

文章编号: 1000-7598(2009)12-3595-08

盐穴储气库破坏后地表沉陷规律数值模拟研究

任松¹, 姜德义¹, 杨春和^{1,2}

(1. 重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071)

摘要: 地下盐穴储气库在天然气调峰和保障供气安全上具有不可替代的作用。地下盐穴储气库达到设计年限后, 将报废而逐步垮塌, 必然引起严重的地表沉陷。因此, 对盐穴储气库破坏后地表沉陷规律进行研究具有十分重要的意义。考虑到目前的数值分析软件进行地表沉陷分析的不足, 开发了用于盐穴储气库破坏后地表沉陷数值模拟的有限元专用软件—2D-Sink, 该软件具有处理破碎岩块的能力。应用 2D-Sink 对盐穴储气库破坏后引起的地表沉陷规律进行了系统的研究, 共建立了 6 种模型进行数值模拟, 分别研究了地表沉陷层理效应、地表沉陷的岩层倾斜效应、地表沉陷的断层效应和多盐穴地表沉陷规律。对多溶腔地表变形曲线与单溶腔叠加的地表变形曲线进行比较, 验证了地表沉陷叠加原理的正确性。研究成果为盐穴储气库报废后地表沉陷灾害控制提供了理论基础。

关键词: 盐穴储气库; 地表沉陷; 破碎岩块; 2D-Sink

中图分类号: TE 122

文献标识码: A

Numerical simulation research on ground subsidence after salt cavern gas storage collapsing

REN Song¹, JIANG De-yi¹, YANG Chun-he^{1,2}

(1. Key Laboratory for the Exploitation of Southwestern Resources & the Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Salt cavern gas storage plays an irreplaceable role in shaving natural gas peak and ensuring the safety of gas supply. But when the design life of salt caverns gas storage is over, it will be discarded and finally collapse, which would cause serious ground subsidence. It is very important to find the rule of the ground subsidence. Considering the deficiency of the present numerical analysis software in analyzing the ground subsidence, 2D-Sink, the special software which is used in numerical simulation of the ground subsidence after the damage of the salt cavern gas storage has been developed. And the software has the function of dealing with the broken rock. Through operating the 2D-Sink, 6 numerical models are built. The rules of the bedding effect, rock inclined effect; fault effect and ground subsidence of multi-cavern have been studied. To compare the ground subsidence curves of multi-cavern with the superposition ground subsidence curves of single cavern, it is proved that the superposition principle of ground subsidence is correct. The research results can provide one of the basic theories for the control of ground subsidence disaster after the salt cavern gas storages have been discarded.

Key words: salt cavern gas storage; ground subsidence; broken rock; 2D-Sink

1 引言

盐穴地下储气库在天然气调峰和保障供气安全上具有不可替代的作用。近年来, 欧美国家都在不断加大地下盐穴储气库的建设力度, 增大储气量除了常规的调峰应急之外, 已经开始将盐穴储气库用于天然气的战略储备^[1-4]。我国在未来十年内, 将需要建设工作气量为 $240 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的地下储气库,

共计地下盐穴储气库 15~20 座^[5-6]。地下盐穴储气库达到设计年限后, 将报废而逐步垮塌, 必然引起严重的地表沉陷。地表沉陷将破坏地下和地面的建筑物、构筑物以及地下和地表水系, 影响生态环境^[7]。因此, 十分必要对盐穴储气库破坏后地表沉陷规律进行系统研究。

近年来, 随着有限元等数值计算理论不断发展, 用数值模拟方法来研究地表沉陷问题成为可能。

收稿日期: 2009-08-12

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)(No. 2009CB724606); 国家自然科学基金资助项目(No. 50674108); 国家创新研究群体基金(No. 50621403)。
第一作者简介: 任松, 男, 1975 年, 博士, 副教授, 从事岩土工程力学方面的教学和科研工作。E-mail: rs_rwx@tom.com

许多学者在这方面做出了不少有益的尝试。如孙学阳等应用 Flac3D 研究了褶皱构造对开采沉陷的控制作用^[8]; 辽宁工程技术大学的唐又驰等采用 Ansys 有限元分析软件对姚桥煤矿西六采区开采沉陷进行了数值分析及预测^[9]。

盐穴储气库顶板岩层破坏垮塌后的破碎岩块堆积会对上部岩层给予一定的支撑力, 因此, 要求有限元程序具有处理破碎岩块支撑力的能力。这对目前的有限元程序来说还是一个很大的难题。因此, 在应用有限元软件进行地表沉陷分析时一般采用预先设定破碎带和裂隙带的方法来解决这一问题。破碎带和裂隙带的预先设定一般根据经验进行, 会造成很大的误差^[10-12]。

考虑到目前的数值分析软件进行地表沉陷分析的不足, 本文开发了用于盐穴储气库破坏后地表沉陷数值模拟的有限元专用软件—2D-Sink, 该软件具有了处理破碎岩块的能力。然后应用 2D-Sink 对盐穴储气库破坏后地表沉陷规律进行了系统研究。本文共建立了 6 种模型进行数值模拟, 分别研究了地表沉陷层理效应、地表沉陷的岩层倾斜效应、地表沉陷的断层效应和多盐穴地表沉陷规律。对多溶腔地表变形曲线与单溶腔叠加的地表变形曲线进行比较, 验证了地表沉陷叠加原理的正确性。研究成果为盐穴储气库报废后地表沉陷灾害控制提供了理论基础。

2 2D-Sink 简介

2.1 2D-Sink 主要功能

2D-Sink 基于 Windows 平台, 采用 VC6.0 开发完成, 是一种专用于地表沉陷研究的二维有限元分析工具, 具备了以下几点特点:

(1) 全可视化前处理程序, 提供了 6 节点三角形单元、8 节点四边形单元和 6 节点非线性接触单元, 可以方便地建立各种需要的模型, 设定复杂的边界条件, 自动剖分网格并进行合理的优化;

(2) 全可视化后处理程序, 可以方便地查看各种等值曲线、云图、矢量图, 以及能够方便输出任意节点的各种数据, 这对形成地表沉陷的各种变形曲线很重要;

(3) 软件具备多工况处理能力, 能够模拟盐穴的溶蚀过程。多工况的设置十分方便, 溶蚀步数没有限制;

(4) 软件采用增量法, 实现了材料非线性处理, 能够计算材料塑性变形问题;

(5) 有限元中线性方程组的求解, 占很多时间,

2D-Sink 采用等带宽储存的 LU 分解算法, 使软件的分析计算速度大为提高;

(6) 构建了非线性接触单元, 可以模拟层理面、裂隙及断层等不连续面;

(7) 采用固定网格法^[13], 实现渗流等效荷载的计算, 使软件能够处理盐穴卤水渗流问题;

(8) 在有限元分析过程中引入了损伤变量和单元破坏判断条件, 可以分析岩块的损伤破坏过程;

(9) 采用删除破碎单元和弹性加载的方法, 实现了开采沉陷中破碎岩块的模拟。

以上最后 3 点功能是进行地表沉陷数值模拟所不可缺少的功能。

2.2 2D-Sink 垮塌破碎岩块充填效果模拟

盐穴储气库破坏后, 破碎岩块将充填盐穴。破碎岩块的体积始终大于原体积, 因此, 当破碎岩块充满盐穴和垮塌区后, 就能对上面的岩层产生支撑作用, 限制上部岩层的进一步下沉。也就是说, 对于给定的盐穴, 地表的下沉值是有限的, 用 W_0 表示地表最大下沉值, 则:

$$W_0 = mq \cos \alpha \quad (1)$$

式中: m 为盐穴高度; q 为下沉系数, 由上覆岩层的岩性决定; α 为岩层倾角。

然而, 在有限元中垮塌岩块难以模拟, 上覆岩层失去垮塌破碎岩块的支撑将导致无限下沉, 使整个模型的模拟计算不收敛。因此, 必须采用一定的办法来模拟垮塌岩块的支撑力。一般的做法是, 在建立模型时, 就确定好破碎带, 显然, 这一方法有很多不足之处。主要表现在, 在模拟计算之前, 凭借经验确定的破碎带会有很大的误差。

本文采用以下方法解决这一问题: 在整个模拟计算过程中不断地记录垮塌单元体积, 当满足式(2)时, 认为垮塌破碎岩块充满采空区, 可以向上覆岩层提供支撑。

$$V_p k = V_k + V_p \quad (2)$$

式中: V_p 为垮塌单元体积; k 为垮塌岩块的碎胀系数, 大于 1; V_k 为盐穴体积。

垮塌破碎岩块的支撑力采用在盐穴边界上加弹性约束的方法来实现。垮塌破碎岩块是一种松散介质, 宏观上, 它对顶板支撑的力学作用可以近似地用弹性支撑体表述。需要考虑的是垮塌破碎岩块本身在覆岩作用下将逐步被压实, 材料的密度 ρ 、弹性模量 E 和泊松比 μ 随时间而增加。本文采用以下经验公式来反映上述参数的变化规律^[14]:

$$\left. \begin{aligned} \rho &= 1\,600 + 800(1 - e^{-1.25t}) \\ E &= 15 + 175(1 - e^{-1.25t}) \\ \mu &= 0.05 + 0.2(1 - e^{-1.25t}) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中： ρ 为材料的密度 (kg/m^3)； E 为弹性模量 (MPa)； μ 为泊松比； t 为时间 (年)。

3 盐穴储气库破坏后地表沉陷规律研究

本文参照某盐矿的实际地层情况，对盐穴储气库破坏后地表沉陷问题进行有限元数值模拟，以期

获得地表沉陷的一般规律，为盐穴储气库报废后地表沉陷灾害控制提供理论基础。

3.1 地层条件及力学参数

在进行模型构建时，将上覆岩层中岩性基本一致、下沉变形连续协调的岩层进行了复合处理。复合处理后形成 7 个复合岩层，其力学参数见表 1。

各复合岩层的物理力学参数根据复合岩层中各组分岩层的物理力学参数按其厚度进行加权平均处理计算获得。

表 1 计算模型所用的岩石物理和力学参数
Table 1 Parameters of physico-mechanical properties of rocks

岩层	弹性模量 / MPa	泊松比	凝聚力 / MPa	内摩擦角 / (°)	重度 / (kN/m^3)	单轴抗拉强度 / MPa	孔隙率 / %	水平渗透系数 / ($\mu\text{m/d}$)	垂直渗透系数 / ($\mu\text{m/d}$)
1 底板	5 300	0.220	17.50	48.3	26.5	16.90	2.4	7.4	6.2
2 盐岩	830	0.450	4.78	26.0	21.5	0.83	0.3	6.3	4.3
3	5 800	0.233	8.47	44.2	27.2	11.30	1.3	4.7	3.5
4	7 000	0.256	14.30	43.7	26.7	9.03	2.4	6.8	3.9
5	5 600	0.210	8.11	43.3	27.3	10.80	4.5	1.3	9.4
6	7 730	0.178	10.33	42.1	27.0	8.80	5.6	3.6	2.3
7 表土	20	0.300	0.20	18.0	18.0	0.02	2.3	4.7	5.8

即

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n x_i h_i}{\sum_{i=1}^n h_i} \quad (4)$$

式中： x_i 为相应复合岩层中第 i 分层的某物理力学参数在该复合岩层的加权平均值； h_i 为相应复合岩层中第 i 分层的厚度； n 为相应复合岩层中所包含的地质自然分层数。

3.2 模型建立

本文共建立了 6 种模型进行数值模拟研究。为研究层理对地表沉陷的影响，建立了一种不考虑层理的单盐穴模型；为了研究不同倾角岩层的地表沉陷规律，分别建立了 0° 、 15° 、 30° 3 种倾角岩层单盐穴模型；为了研究断层对地表沉陷的影响，建立了一种含有断层的模型；为了研究大范围多盐穴破坏的地表沉陷规律，建立了一种多盐穴模型。在这些模型中，后 5 种都考虑了层理面。

(1) 模型尺寸及网格划分

模拟地表沉陷规律必须模拟整个上覆岩层。因此，单盐穴模型的宽度为 2 000 m，高度为 690 m；多盐穴模型的宽度为 2 800 m，高度为 690 m。

网格的布置从盐穴中心向四周逐渐变疏。单盐穴模型盐穴布置在模型盐层中心，最大跨距 180 m；多盐穴模型共在盐岩层等间距分布 4 个盐穴，盐穴间距为 110 m，盐穴跨距为 180 m。模型网络划分

见以下图 1~5。

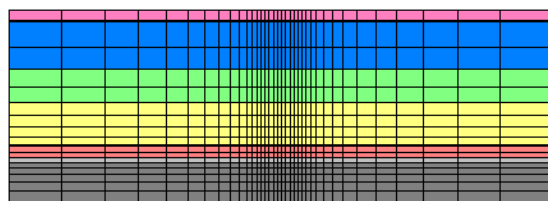


图 1 水平岩层单盐穴网格模型

Fig.1 The grid of single cavern model for horizontal terrane

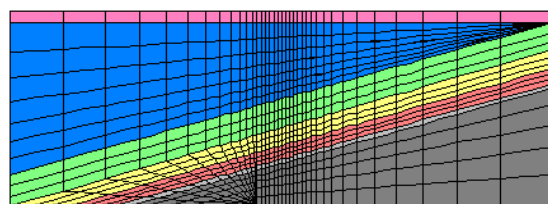


图 2 15° 倾角岩层单盐穴网格模型

Fig.2 The grid of single cavern model for 15-degree terrane

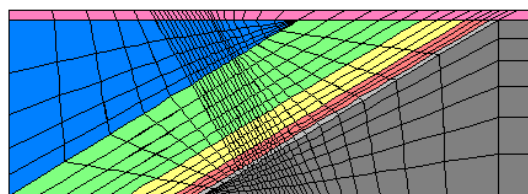


图 3 30° 倾角岩层单盐穴网格模型

Fig.3 The grid of single cavern model for 30-degree terrane

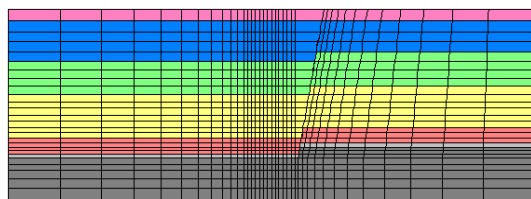


图4 断层单盐穴网格模型

Fig.4 The grid of single cavern model with fault

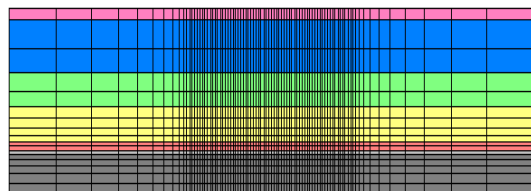


图5 多盐穴网格模型

Fig.5 The grid of multi-cavern

(2) 边界条件

由于计算模型模拟全高,模型上边界是地表为自由边界;模型左右两边离盐穴很远,盐穴破坏对其水平位移的影响可以不计,因此,对这两边加上水平方向固定约束;盐穴破坏对模型下边界的垂直位移影响可以不计,因此,下边界加上垂直方向固定约束。盐穴破坏盐穴内有水压,会对盐穴顶板提供一定的支护作用,因此,在盐穴壁上加上水压。模型边界条件见图6。

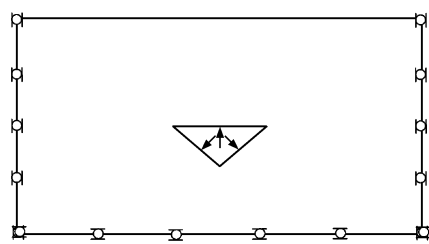


图6 模型边界条件

Fig.6 The boundary condition of model

(3) 断层处理

断层一般处理为断层带,用弱介质模型进行模拟。本文主要研究断层对地表沉陷的影响,直接将断层处理为不连续界面,用非线性接触单元进行模拟。

(4) 破碎岩块充填效果模拟参数的确定

本文数值模拟研究盐穴垮塌后地表的最终变形情况,因此,破碎岩块将达到最大压缩状态,由顶板岩层为较坚硬岩石,查表得式(2)中碎胀系数 k 取值为1.35,式(3)中的 t 取无限大,即 $\rho = 2.4 \text{ g/cm}^3$, $E = 190 \text{ MPa}$, $\mu = 0.25$ 。

(5) 盐穴溶蚀过程

根据相同地质条件下盐穴顶板完全破坏、盐穴报废时盐穴的最大顶板跨距,每个盐穴分3步进行溶蚀,即3个开挖步,每步溶蚀60 m,共溶蚀180 m,溶蚀角为 45° 。图7为模型分3步溶蚀后形成的盐穴。

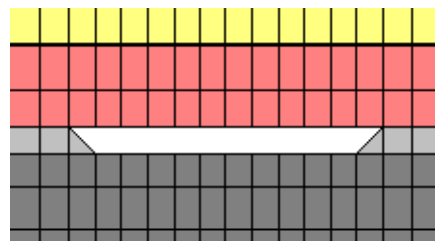


图7 盐岩分步溶蚀形成盐穴

Fig.7 The cavern resulting from the multi-stage excavation

3.3 数值模拟结果分析

3.3.1 地表沉陷层理效应分析

层理是上覆岩层中的软弱薄层,是两个岩层之间的交接面,其力学性质较岩层本身要差很多。在进行有限元分析时,如果不考虑层理,两个相邻岩层将固接在一起,必须满足连续变形;而实际情况是,在盐穴破坏过程中,将会在上覆岩层的某些层理间产生滑动或分离(离层),使相邻的两岩层不满足连续变形条件,这样不可避免地造成计算误差。其中离层的现象在数值分析中都可直观看到(图8)。因此,在进行有限元数值模拟时必须考虑层理。

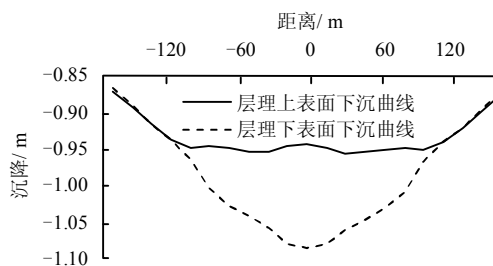


图8 开挖过程中离层的产生

Fig.8 The absciss layer during excavation

数值模拟结果表明,层理对地表沉陷影响十分显著,用有限元模拟地表沉陷时,是否考虑层理,对预测精度有很大影响。在同样的地层和溶蚀条件下,考虑层理模拟计算的地表最大下沉值和最大水平位移分别为0.181 m和0.073 m,而不考虑层理的计算结果分别为0.158 m和0.055 m。表2列出了两种情况下3个工况步的最大垂直和水平位移。可以看到,随着开挖宽度的增加,层理的影响会越严重,不考虑层理将会导致模拟出现较大误差。

表 2 考虑层理和不考虑层理时的最大下沉值和最大水平位移值(单位: m)

Table 2 The max vertical and the max horizontal displacements of the model with bedding and the model without bedding (unit: m)

考虑因素	第 1 步		第 2 步		第 3 步	
	下沉值	位移值	下沉值	位移值	下沉值	位移值
考虑层理	0.032	0.013	0.097	0.039	0.181	0.073
不考虑层理	0.029	0.011	0.085	0.032	0.158	0.055

地表沉陷的层理效应可以解释如下:

上覆岩层中的层理改变了其整体刚度, 如果没有层理, 上覆岩层相当于几个岩层粘合在一起组成一个厚度较大的梁或板, 由于其厚度大, 所以刚度很大, 刚度大的厚硬岩层在岩层移动的发展过程中起着至关重要的作用, 它的弯曲、稳定或断裂在很大程度上决定了地表下沉值的大小。因此, 在弹性模量取值合理的条件下, 用不设置层理的有限元计算模型得到的地表下沉值总是远小于工程实测值。设置层理以后, 相当于原来刚度大的岩梁被层理面分隔成几个刚度较小的岩梁, 刚度小了, 在相同的条件下, 就会产生更大的挠度或更易于失稳破坏, 地表下沉值也相应增大。

3.3.2 地表沉陷倾斜效应分析

图 9~11 分别为 0° 、 15° 和 30° 倾角岩层地表地表下沉曲线和水平位移曲线图。

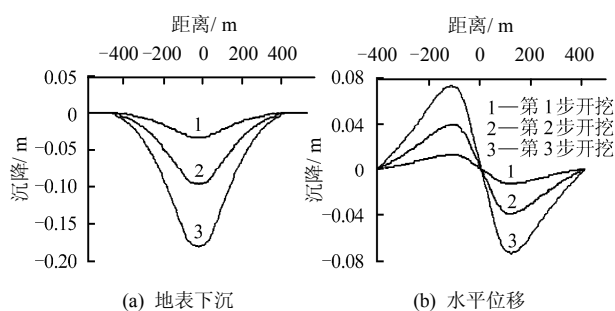


图 9 水平岩层地表下沉和水平位移曲线

Fig.9 The vertical and horizontal displacement curves of horizontal terrane

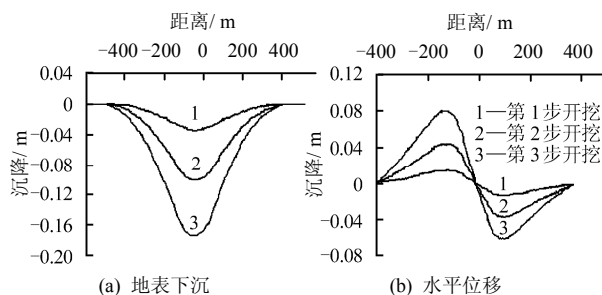


图 10 15° 倾角地表下沉和水平位移曲线

Fig.10 The vertical and horizontal displacement curves of 15-degree terrane

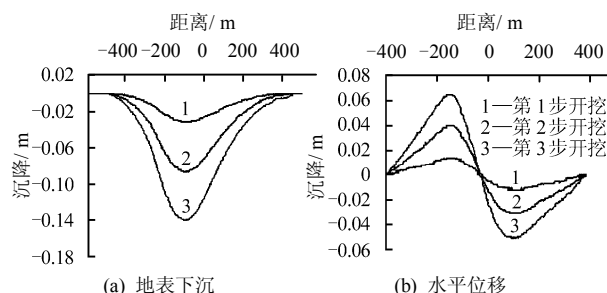


图 11 30° 倾角地表下沉和水平位移曲线

Fig.11 The vertical and horizontal displacement curves of 30-degree terrane

从图可以明显看出, 地表最大下沉值位置向下山方向偏移, 15° 模型 3 步溶蚀的偏移量分别为 8.06、16.13、24.19 m; 30° 模型 3 步溶蚀的偏移量为 83.3、89.74、96.15 m。可见顶板跨距的增大或岩层倾角的增大, 都将导致偏移量的增加; 水平位移在下山方向的最大值比上山方向大, 15° 模型 3 步开挖分别相差 0.002、0.004、0.018 m; 30° 模型 3 步开挖分别相差 0.015、0.022、0.028 m。可见顶板跨距增大或倾角增大, 都将导致差值的增加。 15° 模型的最大下沉值为 0.175 m, 最大水平位移值为 0.080 m; 30° 模型的最大下沉值为 0.140 m, 最大水平位移值为 0.108 m, 可见随着岩层倾角的增加, 地表最大下沉值将减小, 而地表最大水平位移值将增加。

3.3.3 地表沉陷断层效应分析

图 12 为含有断层的模型地表下沉曲线和水平位移曲线图。

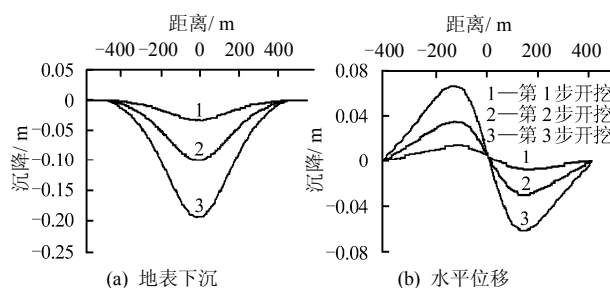


图 12 断层模型地表下沉和水平位移曲线

Fig.12 The vertical and horizontal displacement curves of the model with fault

可以看到, 断层对地表沉陷的影响十分显著。3 步溶蚀的地表最大下沉值分别为 0.033、0.099、0.194 m; 地表最大水平位移值在无断层方向为 0.013、0.035、0.067 m, 有断层的方向为 -0.007、-0.03、-0.062 m, 两边有一定差值, 有断层方向的水平位移较小。与无断层水平模型相比, 断层引起地表下沉值增大, 水平位移值减小。同时断层的存

在使地表最大下沉点向无断层方向偏移,水平位移的0点向无断层方向偏移,也就是说在有断层的一边,地表影响范围要大一些。随顶板跨距的增加,水平位移的0点也向无断层方向偏移。

3.3.4 多盐穴地表沉陷规律分析

图13为4个盐穴破坏时形成的地表下沉曲线和水平位移曲线,可见其形状与单盐穴破坏时相似,只是数值大得多。相同地质条件下,多盐穴模型3步溶蚀的最大下沉值分别为0.079、0.254、0.56 m,比单盐穴分别大2.5、2.6、3.1倍;三步开挖的地表最大水平位移值分别为 ± 0.029 、 ± 0.094 、 ± 0.205 m,比单盐穴分别大2.2、2.4、2.8倍。

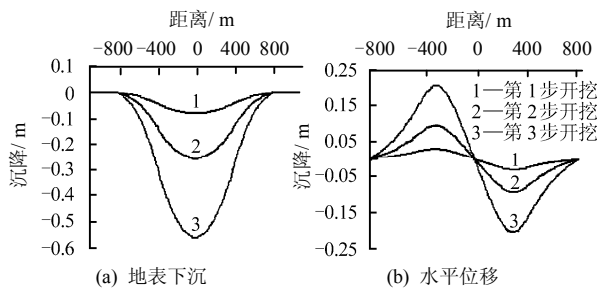


图13 多盐穴地表下沉和水平位移曲线

Fig.13 The vertical and horizontal displacement curves of the multi-cavern model

数值模拟结果显示,多盐穴时,在距顶板一定距离的岩层内会出现波浪型变形曲线。图14为距顶板115 m处岩层的下沉曲线和水平位移曲线,两个图形呈现明显波动现象。但这种现象会随着距顶板距离的增大而逐渐消失,变成和单盐穴相似的曲线。图15为盐穴顶板上221 m处的下沉曲线和水平位移曲线。这时,下沉曲线的波动基本消失,而水平位移曲线还有一定波动。直到顶板上225 m处(图16),多盐穴造成的波动才基本消失,岩层移动和变形曲线的形状与单盐穴开采相似。因此,多盐穴破坏引起的波动效果的影响范围,大约为盐穴高度的15倍,并且水平位移的波动范围比垂直位移的波动范围大。

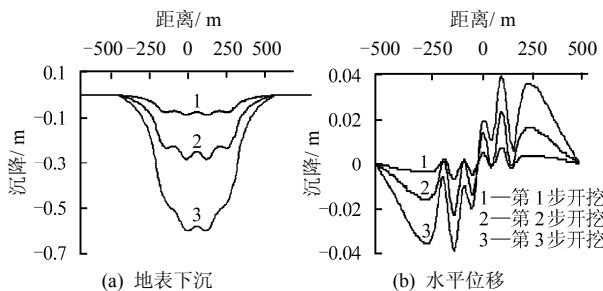


图14 多盐穴顶板上115 m处下沉和水平位移曲线

Fig.14 The vertical and horizontal displacement curves of the layer that is 115 m up the roof

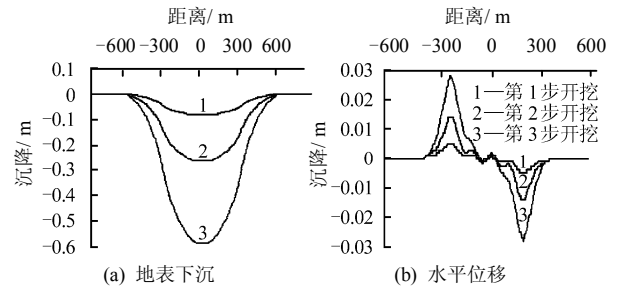


图15 多盐穴顶板上221 m处下沉和水平位移曲线

Fig.15 The vertical and horizontal displacement curves of the layer that is 221 m up the roof

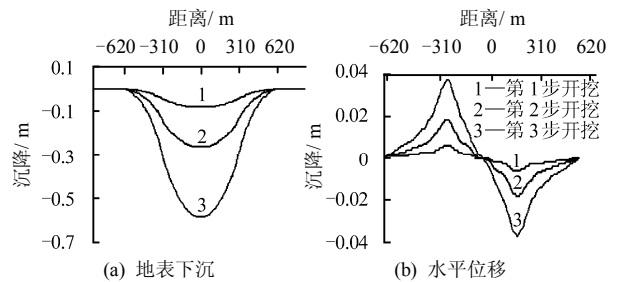


图16 多盐穴顶板上255 m处下沉和水平位移曲线

Fig.16 The vertical and horizontal displacement curves of the layer that is 255 m up the roof

3.3.5 地表沉陷叠加原理

将地层条件完全相同的单盐穴模型,做完全相同的溶蚀模拟计算,得到地表下沉曲线和水平曲线后,按以下方式进行叠加:

设单盐穴地表下沉曲线方程为 $W_s(x)$,那么多盐穴地表下沉曲线叠加方程为

$$W_m(x) = \sum_i^n W_s(x - l_i) \quad (5)$$

式中: n 为盐穴数量; l_i 为第 i 个盐穴中点距原点坐标的距离。

图17为4个单盐穴的地表下沉曲线和地表水平位移曲线按式(5)叠加后得到的地表下沉曲线和地表水平移动曲线,将它们与4盐穴模型的地表下沉曲线和水平移动曲线(图13)进行比较,可以发现它们的形状几乎一致,最大下沉值完全相同为0.56 m,

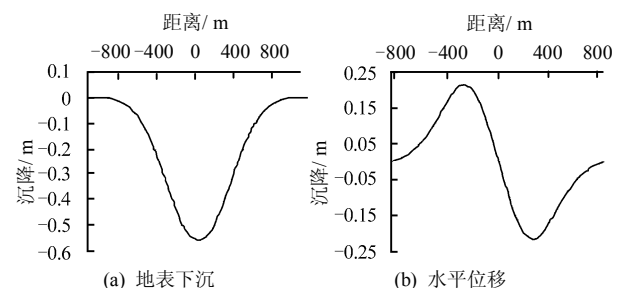


图17 4个单盐穴模型叠加后的下沉曲线

Fig.17 The vertical and horizontal displacement superposition curve of four single cavern

最大水平位移值也基本相同, 仅相差 0.005 m。可见叠加原理是正确的, 多盐穴破坏的地表变形曲线可以用单盐穴破坏的地表变形曲线叠加得到。

4 结 论

考虑到目前的数值分析软件进行地表沉陷分析的不足, 本文开发了用于盐穴储气库破坏后地表沉陷数值模拟的有限元专用软件——2D-Sink, 该软件具有了处理破碎岩块的能力。然后应用 2D-Sink 对盐穴储气库破坏后的地表沉陷规律进行了系统研究, 得到了以下一些结论:

(1) 层理的存在降低了上覆岩层的整体刚度。因此, 层理对地表沉陷影响十分显著;

(2) 地表沉陷中的角度效应比较明显。岩层倾角的增大, 将导致地表最大下沉位置向下山方向偏移, 同时也将导致水平位移在下山方向的最大值大于上山方向的最大值;

(3) 地表沉陷中断层效应比较显著。在断层的影响下, 地表左右两边的最大水平位移值有一定差值, 有断层方向的水平位移较小;

(4) 多盐穴破坏形成的地表变形曲线形状与单盐穴破坏形成的地表变形曲线形状相似, 但数值大得多;

(5) 多盐穴破坏时, 在距顶板一定距离的岩层内会出现波浪型变形曲线, 波动效果的影响范围大约为盐穴高度的 15 倍, 并且水平位移的波动范围比垂直位移波动范围大;

(6) 多盐穴破坏的地表变形曲线可以用单盐穴破坏的地表变形曲线叠加得到。

参 考 文 献

- [1] 杨伟, 王雪亮, 马成荣. 国内外地下储气库现状及发展趋势[J]. 油气储运, 2007, 26(6): 15—19.
YANG Wei, WANG Xuemei, MA Chengrong. Underground gas storage—status quo and development worldwide[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2007, 26(6): 15—19.
- [2] MICHAEL S BRUNO, MAURICE B. Geomechanical analysis of pressure for thin bedded salt caverns[J]. *Dusseault Technologies USA Inc*, 2003, (10): 220—225.
- [3] THOMS R L, GEHLE R M. A brief history of salt cavern use[C]//8th World Salt Symposium. The Hague: [s. n.], 2000.
- [4] OTTO SCHULZE, TILL POPP, HARTMUT KERN. Development of damage and permeability in deforming rock salt[J]. *Engineering Geology*, 2001, 61(2-3): 163—180.
- [5] 邵保平, 赵阳升, 赵延林. 层状盐岩储库长期运行腔体围岩流变破坏及渗透现象研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(增): 241—246.
XI Bao-ping, ZHAO Yang-sheng, ZHAO Yan-lin. Investigation on rheodestruction and permeability of surrounding rock for long-term running storage cavern in bedded rock salt[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(Supp.): 241—246.
- [6] 丁建林. 利用现有采卤溶腔改建地下储气库技术[J]. 油气储运, 2008, 27(12): 42—46.
DING Jiang-lin. Reconstruction of existing salt-caverns into underground gas storage[J]. *Oil & Gas Storage*, 2008, 27(12): 42—46.
- [7] 袁光杰, 田中兰, 袁进平. 盐穴储气库密封性能影响因素[J]. 天然气工业, 2008, 28(4): 105—107.
YUAN Guang-jie, TIAN Zhong-lan, YUAN Jin-ping. Influence factors of sealing property of salt cavern gas storage[J]. *Natural Gas Industry*, 2008, 28(4): 105—107.
- [8] 孙学阳, 夏玉成, 白红梅. 褶皱构造对采煤沉陷控制作用的数值模拟[J]. 煤炭学报, 2007, 32(5): 490—493.
SUN Xue-yang, XIA Yu-cheng, BAI Hong-mei. Numerical simulation of control of fold structures on mining subsidence[J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(5): 490—493.
- [9] 唐又弛, 曹再学, 朱建军. 有限元法在开采沉陷中的应用[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2003, 22(2): 176—178.
TANG You-chi, CAO Zai-xue, ZHU Jian-jun. Application of ANSYS in the mining surface subsidence[J]. *Journal of Liaoning Technical University*, 2003, 22(2): 176—178.
- [10] 尹雪英, 杨春和, 陈剑文. 金坛盐矿老腔储气库长期稳定性分析数值模拟[J]. 岩土力学, 2006, 27(6): 869—874.
YIN Xue-ying, YANG Chun-he, CHEN Jian-wen. Numerical simulation research on long-term stability of gas storage in Jintan Salt Mine[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(6): 869—874.
- [11] 付玉, 郭肖, 杜志敏. 考虑裂缝变形的地下储气库数值模拟研究[J]. 西南石油大学学报, 2007, 29(4): 92—94.
FU Yu, GUO Xiao, DU Zhi-ming. Numerical simulation research on underground gas storage considering fracture deformation[J]. *Journal of Southwest Petroleum University*, 2007, 29(4): 92—94.

- [12] 张耀平, 曹平, 赵延林. 双重介质固气耦合模型及含夹层盐穴储气库渗漏研究[J]. 中南大学学报(自然科学版) 2009, 40(1): 217—224.
- ZHANG Yao-ping, CAO Ping, ZHAO Yan-lin. Dual media model for solid-gas coupling and gas seepage in rock salt natural gas storage with inter-layers[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2009, 40(1): 217—224.
- [13] 李宝元, 任亮. 求解带自由面渗流问题移动网格法的改进及其工程应用[J]. 计算力学学报, 2007, 24(3): 370—374.
- LI Bao-yuan, REN Liang. Improvement of moving mesh method in solving seepage problem with free surface and its application[J]. **Chinese Journal of Computational Mechanics**, 2007, 24(3): 370—374.
- [14] 崔希民, 缪协兴, 金日平. 基于时间函数的地表移动动态过程计算方法[J]. 中国矿业, 1999, 8(6): 58—60.
- CUI Xi-min, MIAO Xie-xing, JIN Ri-ping. Time based computation of surface movement process[J]. **China Mining Magazine**, 2007, 24(3): 370—374.