

# 变围压-孔压条件下含气煤岩 应力应变关系研究\*

房平亮<sup>1,2</sup>, 邵黎明<sup>1</sup>, 曾志国<sup>3</sup>, 李宁<sup>1</sup>

- (1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083;
2. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083;
3. 华北油田公司采油工程研究院, 河北 任丘 062552)

**摘要:** 为研究围压及孔压对含气煤岩本构关系的影响,基于弹性力学及破坏理论,建立了细观非均匀弹脆性模型,利用 FEPG 数值模拟软件,编制了有限元计算程序,用数值方法模拟了含气煤岩体在变围压-孔压条件下的变形及破坏规律,结果表明,围压增大时,煤岩体由脆性逐渐转呈柔性,且承载能力有所增强,而孔压的影响则恰好相反.将数值模拟结果分别与变围压、变孔压实验数据进行了对比,两者基本相符,充分验证了力学模型的适用性及计算程序的正确性.

**关键词:** 围压; 孔压; 细观非均匀性; 弹脆性模型; 应力应变关系; 脆性; 柔性

**中图分类号:** O39      **文献标志码:** A

doi: 10.3879/j.issn.1000-0887.2014.07.006

## 引 言

地层条件下的含气煤岩力学性质十分复杂,前人通过一系列的室内实验和基础理论研究<sup>[1-2]</sup>,得出了含气煤岩在不同围压、孔压作用下的应力应变关系.陈忠辉等<sup>[3]</sup>、梁正召等<sup>[4]</sup>、傅宇方等<sup>[5]</sup>对岩石在不同围压条件下的本构关系、变形破坏行为等进行了数值模拟分析,但忽略了孔隙与吸附瓦斯对煤岩性质的影响.徐涛、唐春安等<sup>[6-7]</sup>考虑了气固耦合作用,并对含瓦斯煤岩的破裂、突出过程进行了数值模拟.然而变围压-孔压条件下含气煤岩应力应变关系的数值模拟研究目前还鲜有报道.

针对煤岩类多孔介质在地层周围应力和孔隙瓦斯压力作用下的变形和破坏现象,本文在寇绍全等<sup>[1]</sup>学者含气煤岩变围压下的实验基础上,设计了相应的变孔压实验,并以这两种形式的力学实验为参考依据,基于含气煤岩体变形理论,综合考虑了煤岩体模量、强度的细观非均匀性,建立了气固耦合弹脆性模型,借助 FEPG 有限元软件,编制了相应的数模计算程序.最

\* 收稿日期: 2013-12-12; 修订日期: 2014-05-19

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2013AA064902)

作者简介: 房平亮(1983—),男,山东聊城人,博士生(E-mail: fpl@petrochina.com.cn);

邵黎明(1982—),女,山东威海人,博士后(通讯作者. E-mail: shalom@petrochina.com.cn);

曾志国(1974—),男,湖南桃源人(E-mail: cyy.zengzg@petrochina.com.cn);

李宁(1978—),男,辽宁复县人,博士后(E-mail: lining-ripped@petrochina.com.cn).

后将数值模拟结果与实验数据进行了比较,验证了力学模型的适用性和计算程序的正确性。

## 1 煤层瓦斯流固耦合模型满足的基本假设

煤岩体由固体骨架和煤层瓦斯两部分组成,煤层瓦斯充满煤层孔隙空间。含瓦斯煤岩体满足以下几个基本假设:

- (I) 煤岩体为细观弹脆性介质,脆性破坏前遵守广义 Hooke(虎克)定律;
- (II) 煤岩介质存在细观非均匀性。

细观弹脆性物质的抗剪强度  $\tau_s$ , 抗拉强度  $\sigma_t$  和破坏前的弹性模量  $E$  是空间随机变量,服从 Weibull 分布<sup>[8]</sup>。实现方式如下:

$$A = \eta_A \exp\left\{\frac{\ln[-\ln(1-F)]}{m_A}\right\}, \quad (1)$$

式中,  $A$  是随机量,  $F$  是满足  $[0, 1)$  均匀分布的随机数,  $\eta_A, m_A$  是 Weibull 分布的两个参数。其中  $\eta_A$  反映随机量的平均值; Weibull 模数  $m_A$  反映煤岩均匀程度,  $m_A$  越大, 岩石越均匀。

- (III) 煤岩体在瓦斯压力作用下遵循修正的 Terzaghi 有效应力原理。

## 2 煤层瓦斯流固耦合模型的控制方程

瓦斯煤岩体是两相介质, 煤体骨架的变形由有效应力控制:

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} + \alpha \delta_{ij} p, \quad (2)$$

有效应力-应变关系

$$\sigma'_{ij} = \lambda \varepsilon_{ii} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}, \quad (3)$$

应变和位移关系

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}), \quad (4)$$

煤岩体的平衡方程

$$\sigma'_{ij,j} - \alpha p_{,j} \delta_{ij} = 0, \quad (5)$$

其中,  $\sigma'_{ij}$  为有效应力,  $\sigma_{ij}$  是总应力,  $p$  为瓦斯的孔隙压力;  $\alpha$  是等效孔隙压力系数,  $\delta_{ij}$  是 Kronecker 函数;  $\lambda, \mu$  是 Lamé(拉梅)常数;  $\varepsilon, u$  分别表示应变和位移。

## 3 煤岩材料的破坏及破坏效应

### 3.1 单元材料破坏准则

细观单元材料为弹脆性, 其点破坏准则<sup>[9]</sup>为

$$|\tau_p| + \mu \sigma'_p - \tau_s \geq 0, \quad (6)$$

式中,  $\tau_p, \sigma'_p$  分别是岩石体元某个斜截面上的切应力和有效正应力,  $\mu = \tan \varphi$ ,  $\tau_s$  分别为材料的摩擦因数和材料固有剪切强度,  $\varphi$  是材料的摩擦角。

拉伸破坏准则为

$$\sigma'_1 \geq \sigma_t, \quad (7)$$

式中  $\sigma'_1$  是该岩石体元的最大有效主应力,  $\sigma_t$  是材料的抗拉强度。

### 3.2 破坏效应

破裂后单元产生破坏面, 处于压应变状态的材料模量保持初始值; 处于拉应变和剪切状态的材料弹性模量将弱化, 折减  $r$  倍。故每次单元发生破坏, 需进行应力场的平衡计算后, 再

进行下一步的计算。

## 4 数值算例及结果分析

自然界中的煤岩绝大多数处于三向压缩状态,因此研究三向压缩状态下煤岩的变形特性及应力-应变关系,对于煤岩破坏机理的研究有着十分重要的意义.本文即对含瓦斯煤的三轴压缩实验<sup>[2]</sup>做了数值模拟.采用与实验相符的三维模型,试样含瓦斯并受围压作用;一端固定,另一端位移加载速度  $v = 0.001 \text{ mm/s}$  (图 1),模型计算参数见表 1.

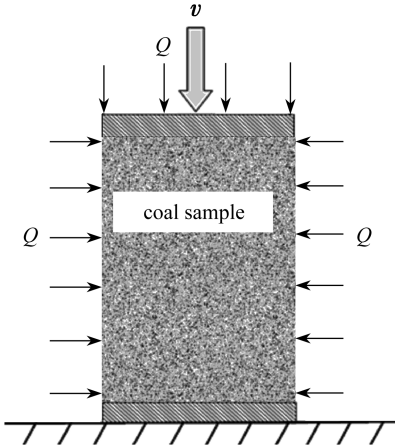


图 1 模型受力简图

Fig.1 Schematic of the model under loading

表 1 数值计算模型参数

Table 1 Material parameters for numerical simulation

parameter	value
modulus of elasticity $E$ /MPa	80
compressive strength $\sigma_c$ /MPa	0.8
tensile strength $\sigma_t$ /MPa	0.2
friction angle $\varphi$ /rad	0.66
Poisson's ratio $\nu$	0.25
effective stress coefficient $\alpha$	0.90
Weibull modulus $m_A$	1.8~2.0
modulus reduction coefficient $r$	35~50

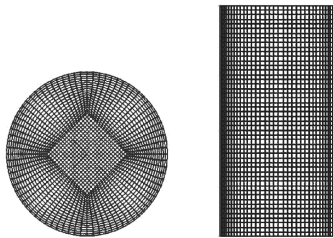
注 对于不同围压条件对试样的模量是否会有影响,颇有争议<sup>[10-11]</sup>,因实验中的围压相对较小,所以本文计算时忽略围压对模量的影响。

**Note** There was debate<sup>[10-11]</sup> on whether the specimen modulus was affected by different confining pressures. Since low confining pressure was used in this experiment, this effect was ignored in calculation.

依据建立的模型,基于有限元软件 FEPCG 平台自编程序进行计算。

**算例 1** 给定孔隙瓦斯压力,改变围压:孔隙瓦斯压力  $p$  为 0.2 MPa,围压  $Q$  依次为 0.15 MPa、0.20 MPa、0.45 MPa、0.60 MPa、0.75 MPa。

**算例 2** 给定围压,改变孔隙瓦斯压力:围压  $Q$  为 0.8 MPa,孔隙压力依次为 0 MPa、0.2 MPa、0.4 MPa、0.6 MPa、0.8 MPa、1.0 MPa。



(共分为 100 000 个六面体单元,每个单元尺寸约为  $0.6 \times 0.6 \times 2 \text{ mm}^3$ )

(meshed into 100 000 hexahedral elements with sizes of about  $0.6 \times 0.6 \times 2 \text{ mm}^3$ )

图 2 圆柱模型顶面与侧面的网格划分

Fig.2 Top face and side face meshing of the cylinder coal specimen

### 4.1 计算过程及模拟结果

计算采用煤样的圆柱模型,模型尺寸与实际尺寸一致,其网格划分如图 2.

算例 1 的计算结果:

图 3 是围压  $Q = 0.15 \text{ MPa}$ 、时间  $t = 1\ 000 \text{ s}$ 、轴向变形 1%时的轴向位移云图。

图 4 是围压  $Q = 0.15 \text{ MPa}$ 、时间  $t$  分别为  $500 \text{ s}$ 、 $1\ 000 \text{ s}$ 、 $2\ 000 \text{ s}$ 、 $2\ 500 \text{ s}$ 、对应的轴向变形分别为  $0.5\%$ 、 $1\%$ 、 $2\%$ 、 $2.5\%$ 时的轴向应力图。

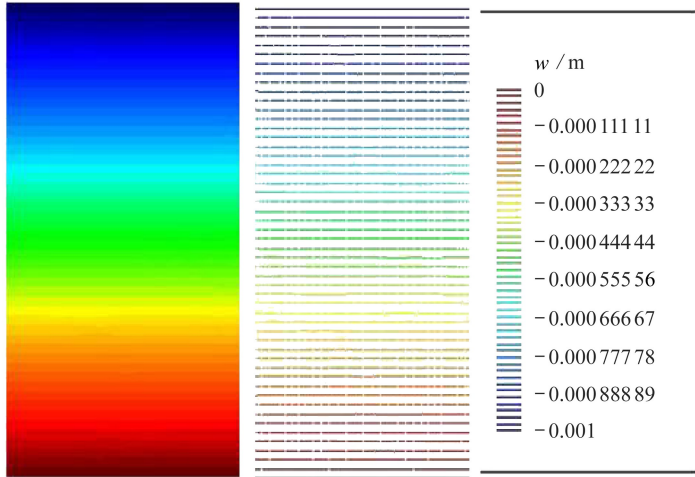


图 3 煤试样轴向位移  $w$

Fig.3 Axial displacement  $w$  of the cylinder coal specimen

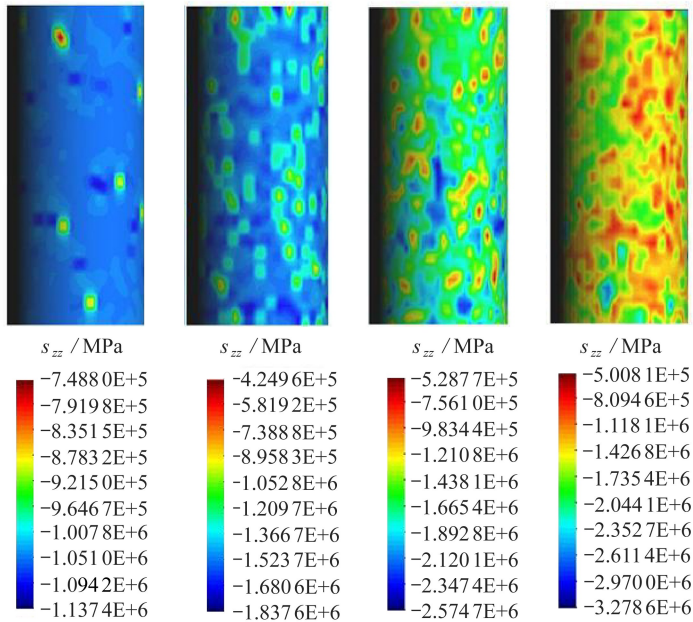


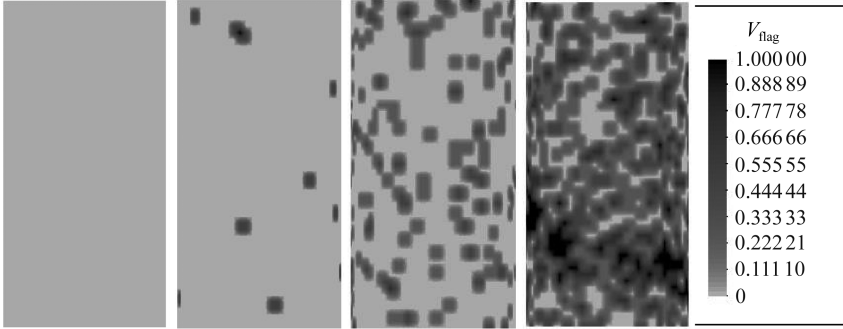
图 4 不同时刻煤试样的轴向应力 ( $s_{zz}$  代表单元的轴向应力)

Fig.4 Axial stress contour of the cylinder coal specimen at different moments ( $s_{zz}$  represents axial stress of the micro unit)

图 5 是围压  $Q = 0.15 \text{ MPa}$ 、时间  $t$  分别为  $500 \text{ s}$ 、 $1\ 000 \text{ s}$ 、 $1\ 500 \text{ s}$ 、 $2\ 000 \text{ s}$ 、对应的轴向变形

分别为 0.5%、1%、1.5%、2% 时的破坏结果图。

由图 4 的前 3 幅应力图可以看出,随着轴向变形的逐渐增大,单元的轴向应力也有逐渐增大的趋势,再把第 3 幅与第 4 幅比较,第 3 幅图应力值为  $1.665\ 4E6$  时第 4 幅为  $1.426\ 8E6$ ,可见轴向应力又有减小的趋势,这在一定程度上定性地反映出单元在外力条件下加载与破坏卸载的特性。而图 5 则反映了煤岩这种不均匀材料随时间的破坏扩展过程,可见轴向变形 0.5% 时试样还处于弹性变化的范围内,没有出现破坏;轴向变形 1% 时,试样刚出现破坏,破坏单元也是随机的;轴向变形 1.5% 时,破坏进一步加剧;直至轴向变形 2% 时,试样靠近底部的破坏单元已经贯通,形成破坏面。



( $V_{\text{flag}}$  代表单元的破坏程度, $V_{\text{flag}}$  值从 0 到 1 表示从未破坏到完全破坏)

( $V_{\text{flag}}$  represents damage extent of the micro unit, the  $V_{\text{flag}}$  values from 0 to 1 indicate from no damage to complete damage)

图 5 不同时刻煤试样的破坏情况

Fig.5 The failure pictures of cylinder coal sample at different time

## 4.2 应力应变关系曲线分析

图 6 为不同围压条件下,煤样的应力应变曲线。可见随围压升高,煤样的力学性质有很大的变化。当围压从 0.15 MPa 逐渐增大到 0.75 MPa 时,弹性区(线性部分)逐渐增长,本构曲线上的最高点(极限强度)及破坏后的残余强度也在逐渐增大,说明随围压逐渐增大,试样的承载能力也在逐渐提高。

破坏后承载能力的下降是脆性破坏的突出特点。图 6 中 0.15 MPa 及 0.20 MPa 围压条件下破坏段的应力变化趋陡,说明在这一围压条件下试样存在脆性破坏。而在 0.45 MPa、0.60 MPa 及 0.75 MPa 围压条件下破坏段的应力变化逐渐趋缓,说明试样逐渐转呈柔性。

煤样在三轴压缩下存在一个由脆性向柔性转化的临界围压。当围压小于临界围压时,煤样呈脆性破坏,有峰值强度,当围压大于临界围压时,煤样则呈柔性变形,没有明显的峰值强度。由图 6 所示在本文计算条件下,由脆性破坏到柔性变形转变的围压约为 0.4~0.6 MPa,这与实验数据大致相符。

再通过算例 2 用来观察孔隙压力所起的作用,并验证计算所选参数的适用性。采用与算例 1 相同的几何模型与表 1 中的物理参数,进行了计算,计算结果见图 7。参考郑哲敏等<sup>[12]</sup>学者的含气煤力学试验方法,针对算例 2 的模拟过程进行了变孔压模型试验,并将实验数据与模拟结果进行了对比(见图 7),两者定性相符,说明上述参数取值、力学模型和有限元程序同样适用于围压恒定、孔隙瓦斯压力改变的情况。

比较图 6 图 7,可以看到孔隙压力与围压对材料的影响有着相反的作用。可见当孔隙压力逐渐升高时,材料的变形与破坏逐渐由柔性转呈脆性。

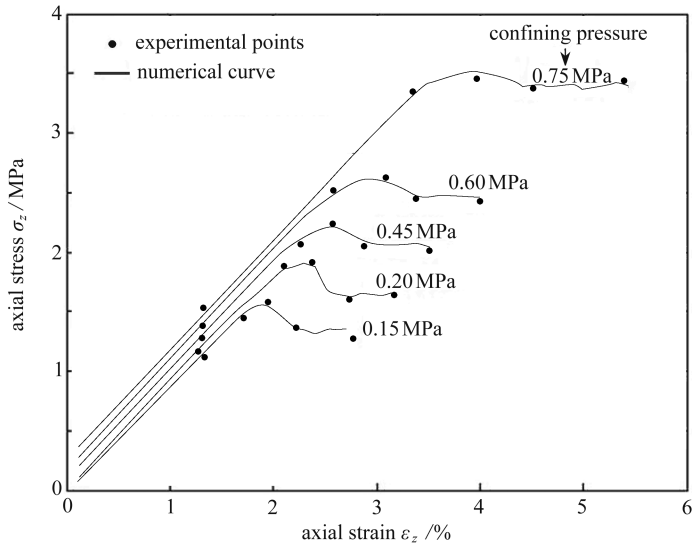


图6 孔压  $p$  为 0.2 MPa, 不同围压条件下轴向应力  $\sigma_z$ - 轴向应变  $\epsilon_z$  关系曲线

Fig.6 The axial stress vs. axial strain curves under different confining pressures ( $p = 0.2$  MPa)

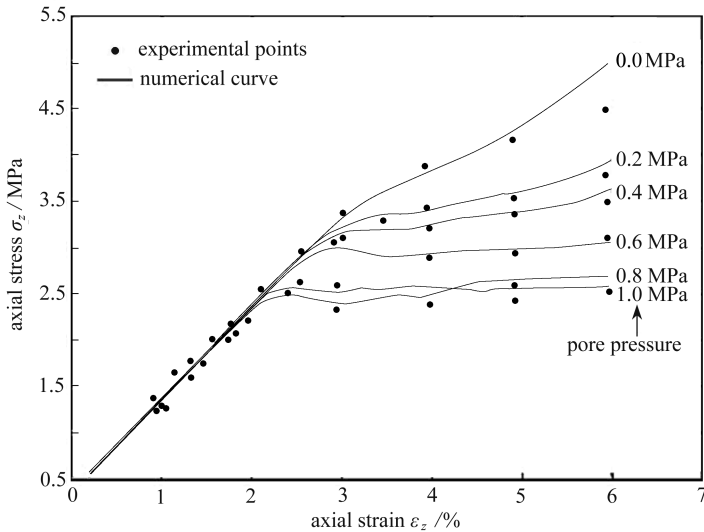


图7 围压  $Q$  为 0.8 MPa, 不同孔隙压力条件下轴向应力  $\sigma_z$ - 轴向应变  $\epsilon_z$  关系曲线

Fig.7  $Q = 0.8$  MPa, the axial stress vs. axial strain curves under different pore pressures

在算例 1 变围压、算例 2 变气压条件下的数值模拟及实验验证的基础上, 分别对围压为 0.2 MPa、0.4 MPa、0.6 MPa 时, 不同气压下的应力应变关系进行了数值模拟, 结果如下。

由图 8、图 9 可见, 当围压为 0.2 MPa、0.4 MPa 时, 含气煤样存在着较为明显的脆性破坏; 由图 10 可见, 当围压为 0.6 MPa 时, 随孔隙压力由 0.8 MPa 降至 0.0 MPa, 应力应变曲线由脆性破坏逐渐转呈理想塑性; 由图 7 可见, 当围压达到 0.8 MPa 时, 随孔隙压力由 1.0 MPa 降至 0.0 MPa, 应力应变曲线几乎均呈现为理想塑性和塑性硬化形态, 这是由于此时围压较高, 煤岩出现了全塑性情况。以上曲线反映出含气煤岩随围压的增大, 变形与破坏呈柔性, 而随孔隙压力的增大, 变形与破坏呈脆性的特征。

需要指明, 本模型只能模拟材料从弹性加载至峰值后的破坏卸载过程。当材料完全破坏后



发生流动,承载力随应变持续增加而减小和趋稳,这个模型是不能模拟的.若只考察在瓦斯和地压作用下煤岩体的初期破坏现象,本模型能模拟材料破坏卸载过程,已经达到了数值模拟对材料本构的要求.

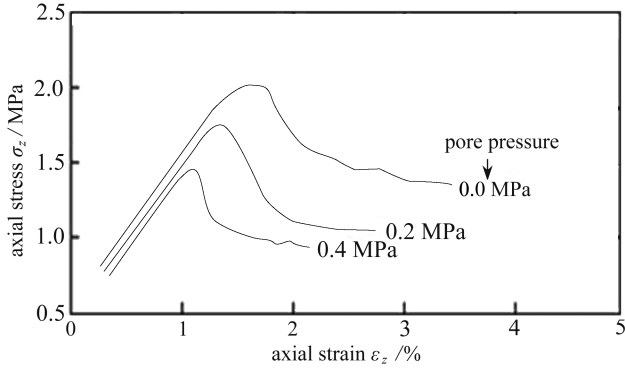


图 8 围压  $Q$  为 0.2 MPa, 不同孔隙压力条件下轴向应力  $\sigma_z$ - 轴向应变  $\varepsilon_z$  关系曲线

Fig.8  $Q = 0.2$  MPa, the axial stress vs. axial strain curves under different pore pressures

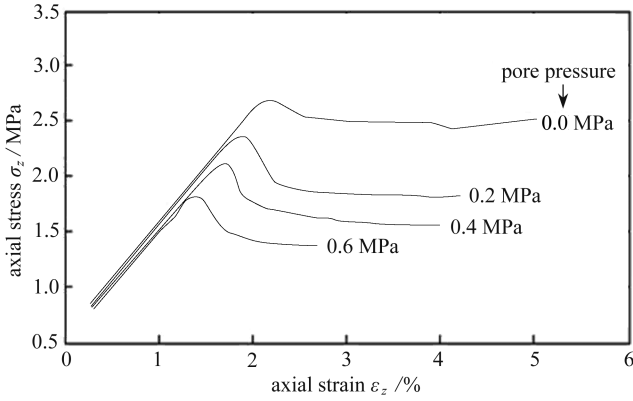


图 9 围压  $Q$  为 0.4 MPa, 不同孔隙压力条件下轴向应力  $\sigma_z$ - 轴向应变  $\varepsilon_z$  关系曲线

Fig.9  $Q = 0.4$  MPa, the axial stress vs. axial strain curves under different pore pressures

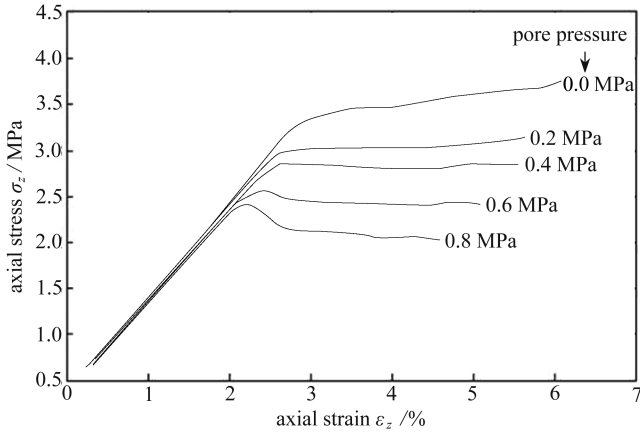


图 10 围压  $Q$  为 0.6 MPa, 不同孔隙压力条件下轴向应力  $\sigma_z$ - 轴向应变  $\varepsilon_z$  关系曲线

Fig.10  $Q = 0.6$  MPa, the axial stress vs. axial strain curves under different pore pressures

## 5 结 论

1) 从数值计算的结果云图及本构曲线模拟的吻合情况可以看出,只要选择的细观参数适当,用形式非常简单的细观非均匀弹脆性模型描述复杂的宏观煤岩应力应变关系,可以模拟出含瓦斯煤岩材料的破坏趋势,并能在一定程度内反映出煤岩的塑性破坏及破坏后仍存在残余强度。

2) 由算例 1 可见,围压对含气煤岩的应力应变关系影响明显.当围压较低时,变形与破坏呈现脆性,当围压较高时,变形与破坏呈现柔性.该算例中由脆性破坏到柔性变形转变的临界围压在 0.4~0.6 MPa 之间。

3) 由算例 2 可见,孔隙压力对含气煤岩本构关系的影响与围压刚好相反。

4) 虽然该算例中的参数取值特指某一实验材料,数值模拟得到的规律却是普适的,不同的含气煤岩材料应力应变关系可以通过不同的力学参数予以反映。

### 参考文献(References):

- [1] 寇绍全,丁雁生,陈力,陶俊,叶东英. 周围应力与孔隙流体对突出煤力学性质的影响[J]. 中国科学(A辑), 1993, 23(3): 263-267. (KOU Shao-quan, DING Yan-sheng, CHEN Li, TAO Jun, YE Dong-ying. The surrounding stress and pore fluid on the mechanical properties of outburst coal [J]. *Science in China (Series A)*, 1993, 23(3): 263-267. (in Chinese))
- [2] 傅雪海,秦勇,姜波,王文峰. 多相介质煤岩体力学实验研究[J]. 高校地质学报, 2002, 8(4): 446-452. (FU Xue-hai, QIN Yong, JIANG Bo, WANG Wen-feng. Study on mechanics experiments of multiphase medium coal rocks [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2002, 8(4): 446-452. (in Chinese))
- [3] 陈忠辉,谭匡烧,杨文柱. 不同围压作用下岩石损伤破坏的数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(5): 576-580. (CHEN Zhong-hui, TAN Kuang-shao, YANG Wen-zhu. Numerical simulation of damage and failure of rocks under different confining pressures [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, 23(5): 576-580. (in Chinese))
- [4] 梁正召,唐春安,张永彬,马天辉. 准脆性材料的物理力学参数随机概率模型及破坏力学行为特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 718-727. (LIANG Zheng-zhao, TANG Chun-an, ZHANG Yong-bin, MA Tian-hui. On probability model of physic-mechanical parameters of quasi-brittle materials and associated mechanical failure behaviors [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(4): 718-727. (in Chinese))
- [5] 傅宇方,黄明利,任凤玉,唐春安. 不同围压条件下孔壁周边裂纹演化的数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 577-588. (FU Yu-fang, HUANG Ming-li, REN Feng-yu, TANG Chun-an. The numerical evolution of hole wall surrounding the crack under different confining pressure simulation analysis [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(5): 577-588. (in Chinese))
- [6] 徐涛,郝天轩,唐春安,杨天鸿. 含瓦斯煤岩突出过程数值模拟[J]. 中国安全科学学报, 2005, 15(1): 107-110. (XU Tao, HAO Tian-xuan, TANG Chun-an, YANG Tian-hong. Numerical simulation of outburst process of gas-coal and rock [J]. *China Safety Science Journal*, 2005, 15(1): 107-110. (in Chinese))
- [7] 徐涛,杨天鸿,唐春安,唐世斌. 含瓦斯煤岩破裂过程固气耦合数值模拟[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2005, 26(3): 293-296. (XU Tao, YANG Tian-hong, TANG Chun-an, TANG Shi-bin. Numerical simulation on coupled solid-gas flow in failure process of gaseous coal and rock [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2005, 26(3): 293-296. (in Chinese))



- Chinese))
- [8] Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1951, **18**: 293-297.
- [9] 郑颖人, 沈珠江, 龚晓南. 岩土塑性力学原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.(ZHENG Ying-ren, SHEN Zhu-jiang, GONG Xiao-nan. *Geotechnical Plastic Mechanics* [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002.(in Chinese))
- [10] 徐涛, 唐春安, 王述红, 张永彬. 岩石破裂过程围压效应的数值试验[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2004, **35**(5): 840-844.(XU Tao, TANG Chun-an, WANG Shu-hong, ZHANG Yong-bin. Numerical tests on confining pressure effect in rock failure process [J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2004,**35**(5): 840-844.(in Chinese))
- [11] 谢和平, 董毓利, 李世平. 不同围压下混凝土受压弹塑性损伤本构模型的研究[J]. 煤炭学报, 1996, **21**(3): 265-270.(XIE He-ping, DONG Yu-li, LI Shi-ping. Study on concrete under compression elastoplastic damage constitutive model for different confining pressure[J]. *Journal of China Coal Society*, 1996, **21**(3): 265-270.(in Chinese))
- [12] 郑哲敏, 丁雁生, 陈力. 煤与瓦斯突出的基本机理[R]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2007.(ZHENG Zhe-min, DING Yan-sheng, CHEN Li. The basic mechanism of coal and gas outburst [R]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2007.(in Chinese))

## Study on the Stress-Strain Relationship of Gas-Bearing Coal Rock Under Variable Confining Pressure-Pore Pressure Conditions

FANG Ping-liang<sup>1,2</sup>, SHAO Li-ming<sup>1</sup>, ZENG Zhi-guo<sup>3</sup>, LI Ning<sup>1</sup>

(1. *Research Institute of Petroleum Exploration & Development (RIPED)*,

*PetroChina, Beijing 100083, P.R.China;*

2. *School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, P.R.China;*

3. *Petroleum Production Engineering Research Institute of Huabei Oilfield Company, Renqiu, Hebei 062552, P.R.China)*

**Abstract:** Under different confining pressure-pore pressure conditions, the numerical method was used to simulate the failure process and the stress-strain relationship of gas-bearing coal rock. A micro-heterogeneous elastic-brittle model based on elasticity theory and failure theory was constructed with the influences of confining pressure and pore pressure considered. An FEM program was developed partially out of the FEPG software, to simulate the deformation and failure behaviors of the gas-bearing coal rock under variable confining pressure-pore pressure conditions. The results show that the coal rock becomes ductile with increase of the confining pressure, and the carrying capacity is enhanced, while the influence of the pore pressure is just opposite. The simulation results quantitatively agree well with the experimental results, which, to a certain extent, proves accuracy of the proposed constitutional model and effectiveness of the FEM program.

**Key words:** confining pressure; pore pressure; micro-heterogeneous; elastic-brittle model; stress-strain relationship; brittleness; ductility

**Foundation item:** The National High-tech R&D Program of China (863 Program) (2013AA064902)