

文章编号: 1007-2993(2023)01-0072-05

盐穴储气库注采运行对邻近铁路安全影响分析

张 幸¹ 李文斌¹ 谢 楠¹ 贲建华¹ 王成林¹ 黄盛隆¹ 叶良良²

(1. 国家管网集团西气东输公司, 上海 200120; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北武汉 430071)

【摘要】 盐穴储气库作为地下天然气储存的一种主要方式, 在我国油气储运行行业中的重要作用日益突出。但是由于盐岩的流变特性, 在储气库的运营过程中盐穴腔体体积会随着运营年限逐渐减少, 从而可能引发地面沉降等一系列环境问题。针对某盐穴储气库建设工程, 通过适用盐岩蠕变变形的幂指数模型对储气库运营中盐岩腔引发的地面沉降进行模拟, 并对邻近铁路运营可能产生的影响进行分析。分析显示, 储气库运行 30 年后, 储气库区域沉降表现为整体的均匀沉降, 无明显的地表倾斜, 区域最大沉降 196 mm, 最大纵横向倾斜率未超过 0.1 mm/m, 储气库群运行所产生的区域地面沉降对铁路的运行无明显影响。

【关键词】 盐穴储气库; 地面沉降; 铁路安全; 数值分析; 注采运行

【中图分类号】 U 21; TE 82

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2023.01.013

Influence Analysis of Injection-production Operation of Salt Cavern Gas Storage on the Safety of Adjacent Railways

Zhang Xing¹ Li Wenbin¹ Xie Nan¹ Ben Jianhua¹ Wang Chenglin¹

Huang Shenglong¹ Ye Liangliang²

(1. PipeChina West East Gas Pipeline Company, Shanghai 200120, China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, Hubei, China)

【Abstract】 Salt cavern gas storage is a main method of underground natural gas storage. With the construction and development of salt cavern gas storage in China, its position in the oil and gas storage and transportation industry has become very prominent. At the same time, due to the rheological characteristics of salt rock, the volume of the salt cavern will gradually decrease with the operating time during the operation of the gas storage, which may cause a series of environmental problems such as surface subsidence. For the construction project of salt cavern gas storage in Pingdingshan, the surface subsidence caused by salt cavern in the operation of gas storage was simulated by using the power exponential model suitable for salt rock creep deformation, and the possible influence on the operation of adjacent railways was analyzed. It shows that after 30 years of operation, the subsidence of the gas storage area is uniform as a whole, with no obvious surface tilt. The maximum subsidence in the area is 196 mm, and the maximum vertical and horizontal tilt rates do not exceed 0.1 mm/m. The regional ground subsidence caused by the operation of gas storage group has no obvious influence on the operation of the adjacent railway.

【Key words】 salt cavern gas storage; surface subsidence; railway safety; numerical analysis; injection-production operation

0 引言

由于盐岩的流变性与重结晶特性, 深部地质结构中盐岩地层具有完善的密封性, 其在我国及世界能源和天然气地下储存中获得了广泛应用^[1-3], 我国第一座盐穴储气库——金坛储气库一期已建成投入使用。国内外已建成盐岩储气库的相关分析与监测

结果显示, 盐岩储气库在运行过程中, 其腔体会随着时间逐渐缩小, 与此同时, 会导致一定程度的地面沉降, 严重时可能危及地面建筑和人员财产安全^[4-6]。因此, 在盐岩储气库建设过程中有必要开展地面沉降对地面构筑物的安全影响评价^[7]。

针对盐岩储气库建设引起的地面沉降, 国内外

作者简介: 张 幸, 男, 1986 年生, 汉族, 安徽宿州人, 硕士, 高级工程师, 主要从事储气库工程技术研究。E-mail: zhangxing@pipechina.com.cn

通讯作者: 叶良良, 男, 1994 年生, 汉族, 江西南昌人, 博士研究生, 主要从事盐穴储气库地表变形研究。E-mail: yeliang0113@163.com

已进行了大量的研究,研究方法有概率积分法、拟合函数法、数值模拟方法等,并结合实际的地面沉降监测数据进行综合分析^[8-13]。德国 Bernburg 储库群埋深为 500~650 m,存储体积约为 10^5 m^3 ,根据 5 年多的观测记录,其中心区域沉降量逐年递增,累积达到 42 mm,影响范围约为 450 m^[14]。美国 Mont Belvieu 储库包括 124 个液化烃储存盐腔,埋深为 750~1700 m,运行期间地表沉降速率为 20~40 mm/a,影响范围为 1500 m^[15]。与国外的盐岩层相比,我国盐岩层多为陆相沉积,泥质夹层及泥岩层盐岩层互层较多,盐岩层的力学性质较为复杂^[16]。

我国某盐岩储气库井位分布区存在既有货运铁

路,针对这一工程实际,通过数值模拟方法分析了该地区由于盐穴储气库注采运行而产生地面沉降和地表倾斜值,对铁路运行的安全影响进行了分析评价。

1 项目概况

该盐穴储气库是西气东输二线工程地下储气库建设库址,已开始进行前期建设。根据建设规划,该储气库的井位分布区是当地工业企业货运铁路穿越区,井位布设与铁路相对位置如图 1 所示。由于盐穴储气库具有很强的蠕变特性,在长期运营过程中,必然会产生一定量的地面沉降,为了保证货运铁路的运营安全,有必要对储气库运营产生的地面沉降和地表倾斜值进行分析。

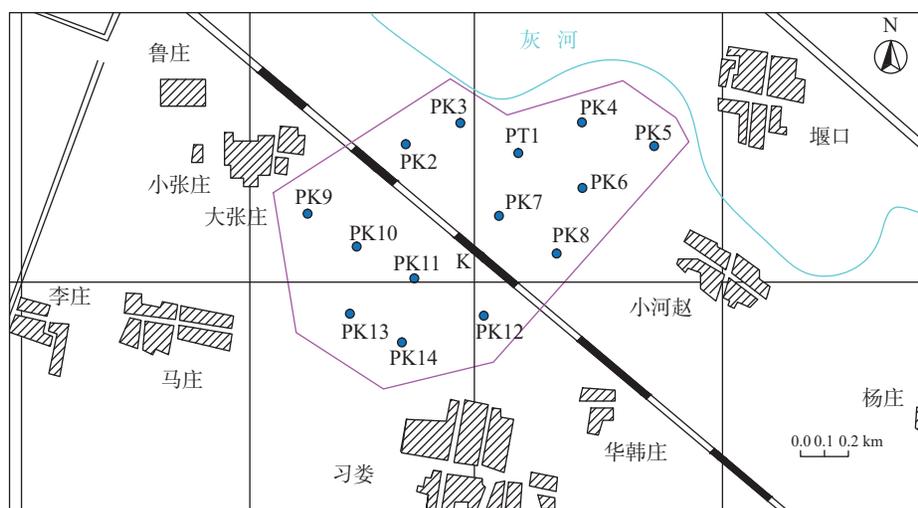


图 1 储气库井位分布

根据《铁路运输安全保护条例》第十八条规定,在铁路线路两侧路堤坡脚、路堑坡顶、铁路桥梁外侧起 1000 m 范围内,及在铁路隧道上方中心线两侧各 1000 m 范围内,禁止从事采矿、采石及爆破作业。按照上述规定,铁路两侧各 1000 m 总计 2000 m 宽度范围内是不允许进行采矿作业的。考虑到储气库建设需要,在不影响铁路安全运营的前提下,有必要开展盐穴储气库建设对铁路安全的影响分析,确定保护带范围内的储气库建设不影响铁路的安全运行。

根据《III、IV 级铁路设计规范》5.6.4 条规定,在松软地基上填筑路基应进行工后沉降分析。沉降量应满足以下要求:III 级铁路路基的工后沉降不应大于 30 cm,IV 级铁路不应大于 40 cm。依据《铁路技术管理规程》,速率小于 120 km/h 的线路要求钢轨横向倾斜差值不得超过 4 mm,依据我国铁轨标准轨距 1.435 m,垂直于线路方向的地表倾斜值应小于 4 mm/1.435 m,即 0.278%。

综合以上规范的各种规定,穿越该储气库区域

铁路线路为低于 80 km/h 低速工业企业货运铁路。依据国家铁路分级标准,可定义为该铁路为 III 级铁路,其应有的沉降变形许可值可参考该等级铁路标准或高一级等级标准。据此,该铁路最大沉降允许值可确定为 300 mm,年最大沉降速度为 40 mm/a,最大横向倾斜值为 0.278%

2 储气库注采运行地面沉降分析

根据该盐矿建库区域地层条件和腔体形态设计,盐穴储气库顶深为 1710 m,底深为 1930 m。储气库盐穴腔体形状分为三部分,下部为圆锥,高度为 40 m,中部为圆柱,高度为 110 m,顶部为半椭圆,高度为 70 m,腔体最大直径为 80 m,腔体模拟形状图如图 2 所示。针对以上腔体形状和实际的地层,建立如图 3 所示的盐腔数值分析模型,数值模拟采用 FLAC 2D 软件,能较好地处理岩石的粘弹塑性问题,建立的模型是二维轴对称数值模拟地质模型,模型建立中考虑了大于 2 m 的泥岩夹层。模型大小为 3000 m×2200 m,上边界为地面,为自由面,其他三个边界面

的法向位移是固定的。下边界深度为 2200 m, 水平方向为 3000 m, 地下深度 1355 m 以上为泥岩层, 其下为盐岩和泥岩夹层。图 4 所示为网格剖分图, 在腔体周围的网格密度大, 外部边界附近网格密度小, 网格单元数量约为 22100 个, 具有较好的计算精度。

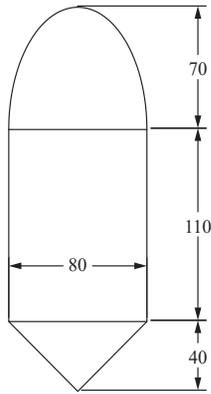


图 2 腔体模拟形状图(单位:m)

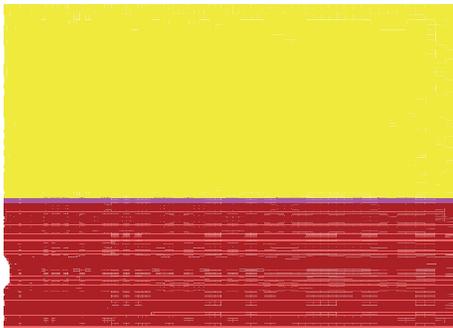


图 3 沉降分析地质模型图

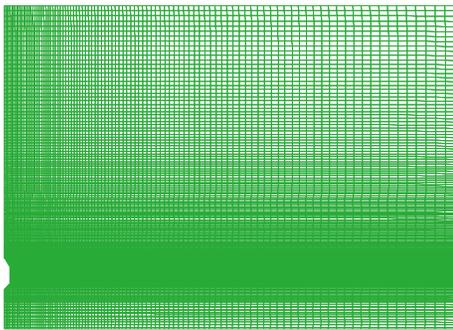


图 4 沉降分析网格模型图

地质体的本构模型采用适用于盐岩的稳态蠕变的幂指数蠕变模型, 表达式为:

$$\dot{\varepsilon} = A\bar{\sigma}^n \quad (1)$$

式中: $\dot{\varepsilon}$ 为稳态蠕变率, a^{-1} ; A 为材料参数, $\text{MPa}^{-n} \cdot \text{a}^{-1}$; n 为材料参数; $\bar{\sigma}$ 为偏应力, MPa 。

根据该盐穴储气库力学试验结果, 并结合国内外盐岩力学特性的研究成果, 确定计算参数, 模拟参数如表 1 所示。

表 1 蠕变参数值表

试样类别	$A/(\text{MPa}^{-n} \cdot \text{a}^{-1})$	n
盐岩	2×10^{-7}	3.3
泥岩夹层	2.8×10^{-8}	2

分析模拟考虑储气库注采运行工况, 运行压力 12 ~ 28 MPa, 每年运行两个周期, 第一注采周期:

采气期: 12 月 1 日—2 月 28 日, 共 90 天, 压力由上限至下限均匀递减;

平衡期: 3 月 1 日—3 月 15 日, 保持下限压力;

注气期: 3 月 16 日—6 月 30 日, 共 107 天, 压力由下限至上限均匀递增;

平衡期: 7 月 1 日—7 月 15 日, 保持上限压力。

第二注采周期:

采气期: 7 月 16 日—9 月 15 日, 共 62 天, 压力由上限至下限均匀递减;

注气期: 9 月 16 日—11 月 30 日, 共 76 天, 压力由下限至上限均匀递增。

运行方案如图 5 所示。

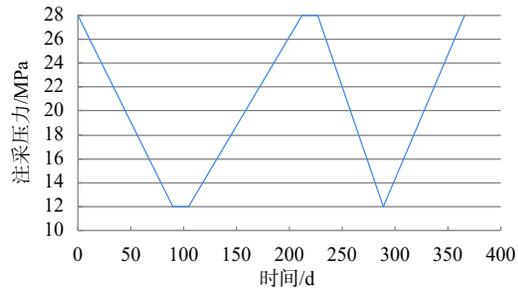


图 5 注采运行方案图

通过对平顶山储气库运行工况下 30 年的蠕变变形分析, 30 年腔体蠕变体积收缩 18.6%。该条件下, 储气库区地表沉降形成以井口为中心的凹陷沉降区, 储气库最大沉降发生的井口, 约为 16.8 mm, 地表以井口为圆心, 半径 0 ~ 500 m 的范围为主沉降区, 500 ~ 2000 m 范围为沉降急速减少区, 2000 m 以外为转微沉降区, 图 6 为储气库腔周沉降分布图。

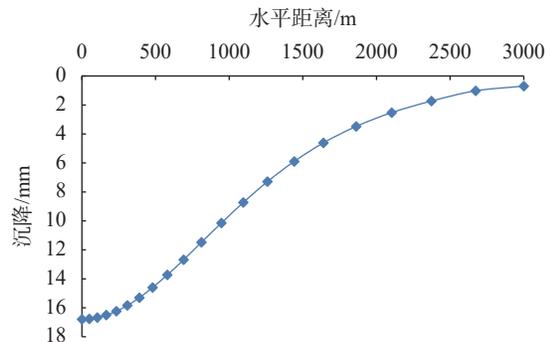


图 6 储气库腔周地表沉降分布图

3 储气库腔群地面沉降对铁路影响分析

盐岩储气库建设运营引发的地面沉降是一个动态与长期的过程,其沉降量随着时间逐步增加,地面上某一点的沉降也受到区域内多个储气库腔体共同作用的影响^[17]。为考虑储气库腔群共同作用的影响,运用叠加原理,设腔群各腔体第 i 井口与地面某点的距离分别为 r_i ,该腔体对该点产生的沉降用 $S(r_i)$ 表示,则该点受腔群影响产生的总沉降可以用各个单腔产生的沉降和计算:

$$S = \sum_{i=1}^n S(r_i) \quad (2)$$

储气库井区与铁路相对位置如图 7 所示,分别沿铁路横轴线和纵轴线建立坐标系, K 为坐标原点。为分析储气库群运行引发地面沉降对铁路安全运行的影响,分别对垂直于铁路线的 A-A1、B-B1、C-C1、D-D1、E-E1 等五条横剖面及沿铁路线的 F-F1 纵剖面进行分析。所有储气库运行产生的沉降通过单腔运行沉降线性叠加的方法获得储气库群的整体沉降。

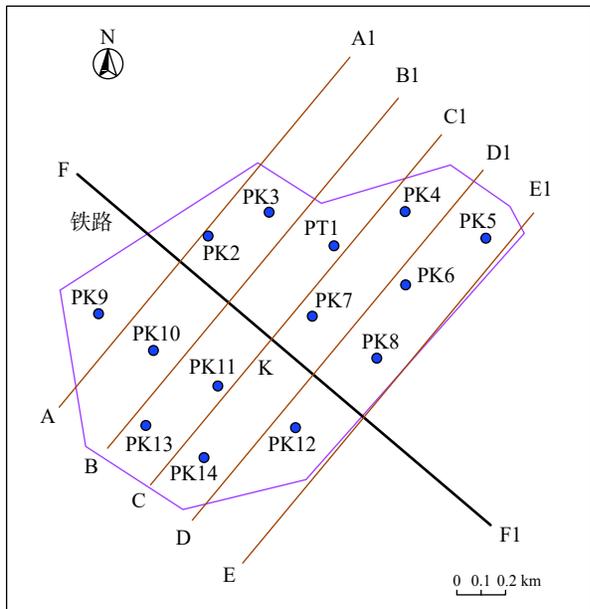


图 7 储气库井区与铁路相对位置图

图 8 为 A-A1 剖面、B-B1 剖面、C-C1 剖面、D-D1 剖面、E-E1 剖面的地面沉降图,图 9 为 F1-F 铁路纵轴线剖面地面沉降曲线。A-A1 剖面、B-B1 剖面、C-C1 剖面、D-D1 剖面、E-E1 剖面的最大沉降分别为 177.6 mm、192.6 mm、196.0 mm、190.2 mm、171.1 mm。区域沉降以铁路纵轴线和 C-C1 为中心,最大沉降位于坐标原点 K 附近,为 196.0 mm,在储气库运行的 30 年期间产生的地面沉降,未超过 III

级铁路最大许可工后沉降 300 mm,年平均沉降速率为 6.6 mm/a,远低于许可沉降速率 40 mm/a。储气库区域的地面沉降表现为整体沉降,无明显的地表倾斜,铁路横纵线的纵横向最大倾斜率均小于 0.01%,未超过铁路许可横向倾斜率 0.278%,储气库群运行所产生的区域地面沉降对铁路的运行影响很小。

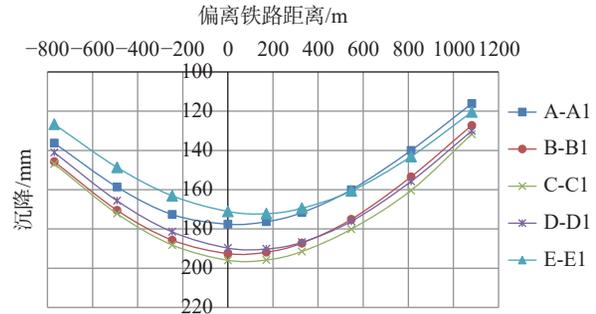


图 8 储气库区域铁路横断面沉降曲线

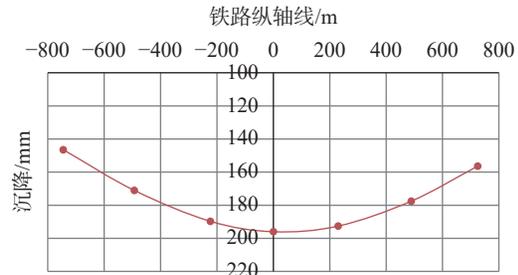


图 9 铁路纵轴线 F-F1 剖面沉降曲线

4 结论

通过对储气库建设的地面沉降进行模拟及对铁路运营影响分析,获得如下结论:

(1) 储气库单腔注采运行 30 年,其形成了明显的地面沉降,地表凹陷以井口为圆心,半径 0~500 m 的范围内为主沉降区,500~2000 m 范围为沉降急速减少区,2000 m 以外为转微沉降区,井口中心最大沉降为 16.8 mm。

(2) 以单腔运行产生的沉降进行叠加,储气库区域的地面沉降表现为整体沉降,无明显的地表倾斜,储气库腔群产生的地面沉降最大为 196.0 mm,铁路横纵线的纵横向最大倾斜率均未小于 0.01%,未超过铁路许可横向倾斜率 0.278%,储气库群运行所产生的区域地面沉降对铁路的运行影响很小。

由于盐穴地表沉降是一种长期且缓慢的过程,为防范风险,在储气库的建设过程中应建立地面沉降监测网,且在临近铁路区域布设加密测点,保证储气库建设过程中的铁路运行安全。

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): 4409-4417.
- [2] SHI X L, CHEN Q L, MA H L, et al. Geomechanical investigation for abandoned salt caverns used for solid waste disposal[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80: 1205-1218.
- [3] YIN H W, YANG C H, MA H L, et al. Study on damage and repair mechanical characteristics of rock salt under uniaxial compression[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52: 659-671.
- [4] BÉREST P, BROUARD B. Safety of salt cavern used for underground storage[J]. *Oil&Gas Science and Technology*, 2003, 3(58): 361-384.
- [5] 李银平, 孔君凤, 徐玉龙, 等. 利用Mogi模型预测盐岩储气库地表沉降[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(9): 1739-1745.
- [6] 陈 雨, 李 晓, 侯正猛, 等. 不同腔形下盐岩储库区地表最大变形预计新方法[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(5): 826-833.
- [7] 井文君, 杨春和, 孔君凤, 等. 盐岩地下储备库引发地表沉降事故的风险分析[J]. *岩土力学*, 2011, 32(S2): 544-550.
- [8] 陈 雨, 李 晓. 盐岩储库区地面沉降预测与控制研究现状与展望[J]. *工程地质学报*, 2010, 18(2): 252-260.
- [9] 任 松, 姜德义, 杨春和, 等. 岩盐水溶开采沉降新概率积分三维预测模型研究[J]. *岩土力学*, 2007, 28(1): 134-138.
- [10] 孔君凤, 李银平, 杨春和, 等. 盐穴储气库群地表铁路路基变形及运输安全评价[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(9): 1776-1784.
- [11] 李二兵, 方 秦, 谭跃虎, 等. 层状盐岩中天然气地下储库地表沉降分析[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2011, 12(6): 629-634.
- [12] EICKEMEIER R. A new model to predict subsidence above brine fields[C]. In: *Proceedings of SMRI Fall Meeting, Nancy, France, 2005*.
- [13] LIU W, LI Y P, YANG C H, et al. A new method of surface subsidence prediction for natural gas storage cavern cavern in bedded salt rock[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(9): 1-17.
- [14] MENZEL W, SCHREINER W. Results of rock mechanical investigations for establishing storage cavern in salt formations[C]. *Proc. 6th Symp. on Salt. Alexandria: The Salt Institute, 1985*.
- [15] RATIGAN J. Ground subsidence at Mount Belvieu, Texas (panel discussion-surface subsidence) [C]. In: *Proceedings of SMRI Spring Meeting, Atlanta, 1991*.
- [16] 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.
- [17] 屈丹安, 杨春和, 任 松. 金坛盐穴地下储气库地表沉降预测研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(S1): 2705-2711.

收稿日期: 2021-11-23