the tightness of salt mining underground gas storage in Yunying Hubei province[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(12): 2430-2436.
- [7] 刘江, 杨春和, 吴文, 李银平. 盐岩短期强度和变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 3105-3109.
- Liu Jiang, Yang Chunhe, Wu Wen, Li Yinping. Experimental study on the salt short-term strength and deformation property[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(1): 3105-3109.
- [8] 唐明明, 王芝银, 丁国生, 冉莉娜. 含夹层盐岩蠕变特性试验及其本构关系[J]. 煤炭学报, 2010, 35(1): 42-45.
- Tang Mingming, Wang Zhiyin, Ding Guosheng, Ran Lina. Study on the creep characteristic and constitutive relationship of interlayered salt[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(1): 42-45.
- [9] 梁卫国, 徐素国, 莫江, 吴迪, 张传达. 盐岩力学特性应变率效应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 43-50.
- Liang Weiguo, Xu Suguo, Mo Jiang, Wu Di, Zhang Chuanda. Experimental study on the strain rate effect of mechanical performance of salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(1): 43-50.
- [10] 徐素国, 梁卫国, 赵阳升. 钙芒硝盐岩物理力学特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(6): 1054-1059.
- Xu Suguo, Liang Weiguo, Zhao Yangsheng. Study on the physic and mechanic property of glauberite salt rock[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(6): 1054-1059.
- [11] 高小平, 杨春和, 吴文, 刘江. 盐岩蠕变特性温度效应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 2054-2059.
- Gao Xiaoping, Yang Chunhe, Wu Wen, Liu Jiang. Experimental research on the temperature effect of the salt creep behavior[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(2): 2054-2059.
- [12] 梁卫国, 徐素国, 赵阳生, 杨春和. 盐岩蠕变特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1386-1390.
- Liang Weiguo, Xu Suguo, Zhao Yangsheng, Yang Chunhe. An experimental study on mechanical properties of rock salt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(7): 1386-1390.
- [13] Colomé Jaime D, Monárdez Christian. Potasio Rio Colorado pilot cavern creep modeling using FLAC3D-comparative analysis with values obtained from sonar mapping and pressure measurements inside the cavern[C] // Solution Mining Research Institute Spring 2011 Technical Conference, 18-19 April 2011, Galveston, Texas, USA.
- [14] 陈卫忠, 伍国军, 戴永浩, 杨春和. 废弃盐穴地下储气库稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(4): 848-854.
- Chen Weizhong, Wu Guojun, Dai Yonghao, Yang Chunhe. Stability of the abandoned salt cavern used for the underground gas storage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(4): 848-854.
- [15] 赵克烈, 杨海军, 陈锋, 杨春和. 深部储气库群盐层蠕变参数优化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 3550-3555.
- Zhao Kelie, Yang Haijun, Chen Feng, Yang Chunhe. Research on creep parameters optimization of salt bed in deep gas storage group[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 3550-3555.
- [16] Tijani M, Hadj-Hassen F, Gatelier N. Improvement of Lemaitre's creep law to assess the salt mechanical behavior for a large range of the deviatoric stress[C] // 9th International Symposium on Salt, 5-7 September 2009, Beijing. DOI: <https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-00566278>.

(编辑回稿日期 2015-05-09 编辑 何明)