

含夹层盐岩双重介质耦合损伤模型研究

贾善坡^{1,2}, 杨建平², 王越之³, 谭贤君², 陈卫忠²

(1. 长江大学 城市建设学院, 湖北 荆州 434023; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 3. 长江大学 石油工程学院, 湖北 荆州 434023)

摘要: 针对中国地下油气储库建设中所出现的含夹层盐岩问题, 考虑夹层和盐岩层之间存在地质界面, 采用以节点位移和孔隙压力为自由度的界面单元来模拟水力损伤造成的地层界面的开裂、扩展和流体渗流; 并基于多孔介质流-固耦合理论, 建立含夹层盐岩双重介质耦合损伤模型。该模型克服了等效连续介质模型不能正确反映地层界面的渗流问题, 又克服了双重介质模型不能考虑地层界面开裂问题。在此基础上, 采用数值模拟技术, 研究高压流体在泥岩夹层与盐岩的界面渗透及其开裂扩展特征, 结果表明, 高压流体沿腔体围岩渗流过程中, 含夹层盐岩界面呈扇形状张开, 沿界面通道流体压力逐步降低。因此, 在层状盐岩储库运营过程中, 要严格控制腔体压力, 避免在含夹层盐岩分层界面上产生油气渗流, 保持腔体的致密性及稳定性。

关键词: 岩石力学; 层状盐岩; 储库; 夹层界面; 裂缝渗流; 有限元

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2012)12 - 2548 - 08

STUDY OF COUPLED DAMAGE MODEL OF DUAL MEDIA FOR SALT ROCK WITH INTERLAYER

JIA Shanpo^{1,2}, YANG Jianping², WANG Yuezhi³, TAN Xianjun², CHEN Weizhong²

(1. School of Urban Construction, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434023, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 3. School of Petroleum Engineering, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434023, China)

Abstract: According to the reality of bedded rock salt and clay interlayer for underground oil or gas storage carven in China, considering the existing interface element between salt rock and weak interlayer, the interface element taking nodal displacement and pore pressure as degree of freedom, is used to simulate the initiation, propagation and fluid seepage of weak layers resulted from hydraulic damage. Based on the fluid-solid coupling theory of porous fluid diffusion and deformation, the coupled damage model of dual media for salt rock with formation interlayer is established. This model can depict the crack propagation process and reflect the seepage flow of interface. Then, some numerical simulations are carried out to analyze the seepage and crack propagation characteristics of high pressure fluid on interface between salt rock and clay. The results show that the fluid pressure decreases along the interface element direction and the aperture of the opened fracture is fan-shaped during the leakage process of high-pressure fluid along cavity surrounding rocks. It is concluded that the effects of interface seepage on pressure distribution are very important. For the tightness and stability of the oil and gas repository, the inner pressure of oil or gas repository should be controlled to avoid the oil and gas leakages on the interface for salt rock with interlayer.

Key words: rock mechanics; salt rock with interlayer; storage cavern; interface of interlayer; crack seepage; finite elements

收稿日期: 2012 - 05 - 04; **修回日期:** 2012 - 08 - 28

基金项目: 中国石油科技创新基金(2011D - 5006 - 0603); 国家自然科学基金资助项目(51004097); 国家科技重大专项项目(2011ZX05005 - 006)

作者简介: 贾善坡(1980 -), 男, 博士, 2002年毕业于中国石油大学(华东)土木工程与石油工程专业, 现任副教授, 主要从事岩石力学与工程方面的教学与研究工作。E-mail: jiashanporsm@163.com

1 引言

为了弥补地上石油储备的不足,许多国家利用地下盐穴储存石油,如美国、德国、加拿大、法国等国家。盐岩被公认为油气储存的理想介质,用于国家战略能源储备和商业油气储备,并且已在世界上其他国家成功应用多年。与国外大量存在的“盐丘型”储层条件不同,我国盐岩地层的基本特点是盐岩层多、单层厚度薄,盐岩体中一般含有众多夹层。尽管盐岩本身的渗透率极低,但是,由不同矿物成分的盐岩矿层及泥岩夹层所组成的盐岩体不同,其渗透率会因渗透压力、温度及渗透介质等诸多因素的不同而发生改变,在这种情况下,储库的渗透稳定和密封安全等关键问题的研究在国内外无成熟的理论可借鉴。

国内外对应力加载条件下盐岩的渗透率演化研究成果较多,而对层状盐岩渗透性研究也才刚刚起步,尤其对层状岩盐的渗透性和含夹层的盐穴储气库的渗漏研究甚少。T. Popp 等^[1-2]测试了盐岩三轴加载过程中的渗透率演化和超声波速变化,对加载过程中盐岩内部微裂隙扩展演化进行了研究;J. C. Stormont^[3]在美国 WIPP(waste isolation pilot plant)开挖巷道现场测试开挖损伤区和非损伤区盐岩的渗透性,发现开挖洞径 1 倍范围以内的盐岩渗透率较高($10^{-15} \sim 10^{-19} \text{ m}^2$),而 1 倍洞径以外盐岩的渗透率较低($10^{-20} \sim 10^{-22} \text{ m}^2$);Z. M. Hou^[4]建立了盐岩的 Hou/Lux 本构模型,将短期和长期强度、膨胀、损伤、渗透性以及裂隙愈合引入到本构模型中,并对地下工程开挖扰动区进行分析;吴文等^[5]通过盐岩渗透性试验研究发现盐岩的体积应变从 0 增大到 0.005 时,渗透率从 10^{-22} m^2 数量级增大到 10^{-15} m^2 ;邵保平等^[6]对我国层状盐岩流变破坏后试样的渗透率进行了测试,提出了破坏试样渗透率和有效体积应力之间的关系式;周宏伟等^[7]在国内对湖北云应盐矿盐岩进行了渗透性测试,包括 10 个纯盐岩试样和 10 个含有部分夹层的盐岩试样,夹层分布方向垂直于渗透方向,由于受到测试设备分辨率的限制,20 个测试样本中只测出来 10 个样本的渗透参数,其中含有夹层的 10 个试样只测出 1 个试样的渗透参数,测得的渗透率范围为($10^{-16} \sim 10^{-18}$) m^2 ;梁卫国等^[8]研究了层状盐岩中盐岩与夹层的孔隙率与渗透率在气压作用下的变化规律,提出了层状盐岩储气库极限运行压力确定原则,但没有研究软弱夹层与盐岩的夹层层面对渗透压力影响;陈卫忠等^[9-10]建立

了考虑盐岩夹层的等效边界气体模型,并推导了相应的温度-渗流-应力-损伤模型,该模型可以反映盐岩的热损伤效应以及气体沿夹层界面的渗流流动,但没有研究盐岩夹层界面的破损开裂效应以及流体的渗漏对软弱地层界面开裂的影响。

盐穴储库投入运行前要经过密封性试验,重点针对井筒密封性和腔体地质因素的盐穴密封性进行检测,以便确定所建造的盐穴储油库工程是否密封并符合设计规范。密封性测试方法是向井筒和溶腔注水憋压,通过观测压力变化和液体漏失情况判断是否存在井筒和腔体的漏失。国内外普遍将研究重点放在盐岩力学特性、盐穴蠕变、盐穴形状等地质因素对储库稳定性影响方面,没有考虑软弱夹层对储库油气渗透范围及渗漏程度的影响,而含夹层盐穴储库孔隙压力分布的研究是储库压力预测、蠕变分析以及油气渗漏等一系列关键技术问题的理论基础。因此,结合我国地下油气储库建造过程中所出现层状盐岩体问题,建立含夹层盐岩裂缝流体渗流数学模型,研究高压流体渗流特性及地层界面的开裂行为,对我国在盐岩体中建造油气储库具有十分重要的理论意义和指导价值。本文在盐岩夹层界面渗流特性及损伤开裂扩展理论分析的基础上,采用以节点位移和孔隙压力为自由度的界面单元,建立了层状盐岩双重介质耦合模型,并进行了相应的数值模拟,研究了夹层界面裂缝扩展过程中岩层的孔隙压力分布以及界面的开裂形态,获得了一些有益的结论。

2 双重介质耦合损伤模型

2.1 基岩渗流-应力耦合控制方程

将盐岩或泥岩基质假设为多孔介质,流体能够承担或传递压力,将其定义为孔隙压力,而通过岩石颗粒间的接触面传递的应力称为有效应力,一般采用 Biot 有效应力 σ'_{ij} ^[11],其表达式为

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} + \alpha \delta_{ij} p \quad (1)$$

式中: σ_{ij} 为总应力; p 为流体压力; δ_{ij} 为 Kronecker 符号; α 为 Biot 系数, $\alpha = 1 - K_v / K_s$, K_v , K_s 分别为岩石的体积压缩模量和固体颗粒的压缩模量。

储层骨架应力平衡方程可采用虚功原理来表示,即在某一时刻岩石骨架的虚功与作用在该岩石骨架上作用力(体力和面力)产生的虚功相等,即

$$\int_V \delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{d} \boldsymbol{\sigma} \mathbf{d}V - \int_V \delta \mathbf{u}^T \mathbf{d} \mathbf{f} \mathbf{d}V - \int_S \delta \mathbf{u}^T \mathbf{d} \mathbf{t} \mathbf{d}S = 0 \quad (2a)$$

其中,

$$\left. \begin{aligned} \boldsymbol{\sigma} &= \boldsymbol{\sigma}' - \alpha \mathbf{m} p \\ \mathbf{m} &= [1, 1, 1, 0, 0, 0]^T \end{aligned} \right\} \quad (2b)$$

式中: \mathbf{t} 为面力; \mathbf{f} 为体力; $\delta \boldsymbol{\varepsilon}$, $\delta \mathbf{u}$ 分别为虚应变和虚位移。

以增量形式表示的本构关系为

$$d\boldsymbol{\sigma}' = \mathbf{D}_{ep} (d\boldsymbol{\varepsilon} - d\boldsymbol{\varepsilon}_l) \quad (3a)$$

其中,

$$d\boldsymbol{\varepsilon}_l = -\mathbf{m} \frac{dp}{3K_s} \quad (3b)$$

式中: \mathbf{D}_{ep} 为弹塑性矩阵; $d\boldsymbol{\varepsilon}_l$ 为孔隙流体压力引起的颗粒压缩, 仅在正方向上产生变形, 无剪切方向上的变形。

取 $\alpha = 1$, 结合式(2), (3)可表示为

$$\int_V \delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{D}_{ep} \left(d\boldsymbol{\varepsilon} + \mathbf{m} \frac{dp}{3K_s} \right) dV - \int_V \delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{m} dp dV - \int_V \delta \mathbf{u}^T d\mathbf{f} dV - \int_S \delta \mathbf{u}^T d\mathbf{t} dS = 0 \quad (4)$$

由于渗流连续性方程含有时间项, 为了将应力和渗流进行耦合, 需对式(4)进行时间的求导, 对于单相饱和流体, $p = p_w$, 具体表示为

$$\int_V \delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{D}_{ep} \left(\frac{d\boldsymbol{\varepsilon}}{dt} + \mathbf{m} \frac{1}{3K_s} \frac{dp_w}{dt} \right) dV - \int_V \delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{m} \frac{dp_w}{dt} dV = \int_V \delta \mathbf{u}^T \frac{d\mathbf{f}}{dt} dV + \int_S \delta \mathbf{u}^T \frac{d\mathbf{t}}{dt} dS \quad (5)$$

考虑某一体积岩石, 根据质量守恒原理, 在 dt 时间内流入该体积内的液量应等于其内部储液量的增加, 流体的渗流用达西定律来描述, 经过推导, 可得出渗流的连续性方程为

$$\left(\mathbf{m}^T - \frac{\mathbf{m}^T \mathbf{D}_{ep}}{3K_s} \right) \frac{d\boldsymbol{\varepsilon}}{dt} - \nabla^T \left[\mathbf{k}_0 \mathbf{k}_r \left(\frac{\nabla p_w}{\rho_w} - \mathbf{g} \right) \right] + \left\{ \frac{n}{K_w} + \left[\frac{1-n}{3K_s} - \frac{\mathbf{m}^T \mathbf{D}_{ep} \mathbf{m}}{(3K_s)^2} \right] \right\} \frac{dp_w}{dt} = 0 \quad (6)$$

式中: \mathbf{k}_0 为初始渗透系数张量与流体密度的乘积; \mathbf{k}_r 为比渗透系数, 为应力、应变或损伤变量等的函数; \mathbf{g} 为重力加速度矢量; n 为孔隙度; K_w 为流体的体积模量。

采用 Kozeny-Carman 方程描述渗透系数 k 与孔隙度 n 之间的关系为

$$k = \frac{\rho g}{\nu} \frac{d^2}{180} \frac{n^3}{(1-n)^2} \quad (7)$$

式中: ν 为流体的动力黏度系数, d 为固体颗粒的

平均尺寸(直径)。

由孔隙弹性理论可以导出孔隙度和体积应变 ε_v 之间的关系为

$$n = 1 - \frac{1-n_0}{\varepsilon_v} \quad (8)$$

式中: n_0 为初始孔隙度。

将式(8)代入(7)可得

$$k = k_0 \left[\left(\frac{1}{n_0} \right) (1 + \varepsilon_v)^3 - \left(\frac{1-n_0}{n_0} \right) (1 + \varepsilon_v)^{-1/3} \right]^3 \quad (9)$$

式中: k_0 为初始应力作用下岩石的渗透系数。

2.2 夹层界面损伤力学模型

将含夹层盐岩地层接触界面或层面简化为一种特殊的裂缝介质, 采用内聚力黏结单元来描述, 在单元损伤前, 应力 - 应变满足弹性关系^[12], 即

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \mathbf{K} \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} & K_{nt} \\ K_{ns} & K_{ss} & K_{st} \\ K_{nt} & K_{st} & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \\ \varepsilon_t \end{Bmatrix} \quad (10)$$

式中: t_n , t_s 和 t_t 分别为界面单元法向、第一和第二切向承受的应力; \mathbf{K} 为界面单元刚度矩阵; ε_n , ε_s 和 ε_t 分别为界面单元法向、第一和第二切向的应变, 即

$$\varepsilon_n = \frac{d_n}{T_0}, \quad \varepsilon_s = \frac{d_s}{T_0}, \quad \varepsilon_t = \frac{d_t}{T_0} \quad (11)$$

式中: d_n , d_s 和 d_t 分别为界面单元法向、第一和第二切向的位移; T_0 为界面厚度。

(1) 夹层界面起裂准则

采用二次应力准则来描述界面的起裂行为, 当界面单元 3 个方向承受的应力与其对应临界应力的比值的平方和达到 1 时, 界面单元开始破坏, 夹层界面起裂并扩展, 即

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_t}{t_t^0} \right\}^2 = 1 \quad (12)$$

式中: t_n^0 为界面单元的法向临界拉应力, 具体值为界面的抗拉强度; t_s^0 , t_t^0 分别为第一和第二切向的临界拉应力; 符号 $\langle \rangle$ 表示应力只取正值, 即界面单元在承受压应力时或产生压缩变形时不会出现损伤。

(2) 夹层界面损伤演化方程

夹层界面裂缝的扩展形式还有可能为法向和切向扩展的混合形式, 采用 Benzeggagh-Kenane(BK) 能量模式进行描述, 当界面单元的切向第一断裂能 G_s^C 和第二断裂能 G_t^C 相等时, 界面裂缝扩展的总断裂能 G^C 可表示为

$$G^C = G_n^C + (G_s^C - G_n^C) \left(\frac{G_s + G_t}{G_n + G_s + G_t} \right)^\eta \quad (13)$$

式中： G_n^C 为界面单元法向断裂能； G_n 、 G_s 和 G_t 分别为界面单元法向、第一和第二切向应力所对应位移上所做的功； η 为待定参数。

采用标量损伤指标 D 来描述夹层界面裂缝的扩展，当 $D=0$ 时，界面单元没有损伤，当 $D=1$ 时地层界面开裂。

界面单元承受压应力时不会出现损伤，当界面单元承受拉应力时，采用刚度退化来描述界面单元的损伤演化过程，如图 1 所示，损伤后界面单元的应力可表示为

$$\left. \begin{aligned} t_n &= (1-D)\bar{t}_n \\ t_s &= (1-D)\bar{t}_s \\ t_t &= (1-D)\bar{t}_t \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中： \bar{t}_n 、 \bar{t}_s 和 \bar{t}_t 分别为界面单元法向、第一和第二切向按照线弹性准则(未损伤)得到的应力。

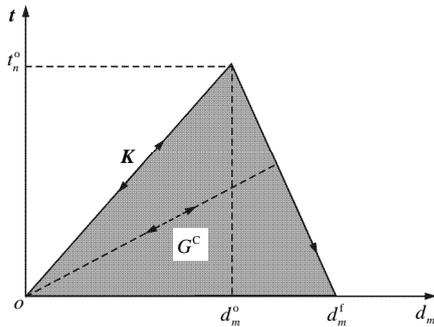


图 1 界面单元损伤演化过程中的应力 - 位移准则
Fig.1 Criterion of stress and displacement during damage evolution of interface element

采用线性位移扩展准则来描述界面单元的损伤演化，即

$$D = \frac{d_m^f (d_m^{\max} - d_m^o)}{d_m^{\max} (d_m^f - d_m^o)} \quad (15)$$

式中： d_m^{\max} 为在加载过程中，单元所达到的最大位移； d_m^f 为当单元完全破坏时对应的位移幅值； d_m^o 为单元开始发生损伤时的位移值。对于界面单元的混合模式变形，引入等效位移 d_m ，即

$$d_m = \sqrt{\langle d_n \rangle^2 + d_s^2 + d_t^2} \quad (16)$$

二次应力起裂准则所对应的 d_m^o 可表示为

$$d_m^o = \sqrt{1 + \beta_1^2} \left[\left(\frac{K_n}{t_n^o} \right)^2 + \left(\frac{\beta_1 K_s}{\sqrt{1 + \beta_2^2} t_s^o} \right)^2 + \left(\frac{\beta_1 \beta_2 K_t}{\sqrt{1 + \beta_2^2} t_t^o} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (17a)$$

其中，

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 &= d_{\text{shear}} / d_n \\ \beta_2 &= d_t / d_s \end{aligned} \right\} \quad (17b)$$

式中： d_{shear} 为 2 个剪切方向的位移矢量和。等效位移 $d_m = \sqrt{d_n^2 + d_{\text{shear}}^2} = \sqrt{d_n^2 + d_s^2 + d_t^2}$ ，定义界面单元初始的刚度矩阵为

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_n & 0 & 0 \\ 0 & K_s & 0 \\ 0 & 0 & K_t \end{bmatrix} \quad (18)$$

采用基于 B-K 混合模式，界面单元完全破坏时位移 d_m^f 可表示为

$$d_m^f = \{2(1 + \beta_1^2)(1 + \beta_2^2)[G_n^C K_n^\eta (1 + \beta_2^2)^\eta + G_n^C (K_s \beta_1^2 + K_t \beta_1^2 \beta_2^2)^\eta]\} / \{d_m^o [K_n (1 + \beta_2^2) + K_s \beta_1^2 + K_t \beta_1^2 \beta_2^2]\} \quad (19)$$

2.3 夹层界面渗透模型

流体在地层界面中的流动分解为沿界面方向的切向流动和垂直于界面的法向流动，如图 2 所示。

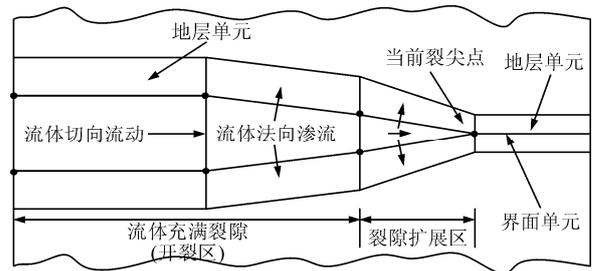


图 2 流体沿地层界面的流动示意图

Fig.2 Sketch of fluid flow within interface elements

流体在界面内的切向流动采用牛顿流公式进行描述^[10]：

$$q = \frac{w^3}{12\mu} \nabla p \quad (20)$$

式中： q 为流体的体积流量， w 为界面单元张开度， μ 为流体的黏性系数。

流体界面中的法向流动，可解释为流体流进界面单元上下表面的体积速率，具体可表示为

$$\left. \begin{aligned} q_t &= c_t (p - p_t) \\ q_b &= c_b (p - p_b) \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

式中： q_t 、 q_b 分别为流体进入界面单元上、下表面的体积流速； c_t 、 c_b 分别为单元上、下表面滤失系数； p_t 、 p_b 分别为单元上、下表面孔隙压力。

3 算例分析

基于上述提出的界面损伤模型和流体渗漏模型，以大型有限元软件 ABAQUS 平台，进行了二次开发，研究了储库盐岩与泥岩界面的开裂以及流体的渗流特性。

3.1 计算模型及参数

以某储油库为例进行分析，储库埋深为 800 m，储库内含有 2 个泥岩夹层，如图 3 所示。水平应力 14.4 MPa，垂向应力 16 MPa，初始孔隙压力 8 MPa。

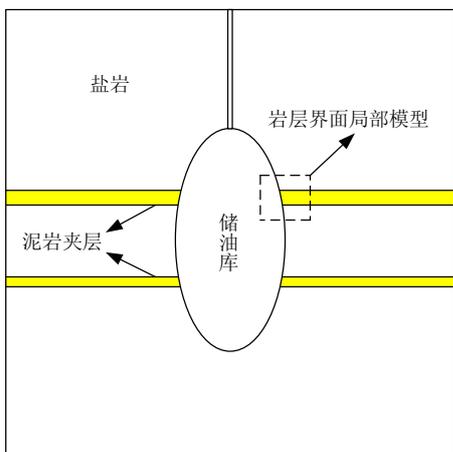


图 3 储油库模型示意图

Fig.3 Sketch of model of oil storage cavern

为了分析储油库的渗漏问题，取岩层界面局部模型进行研究，计算模型如图 4 所示。假设岩体初始处于饱和状态，模型上边界施加上覆岩层压力，对模型下边界和右边界进行法向位移约束(右下角点施加全约束)，模型左边界施加储库内压，并在界面节点 A 处施加流量边界，用以考虑流体沿岩层界面的漏失，流量值为 $5.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 。

岩层采用线弹性孔隙材料模型，暂不考虑岩层

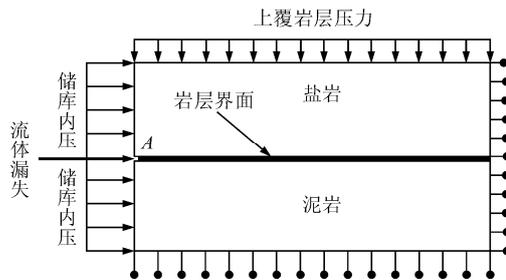


图 4 储油库地层界面渗漏示意图

Fig.4 Sketch of interface seepage in interlayer of oil storage cavern

界面开裂以及流体的漏失渗入引起泥岩和盐岩的塑性破坏，具体计算参数如表 1 所示。

3.2 结果分析

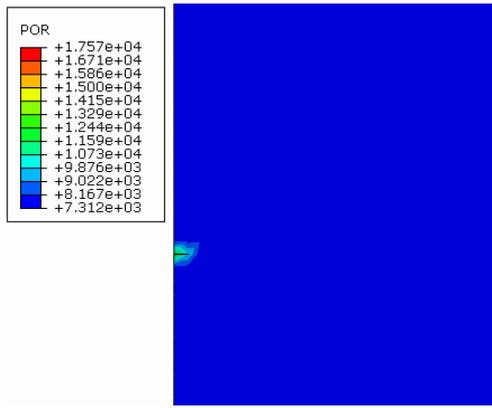
图 5 为界面开裂过程中孔隙压力的分布。由图 5 可知，当储库腔体内压力达到界面开裂条件后，高压流体进入盐岩与泥岩界面，并逐步渗透扩展；开裂的岩层界面周边的孔隙压力分布仅在一定的范围内受裂隙扩展的影响。此外，孔隙压力基本不受裂隙的影响，靠近储库腔体附近的裂隙周围孔隙压力明显高于远场孔隙压力值，而裂隙尖端前方的孔隙压力值要小于远场孔隙压力值；随着裂隙的逐渐扩展，孔隙压力的影响区域也越来越大，由此可见，储库流体沿岩层界面渗漏时，对岩层的孔隙压力的影响非常明显，不可忽视。

当储库以一定的流量注入流体时，储库腔体内压逐渐增大，靠近储库腔体的岩层界面附近孔隙压力逐渐增大，当产生的张应力超过界面的抗拉强度时，岩层界面开裂，流体逐渐渗入，此后孔隙压力逐渐增大。当达到峰值 28.4 MPa 时，岩层界面明显开裂，此后，注入压力趋于稳定，界面的开裂逐渐向深部延伸，注入压力随时间的变化曲线如图 6 所示。

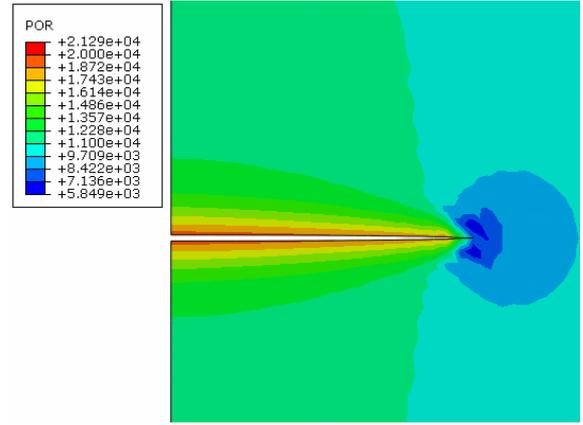
表 1 主要计算参数

Table 1 Main parameters for calculation

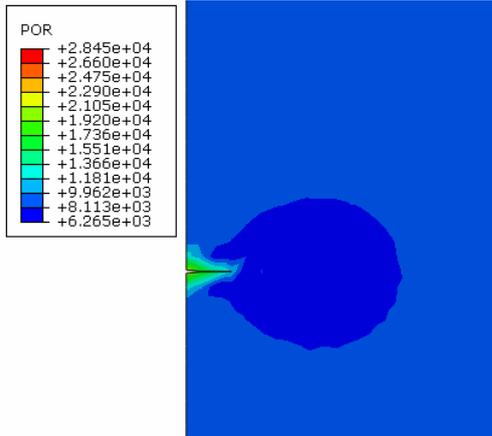
盐岩				泥岩					
弹性模量/Pa	泊松比	渗透系数/(m·s ⁻¹)	孔隙度	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/ Pa	泊松比	渗透系数/(m·s ⁻¹)	孔隙度	
1.6×10 ¹⁰	0.35	8.4×10 ⁻¹⁰	0.01	2 300	1.4×10 ¹⁰	0.40	1.0×10 ⁻⁹	0.06	
界面				流体					
法向刚度/Pa	切向刚度/Pa	法向临界拉应力/Pa	切向临界拉应力/Pa	法向断裂能/(N·m ⁻¹)	切向断裂能/(N·m ⁻¹)	能量指数系数	界面漏失系数/(m ³ ·Pa ⁻¹ ·s ⁻¹)	密度/(kg·m ⁻³)	黏度/(Pa·s)
8.5×10 ¹⁰	8.5×10 ¹⁰	3.2×10 ⁵	3.2×10 ⁵	2.8×10 ⁴	2.8×10 ⁴	2.284	5.88×10 ⁻¹³	1 000	1.0×10 ⁻³



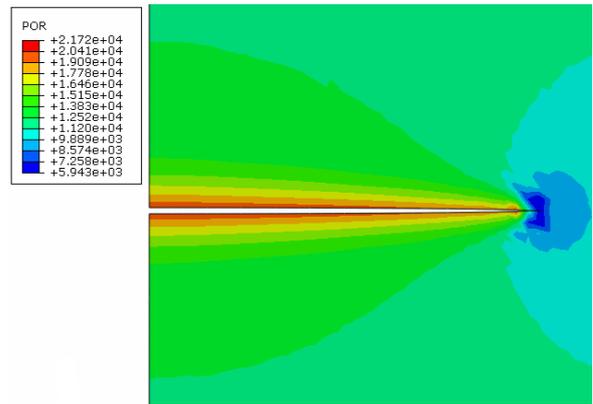
(a) 启裂时



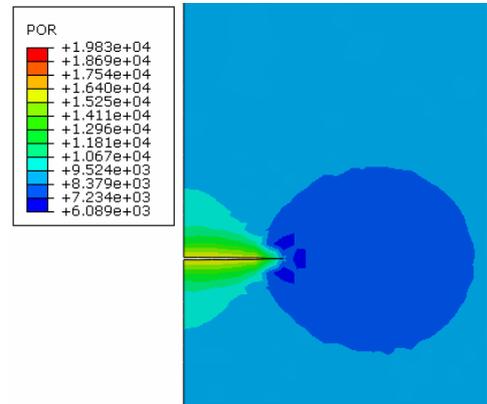
(e) 70 s 后



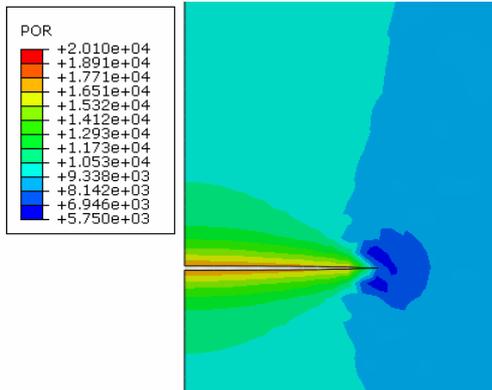
(b) 10 s 后



(f) 100 s 后



(c) 20 s 后



(d) 40 s 后

图 5 不同时期的孔隙压力分布(单位: kPa)

Fig.5 Distributions of pore pressure at different times(unit: kPa)

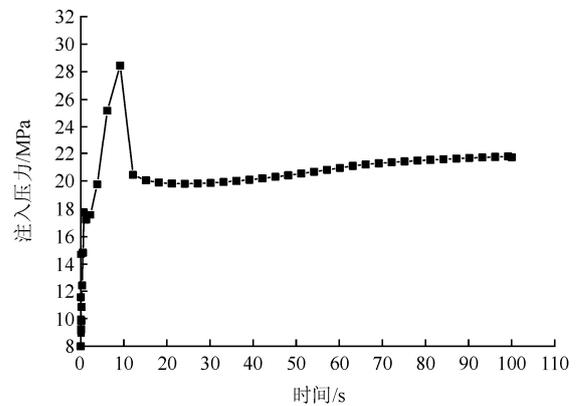


图 6 储库界面开裂时注入压力随时间的变化曲线

Fig.6 Variation curve of injection pressure with time when storage cavern interface ruptures

图 7 为腔体注入流体过程中, 距腔体附近一定范围内孔隙压力沿岩层界面的变化曲线。由图 7 可知, 高压流体沿岩层界面裂缝渗透过程中, 沿裂缝通道流体压力迅速降低, 在裂隙尖端前缘达到最小值; 当缝尖压力满足岩层界面开裂扩展准则时, 裂缝才向前方扩展, 否则裂缝停止扩展, 缝内压力趋于暂时稳定。

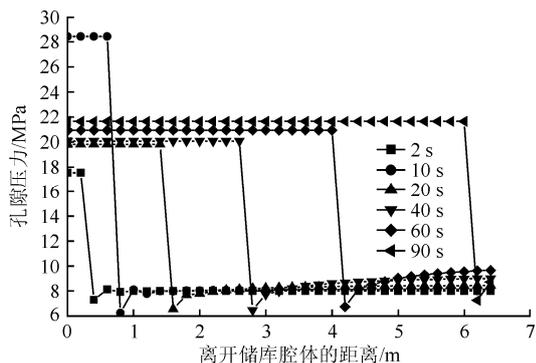


图7 不同时刻孔隙压力沿岩层界面的分布曲线

Fig.7 Pore pressure distribution curves along rock interface with time

图8为腔体附近裂缝张开度与时间的关系曲线。由图8可知，在15s之前，界面的张开度出现了波动，这是由于高压流体在沿界面渗漏的过程中，储库腔体内压变化所致，在此之后，界面的张开度随时间的增大而逐渐增大，100s后裂缝的最大张开度约为2.18mm；孔口处裂缝的张开度在经过一段时间后增加速率减慢，并逐渐趋于稳定。

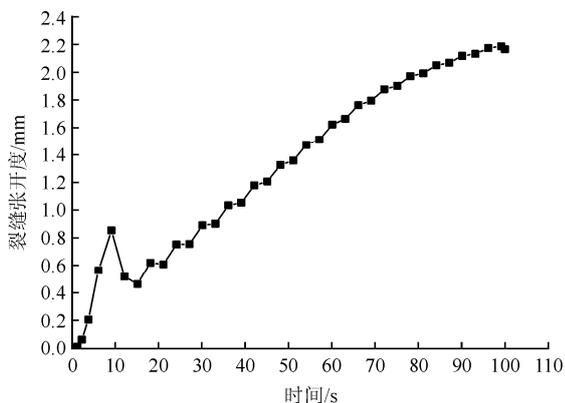


图8 腔体附近裂缝张开度与时间的关系曲线

Fig.8 Relationship curve of opening displacement of crack around cavity with time

图9为不同时刻岩层界面裂缝宽度变化曲线。由图9可知，随时间的增长，裂缝的宽度在逐步变宽，在界面开裂渗流扩展的通道上，界面开裂裂缝呈扇形状张开，界面水力裂缝宽度为距离和时间的函数，在腔体附近裂缝宽度较大，随离开储库腔体距离的增大，裂缝宽度逐渐变小；随时间的增长，裂缝沿岩层界面的开裂深度在逐步变大，20s后界面开裂深度约为1.1m，40s后界面开裂深度约为2.4m，60s后界面开裂深度约为3.8m，90s后界面开裂深度约为5.8m，由此可见，对于层状盐岩储库，界面的开裂造成的渗流场的改变不可忽略。

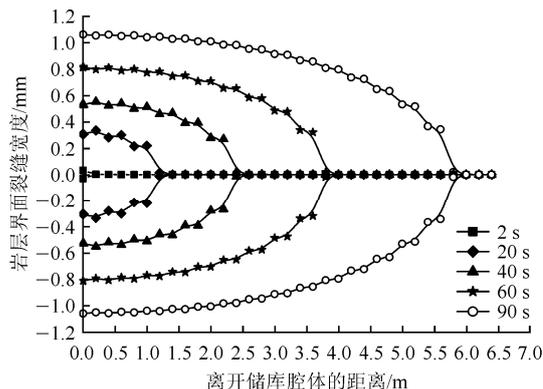


图9 不同时刻岩层界面裂缝宽度变化曲线

Fig.9 Variation curves of crack width of rock stratum interface with time

4 结论

(1) 含夹层盐穴油气储库流体渗漏主要沿夹层带和层间裂隙，基于损伤力学和渗流力学理论，构建了以节点位移和孔隙压力为自由度的界面单元，建立了地层界面开裂的损伤演化方程。

(2) 考虑夹层盐岩体存在地质界面，推导了岩层变形方程、夹层界面变形方程、界面扩展准则以及流体渗流方程，建立了含夹层盐岩双重介质耦合损伤模型，该模型可以考虑层状盐岩地层界面开裂、扩展和流体渗漏。

(3) 计算结果表明，高压流体地层界面渗透过程中，流体压力逐步降低，地层界面裂缝呈扇形状张开，所以，在油气储库运营过程中，特别是油气注入腔体的过程中，严格控制腔体压力不得大于地层界面临界应力，避免在分层界面的流体渗透，保持腔体的致密性及稳定性。本文没有考虑盐岩溶解对界面开裂的影响，今后将进一步开展研究。

参考文献(References):

[1] POPP T, KERN H. Monitoring the state of microfracturing in rock salt during deformation by combined measurements of permeability and P- and S-wave velocities[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy, 2000, 25(2): 149 - 154.

[2] POPP T, KERN H, SCHULZE O. Evolution of dilatancy and permeability in rock salt during hydrostatic compaction and triaxial deformation[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(B3): 4 061 - 4 078.

[3] STORMONT J C. In-situ gas permeability measurements to delineate

- damage in rock salt[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(7): 1 055 - 1 064.
- [4] HOU Z M. Mechanical and hydraulic behavior of rock salt in the excavation disturbed zone around underground facilities[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(5): 725 - 738.
- [5] 吴文, 侯正猛, 杨春和. 盐岩的渗透特性研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(7): 746 - 749.(WU Wen, HOU Zhengmeng, YANG Chunhe. Investigations on permeability of rock salt[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(7): 746 - 749.(in Chinese))
- [6] 邵保平, 赵阳升, 赵延林, 等. 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 1): 241 - 246. (XI Baoping, ZHAO Yangsheng, ZHAO Yanlin, et al. 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.1): 241 - 246.(in Chinese))
- [7] 周宏伟, 何金明, 武志德. 含夹层盐岩渗透特性及其微观结构特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(10): 2 068 - 2 073.(ZHOU Hongwei, HE Jinming, WU Zhide. Permeability and meso-structure characteristics of bedded salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(10): 2 068 - 2 073.(in Chinese))
- [8] 梁卫国, 杨春和, 赵阳升. 层状盐岩储气库物理力学特性与极限运行压力[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 22 - 27.(LIANG Weiguo, YANG Chunhe, ZHAO Yangsheng. Physico-mechanical properties and limit operation pressure of gas deposit bedded salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 22 - 27.(in Chinese))
- [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): 1 297 - 1 304.(CHEN Weizhong, TAN Xianjun, WU Guojun, et al. Research on gas seepage law in laminated salt rock gas storage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(7): 1 297 - 1 304.(in Chinese))
- [10] 谭贤君, 陈卫忠, 杨建平, 等. 盐岩储气库温度 - 渗流 - 应力 - 损伤耦合模型研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3 633 - 3 641.(TAN Xianjun, CHEN Weizhong, YANG Jianping, et al. Study of THM-damage coupling model of gas storage in salt rock with interlayer[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3 633 - 3 641.(in Chinese))
- [11] 贾善坡. Boom Clay 泥岩渗流 - 应力 - 损伤耦合流变模型、参数反演与工程应用[博士学位论文][D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2009.(JIA Shanpo. Hydro-mechanical coupled creep damage constitutive model of Boom clay, back analysis of model parameters and its engineering application[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2009.(in Chinese))
- [12] 寇剑锋, 徐 绯, 郭家平, 等. 黏聚力模型破坏准则及其参数选取[J]. 机械强度, 2011, 33(5): 714 - 718.(KOU Jianfeng, XU Fei, GUO Jiaping, et al. Damage law of cohesive zone model and selection of the model parameters[J]. Journal of Mechanical Strength, 2011, 33(5): 714 - 718.(in Chinese))