

基于盐腔时效收敛特征的密集地下储气库群 地面变形动态预测

陈雨^{1,2} 李晓¹ 李守定¹

1.中国科学院地质与地球物理研究所·中国科学院工程地质力学重点实验室 2.中国科学院研究生院

陈雨等.基于盐腔时效收敛特征的密集地下储气库群地面变形动态预测.天然气工业,2012,32(9):80-84.

摘 要 盐岩具有显著的蠕变特性,盐腔在内外压力相互作用下表现出较明显的收缩性。为了掌握密集地下盐穴储气库群地面变形的动态发展规律,在综合考虑影响腔体收敛的多种时效因素(腔体水溶速率、体积收敛系数以及收敛传递率等)的基础上,对盐腔建腔期和运营期的腔体时效收敛函数进行了合理简化,基于腔体收敛传递假设,推导出腔体收敛传递函数,并结合地面沉降高斯分布规律和变形叠加原理,建立起一套较为完整的密集盐岩地下储气库群地面变形动态预测计算模型,提出了基于盐腔时效收敛特征的密集地下储气库群地面变形动态预测方法。实际应用结果表明:①地面沉降平均速率会随着时间的增加由大变小并逐渐趋于稳定;②地面计算点距离盐腔中心越近,初始沉降速率越大,其速率降低得越快。

关键词 密集 地下盐穴储气库群 地面变形 时效收敛变化 动态预测 收敛传递 水溶速率

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2012.09.019

盐岩以其极低的渗透率及良好的损伤自愈能力而被世界上诸多国家作为石油天然气战略储备的首选地质储存媒介,但另一方面,大量实验证明,即使在非常小的偏应力作用下,盐岩也具有十分明显的流变特性^[1],这必将影响到盐岩储库的长期稳定使用并且可能导致库区地质灾害的发生^[2-4]。

为了掌握密集地下储气库群地面变形动态发展规律^[5-9],在综合考虑影响腔体收敛的多种时效因素(腔体水溶速率、体积收敛系数以及收敛传递率等)的基础上,对两阶段的腔体时效收敛函数进行了合理简化,基于腔体收敛传递假设,推导出腔体收敛传递函数,并结合地面沉降高斯分布规律以及变形迭加原理,构建起一种较为完整的盐岩密集储气库区地面变形动态预计方法。

1 地面变形动态预测方法

地下盐穴储气库从建造到运营过程中时效收敛变化的因素较多,这给地面变形时效预测方法的建立造

成了较大的障碍。根据 Schober 和 Sroka^[10]提出的一种基于恒定收敛率的两阶段收敛模型,对腔体收敛函数进行了优化整合,并据此推导出腔体收敛变形的传递函数,从而得到了简便实用的地面变形动态预测公式。

1.1 腔体时效收敛

地下盐穴储库从建造到运营一般可分为两个阶段,分别称为建腔期和运营期(图 1)。基于上述理论模型,假定盐穴腔体溶蚀速率恒定,以便建立起腔体溶蚀与时效收敛之间的关系,简化后续推导过程。

根据图 1 可知,第一阶段为建腔期,以溶蚀作用为标志。在此阶段,假定盐腔以恒定速率进行溶蚀,则有:

$$V(t) = \frac{V_0}{T}t \quad (t \leq T) \quad (1)$$

式中 $V(t)$ 是腔体溶蚀体积, m^3 ; V_0 是腔体体积, m^3 ; T 是建腔持续时间, a ; t 是当前腔体溶蚀时间, a 。

根据该模型恒定收敛率的假设条件,建立以下腔体时效收敛关系^[11],式中腔体收敛体积的增量与当前

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(973 计划)(编号:2009CB724605,2010CB731501);国家自然科学基金资助项目(编号:41027001);中国科学院知识创新工程重要方向项目(编号:KZCX2-YW-JS102, YZ200912);中国地质调查局工作项目(编号:1212011220136)。

作者简介:陈雨,1984 年生,博士;主要从事油气地下储存与地质工程方面的研究工作。地址:(100029)北京市朝阳区北土城西路 19 号工程室。电话:15201211858。E-mail:jerry198491@126.com

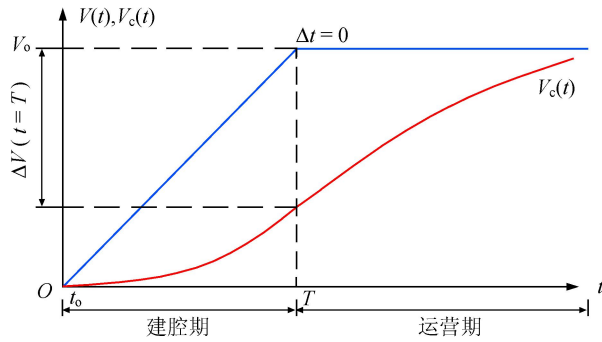


图1 简化后的两阶段收敛模型示意图

腔体收敛剩余体积呈正比：

$$\frac{\partial V_c(t)}{\partial t} = \zeta[V(t) - V_c(t)] \quad (2)$$

式中 $V_c(t)$ 是 t 时间的腔体收敛体积, m^3 ; ζ 是腔体收敛系数, a^{-1} 。

以上一阶线性非齐次微分方程的通解为：

$$V_c(t) = V(t) - \exp(-\zeta t) \int_0^t \frac{\partial V(\lambda)}{\partial \lambda} \exp(\zeta \lambda) d\lambda \quad (3)$$

考虑到该模型两个阶段中的腔体溶蚀速率不同,应分别计算两个阶段各自的腔体时效收敛体积。根据通解式(3),可求得 $t \leq T$ 时的腔体收敛体积表达式为：

$$V_c(t \leq T) = \frac{V_0}{T} \left[t - \frac{1}{\zeta} [1 - \exp(-\zeta t)] \right] \quad (4)$$

当 $t > T$ 时,造腔期结束,腔体溶蚀体积不再增加,即 $\frac{\partial V(t)}{\partial t} = 0$,式(3)不再适用。当 $t = T$ 时,腔体溶蚀体积本应达到 V_0 ,但由于收敛过程持续进行,故该时刻的腔体收敛后剩余体积应为：

$$\Delta V_0(t = T) = V_0 - V_c(t = T) \quad (5)$$

根据刘江^[9]等人的试验结果分析可知,盐腔建造完成后,就进入了稳定蠕变期,基于恒定收敛假设,在 $t > T$ 时,其蠕变收敛形式可以表示为以下幂指数关系：

$$\frac{V_{c2}(t > T)}{\Delta V_0} = 1 - \exp(-\zeta \Delta t) \quad (6)$$

$$V_c(t > T) = V_{c1} + V_{c2} \quad (7)$$

式中 V_{c1} 表示建腔结束时的腔体收敛体积, $V_{c1} = V_c(t = T)$, m^3 ; V_{c2} 表示建腔结束后的腔体收敛体积, m^3 ; $\Delta t = t - T$, a 。

由式(5)、(7)可以得到 $t > T$ 时腔体总收敛体积的表达式为：

$$V_c(t > T) = V_0 - \Delta V_0 \exp(-\zeta \Delta t) = V_0 \left[1 - \frac{1}{\zeta T} [\exp(-\zeta \Delta t) - \exp(-\zeta T)] \right] \quad (8)$$

1.2 腔体体积收敛传递

由于受到盐腔上覆岩层的影响,腔体体积收敛在传递过程中将会受到阻滞。因此,腔体体积收敛通过上覆岩层传递到地表的过程将会延迟。腔体体积收敛传递延迟效应主要与上覆岩体的性质有关,同一地区储库群各腔体体积收敛传递的延迟效应可视为近似相同。假定其传递率保持为常量,可建立如下传递函数关系^[11]：

$$\frac{\partial V_s(t)}{\partial t} = \eta [aV_c(t) - V_s(t)] \quad (9)$$

式中 $V_s(t)$ 是 t 时间的地面沉降体积, m^3 ; η 是传递率,表示地面沉降体积的增量与腔体体积收敛传递延迟的比值, a^{-1} ; a 是经上覆岩层传递损失后的实际传递收敛体积与收敛体积的比例,它的取值反映了不同岩性地层在实际收敛传递中形成的支撑折减作用,与地层结构和岩体性质有关,可利用现场监测数据反算求得。

式(9)的通解为：

$$V_s(t) = a \left[V_c(t) - \exp(-\eta t) \int_0^t \frac{\partial V_c(\lambda)}{\partial \lambda} \exp(\eta \lambda) d\lambda \right] \quad (10)$$

此时,若直接将式(4)、(8)代入式(10)进行求解,难以获得其解析解,失去了工程应用价值。因此,对式(4)、(8)进行合理的优化整合就显得尤为重要。

利用泰勒公式对冥指数函数进行展开得到以下表达式：

$$e^x = 1 + x + \frac{1}{2} x^2 + \frac{1}{6} x^3 + \dots + \frac{1}{n!} x^n + R_n(x) \quad (11)$$

通常情况下,腔体建造期一般为 3~5 a,而收敛系数 ζ 的取值根据国外现场监测实例一般取为 (0.01~0.02)/a,利用式(11)进行以下推导：

$$\exp(\zeta T) = 1 + \zeta T + \frac{1}{2} (\zeta T)^2 + \frac{1}{6} (\zeta T)^3 + \dots \quad (12)$$

$$\exp\left(\frac{1}{2} \zeta T\right) = 1 + \frac{1}{2} \zeta T + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} \zeta T\right)^2 + \frac{1}{6} \left(\frac{1}{2} \zeta T\right)^3 + \dots \quad (13)$$

对于以上展开式,因变量值较小,故取前 4 项作为近似表达式即可,得到以下表达式：

$$\frac{1}{\zeta T} [\exp(\zeta T) - 1] \approx \exp\left(\frac{1}{2} \zeta T\right) \quad (14)$$

根据式(14),式(8)可进行如下变换：

$$\begin{aligned} V_c(t > T) &= V_0 \left[1 - \frac{1}{\zeta T} [\exp(-\zeta \Delta t) - \exp(-\zeta T)] \right] = \\ &= V_0 \left[1 - \frac{1}{\zeta T} [\exp(\zeta T) - 1] \exp(-\zeta \Delta t) \right] = \\ &= V_0 \left[1 - \exp\left(\frac{1}{2} \zeta T\right) \exp(-\zeta \Delta t) \right] = \end{aligned}$$

$$V_0 \left[1 - \exp \left[- \zeta \left(t - \frac{1}{2} T \right) \right] \right] = V_0 [1 - \exp(\zeta' t)] \quad (15)$$

由此,得到式(8)的近似表达式(15)。根据德国某盐穴储库区长期现场监测数据^[12],选取如下计算参数: $V_0 = 200\ 000\ \text{m}^3$; $\xi = 0.01/\text{a}$; $T = 3\ \text{a}$ 。将式(4)、(8)、(15)进行对比,计算结果如表 1 所示。

表 1 两阶段腔体收敛体积对比计算结果表

时间/a		收敛体积占腔体总体积百分比	
t	t'	式(4)+(8)	式(15)
1.5	0	0.373%	0
3.0	1.5	1.485%	1.489%
5.0	3.5	3.436%	3.439%
8.0	6.5	6.290%	6.293%
10.0	8.5	8.145%	8.149%
15.0	13.5	12.625%	12.628%
30.0	28.5	24.796%	24.799%
50.0	48.5	38.428%	38.430%
100.0	98.5	62.655%	62.656%
150.0	148.5	77.349%	77.350%
200.0	198.5	86.261%	86.262%
300.0	298.5	94.946%	94.946%
400.0	398.5	98.141%	98.141%

通过对比以上计算结果,可以发现利用式(15)计算腔体收敛体积完全可以满足工程上对计算精度的要求;在盐腔溶蚀 $0.5\ T$ 内,可以利用公式(4)进行计算,以补充公式(15)的计算范围。

相比式(8),式(15)更加简洁,将其代入式(10)可以顺利求得任意时间的地面沉降体积:

$$V_s(t) = aV_0 \left[1 + \frac{\zeta}{\eta - \zeta} \exp(-\eta t') - \frac{\eta}{\eta - \zeta} \exp(-\zeta t') \right] \quad (16)$$

式(16)建立了腔体收敛体积与地面沉降体积之间的函数关系,据此,我们定义以下表达式为腔体时效收敛传递函数:

$$F(\zeta, \eta, t') = 1 + \frac{\zeta}{\eta - \zeta} \exp(-\eta t') - \frac{\eta}{\eta - \zeta} \exp(-\zeta t') \quad (17)$$

1.3 腔群地面沉降动态预测

欧洲厚型盐丘地层中建造的盐腔多以圆柱形为主,而我国盐岩多以层状为主,综合考虑稳定性和经济性,椭圆形腔体为最佳形式。盐穴开采地面沉降分布

形式一般符合高斯分布规律^[12],利用高斯积分公式可以推导出地面沉降量与地面沉降体积之间存在如下关系:

$$S_m(t) = \frac{V_s(t)}{r^2} \quad (18)$$

$$\tilde{r}^2 = r t r_b \quad (19)$$

式中 $S_m(t)$ 为 t 时刻最大沉降量; r_b 、 r 分别是溶腔顶部和底部的影响半径,且 $t = z \cot \gamma, \text{m}$ 。

将式(16)代入式(18),得出单腔收敛引起的地面沉降时空动态预测公式如下:

$$S(d, t) \approx S_m F(\zeta, \eta, t') \exp \left(-\pi \frac{d^2}{\tilde{r}^2} \right) \quad (20)$$

$$S_m = \frac{aV_0}{r^2} \quad (21)$$

式中 $S(d, t)$ 为距离腔体中心 d 处在 t 时刻的沉降量; S_m 为腔体中心处的最大沉降量; d 为计算点到腔体中心的距离。

同一储库区单一腔体沉降计算中各参数相互独立,可根据叠加原理,对多腔体库区地面沉降进行合理预测。

点 p_j 的沉降计算公式可由下式得出:

$$S_{p_j(x_j, y_j)}(t) = \sum_{i=1}^n S_{m_i} F(\zeta, \eta, t') \exp \left(-\pi \frac{d_i^2}{r_i^2} \right) \quad (22)$$

式中 $S_{p_j}(x_j, y_j)(t)$ 为点 p_j 在 t 时刻的沉降量; d_i^j 为点 p_j 到腔体之中心的距离。

1.4 地面沉降与水平变形关系

地面沉降与地面水平变形之间的对应关系可用下式表示:

$$dU = n \frac{d}{z} dS \quad (23)$$

在忽略腔体高度影响的前提下,得到腔体收敛引起的水平变形近似公式为:

$$U(d, t) = n \frac{d}{z} S_m F(\zeta, \eta, t) \exp \left(-\pi \frac{d^2}{r^2} \right) \quad (24)$$

式中 $U(d, t)$ 为腔体中心 d 处的点在 t 时刻的水平变形; $\tilde{z} = \sqrt{z_1 z_b}$, m ; n 表示水平变形影响系数,为了简化计算,一般 n 取值为 1。

1.5 参数 ζ 和 η 的理解

参数 ζ 和 η 的取值决定了预测结果的准确性,因此,有必要弄清楚这 2 个参数所代表的物理意义。图 2 给出了基于恒定收敛率下参数 ζ 和 η 的图解^[10]。

由图 2 可知,收敛系数 ζ 的倒数表示当腔体收敛体积达到当前腔体溶蚀体积时所需要的收敛时间;而传递率 η 的倒数则表示地面沉降体积达到腔体收敛传递体积时的时间延迟。

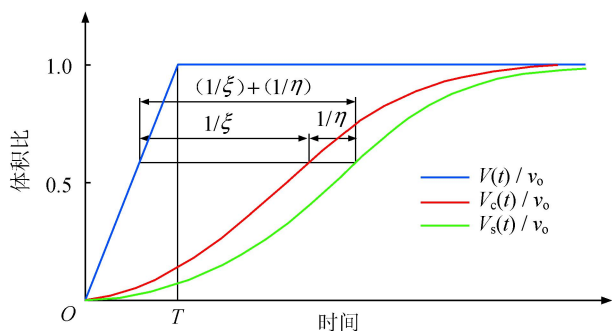


图 2 参数 ζ 和 η 含义解析图

2 地面沉降动态预测算例

2.1 单腔地面变形动态预测

对椭圆形单腔开采导致的地面沉降进行动态预测,参考德国同类型某盐穴储库区长期监测结果确定部分计算参数:盐层厚度为 214 m,上顶板厚度为 38 m,下底板厚度为 50 m,腔体的体积为 $2 \times 10^5 \text{ m}^3$,高径比取为 $7/3^{[13]}$, a 取值为 0.7, γ 取值为 40° , ξ 取值为 $0.0115/a$, η 取值为 $3/a^{[12]}$,建造周期(T)取值为 3 a,计算时长最长为 200 a。

利用公式(16)、(21),代入以上计算参数,可以得到该腔体从建造到使用的 200 a 各时间点处的地面沉降量与水平变形情况(图 3、4)。

图 5 为单腔收敛地面沉降平均速率变化图。由图 5 可知,地面沉降平均速率随着时间的增加由大到小变化并逐渐趋于稳定,从建腔完成到运营 50 a 的沉降量为 35.5 mm,几乎占运营 200 a 后总沉降量 74.8 mm 的一半。同时,地面计算点距离盐腔中心越近,初始沉降速率越大,其速率降低得越快。腔体收敛体积经地表向上传递的速率亦是由快到慢变化的。该算例中距离腔体中心 500 m 处为地面变形主要影响区域,50 a 最大水平变形值为 10.2 mm。

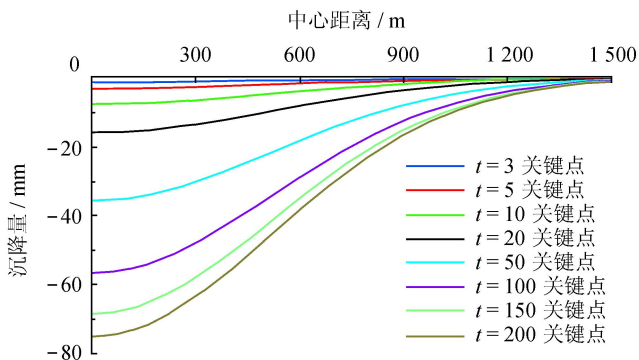


图 3 单腔收敛地面沉降动态预测图

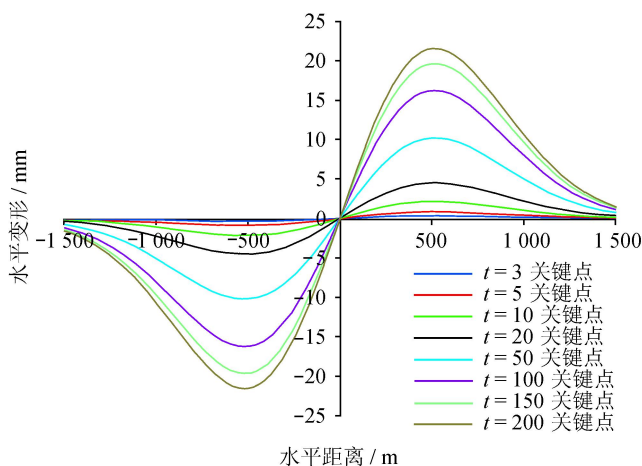


图 4 单腔收敛地面水平变形动态预测图

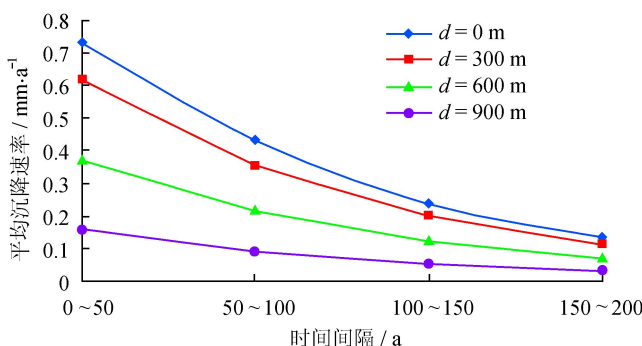


图 5 单腔收敛地面沉降平均速率变化图

2.2 库群地面沉降动态预测

为充分利用盐岩地层资源,提高库区综合利用经济效益,满足天然气高峰调节对储备量的要求,往往需要在相对狭小的空间区域建设尽可能多的地下储气腔。利用式(21)可以对密集储库群库区地面沉降变形进行时空预测。

以下算例根据我国当前建设运营中的金坛盐岩储库区部分腔体的实际平面布置情况,借用单腔开采预测中的计算参数,对图 6 所示储库群进行地面沉降动态预测^[6]。为简化计算,各腔体均采用相同体积和埋深值。

根据迭加原理,基于腔群地面沉降预测公式,利用 C++ 语言编写储库区沉降动态预测程序进行求解,预测结果如图 7 所示。

对比单腔和库群的沉降动态预测值可以发现,虽然单腔开采引起的地面变形尚不严重,但由于盐岩储库区多是由十几个甚至几十个规模较大的单腔组合而成,由于叠加效应导致的地面沉降量较单腔开采时将产生数量级的变化,其影响的严重性在储库区建造运营时不可忽视。

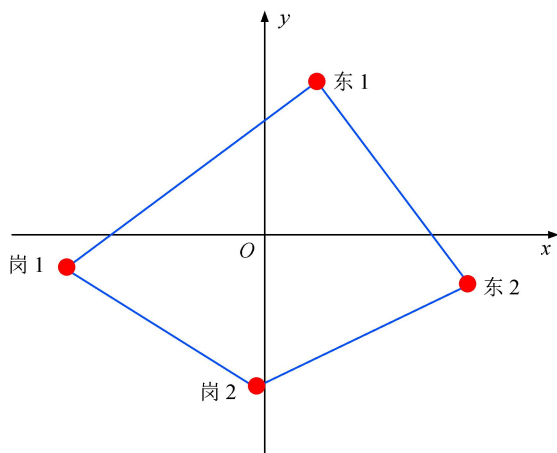
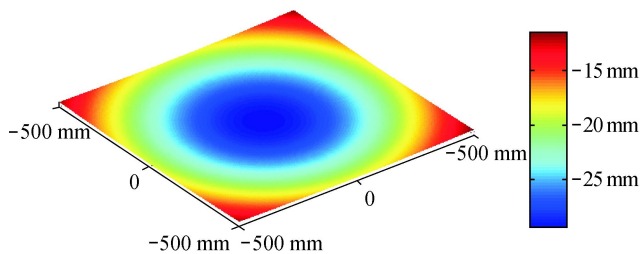
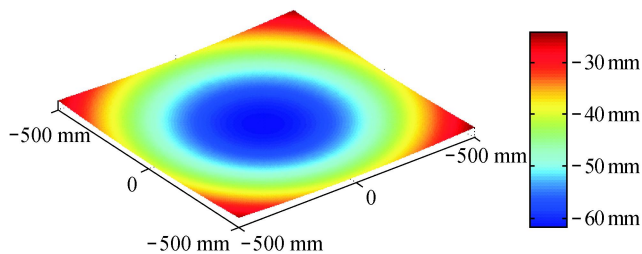


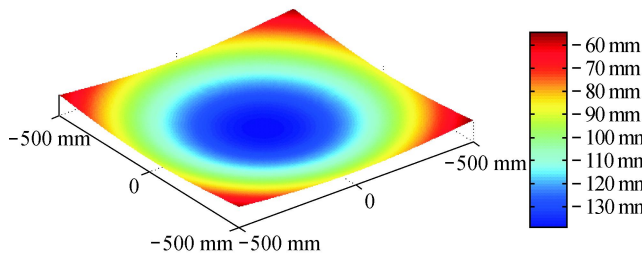
图 6 地面储气库区平面布置示意图



a. 盐腔储库区10 a地面沉降图



b. 盐腔储库区20 a地面沉降图



c. 盐腔储库区50 a地面沉降图

图 7 盐穴储气库区地面沉降时空变化三维图

3 结论

1)综合考虑了腔体建造运营时间、腔体时效收敛以及覆岩引起的腔体收敛体积传递延迟等多种因素,基于前人理论模型以及收敛变形连续传递假设,建立了一种简便可行的储库区地面变形动态预测方法。

2)通过算例可知,地面沉降平均速率随着时间的

增加由大到小并逐渐趋于稳定;距离盐腔中心越近,初始沉降速率越大,其速率降低得越快。考虑到收敛传递的连续性,可以认为腔体收敛亦是由快到慢并逐渐趋于稳定,与前人对腔体收缩规律的研究结论相符。

3)储库区规模对地面变形的影响非常明显,将导致沉降量数量级的变化,必须严格加以控制,避免其对储库区基础设施造成严重影响。

参 考 文 献

[1] 赵顺柳,杨骏六.用于存储的地下岩盐溶腔特性研究综述[J].中国井矿盐,2003,34(3):22-25.

[2] BEREST P, BROUARD B. Safety of salt caverns used for underground storage blow out; mechanical instability; seepage; cavern abandonment[J]. Oil & Gas Science and Technology, 2003, 58(3):361-384.

[3] THOMS R L, GEHLE R M. A brief history of salt cavern use[C]// Salt 2000, Solution Mining Research Institute, Keynote Address 7-11 May, 2000, The Hague, Clarks Summit; Solution Mining Research Institute, 1994:425.

[4] 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.

[5] 任松,姜德义,杨春和,等.岩盐溶解开采沉陷新概率积分三维预测模型研究[J].岩土力学,2007,28(1):133-138.

[6] 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(增刊1):2705-2711.

[7] 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.

[8] 丁国生,张保平,杨春和,等.盐穴储气库溶腔收缩规律分析[J].天然气工业,2007,27(11):94-100.

[9] 刘江,杨春和,吴文,等.盐岩蠕变特性和本构关系研究[J].岩土力学,2006,27(8):1267-1271.

[10] SCHOBER F, SROKA A. Die berechnung von bodenbewegungen über kavernenartigen hohlräumen unter beachtung der globalen volumenkonvergenz [D]. Clausthal: TU Clausthal, 1982.

[11] HOU Z M. Untersuchungen zum nachweis der stand-sicherheit fuer untertageponien im satzgebirge [D]. Clausthal: TU Clausthal, 1997.

[12] WALTER H, SROKA A, SCHOBER F. Die wirkung verschiedener konvergenzmodelle für zylinderförmige kavernen auf die übert? ige senkungsbewegung [J]. Das Markscheidewesen, 1983, 90(1):35-46.

[13] 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.

(修改回稿日期 2012-07-06 编辑 何 明)