

考虑损伤的含瓦斯煤有效应力方程

刘星光^{1,2}, 高峰^{1,2}, 张志镇^{1,2}, 邢燕^{1,2}, 李玺茹^{1,2}

1. 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏徐州 221008
2. 中国矿业大学力学与建筑工程学院, 江苏徐州 221116

摘要 煤层开采和瓦斯抽放引起的煤体损伤演化不仅使煤体力学性质发生改变, 而且还影响煤与瓦斯的相互作用。本文基于损伤力学与多孔介质理论, 并考虑煤体吸附瓦斯膨胀变形效应, 建立了压缩条件下含瓦斯煤体的有效应力方程, 得到了与含瓦斯煤体损伤演化相关的孔隙压有效应力系数和吸附有效应力。利用含瓦斯煤体有效应力方程和线弹性本构模型, 计算分析了不同应力条件下含瓦斯煤体的变形与有效应力系数演化特征。结果表明, 计算值与试验结果一致性较好, 可以有效描述含瓦斯煤体的损伤力学行为。

关键词 损伤演化; 含瓦斯煤体; 吸附膨胀; 有效应力

中图分类号 TD713

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.03.004

Effective Stress Equation of Gas-saturated Coal Considering Damage

LIU Xingguang^{1,2}, GAO Feng^{1,2}, ZHANG Zhizhen^{1,2}, XING Yan^{1,2}, LI Xiru^{1,2}

1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, Xuzhou 221008, Jiangsu Province, China
2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu Province, China

Abstract The damage growth of coal induced by coal mining and gas exploitation conduces to not only the degradation of mechanical properties, but also the modification of interaction between coal and gas. Considering the swelling deformation of coal during adsorbing gas, the effective stress equation for gas-saturated coal under compression is built up based on damage mechanics and porous media theory. The pore pressure effective stress coefficient and adsorption effective stress related with damage evolution of gas-saturated coal are obtained. Then by using the effective stress equation and linear elastic constitutive model, the deformation and effective stress coefficient of gas-saturated coal are computationally analyzed with the different stress conditions. The computing value fits with the test result quite well, the fact indicates the equation is able to effectively describe the mechanical behavior of gas-saturated coal.

Keywords damage evolution; gas-saturated coal; adsorption swelling; effective stress

0 引言

煤炭生产与瓦斯抽放过程中, 破坏了煤层局部范围原有的应力场和瓦斯压力场的平衡, 导致采掘空间周围煤体的应力场改变和瓦斯渗流。研究含瓦斯煤的变形和力学响应特征, 对于预防煤和瓦斯突出及采动影响下煤层瓦斯的抽放具有重要意义^[1]。煤是一种具有孔隙裂隙结构的多孔介质, 瓦斯气体通常以游离和吸附状态赋存于煤层中, 煤粒内的微孔隙

和煤体的裂隙均被吸附瓦斯和游离瓦斯所充满, 并与煤粒本身构成统一的整体。煤体变形和破坏是由作用在煤体骨架上的平均法向力所决定的, 称之为有效应力。有效应力原理起初用于土力学中的孔隙水压力分析, 认为增加外部静水压力与降低相同值的孔隙水压力所产生的材料体积变化相等, 剪切应力仅与法向应力和孔隙压力差值有关^[2,3]。针对多孔介质有效应力方程的研究已经取得了较多的成果^[4-7]。考虑到煤与

收稿日期: 2012-11-27; 修回日期: 2012-12-25

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2011CB201205; 2010CB226804); 《科技导报》博士生创新研究资助计划项目(No.kjdb2011010)

作者简介: 刘星光, 博士研究生, 研究方向为采动岩体力学和煤与瓦斯共采理论, 电子信箱: lxgcumt@126.com; 高峰(通信作者), 教授, 研究方向为岩石断裂力学, 电子信箱: fgao@cumt.edu.cn

瓦斯相互作用的机制十分复杂,特别是受到瓦斯吸附效应的作用,直接采用土力学中的有效应力理论不能准确描述煤与瓦斯的作用机制,为此,国内外众多学者针对含瓦斯煤的有效应力方程也开展了大量的研究工作。卢平和沈兆武^[9]提出了含瓦斯煤的双重有效应力原理。George等^[9]、吴世跃等^[10]、李祥春等^[11]、祝捷等^[12]分别提出了考虑瓦斯吸附、解吸影响的含瓦斯煤有效应力方程。陶云奇等^[13]提出了考虑温度效应的含瓦斯煤有效应力方程。这些成果的应用为含瓦斯煤层的安全开采和煤层瓦斯抽放起到了重要的指导作用。

由于在煤层开采或瓦斯抽放过程中,煤层应力和孔隙瓦斯压力重新分布,煤体内损伤发展,孔隙分布、张开度和连通状态改变,影响了煤与瓦斯的相互作用,但现有的有效应力方程研究中很少考虑煤体损伤的影响。为进一步揭示含瓦斯煤体的变形破坏机制,本文基于损伤力学与多孔介质理论,并考虑煤体吸附瓦斯膨胀变形效应,建立了压缩条件下含瓦斯煤体的各向异性有效应力方程,得到了与损伤演化相关的孔隙压有效应力系数和吸附有效应力,并根据现有的试验结果验证了该方程的有效性。

1 含瓦斯煤体有效应力方程

基于连续损伤力学理论,含有损伤的煤体应力-应变关系可以表示为:

$$\sigma_{ij} = \bar{S}_{ijkl} \epsilon_{kl}, \epsilon_{ij} = \bar{C}_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (1)$$

式中, \bar{S}_{ijkl} 和 \bar{C}_{ijkl} 分别为损伤有效弹性系数张量和损伤有效弹性柔度张量。

考虑损伤含瓦斯煤介质的 1 个代表性体积单元,内部包含足够多的煤基质颗粒和孔隙。单元体外边界受总应力为 σ_{ij} ,单元体内瓦斯吸附平衡,孔隙瓦斯压力为 $p\delta_{ij}$,其受力情况如图 1 所示。可以将该受力情况看成图 2 中 3 种载荷情况的叠加,第 1 种情况为单元体外边界上施加均匀的应力 $\sigma_{ij}-p\delta_{ij}$,第 2 种为在单元体内固体骨架上作用均匀应力 $p\delta_{ij}$,第 3 种是单元体内煤颗粒表面受到吸附膨胀应力 $\sigma_s\delta_{ij}$ 。

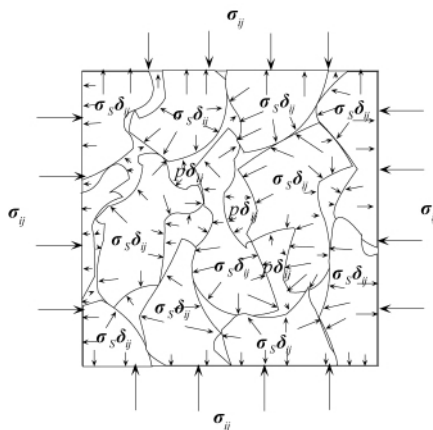
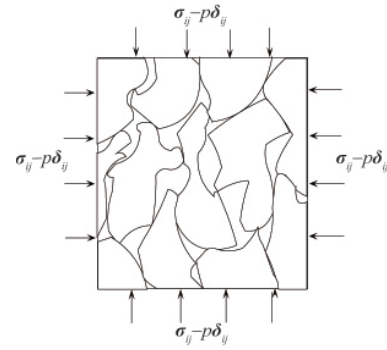
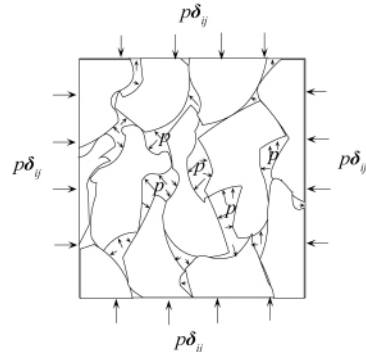


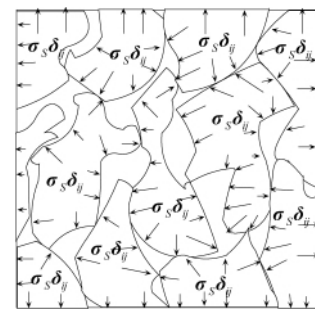
图 1 含瓦斯煤代表性体积单元的受力情况
Fig. 1 Loading condition for the representative element volume of gas-saturated coal



(a) 第 1 种载荷情况
(a) The first loading condition



(b) 第 2 种载荷情况
(b) The second loading condition



(c) 第 3 种载荷情况
(c) The third loading condition

图 2 代表性体积单元的 3 种载荷情况
Fig. 2 Three loading conditions for the representative element volume

在第 1 种载荷作用下,由式(1)可以得到损伤单元体的应变为

$$\epsilon_{ij}^1 = \bar{C}_{ijkl} (\sigma_{ij} - p\delta_{ij}) \quad (2)$$

第 2 种载荷相当于对煤体固体骨架作用均匀的静水压力 $p\delta_{ij}$,并使之产生均匀应变。可以表示为

$$\epsilon_{ij}^2 = C_{ijkl}^m p\delta_{ij} \quad (3)$$

式中, C_{ijkl}^m 为煤固体颗粒的弹性柔度张量。

在自由空间内,煤粒由于吸附瓦斯,表面张力降低,一部分表面能和吸附热转化为煤粒的弹性膨胀能,煤粒体积膨胀,使煤体表现为宏观体积膨胀。吴世跃等^[10]根据表面物理化学和弹性力学原理,推导了煤吸附瓦斯膨胀变形计算公式。

根据该模型,第3种载荷下损伤单元体的应变为:

$$\varepsilon_{ij}^3 = -\frac{2apRT\ln(1+bp)}{9V\bar{K}}\delta_{ij} \quad (4)$$

式中, a 为参考压力下的极限吸附量, m^3/t ; b 为煤的吸附平衡常数, MPa^{-1} ; ρ 为煤的视密度, t/m^3 ; R 为通用气体常数, $R=8.3143\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$; T 为绝对温度, K ; V 为摩尔体积, $V=22.4\times 10^{-3}\text{m}^3/\text{mol}$; $\bar{K}=\frac{\bar{S}_{ijj}}{9}$, 为损伤煤体的有效体积模量, 其中 \bar{S}_{ijj} 为损伤有效弹性系数张量与单位矩阵的运算结果。

求得各部分变形分量,最后由叠加原理得到单元体的总应变为:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^1 + \varepsilon_{ij}^2 + \varepsilon_{ij}^3 = \bar{C}_{ijkl}\sigma_{kl} - p(\bar{C}_{ijkl} - C_{ijkl}^m) - \frac{2apRT\ln(1+bp)}{9V\bar{K}}\delta_{ij} \quad (5)$$

基于有效应力原理,有效应力与应变的关系表示为:

$$\sigma_{ij}^c = \bar{S}_{ijkl}\varepsilon_{kl}, \varepsilon_{ij} = \bar{C}_{ijkl}\sigma_{kl}^c \quad (6)$$

将式(5)带入式(6),由式(1)得到:

$$\sigma_{ij}^c = \sigma_{ij} - p(\delta_{ij} - \bar{S}_{ijkl}C_{klmn}^m) - \bar{S}_{ijkl}\frac{2apRT\ln(1+bp)}{9V\bar{K}} = \sigma_{ij} - \sigma_{ij}^p - \sigma_{ij}^s \quad (7)$$

其中, $\sigma_{ij}^p = \alpha_{ij}p$, 为孔隙瓦斯有效应力; $\alpha_{ij} = \delta_{ij} - \bar{S}_{ijkl}C_{klmn}^m$, 为孔隙压有效应力系数张量; $\sigma_{ij}^s = \bar{S}_{ijkl}\frac{2apRT\ln(1+bp)}{9V\bar{K}}$, 为吸附有效应力。

式(7)即为含瓦斯煤体有效应力方程。可以看出孔隙压有效应力系数和吸附有效应力都是损伤变量的函数。孔隙压有效应力系数和吸附有效应力分别表征了瓦斯对煤体的力学作用和化学作用的程度。煤体损伤改变了瓦斯孔隙压力和吸附瓦斯对煤体的作用,有效应力随损伤发展而演变。

对于各向同性损伤煤体,损伤变量可以用标量 D 表示。采用分段曲线损伤模型^[14],表示为:

$$D = \begin{cases} A_1 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \right)^{B_1} & (0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_c) \\ 1 - \frac{A_2}{C_2 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right)^{B_2} + \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}} & (\varepsilon \geq \varepsilon_c) \end{cases} \quad (8)$$

式中, $A_1 = (E\varepsilon_c - \sigma_c)/E\varepsilon_c$, $B_1 = \sigma_c/(E\varepsilon_c - \sigma_c)$, $A_2 = \sigma_c/E\varepsilon_c$ 为材料常

数, σ_c 和 ε_c 分别为峰值应力和峰值应变。 B_2 和 C_2 为曲线参数,取 $B_2=1.7$, $C_2=0.003\sigma_c^2$ 。

含瓦斯煤的有效应力方程可以表示为:

$$\sigma_{ij}^c = \sigma_{ij} - p \left[1 - \frac{(1-D)^2 K}{K_m} \right] \delta_{ij} - \frac{2apRT\ln(1+bp)}{3V} \delta_{ij} = \sigma_{ij} - \alpha_{ij}p - \sigma_{ij}^s \quad (9)$$

式中, $\alpha_{ij} = \left[1 - \frac{(1-D)^2 K}{K_m} \right] \delta_{ij}$, 为孔隙压有效应力系数张量; $\sigma_{ij}^s = \frac{2apRT\ln(1+bp)}{3V} \delta_{ij}$, 为吸附有效应力; $K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$, 为未损伤煤体的体积模量; E 为煤体弹性模量; ν 为煤体泊松比。 K_m 为煤固体颗粒的体积模量。由上式可以看出,各向同性含瓦斯煤体的吸附有效应力不随煤体的损伤发展而改变。

2 计算结果及分析

李晓泉^[15]利用实验室试验测定了不同围压下含瓦斯煤的各项参数,如表1所示。

表1 含瓦斯煤材料参数

Table 1 Parameters for gas-saturated coal

参数	参数值		
围压/MPa	2	4	6
孔隙瓦斯压力/MPa	0.3	0.3	0.3
试验温度/K	303	303	303
峰值应力 σ_c /MPa	12.93	24.44	31.18
峰值应变 ε_c	0.0507	0.063	0.0676
$a/(\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$	30.925	30.925	30.925
b/MPa^{-1}	1.067	1.067	1.067
E/MPa	272	478	540
泊松比 ν	0.219	0.229	0.231
K_m/MPa	1875	1875	1875
$\rho/(\text{t} \cdot \text{m}^{-3})$	1.3	1.3	1.3

利用含瓦斯煤体有效应力方程和线弹性本构关系,根据表1中参数,计算文[15]中试验煤样的应力-应变曲线和孔隙压有效应力系数演化特征。孔隙瓦斯压0.3MPa,围压2、4和6MPa情况下含瓦斯煤样的应力-应变计算结果和试验结果如图3所示,孔隙压有效应力系数随轴向应变的变化曲线如图4所示。

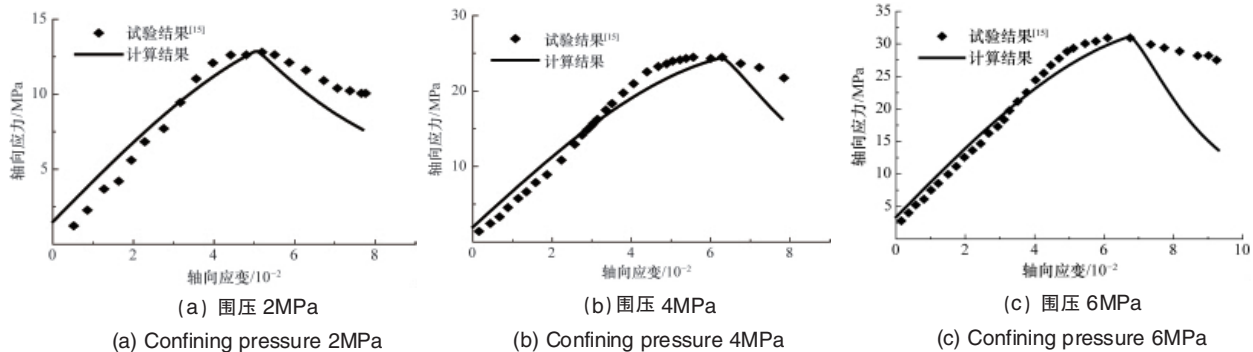


图3 不同围压下含瓦斯煤样的计算结果和试验结果曲线

Fig. 3 Computing result and tested result curves of the gas-saturated coal samples with different confining pressure

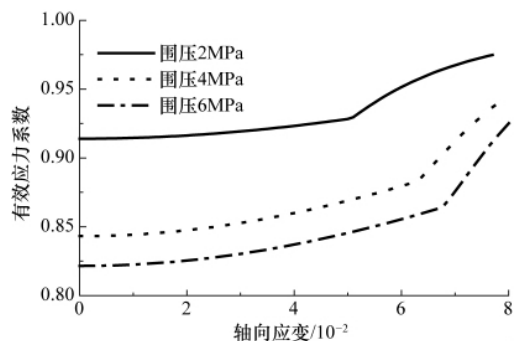


图4 不同围压下含瓦斯煤样的孔隙压有效应力系数随轴向应变的变化曲线

Fig. 4 Curves of pore effective pressure coefficient changing with axial strain of the gas-saturated coal samples with different confining pressure

由图3可以看出,利用建立的有效应力方程计算得到的结果与试验值在非线性变形阶段较好吻合,该有效应力方程可以描述煤层开采和瓦斯抽放对煤与瓦斯相互作用的影响。考虑到采用的损伤演化方程不能体现煤体的初始损伤和压实过程中的损伤恢复,在初始变形阶段计算误差较大,还存在一定的局限性。图4表明,随着轴向应变的增加,损伤不断发展,孔隙压有效应力系数逐渐增大,孔隙瓦斯压力对煤体的力学作用逐渐增强;随着围压增大,孔隙压有效应力系数减小,孔隙瓦斯压力对煤体的力学作用逐渐减弱。

3 结论

本文基于损伤力学和多孔介质理论,建立了压缩条件下含瓦斯损伤煤体的有效应力方程,方程中的孔隙压有效应力系数和吸附有效应力描述了瓦斯对煤体的作用随煤体损伤演化而改变的特征。计算结果表明,损伤增强了瓦斯对煤体的力学作用,而围压减弱了瓦斯对煤体的力学作用。计算结果与试验结果的对比表明,本文建立的含瓦斯煤有效应力方程可以较好地描述含瓦斯煤体的损伤力学行为。

参考文献 (References)

- [1] 刘延保,曹树刚,李勇,等.煤体吸附瓦斯膨胀变形效应的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(12):2484-2491.
Liu Yanbao, Cao Shugang, Li Yong, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(12): 2484-2491.
- [2] Biot M A. General theory of three-dimensional consolidation [J]. Journal

of Application Physics, 1941, 12: 155-164.

- [3] Terzaghi K. Theory soil mechanics[M]. New York: Wiley, 1943.
- [4] Nur A, Byerlee J D. An exact effective stress law for elastic deformation of rock with fluids [J]. Journal of Geophysical Research, 1971, 76(26): 6414-6419.
- [5] Shao J F. Poroelastic behaviour of brittle rock materials with anisotropic damage[J]. Mechanics of Materials, 1998, 30(1): 41-53.
- [6] Zhang K, Zhou H, Hu D, et al. Theoretical model of effective stress coefficient for rock/soil-like porous materials [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2009, 22(3): 251-260.
- [7] 海龙,梁冰,隋淑梅.考虑损伤作用计算多孔介质有效应力研究[J].力学与实践,2010,32(1):29-32.
Hai Long, Liang Bing, Sui Shumei. Mechanics and Engineering, 2010, 32(1): 29-32.
- [8] 卢平,沈兆武.含瓦斯煤的有效应力与力学变形破坏特性 [J]. 中国科学技术大学学报,2001,31(6):687-693.
Lu Ping, Shen Zhaowu. Journal of University of Science and Technology of China, 2001, 31(6): 686-693.
- [9] George J D St, Barakat M A. The change in effective stress associated with shrinkage from gas desorption in coal [J]. International Journal of Coal Geology, 2001, 45: 105-113.
- [10] 吴世跃,赵文.含吸附煤层气煤的有效应力分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(10):1674-1678.
Wu Shiyue, Zhao Wen. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(10): 1674-1678.
- [11] 李祥春,郭勇义,吴世跃,等.煤体有效应力与膨胀应力之间关系的分析[J].辽宁工程技术大学学报,2007,26(4):535-537.
Li Xiangchun, Guo Yongyi, Wu Shiyue, et al. Journal of Liaoning Technical University, 2007, 26(4): 535-537.
- [12] 祝捷,姜耀东,赵毅鑫,等.考虑吸附作用的各向异性煤体有效应力 [J]. 中国矿业大学学报,2010,39(5):699-704.
Zhu Jie, Jiang Yaodong, Zhao Yixin, et al. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(5): 699-704.
- [13] 陶云奇,许江,彭守建,等.含瓦斯煤孔隙率和有效应力影响因素试验研究[J].岩土力学,2010,31(11):3417-3422.
Tao Yunqi, Xu Jiang, Peng Shoujian, et al. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(11): 3417-3422.
- [14] 钱济成,周建方.混凝土的两种损伤模型及其应用[J].河海大学学报,1989,17(3):40-47.
Qian Jicheng, Zhou Jianfang. Journal of Hehai University, 1989, 17(3): 40-47.
- [15] 李晓泉.含瓦斯煤力学特性及煤与瓦斯延期突出机理研究[D].重庆:重庆大学,2010.
Li Xiaoquan. Study of experiment of gas-filled coal mechanical properties and mechanism of delay outburst coal and gas[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.

(责任编辑 齐志红)

《科技导报》“卷首语”栏目征稿

“卷首语”栏目每期邀请一位中国科学院院士和中国工程院院士就重大科技现象、事件,以及学科发展趋势、科学研究热点和前沿问题等,撰文发表个人的见解、意见和评论。本栏目欢迎院士投稿,每篇文章约2000字,同时请提供作者学术简历、工作照和签名电子文档。投稿邮箱:kjdbbjb@cast.org.cn。