

文章编号:1000-582X(2012)05-103-04

能源地下储库造腔期流场相似实验

任松¹, 陈结¹, 姜德义¹, 杨春和^{1,2}, 刘春³

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071; 3. 重庆科技学院 安全工程学院, 重庆 400042)

摘要:基于“选定物理法”搭建了模拟建腔期腔内流场的相似模型实验平台, 并利用染色法研究了建腔期腔内流场运移规律。试验发现:反循环造腔时腔内流场可划为 6 个影响区, 浮羽流区、对流扩散区、缓冲扩散区、饱和沉淀区、边界溶蚀区和瀑布流区;注入水的作用范围及扩散速度随注水流量的增大而增加, 但注水流量变化不改变注入水运动趋势;套管间距的变化将引起注入淡水的作用区域的改变, 注入淡水作用区域随套管的提升而向上移, 促进上部盐岩的溶解;夹层赋存状态不仅会改变注入水流动状态, 还会改变边界质量流流动状态, 夹层数量移, 腔内卤水运动状态与浓度分布也越复杂;随着腔体形状的扩展, 腔内流场及浓度场相对作用范围变小, 促使注入水作用范围逐步上移。

关键词:相似模型;染色法;流场;盐岩;夹层

中图分类号:TD853.34

文献标志码:A

Similar experiments of the flow field in cavity construction period of underground energy storage

REN Song¹, CHEN Jie¹, JIANG De-yi¹, YANG Chun-he^{1,2}, LIU Chun³

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Science, Wuhan 430071, P. R. China; 3. Safety Engineering College, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 400042, P. R. China)

Abstract: A similar model experimental platform of flow field in construction period of salt caverns is established based on the similar theory of “selected laws of physics”. The movement rule of flow field in cavity construction period is analyzed by systematic experiments with staining. It finds that the brine migration in reverse circulation of cavity construction can be divided into 6 role zones: buoyant plume zone, convection-diffusion zone, buffer diffusion zone, saturated precipitation zone, border dissolution zone and waterfall flow zone. The increase of water injection flow rate accelerates its influence scope and spread speed, but the brine’s movement trend cannot be changed. The change of tube pitch and its spatial location changes the influence scope of water injection flow. Promoting the tube pitch makes the influence scope of fresh water upward, which accelerates the dissolution of upper salt rock. Interlayer changes not only the

收稿日期:2011-12-09

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2009CB724606);国家自然科学基金资助项目(51074198);中央高校基本科研业务费资助项目(CDJXS11241182, CDJZR10240017);国家创新研究群体基金资助项目(50921063);重庆市科委自然科学基金计划资助项目(CSTC2009BB6229, 2010BB6044)

作者简介:任松(1975-),男,重庆大学副教授,博士,从事岩土工程力学方面的教学和科研工作,
(E-mail)rs_rwx@cqu.edu.cn。

state of water injection flow, but also the state of boundary mass flow. The more the number of sandwich, the more complex the motion state and the concentration distribution of brine are. With the expansion of the cavity, the relative influence scope of the injection flow and the boundary mass flow become small, and injection water flow's influence scope gradually goes upward.

Key words: similar model; staining; flow field; salt rock; interlayer

盐岩是一种具有良好物理力学特性的软岩,良好的自我恢复能力和渗透率低使得盐岩成为一种国内外公认的理想能源地下储存场所。我国近年来开始在盐岩地层中建设能源地下储库群,这是我国能源战略储备计划的重要部分,对经济发展也能起到显著的促进作用。但由于在储库建造技术方面起步晚,理论和实践经验方面都有所不足。所以在建造过程中,需要在借鉴国外经验同时还需用系统的方法来研究其中的关键问题。其中能否控制好腔体的形状是关系到建腔成败的重要因素。为了建成理想的能源储库腔体形状,现有的建腔工艺一般都是通过改变注入淡水的流动状态,从而间接地来控制腔体形状。所以从腔内流场的角度来进行研究,对地下储库的建设具有重要的促进作用。

Hossein Kazemi 等^[1]早在上世纪就对盐丘地质水溶造腔过程中盐岩溶解特征进行了研究,发现倾角、温度、卤水浓度、表面粗糙度对纯盐岩的溶解都有不同程度的影响,所以要控制好溶腔的形状,就必须对腔内的浓度分布及腔内流体的运动状态有所了解;文献[2-4]通过有限元软件数值分析了岩穴大小、顶底板厚度、埋深及力学参数对岩穴的影响。杨春和等、梁卫国等和姜德义等^[5-7]对盐岩及层状盐岩的基本力学开展了研究。陈剑文等和陈卫忠等^[8-9]对盐岩储库密闭性和渗透性进行了研究。杨强等和任松等^[10-11]对盐穴稳定性开展了系列研究。张强勇等和刘建平等^[12-13]进行了相似材料模拟盐岩腔体力学特性和水溶造腔方面的模拟实验。陈锋等^[14]对盐穴建成后注气排卤进行了研究。吴乘胜等、赵志成等和万玉金等^[15-17]研究了盐岩储气库建腔过程中流体运移及溶蚀机理,得出了纯盐岩建腔过程腔体的扩张模型,为盐岩水溶开采及水溶造腔提供了理论指导。目前对盐岩能源储库腔群建造的研究工作主要集中在盐岩溶解及浓度分布等方面,其成果不能较好地反映盐岩储库建造期腔内流场特征,无法直接应用到造腔工程。而国内能源地下储库正处在大规模建造期,系统地研究影响腔体形状的关键因素显得尤为急切。当前盐岩单井油垫对流法水溶造腔过程是地表工作站将淡水沿内管(正循环)或外管(反循环)注入腔体内,注入的淡水对腔体表面盐岩

进行溶蚀,故腔内边界层盐岩溶解速率及腔体形态的扩展趋势将受到腔内卤水流动状态的很大影响。准确了解建腔期注入水的流动规律有利于腔体稳定性及腔体形状控制。笔者运用相似模拟实验来研究建腔期腔体内流场的变化动态及规律,由于淡水基本上是无色的,很难捕捉到流场的分布情况,所以采用“染色法”来实现流场可视化这样一个目的。在此基础上,再来分析套管间距、注水速度、造腔阶段以及夹层覆存状态对腔内流场的影响,从而了解流场在不同造腔条件下作用的运动规律,为能源地下储库群的建造项目提供基本的理论依据。

1 相似理论

流场相似实验是用缩小的模型来分析原型现象的研究。其中要求模型与原型达到几何相似、运动相似以及动力相似。笔者采用“选定物理法”^[19]来建立相似模拟实验,其特点是可以直接从物理现象来推导出相似准则,避免了方程分析法繁琐的公式计算和量纲分析法中无用相似参数的确定。

1.1 腔内流场现象物理解释

影响岩穴建腔期腔内流场分布的 3 个主要作用力为:套管进水口惯性力、浮力和黏性力。但黏性力主要作用在套管壁面及溶腔壁,且卤水是低黏性液体,故与整个腔内的流场相比,黏性力基本上可以忽略不计。因研究的是注入淡水后腔内流场的分布特征,故只要确定模型与原型边界条件和初始条件相似,就能确保确保试验时流场相似。

1.2 主要作用力

$$\text{惯性力: } F_i = \rho l^3 \frac{l}{t^2} = \rho l^2 v^2. \quad (1)$$

$$\text{浮力: } F_g = \rho g l^3. \quad (2)$$

1.3 相似准则

根据上述选定物理法可得主 Π 数

$$\Pi = \frac{F_i}{F_g} = \frac{F'_i}{F'_g}. \quad (3)$$

因受到的重力加速度一样且注入的液体性质一样,即($g = g', \rho = \rho'$),可得如下几何相似比 π_l 与速度相似比 π_v 的关系:

$$\pi_v = \frac{v}{v'} = \sqrt{\frac{l}{l'}} = \pi_l^{0.5}. \quad (4)$$

令注入淡水流量 $Q = A\nu = l^2\nu$, 可计算出几何相似比与流量相似比 π_Q 的关系:

$$\pi_Q = \frac{Q}{Q'} = \left(\frac{l}{l'}\right)^{2.5} = \pi_l^{2.5} \quad (5)$$

上述各式中: ρ = 水的密度, A = 套管的横截面积, l = 长度, ν = 流速, t = 时间, g = 重力加速度, 带 ' 符号量为相对应的相似参数。

通过式(5)可确定模型试验的腔体尺寸、套管尺寸和相应的流量值。另外根据试验设计需要可变动模型几何尺寸和流量。

2 相似实验平台搭建

盐穴储库建造过程中, 腔体形状主要受腔内卤水运移规律影响(卤水浓度, 卤水扩散速率, 注水流量)的影响。盐穴建造过程中, 腔体形状不是固定不变的, 动态跟踪分析腔内流场很难实现, 所以笔者参考现有造腔工程参数, 选定了3个具有代表性的造腔阶段, 其中建腔初期溶腔平均直径约为9 m, 建腔中期溶腔平均直径约为15 m, 建腔后期溶腔平均直径约为32 m, 对上述3个造腔阶段, 其短时间内(指盐穴腔体形状没有发生明显变化)研究套管间距、注水速度、夹层赋存状态对流场的影响和3个不同造腔阶段的流场分布状态。需要说明的是: 盐穴储库建造过程中, 流场运移主要受腔体形状、注水速度及卤水浓度等因素影响, 与地应力无关, 故不考虑地应力场。

2.1 相似模拟试验平台搭建

笔者按相似关系式(4)、(5)来搭建能源地下储库建腔期流场相似实验平台, 由于真实腔体是一个梨形状, 基本上是一个对称的几何体, 且腔体上表面是油垫, 下端为沉渣, 下端的卤水浓度已经达到饱和, 所以本实验模型采用的是一个高1.1 m, 宽0.6 m, 厚0.05 m的长方体, 模型底部0.05 m × 0.6 m面用盐粉铺垫来模拟腔体下端的沉渣饱和卤水区, 在模型的两侧面(尺寸为1.1 m × 0.05 m)铺上厚度为0.05 m的盐砖, 为模拟夹层, 在两侧面中部一到两处用薄玻璃片隔开, 用来模拟盐穴某一造腔阶段腔体内流场分布特征。相似模拟实验平台如图1所示。

实验时淡水经染色池染料染色后再经流量计进入到进水管, 因模型腔体内预先充满了无色的卤水, 所以可以观察注入有色淡水进入模型腔体后的流动情况。整个过程采用高清摄像机记录, 将记录的动画录像用图像分析软件来提取所需画面。开始阶段流场变化较快, 所以每隔5 s就提取一张图片, 以此

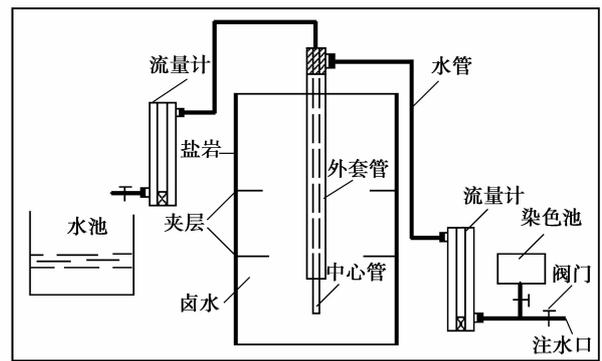


图1 相似模拟实验装置图

时间间隔提取10张, 之后再每过30 s提取一张图片, 这以此时间间隔提取3张图片。将这13张图片的轮廓线描绘出来, 最后将所有图片的轮廓线叠加到一张图片上。通过这种叠加的处理方法, 就可以获得在相同时间内不同套管间距、注水速度以及夹层赋存状态下流场变化规律, 及3个不同造腔阶段流场的分布特征。

2.2 实验方案设计

1) 分析建腔中期(此阶段腔体卤水移动要比建腔初、后期阶段要明显, 且对应的几何相似模型更利于实验操作, 试验也能较好地反映现场真实腔体内卤水流动)套管间距、流速及夹层的空间位置对腔内流场的影响。建腔中期, 腔体平均直径约为15 m左右, 依据式(4)、(5)可确定几何相似比为25, 流量相似比由不同的试验要求分别设定, 同时保证初始条件相似。模型腔体的套管尺寸为内管直径5.8 mm, 外管直径9.4 mm。在此模型上做如下3个实验:

a) 注水流量对腔内流场的影响实验。先由式(5)确定模型的注水流量(300, 450, 600 mL/min); 内管距离底部200 mm, 水位高度为700 mm, 套管间距为500 mm; 不考虑夹层。

b) 套管间距对腔内流场的影响实验。取注水流量为600 mL/min; 内管距底部200 mm, 水位高度为700 mm, 套管间距分别取50, 150, 250 mm(内管位置不改变, 仅改变外管位置); 不考虑夹层。

c) 夹层赋存状态对腔内流场的影响实验。取注水流量600 mL/min; 内管距底部200 mm, 水位高度为700 mm, 套管间距50 mm; 分别考虑无夹层、单层夹层(夹层距离注水口250 mm)、两层夹层(下部夹层与注水口平行, 两夹层间距250 mm)。

2) 3个同造腔阶段流场分布规律。文中几何相似比是相似理论由腔体几何尺寸和套管几何尺寸共同确定的, 所以通过改变模型的套管尺寸就能模拟

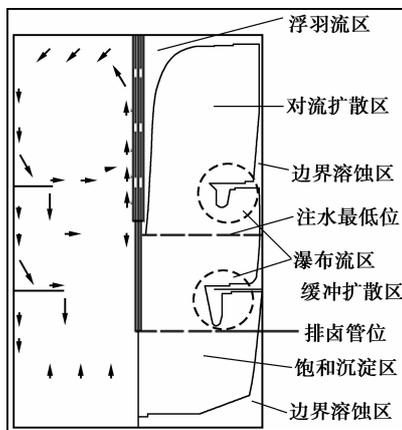
不同造腔阶段的流场实验,避免了腔体模型的从新搭建。由式(4)、(5)可确定模型相关建模参数,如表 1 所示。

表 1 3 个造腔阶段试验参数

造腔阶段	现场腔体平均直径/m	几何相似比	模型腔体直径/mm	模型外管直径/mm	模型内管直径/mm	流量/(mL·min ⁻¹)
建腔初期	9	18	600	16.0	9.4	2 425
建腔中期	15	25	600	9.4	5.8	600
建腔后期	32	52	600	5.1	3.0	80

3 相似模型实验结果及分析

通过上述试验研究发现,建腔期腔内流场变化表现出的规律性,建腔期主要采用反循环溶腔技术(因真实盐穴建造过程中均以反循环为主,故不考虑正循环),其形成的流场可分为 6 个作用区,具体划分情况如图 2 所示。



(注:注水最低位指注入水进入腔体后在竖直方向能达到的最大距离)

图 2 建腔期流场区域划分图

1)浮羽流区:在惯性力、浮力及扩散驱动力共同作用下,注入淡水先减速向下运动一定的距离,因浮力作用速度减小到零,之后转而向上运动直至油垫与卤水的界面(在向上运动的过程中不可避免的有横向的扩散运动,但很缓慢),再快速向两侧运动,由于边界层粘性力的作用,速度将会逐渐减小,浮羽流区是注入淡水的主要作用区域,使得这一区域的卤水浓度比较低,导致这一区域的盐岩溶解速最快;2)边界溶蚀区:这是边界盐岩溶蚀区域,在此区域形

成的饱和盐水会由于重力作用向下运动,也会受浓度梯度的影响而向横向扩散,其溶解速度和卤水下沉速度与卤水浓度成反比关系。3)对流扩散区:边界溶蚀区的饱和盐水向下卷吸其周围的卤水,而浮羽流区的上升流将会向上卷吸其周围的卤水,这两种逆向的卷吸作用使此区域的卤水混合很快,此区域的范围比较大,且区域内卤水浓度比较接近,浓度一般也比较低,所以成为盐岩腔体溶解扩展的最主要区域。当此区域有夹层时,流场将会变得复杂,此时的卤水流动多为紊流;4)缓冲扩散区:这一区域位于注水最低位界面以下,所以上浮淡水已不能影响此区域,只受因浓度差而产生的浓度驱动力和排卤管排卤吸力的影响。正是由于此区域卤水这样的流动状态,所以此区域的浓度在竖向基本上是成线性分布,而横向上浓度相差不太大。这样的浓度分布,使盐岩溶蚀形状为上大下小的倒梯形。5)饱和和沉淀区:这一区域的卤水仅有微弱的扩散运动,通常视为静止状态,所以此区域夹层的存在也基本上不会影响卤水的运移。因为此区域卤水浓度基本上已达到饱和,所以盐岩几乎不会溶解。6)瀑布流区:夹层的存在使夹层上下端的流场很不一样,边界溶蚀区形成的饱和卤水由于重力作用向下运动,其横向的扩散运动将远远小于下沉速度,当饱和卤水下沉到夹层处时,会在夹层上部形成饱和和卤水冲击带,这层冲击带将会降低其附近盐岩的溶解速率。而在夹层的下方,夹层会对上升淡卤流产生阻碍作用,在夹层下部形成瀑布状流动,并在附近形成一定的涡流,涡流的存在会加速夹层下部的卤水与附近淡卤的对流扩散,从而使夹层下部盐岩的溶解速率加快。图 3 是相似实验流场运移分布图。需要强调的是,上述 6 个区域作用范围的分界面并不是固定不变的,它会受套管位置、流速、夹层位置及腔体大小的影响。

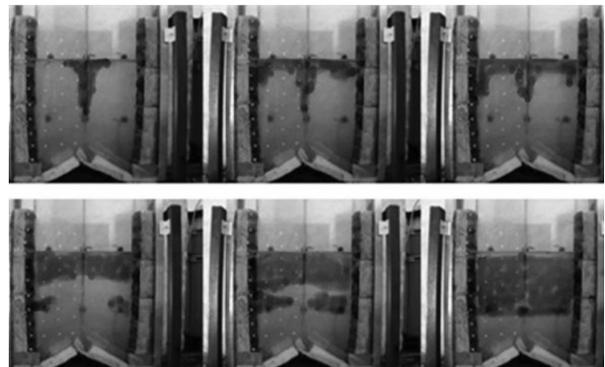


图 3 染色淡水注入腔内后运移扩散图

3.1 注水速度对流场的影响

注入淡水在整个溶腔内的运动趋势不受注水流

量变化的影响,但流量的改变会影响淡水扩散速度及淡水向下运移和扩散范围。当然浮羽流区的大小也相应随之改变,最终达到影响对流扩散区整体卤水浓度的目的。图4为相同时间内有色淡水进入腔内流动轮廓图。由图可知,随着注水流量的增加,前50 s内注入淡水的扩散范围和运动速度都相应的增大,而在注水最低位界面以下其向下的扩散速度变化很微弱。

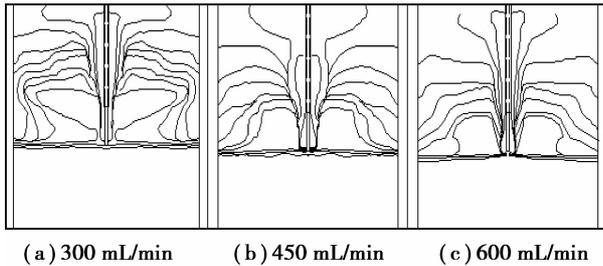


图4 3种流量对应腔内流场分布图

3.2 套管间距对流场的影响

套管的提升会明显改变流场的作用范围,中间管的提升,会减少淡水在竖直方向的运动距离,从而使淡水迅速运动到腔顶并快速运动到两侧。由于对流扩散区和浮羽流区的作用范围随中间管的提升而减小,从而使淡卤水的作用范围比较集中,从而加快上部盐岩的溶解。而缓冲扩散区的范围却随套管的提升增大,边界溶蚀区和饱和沉淀区受其影响不大。图5为相同时间内不同套管间距组合流场分布图,由图可知,当套管位置越高时,前50 s内注入淡水的作用范围越小。由于受淡水影响的区域上移且变集中,则使上部盐岩层的溶解速率加快。

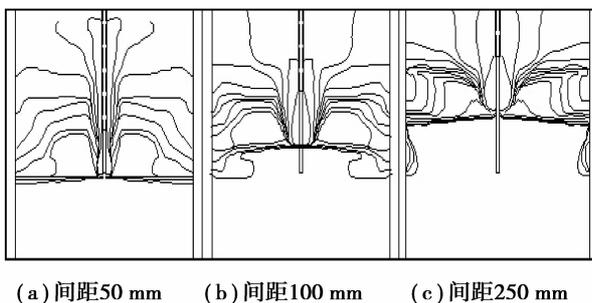


图5 3种套管间距对应腔内流场分布图

3.3 夹层赋存状态对流场的影响

流场运动的趋势和作用范围会由于夹层的存在而有所改变,具体变化情况要分夹层位于注水位上部和下部2种情况。当夹层处于注水最低位置上部时,注入水会在夹层附近分流,并在夹层上下两面形

成涡旋流,从而加快卤水的对流扩散作用,促进盐岩的溶蚀。然而,当夹层位于注水最低位下部时,夹层存在主要影响边界的质量流,边界溶蚀区的饱和卤水因重力作用而向下运动,遇到夹层阻挡时将形成回旋流,加速卤水的横向扩散。边界质量流绕过夹层后,在夹层下方形成涡旋流,这将加速盐岩的溶解。图6为相同时间内流场受不同夹层位置的影响,由图可知,从没有夹层到含有两个夹层,腔内卤水的运动状态变得越来越复杂,且边界质量流与注入淡水流的相互作用更突出。

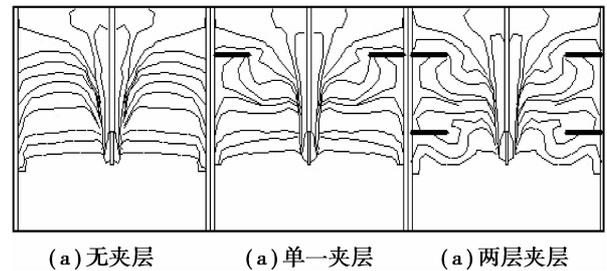


图6 3种夹层赋存状态对应腔内流场分布图

3.4 3种造腔阶段腔内流场运移规律

在套管尺寸和流量保持不变的情况下,随着腔体形状的扩大,和腔体大小相比注入腔内淡水的相对影响范围是减小的。从图7也可以明显看出,随着腔体形状的扩大对流扩散区和浮羽流区的作用范围在缩小,对流扩散区向下的扩散速度也在减小,而缓冲扩散区的作用范围却在增大。边界溶蚀区的饱和卤水在向下运动时其横向扩散作用增强,但下沉速度却会有所降低。

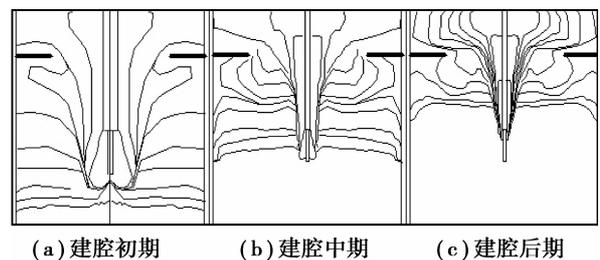


图7 3个造腔阶段对应腔内流场分布图

4 结论

利用“选定物理法”搭建了研究建腔期腔内流场运移规律的相似模型实验平台,并分析注水流量、夹层空间位置、套管间距对流场的影响,主要得出如下结论:

1) 反循环造腔时腔内流场可划分为6个作用

区、浮羽流区、对流扩散区、饱和沉淀区、缓冲扩散区、边界溶蚀区和瀑布流区。

2) 注水流量增加不会改变卤水总的运动趋势, 但会促进注入水的作用范围及向下扩散速度, 并降低对流扩散区卤水浓度, 从而加速上部盐岩溶解。

3) 套管间距及相应的空间位置的改变将改变注入水的作用范围, 一般淡水作用区域随套管提升而上升。套管提升使得注入水流快速返流到腔体上部, 从而降低腔体上部卤水浓度, 促进上部盐岩的溶解。

4) 夹层赋存状态可以改变注入水流动状态, 还可以改变腔体边界质量流流动状态。夹层数量越多, 腔内流场与浓度分布也越复杂。

5) 随着造腔过程的推进, 腔体形状将逐渐扩大, 对应的流场和浓度场作用范围变小。

参考文献:

- [1] KAZEMI H, JESSEN F W. Mechanism of flow and controlled dissolution of salt in solution mining [J]. SPE Journal, 4(4): 317-328.
- [2] TAO ZHI-YONG, MA ZHEN-HE. The research of salt cavern 3D modeling technology [C]//2009 Asia-Pacific Conference on Information Processing, APCIP 2009, July 18-19, 2009, Shenzhen, China. Shenzhen: [s. n.], 2009: 241-243.
- [3] EHGARTNER B L, PARK B Y. Sensitivity of storage field performance to geologic and cavern design parameters in salt domes [R]. [S. l.]: Sandia National Laboratories, 2009.
- [4] FUENKAJORN K. Prediction of cavern configurations from subsidence data [J]. Engineering Geology, 2010, 110(1/2): 21-29.
- [5] 杨春和, 李银平, 屈单安, 等. 层状盐岩力学特性研究进展 [J]. 力学进展, 2008, 38(4): 484-494.
YANG CHUN-HE, LI YIN-PING, QU DAN-AN, et al. Advance in researches of the mechanical behaviors of bedded salt rocks [J]. Advances in Mechanics, 2008, 38(4): 484-494.
- [6] 梁卫国, 徐素国, 莫江, 等. 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 WEI-GUO, XU SU-GUO, MO JIANG, et al. Test study of strain rate effects on mechanical performances of salt rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(1): 43-50.
- [7] 姜德义, 陈结, 刘建平, 等. 应力损伤盐岩的声波、溶解试验研究 [J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3569-3573.
JIANG DE-YI, CHEN JIE, LIU JIAN-PING, et al. Experimental research on acoustic and dissolved properties of stress damaged salt rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3569-3573.
- [8] 陈剑文, 杨春和, 郭印同. 基于盐岩压缩-扩容边界理论的盐岩储气库密闭性分析研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(suppl2): 3302-3308.
CHEN JIAN-WEN, YANG CHUN-HE, GUO YIN-TONG. Study of sealability of cavern for natural gas storage in deep salt formation based on compaction-dilatancy boundary of salt [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (suppl2): 3302-3308.
- [9] 陈卫忠, 谭贤君, 伍国军, 等. 含夹层盐岩储气库气体渗透规律研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1297-1304.
CHEN WEI-ZHONG, TAN XIAN-JUN, WU GUO-JUN, et al. Research on gas seepage law in laminated salt rock gas storage [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(7): 1297-1304.
- [10] 杨强, 刘耀儒, 冷旷代, 等. 能源储备地下库群稳定性与连锁破坏分析 [J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3553-3561.
YANG QIANG, LIU YAO-RU, LENG KUANG-DAI, et al. Stability and chain destruction analysis of underground energy storage cluster based on deformation reinforcement theory [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3553-3561.
- [11] 任松, 姜德义, 杨春和. 盐穴储气库破坏后地表沉陷规律数值模拟研究 [J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3595-3601.
REN SONG, JIANG DE-YI, YANG CHUN-HE. Numerical simulation research on ground subsidence after salt cavern gas storage collapsing [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3595-3601.
- [12] 张强勇, 刘德军, 贾超, 等. 盐岩油气储库介质地质力学模型相似材料的研制 [J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3581-3586.
ZHANG QIANG-YONG, LIU DE-JUN, JIA CHAO, et al. Development of geomechanical model similitude material for salt rock oil-gas storage medium [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3581-3586.
- [13] 刘建平, 姜德义, 陈结, 等. 一种盐岩相似材料的试验研究 [J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3660-3663.
LIU JIAN-PING, JIANG DE-YI, CHEN JIE, et al. Experimental research on a similitude material of rock salt [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3660-3663.

1034.
LONG QING-MING, ZHAO XU-SHENG, SUN DONG-LING, et al. Experimental study on coal permeability by adsorption[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(9): 1030-1034.
- [16] 张先敏, 同登科. 考虑基质收缩影响的煤层气流动模型及应用[J]. 中国科学, 2008, 38(5): 790-796.
ZHANG XIAN-MIN, TONG DENG-KE. A coalbed gas flow model and its application considering matrix shrinkage [J]. Scientia Sinica Technologica, 2008, 38(5): 790-796.
- [17] 周军平, 鲜学福, 姜永东, 等. 考虑有效应力和煤基质收缩效应的渗透率模型[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2009, 31(1): 4-8.
ZHOU JUN-PING, XIAN XUE-FU, JIANG YONG-DONG, et al. A permeability model considering the effective stress and coal matrix shrinking effect [J]. Journal Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2009, 31(1): 4-8.
- [18] 周锋德, 姚光庆, 唐仲华. 煤基质收缩和膨胀对甲烷开采和二氧化碳存储的影响[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(1): 150-156.
ZHOU FENG-DE, YAO GUANG-QING, TANG ZHOU-HUA. Influence of coal matrix shrinkage and swelling on coalbed methane production and CO₂ storage[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(1): 150-156.
- [19] 许江, 彭守建, 尹光志, 等. 含瓦斯煤热流固耦合三轴伺服渗流装置的研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 907-914.
XU JIANG, PENG SHOU-JIAN, YIN GUANG-ZHI, et al. Development and application of three-axial servo-controlled seepage equipment for hot-fluid-solid coupling of coal containing methane [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 907-914.
- [20] 钱凯, 赵庆波. 煤层甲烷气勘探开发理论与实验测试技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996.
- [21] American Society for the Testing of Materials. ASTM Standard D4525 Standard test method for permeability of rocks by flowing air[S]. USA: ASTM, 1990.
- [22] KLINKENBERG L J. The permeability of porous media to liquids and gases[C]//Drilling and Production Practice. New York: American Petroleum Institute, 1941: 200-213.
- [23] WU Y S, PRUESS K, PERSOFF P. Gas flow in porous media with Klinkenberg effects[J]. Transport in Porous Media, 1998, 32(1): 117-137.
- (编辑 郑 洁)
-
- (上接第 108 页)
- [14] 陈锋, 杨海军, 杨春和. 盐岩储气库注气排卤期剩余可排卤水分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3602-3606.
CHEN FENG, YANG HAI-JUN, YANG CHUN-HE. Analysis of residual brine of salt rock gas storage during injecting gas to eject brine [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3602-3606.
- [15] 万玉金. 在盐层中建设储气库的形状控制机理[J]. 天然气工业, 2004, 24(9): 130-132.
WAN YU-JIN. Shape-controlling mechanism of gas storage building in salt beds[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(9): 130-132.
- [16] 赵志成, 朱维耀, 单文文, 等. 盐岩储气库水溶建腔数学模型研究[J]. 天然气工业, 2004, 24(9): 126-129.
ZHAO ZHI-CHENG, ZHU WEI-YAO, SHAN WEN-WEN, et al. Mathematical model of chamber building with water solution for gas storages in salt beds[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(9): 126-129.
- [17] 吴乘胜, 杨骏六. 单井对流法水溶采矿的数学模型[J]. 力学与实践, 2003, 25(1): 11-13.
WU CHENG-SHENG, YANG JUN-LIU. Mathematical model of solution mining with single well convection method[J]. Mechanics and Engineering, 2003, 25(1): 11-13.
- [18] 梅尔兹科奇 W. 流动显示[M]. 黄素逸, 王志国, 张浩然, 译. 北京: 科学出版社, 1991.
- [19] 江守一郎. 模型实验的理论与应用[M]. 郭廷伟, 李安定, 译. 北京: 科学出版社, 1986.
- (编辑 郑 洁)