

平顶山地下盐穴储气库地表沉降机理数值模拟*

王志荣¹, 贺平¹, 石茜茜¹, 韩中阳¹, 张利民²

(1. 郑州大学 水利与环境学院, 郑州 450001; 2. 河南省煤田地质局资源环境调查中心, 郑州 450053)

摘要: 针对平顶山盐田盐层薄、夹层多、埋藏深的特点, 采用 Fortran 语言将蠕变模型导入有限元软件, 分别建立单腔、双腔和群腔储气库计算模型, 并且根据地面监测资料拟合得到模型参数, 对不同工况下薄层状盐穴储气库的地面沉降进行了预测。研究表明: (1) 储气压力 10 MPa 时 40 万方储气库, 单腔蠕变影响范围约为 30 m, 蠕变 5 a、10 a、15 a、20 a、30 a 之后中心点沉降分别为 49.21 mm、53.60 mm、57.70 mm、61.51 mm、64.44 mm, 沉降范围基本一致约为 1 500 m; (2) 由于双腔相互影响, 中点最大沉降量和沉降范围都比单腔略大, 从溶腔稳定与沉降控制角度分析, 地面对井最佳水平间距应大于地下溶腔最大直径的 1.5 倍; (3) 群腔模式下中心点最大沉降量和沉降范围都有所增大, 而且随着腔数的增加, 二者增大的趋势越明显。以 7 溶腔储气库群为例, 蠕变 30 a 之后中心点的沉降量达到 247 mm, 沉降的影响范围达到 2 480 m。

关键词: 互层状盐岩; 地下储气群库; 围岩蠕变; 地面沉降; 数值分析

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2018)04-1105-09

Numerical Simulation on Mechanism of Surface Subsidence Caused by Gas Storage of Salt Cavern in Pingdingshan

Wang Zhirong¹, He Ping¹, Shi Xiqi¹, Han Zongyang¹, Zhang Limin²

(1. School of Water Conservancy and Environment Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, P.R.China;
2. Resources and Environment Research Center, Henan Coalfield Geology Bureau, Zhengzhou 450053, P.R.China)

Abstract: In view of the characteristics of thin thickness, multilayer and deep burial, Using the Fortran language to program the creep model and import the finite element software. The calculation models for single-chamber, double-chamber, and group-cavity gas storages were established respectively. Meanwhile, the model parameters were obtained according to the ground monitoring data, and the ground subsidence of the thin layer salt cavern reservoir in different working conditions was predicted. The results show that: (1) the creep reach of gas storage with volume of $4 \times 10^5 \text{ m}^3$ is 30 m under pressure of 10 MPa, and the subsidence of center point are 49.21 mm, 53.60 mm, 57.70 mm, 61.51 mm, 64.44 mm respectively after creep time of 5 a, 10 a, 15 a, 20 a, 30 a, while the effect scope of subsidence are basically the same with a value of 1 500 m. (2) The subsidence of double cavity is slightly larger than single cavity, and the reasonable space of double cavity should be 1.5 times the size of maximum diameter from the perspective of subsidence control. (3) The central point subsidence and influence radius of group cavity are obviously larger, meanwhile the central point subsidence and influence radius of 7-cavity gas storage are 247 mm and 2 480 m respectively after 30 years of creep.

Keywords: layered salt rock; underground group gas storage; side rock creep; surface subsidence; numerical analysis

* 收稿日期: 2018-01-09(修改稿)

作者简介: 王志荣(1963-), 男, 浙江嘉善人, 博士, 教授, 主要从事岩土工程与地质灾害防治研究。

E-mail: wangzhirong513@sina.com

基金项目: 国家自然科学基金(41272339); 河南省自然科学基金(182300410149)

0 引言

盐岩地下溶腔因其安全经济的特点在能源存储和有毒工业废气地处置方面具有良好的应用前景,已经逐步成为能源储备领域的研究热点^[1-4]。目前国内外已经建成了许多盐岩储气库^[5],大量监测资料表明,盐岩蠕变导致的沉降问题对储气库的安全稳定具有很大的威胁^[6-7]。许多学者也对储气库的沉降问题进行了相关研究,认为盐穴储气库地表沉降量计算分为建造和运营 2 个阶段^[8],盐穴储气库地表动态沉降量随着造腔速率、埋深、直径、高度和时间增加而增加,随着内压增加而降低。内压、埋深、直径和时间对盐穴储气库地表动态沉降量影响比较显著,而造腔速率和高度对其影响不显著。岩层角度以及断层等均对沉降具有影响作用,多溶腔储气库地表沉降具有叠加效应^[9]。正常运行状态下,随储气内压增大,储库群塑性区范围及腔周矿柱单元失效概率逐渐减小,随储气库间距减小,塑性区范围及矿柱单元失效概率均明显增大^[10]。另外,地面沉降的风险也可以采用风险失效概率^[11]来进行评估,能够为盐矿区地面设施风险安全控制提供理论依据。

目前,关于盐岩储气库地表沉降的计算方法并没有成熟的理论,现有研究都是从传统的经典理论出发进行计算,比如改进的概率积分法和拟合函数法等^[12],一般都是利用地表监测数据和沉降剖面线形状假设相近的函数和参数,并通过统计学方法评价影响因素的影响效果。在理论方法不够成熟、现场监测资料缺乏时,数值分析是研究盐岩储气库地表沉降的重要手段^[13]。

与国内外厚盐丘型储层条件相比,平顶山盐田的地质条件十分特殊,表现为盐岩与泥岩相间互层,且具有盐层与夹层数量多、单层厚度薄、埋藏深等特点,因而造成较为复杂的互层状盐岩力学特性。本文基于盐岩蠕变试验,采用 Fortran 语言将蠕变模型程序化并且导入有限元软件,对河南省平顶山薄层状盐岩储气库的地面沉降规律进行了研究,为储气库的建设和沉降控制提供数据参考。

1 工程地质背景

平顶山盐田地处豫西山地向豫东平原过渡的次一级的箕形地带。研究区域的勘探资料表明,该区域岩性为灰色泥岩、石盐岩、含膏泥岩。上部为棕红色、灰色泥岩与灰白色含膏泥岩互层;中部为

灰白色膏盐、石盐岩、膏质泥岩夹灰色泥岩、灰质泥岩和含膏泥岩;下部为灰色泥岩、石盐岩及含膏泥岩。盐层层数最多可达 61 层,盐层间距小,对应的泥岩夹层以薄、多为特点,平均厚度为 2.8 m,最大为 12.32 m,厚度普遍在 5 m 以内,泥质夹层总厚度约占盐层总厚度的 30% 左右。另外,盐岩溶腔的探测资料表明,单个溶腔形态复杂,基本呈下部大而上部小的形状,溶腔最大半径约为 30 m,埋深平均为 1 200 m,溶腔高度平均为 200 m(图 1)。

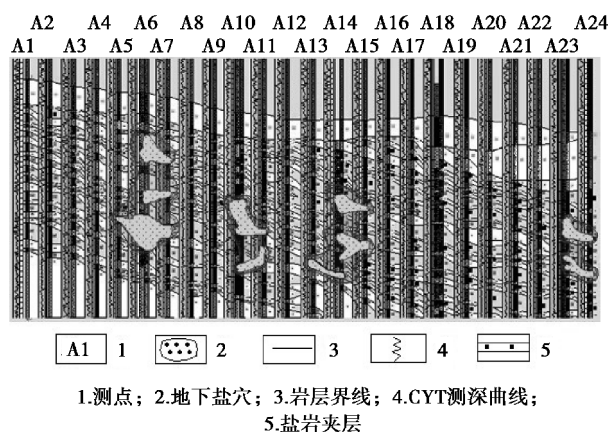


图 1 马庄井田 A 线盐岩溶腔分布探测图

Fig. 1 Distribution of salt rock cavities interpreted from Line A in Mazhuang well field

2 地表沉降数值计算

2.1 单腔储气库沉降计算

2.1.1 模型建立

通过岩石力学试验可知,互层状盐岩中的泥岩强度比较高,而泊松比和稳态蠕变率则较小。因此,可以确定泥岩夹层由于自身较强的力学性能,从而能够控制储气库围岩蠕变变形的发展,有利于储气库的安全稳定。考虑到计算机的实际计算性能,为了减少计算量,本文在三维数值模型建立时,将互层状盐岩看作一种均一的新材料,输入其各种力学参数,据此分别建立单腔、双腔和群腔模型。根据前期溶腔探测的结果以及邻近的高分辨率二维地震勘探资料可以得到盐岩溶腔的大概形状与分布范围,但是开采形成的溶腔形状十分不规则,为数值分析模拟的网格划分带来很大的不便。因此,需要对溶腔进行一定的简化处理,根据溶腔下部半径较大而上部半径小的特征,将其顶部简化为半球体,底部简化为椭球体,中间部分为圆台状。

首先,按照实际勘探情况建立溶腔模型,溶腔高度取 200 m,体积约为 40 万 m^3 ,互层状盐岩的厚

度为 300 m,其中泥岩厚度为 5 m,盐岩层厚 30 m,上覆泥岩层厚度取整为 1 200 m,下卧泥岩层厚度为 300 m。溶腔模型尺寸和计算区域剖面图如图 2 与图 3。一般来讲,数值计算范围不小于工程尺寸的 3~4 倍,同时考虑到地面沉降的水平影响范围较大,取计算模型的底面尺寸为 3 000 m×3 000 m。由于模型的对称性,可以考虑取 1/4 模型进行计算。数值模型采用六面体实体单元,首先对模型进行区域划分,使得整个模型的各个区域都能够进行结构化网格划分,网格大小为 5 m,模型网格划分如图 4 所示。计算分析过程中不考虑盐岩溶腔的造腔过程,按溶腔一次性成型处理,首先建立静力分析步计算模型,然后将应力计算结果导入到地应力平衡分析步,再施加内压并建立蠕变分析步进行计算分析。然后在埋深均为 1 200 m 的情况下分别又建立了体积约为 20 万 m³ 和 30 万 m³ 的溶腔模型。

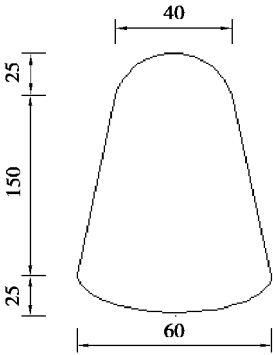


图 2 溶腔模型示意图(单位:m)

Fig. 2 Schematic diagram of cavity model (unit: m)

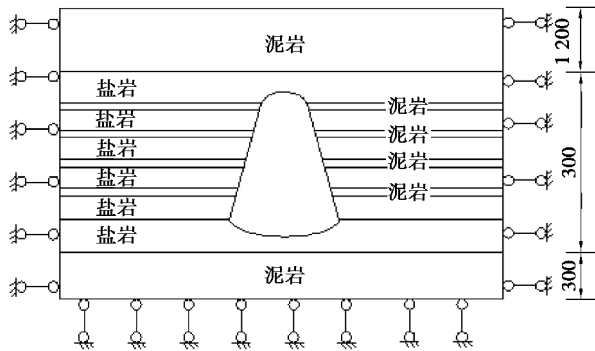


图 3 计算区域剖面图(单位:m)

Fig. 3 Profile of calculation area (unit: m)

模型建立完毕后,需要施加各种边界条件及荷载条件,根据实际情况,本次计算采取底部固定约束,顶部自由,其余边界约束法向位移,如图 4 所示。荷载主要是腔体内部储气压力,参考文献资料采取 5 MPa、10 MPa、15 MPa 3 种储气压力。有限

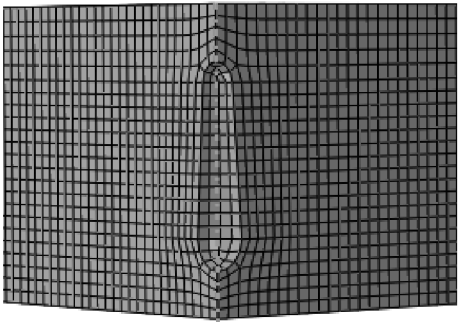


图 4 单腔模型网格划分图

Fig. 4 Mesh figure of single cavity model

元软件虽然具有良好的非线性分析功能,内置蠕变规律应用范围广,但对不同岩性的针对性不强。为了更好地体现盐岩的蠕变特性,根据岩石试验呈现的蠕变特征,采用开尔文元件和理想弹塑性元件串联组成蠕变模型^[14],利用 Fortran 语言编程后导入到有限元软件中进行沉降计算分析。岩石的力学参数采用地面监测曲线的非线性拟合值(表 1)^[15-16]。

表 1 岩石力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rock

岩性	变形模量 /GPa	泊松比	黏聚力 /MPa	内摩擦角 /(°)
盐岩	6.67	0.362	15.23	26.3
泥岩	10.18	0.230	15.63	15.7

2.1.2 不同内压时地面沉降分析

为了研究不同储气压力时的地面沉降规律,设储气压力为 5 MPa、10 MPa 和 15 MPa 3 种工况。当储气库的体积为 40 万方、埋深按实际情况设置为 1 200 m 时,经过蠕变 30 a 后的沉降等值云图如图 5~7 所示,说明储气库上方地表中心点的沉降量最大,逐渐呈圆形向周围扩散,沉降量逐步的减小,地面沉降的影响范围较大,一般均大于 1 100 m。另外,沉降变化云图也说明在储气压力为 5 MPa 和 10 MPa 时沉降量自中心点至远方是连续变化的,而在储气压力为 15 MPa 时沉降云图变化并不连续,而是在距离中心点一定距离的地方出现沉降较大的情况,说明此时的储气压力过大,对地面沉降的分布已经产生了影响。

鉴于储气压力为 15 MPa 时出现了不符合一般沉降规律的紊乱现象,即地面出现了波浪式变形,表明内压过大时会引起具有动采特征的波动性沉降,这种表面紊乱现象却十分符合实际监测结果^[16]。因此,为了研究不同储气压力下沉降的发

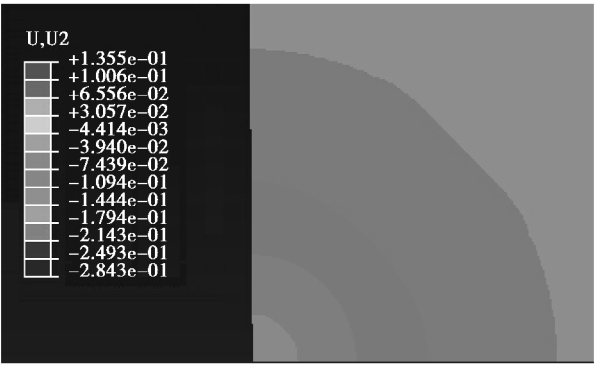


图 5 储气压力 5 MPa 时沉降等值云图
Fig. 5 Equivalent nephogram of sedimentation
(under pressure of 5 MPa)

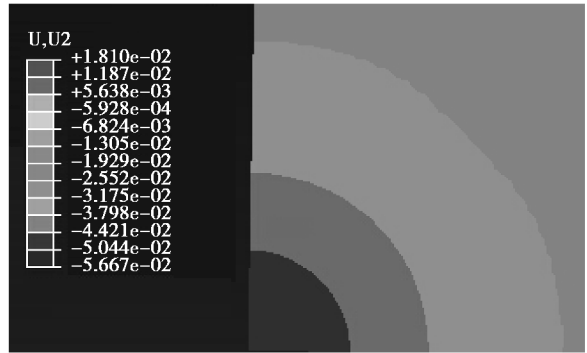


图 6 储气压力 10 MPa 时沉降等值云图
Fig. 6 Equivalent nephogram of sedimentation
(under pressure of 10 MPa)

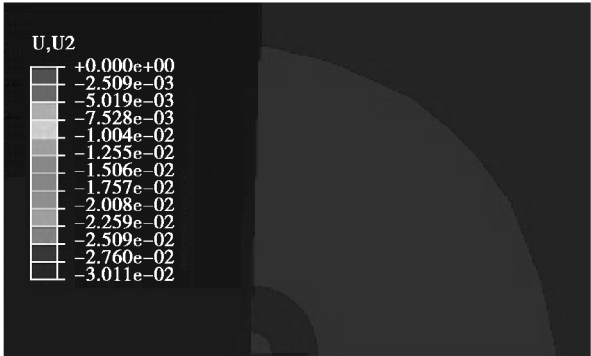


图 7 储气压力 15 MPa 时沉降等值云图
Fig. 7 Equivalent nephogram of sedimentation
(under pressure of 15 MPa)

展规律,主要通过对比储气压力为 5 MPa 和 10 MPa 2 种情况下的地面沉降变化规律,蠕变时间 30 a 时的溶腔周围蠕变变形云图如图 8 和图 9 所示,2 种压力下沉降变化曲线分别如图 10 和图 11 所示。腔周蠕变云图说明随着储气压力的增大,蠕变变形的最大值有所减小,但蠕变变形的影响

范围基本一致,约为 30 m 即溶腔的最大半径。最大蠕变变形主要产生在溶腔的下半部分,尤其是溶腔直径最大处,因此,直径最大的地方也是有可能发生塑性变形的地方,是溶腔变形过大之后的薄弱之处。

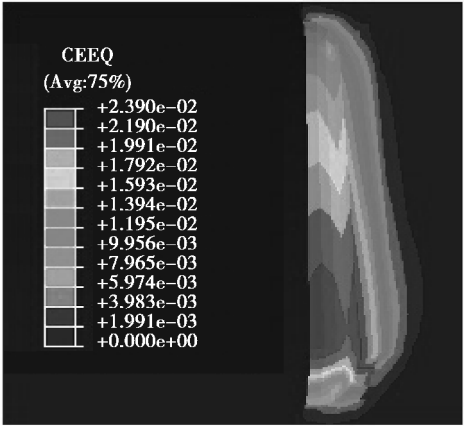


图 8 储气压力 5 MPa 时腔周蠕变云图
Fig. 8 Creep nephogram of cavity circum
(under pressure of 5 MPa)

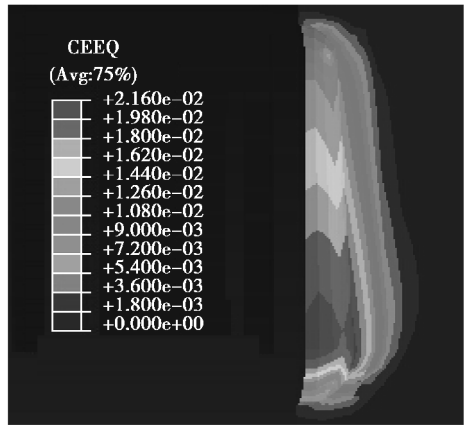


图 9 储气压力 10 MPa 时腔周蠕变云图
Fig. 9 Creep nephogram of cavity circum
(under pressure of 10 MPa)

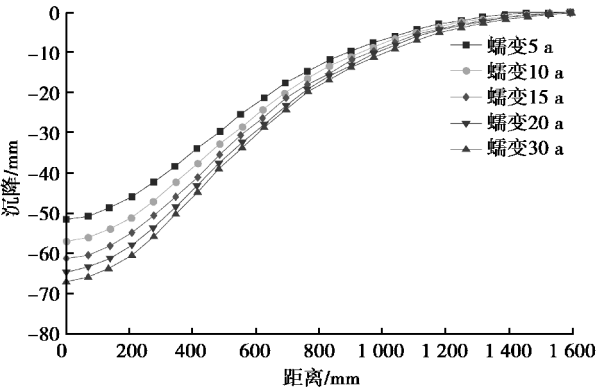


图 10 储气压力 5 MPa 时的沉降曲线图
Fig. 10 Curves of sedimentation (under pressure of 5 MPa)

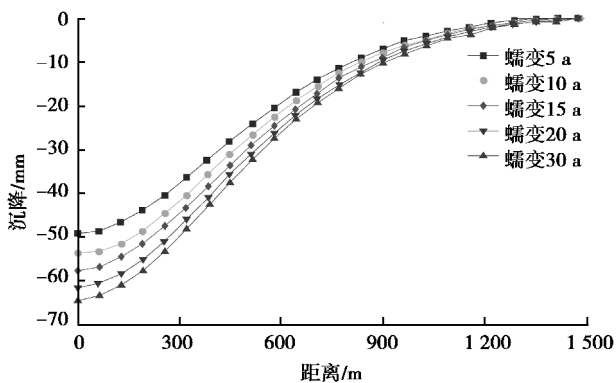


图 11 储气压力 10 MPa 时的沉降曲线图

Fig. 11 Curves of sedimentation (under pressure of 10 MPa)

2.1.3 不同埋深时地面沉降分析

埋深也是影响储气库地面沉降的因素,实际工程中由于盐岩层的埋藏深度不一,不同地区具有较大差别,因此也有必要对不同埋深情况下的储气库地面沉降规律进行相应的研究。为了确定埋深的影响效果,又分别建立了埋深为 600 m 和 1 800 m 的模型,进行沉降计算分析。此时溶腔体积设置为 40 万 m^3 ,储气压力设置为 10 MPa。埋深为 1 200 m 时的沉降曲线图如图 11,埋深为 600 m 和 1 800 m 时的沉降曲线图如图 12 和图 13。通过对比分析 3 种不同埋深情况下的沉降曲线图可以发现,埋深为 600 m、1 200 m、1 800 m 时,蠕变时间 30 a 情况下储气库中心点的沉降量分别为 67.5 mm、64.4 mm、52.6 mm,而对应的沉降影响范围分别为 1 176 m、1 475 m、1 916 m。沉降曲线随着储气库埋深的不断增加,储气库中心点的沉降量不断减小,而沉降影响范围却有所增加,这表明埋深的增加使得沉降传递到地表的作用得到了削弱,较大的覆盖层厚度有利于较小地面沉降。另外,3 种不同埋深情况下蠕变 30 a 时的沉降曲线图如图 14 所示,图中可以更直观地显示不同埋深时储气库地面沉降的变化规律。埋深较小时,中心点的沉降量较大,而影响范围较小,因此沉降曲线较陡。随着埋深的逐渐增加,中心点的沉降逐渐减小,而沉降影响范围逐渐增加,因此沉降曲线逐渐变缓。

2.2 双腔储气库沉降计算

2.2.1 模型建立

双腔沉降计算时采用体积为 40 万 m^3 的溶腔,埋深为 1 200 m,储气压力为 10 MPa,蠕变时间同样设置为 5 a、10 a、15 a、20 a、30 a。由于要分析不同溶腔间距对储气库沉降的影响作用,分别建立溶腔间距为 1 倍、1.5 倍和 2 倍最大直径(即 60 m、

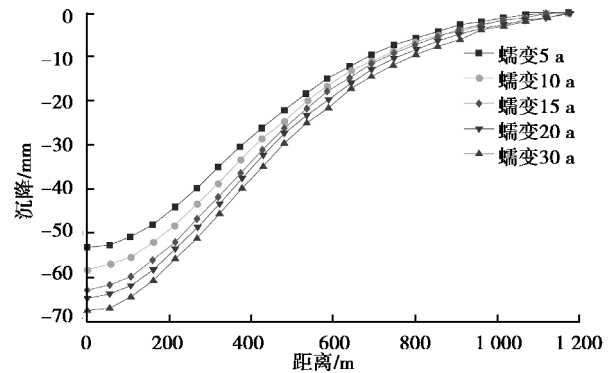


图 12 埋深 600 m 时沉降曲线图

Fig. 12 Curves of sedimentation at depth of burial of 600 m

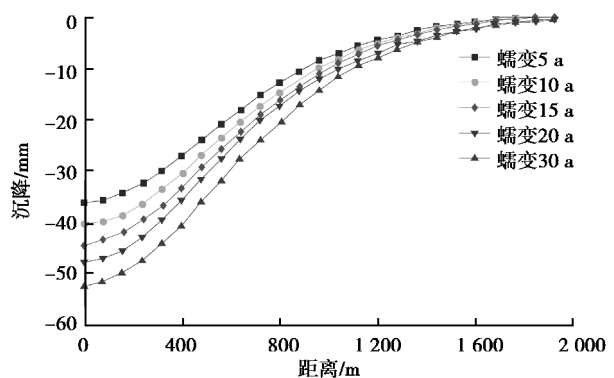


图 13 埋深 1 800 m 时沉降曲线图

Fig. 13 Curves of sedimentation at depth of burial of 1 800 m

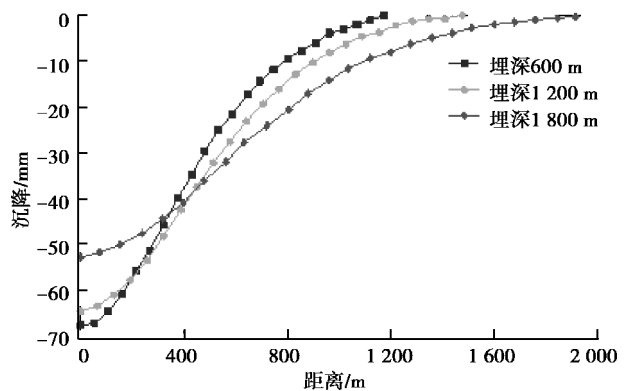


图 14 不同埋深时沉降曲线对比图

Fig. 14 Comparison of different depth of burial sedimentation curves

90 m 和 120 m) 的溶腔模型。数值模型底面尺寸依然采用 3 000 m \times 3 000 m,上覆泥岩层厚度为 1 200 m,中间盐岩层厚度为 300 m,下部泥岩底板的厚度为 300 m。由于双腔模型具有轴对称的性质,因此可以取整个模型的一半进行数值计算分析,材料参数与单腔时采用的参数一样,数值计算模型如图 15 所示。首先进行不同溶腔间距下的计

算分析,确定合理的溶腔间距之后再研究不同储气压力下的沉降规律。

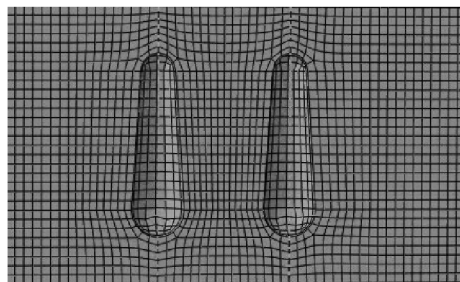


图15 双腔模型网格划分图

Fig. 15 Graticule division graph of double cavities mode

2.2.2 不同腔距和储气压力时地面沉降分析

储气库溶腔间距是储气库建设时需要考虑的重要指标之一,关系到储气库相互之间的稳定性。两个溶腔的对称中心为沉降中心点,沿剖面与模型上表面交线方向的单元节点记录沉降数值。不同溶腔间距情况下蠕变30 a之后的地面沉降曲线如图16所示,沉降曲线的变化趋势与单腔时一致,均呈现S形。图中曲线也表明,不同间距时的沉降曲线基本重合,说明在1200 m埋深的情况下溶腔间距的变化对地面沉降的影响不大,沉降的差异经过上覆岩体的传递作用到达地面之后变得比较微弱。

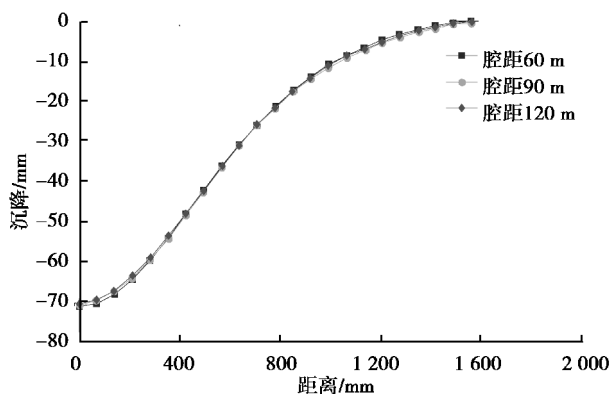


图16 不同腔距时地面沉降曲线

Fig. 16 Curves of sedimentation of different distance of cavities

通过不同腔距情况下溶腔周围等效蠕变变形的扩展区域可以确定出合理的溶腔间距,蠕变时间为30 a时溶腔周围蠕变变形的发展情况如图17~19所示。蠕变发展的云图表明,在溶腔间距为60 m时,两个溶腔周围蠕变变形发展范围已经十分接近,溶腔之间的岩柱存在着贯通的可能,会造成岩柱的变形过大而破坏从而导致储气库的体积减缩严重甚至塌陷,因此溶腔间距为1倍最大直径

时不能保证溶腔之间岩柱的安全性。溶腔间距为90 m和120 m时,腔周蠕变的发展范围变化不大,但由于溶腔间距的增加,蠕变30 a之后溶腔之间存在着安全距离,间距90 m时有30 m的安全距离,间距120 m时有60 m的安全距离,没有出现蠕变区域接近贯通的情况。由于间距90 m时的安全距离依然有30 m(即为溶腔的最大半径),能够保证两个溶腔的安全,另外从经济的角度考虑,间距120 m有些过大,不能充分利用地下空间资源。因此,选取溶腔间距90 m(即1.5倍最大溶腔直径)是比较合理的。

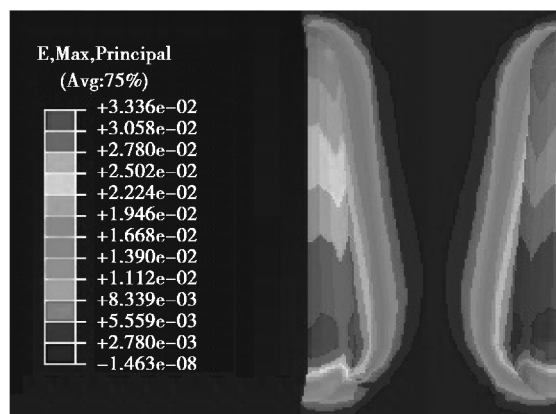


图17 腔距60 m时蠕变变形云图

Fig. 17 Creep nephogram of cavity distance of 60 m

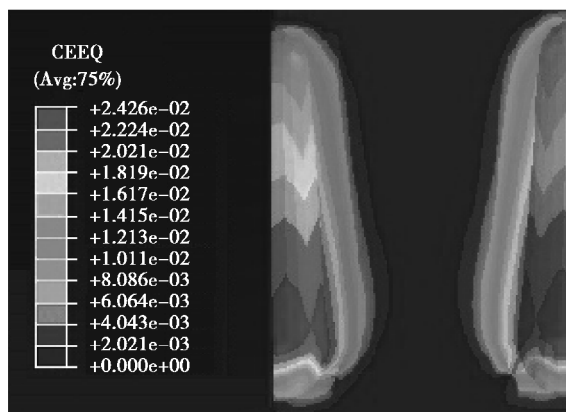


图18 腔距90 m时蠕变变形云图

Fig. 18 Creep nephogram of cavity distance of 90 m

另外,在不同储气压力的情况下,沿沉降数据记录路径上的沉降变化曲线如图20和图21所示。由图中可以看出,双腔情况下的沉降曲线变化趋势和单腔时基本一致,但不同的是此时沉降最大值在两个溶腔的中心点处,而不在溶腔顶部所对应的地面点。中心点沉降值比单个溶腔时要大,并且沉降的影响范围也要比单腔时大,储气压力5 MPa时

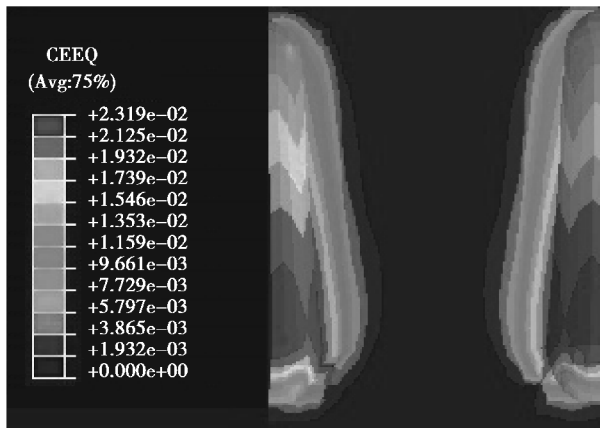


图 19 腔距 120 m 时蠕变变形云图

Fig. 19 Creep nephogram of cavity distance of 120 m

蠕变 30 a 之后中心点的沉降为 75 mm, 沉降影响范围为 1 562 m, 储气压力 10 MPa 时中心点沉降为 72 mm, 沉降影响范围为 1 500 m。可以看出, 储气压力不同时, 最大沉降量和沉降影响范围相差不大, 说明埋深较大情况下, 储气压力变化对地面沉降的影响效果得到很大程度的削弱。

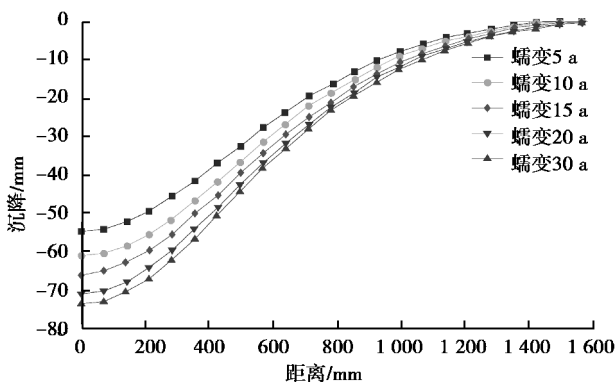


图 20 储气压力 5 MPa 时沉降曲线图

Fig. 20 Sedimentation curves of gas pressure at 5 MPa

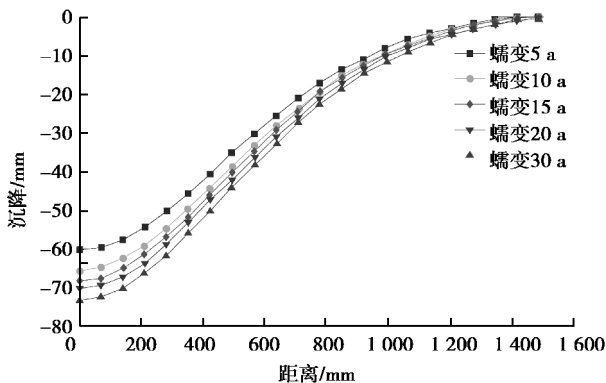


图 21 储气压力 10 MPa 时沉降曲线图

Fig. 21 Sedimentation curves of gas pressure at 10 MPa

2.3 群腔储气库沉降计算

2.3.1 模型建立

储气库的建设需要规模化才能体现其优越性, 也能更好地发挥其效益。因此, 有必要建立群腔模式的储气库, 研究其沉降分布和变化规律。鉴于计算机硬件计算能力有限, 本次模拟只建立 7 腔的模型, 由于溶腔分布的对称性, 分析时可以取 1/4 进行建模计算。为了保证储气库群的等间距性, 采用正六边形的布置方式, 溶腔平面分布示意图如图 22 所示。溶腔间距采用 1.5 倍的最大溶腔直径(即 90 m), 储气压力采用 10 MPa, 埋深为 1 200 m, 蠕变时间同样设置为 5 a、10 a、15 a、20 a、30 a, 材料参数与之前保持一致, 模型网格划分如图 23。

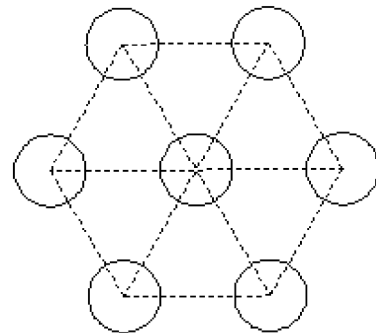


图 22 群腔模型平面分布示意图

Fig. 22 Map of exhibition of planar distribution of group cavities model

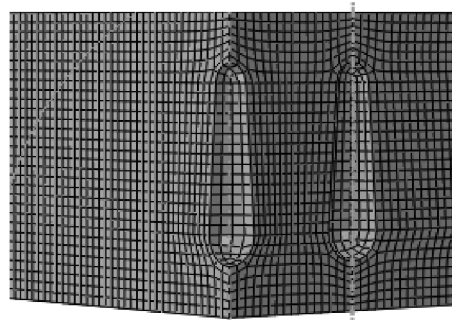


图 23 群腔模型网格划分图

Fig. 23 Graticule division graph of group cavities model

2.3.2 群腔沉降分析

群腔模型情况下, 以六边形中心所对应的地面点为中心点, 建立沉降数据记录坐标系。由 7 个溶腔组成的储气库群地面沉降曲线如图 24 所示, 图中沉降曲线表明, 群腔模型下地面沉降的变化曲线仍然呈现出 S 形, 与单腔和双腔不同的是此时沉降中心点是整个储气库群的中心点, 即处于六边形中心处溶腔顶点对应的地面点。由于不同溶腔的造

成的沉降相互叠加,再经过上覆岩层的传递削弱,地面沉降并没有体现出群腔的特征,沉降曲线的整体变化趋势与单腔和双腔模型时相同,但由于多个溶腔的沉降相互叠加,使得中心点的沉降比单腔和双腔时大很多,沉降的影响范围也有明显的增加,蠕变 30 a 之后中心点的沉降量达到 247 mm,沉降的影响范围达到 2 480 m。

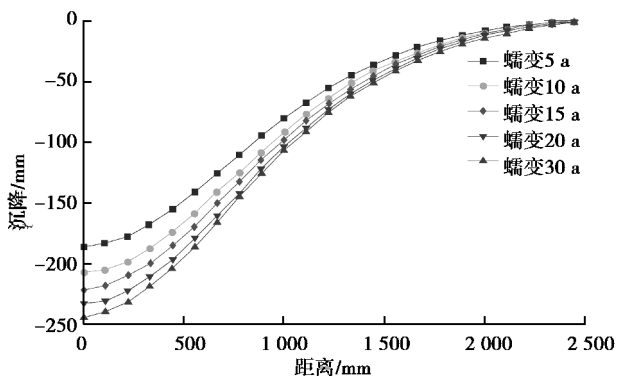


图 24 群腔模型地面沉降曲线

Fig. 24 Ground sedimentation curves of group cavities models

2.4 溶腔沉降综合分析

总体来说,单腔、双腔和多腔储气库的地面沉降变化趋势基本一致,都是在中心点处达到最大沉降量,距离中心点一定范围之内的沉降量与中心点较为接近,即为最大沉降区。随着距中心点距离的增加,沉降迅速的衰减至较小的值,这部分区域称为沉降衰减区。沉降衰减区之外区域的沉降量非常小,而且沉降曲线较为平缓,各点的沉降量比较接近并且逐渐趋近于零。3 种溶腔模型下均呈现出了明显的三阶段特征,说明不同工况下地面沉降的总体变化趋势是相似的。

就沉降的不同影响因素而言,随着溶腔体积的增加,中心点的沉降逐渐增大,沉降的影响范围增大;储气压力增大时中心点的沉降减小,同时沉降的影响范围减小;埋深增大时中心点的沉降减小,沉降影响范围增大,同时沉降曲线趋向于平缓。虽然 3 种溶腔模型情况下储气库地面沉降的总体变化趋势基本一样,但是随着单个溶腔数目的增加,中心点的沉降量有明显的增加,沉降的影响范围也增加较多。因此,对于实际工程中的储气库群来讲,溶腔数目是一项很重要的影响因素,必须结合地质情况来确定储气库群的合理溶腔数目。

参照金坛盐穴储气库沉降预测资料^[3],平顶山地区互层状盐岩储气库地面沉降量与之较为接近,最大沉降差仅为 10.8 mm,从沉降控制的角度看,地面沉降不会对储气库稳定性造成较大影响,工程建设具有可行性。

3 结论

盐岩储气库地表沉降由多种因素决定,本文以平顶山盐田储气库建设为背景,基于蠕变试验模型建立了单腔、双腔和群腔储气库计算模型,对不同体积、储气压力、埋深以及蠕变时间下的储气库沉降发展规律进行了数值模拟研究,得到主要结论如下:

(1)单腔储气库在不同工况下地面沉降变化曲线均呈现 S 形变化趋势。相同条件下,当体积增加时,中心点的沉降量增大,沉降影响范围增大;储气压力增加时,中心点的沉降量反而减小,沉降影响范围也相应减小;埋深增大时,中心点沉降量变小,但沉降影响范围增大。储气压力 10 MPa 时,40 万 m^3 储气库溶腔蠕变影响范围约为 30 m,蠕变 5 a、10 a、15 a、20 a、30 a 之后,中心点沉降分别为 49.21 mm、53.60 mm、57.70 mm、61.51 mm、64.44 mm,影响范围基本一致,约为 1 500 m。溶腔的体积和埋深一定时,储气压力的增加有利于控制地面沉降的发展,但压力过高容易破坏储气库围岩的稳定性与密闭性,本次研究中体积 40 万 m^3 埋深 1 200 m 的储气库压力应控制在 10~15 MPa 之间。

(2)双腔储气库在不同腔距时的蠕变变形与沉降分析表明,合理溶腔间距为溶腔最大直径的 1.5 倍(即 90 m)。也就是说,为保证库区地面的稳定,对井的水平间距应大于地下溶腔最大直径的 1.5 倍。储气压力为 5 MPa 和 10 MPa 时,蠕变 30 a 之后双腔中心点的沉降分别为 75 mm 和 72 mm,沉降影响范围分别为 1 562 m 和 1 500 m,说明当埋深较大时,储气压力的变化对地面沉降的影响不大,但最大沉降量和沉降影响范围比单腔大,地面沉降的中心点为两溶腔中点所对应的地面点。

(3)群腔储气库地面沉降曲线没有呈现出多个溶腔的特征,沉降中心点为储气库群中心所对应的地面点。7 溶腔储气库群在蠕变 30 a 之后中心点的沉降量达到 247 mm,沉降的影响范围达到 2 480 m。与单腔和双腔模型最大的区别是,群腔模式下中心点最大沉降量和沉降的影响范围都明显增大,说明溶腔个数的增加对储气库群的总体沉降具有较大影响。

参考文献(References)

- [1] 李建中. 石油战略储备的新领域——地下盐穴储库[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 4787-4789. (Li Jianzhong. A new field of petroleum strategic reserve: underground salt cavern repository [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,

- 2004, 23(2): 4787-4789. (in Chinese))
- [2] 黄耀先. 深埋盐岩储气库地表沉降的理论模型与数值模拟研究[D]. 重庆:重庆大学, 2012. (Huang Yaolian. Study on theoretical model and numerical simulation of surface subsidence caused by gas storage of salt rock [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012. (in Chinese))
- [3] 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(增1): 2705-2711. (Qu Danan, Yang Chunhe, Ren Song. Study and prediction of surface subsidence of salt rock caves used for gas storages in Jintan salt mine [D]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(1): 2705-2711. (in Chinese))
- [4] 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. (Li Yinping, Kong Fengjun, Xu Yulong, et al. Predication of surface subsidence above salt rock gas storage using Mogi model [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(9): 1739-1745. (in Chinese))
- [5] 丁国生, 张昱文. 盐穴地下储气库[M]. 北京:石油工业出版社, 2010. (Ding Guosheng, Zhang Yuwen. Salt rocks underground gas storage [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010. (in Chinese))
- [6] Bérest P, Bergues J, Brouard B. Review of static and dynamic compressibility issues relating to deep underground salt caverns [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 1999, 36(8): 1031-1049.
- [7] Forest S, Pradel F, Sab K. Asymptotic analysis of heterogeneous Cosserat media [J]. International Journal of Solids & Structures, 2001, 38(26-27): 4585-4608.
- [8] 王同涛, 闫相祯, 杨秀娟, 等. 考虑盐岩蠕变的盐穴储气库地表动态沉降量预测[J]. 中国科学: 技术科学, 2011, 41(5): 687-692. (Wang Tongtao, Yan Xiangzhen, Yang Xiujuan, et al. Dynamic subsidence prediction of ground surface above salt cavern gas storage considering the creep of rock salt [J]. Science China: Technology Science, 2011, 41(5): 687-692. (in Chinese))
- [9] 任松, 姜德义, 杨春和. 盐穴储气库破坏后地表沉降规律数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3595-3601. (Ren Song, Jiang Deyi, Yang Chunhe. Numerical simulation research on ground subsidence after salt cavern gas storage collapsing [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3595-3601. (in Chinese))
- [10] 刘健, 宋娟, 张强永, 等. 盐岩地下储气库群间距数值计算分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 3413-3419. (Liu Jian, Song Juan, Zhang Qiangyong, et al. Numerical calculation and analysis of distance among underground gas storage caverns [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(2): 3413-3419. (in Chinese))
- [11] 张宁, 张强勇, 向文, 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(2): 3756-3762. (Zhang Ning, Zhang Qiangyong, Xiang Wen, et al. Calculation and analysis for failure risk probability of ground settlement on area of salt rock underground gas storage [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(2): 3756-3762. (in Chinese))
- [12] 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): 133-138. (Ren Song, Jiang Deyi, Yang Chunhe, et al. Study on a new probability integral 3D model for forecasting solution mining subsidence of rock salt [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(1): 133-138. (in Chinese))
- [13] 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): 58-62. (Chen Feng, Yang Chunhe, Bai Shiwei. 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): 58-62. (in Chinese))
- [14] 王志荣, 张利民, 韩中阳. 平顶山盐田互层状盐岩蠕变特性与试验模型研究[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(5): 125-129. (Wang Zhirong, Zhang Limin, Han Zhongyang. A study of the properties and the test model of the inter bedded salt rock in Pingdingshan salt field [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2014, 41(5): 125-129. (in Chinese))
- [15] 王志荣, 李亚坤, 张利民, 等. 薄层状盐岩地下储气库工程地质条件及可行性分析[J]. 工程地质学报, 2015, 23(1): 148-154. (Wang Zhirong, Li Yakun, Zhang Limin, et al. Analysis of the feasibility and engineering geology condition of underground gas storage in thin salt rock [J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(1): 148-154. (in Chinese))
- [16] 王志荣, 王泉更, 石茜茜, 等. 基于生长曲线的互层状盐岩储气库地表沉降预测[J]. 工程勘察, 2016, 44(5): 1-5. (Wang Zhirong, Wang Quangeng, Shi Xixi, et al. Prediction of surface subsidence of gas storage of inter-bed layered salt rock based on growth curve [J]. Geotechnical Investigation and Survey, 2016, 44(5): 1-5. (in Chinese))