

含吸附煤层气煤的有效应力分析

吴世跃^{1,2}, 赵文¹

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110004; 2. 太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 煤层中的气体(煤层气)主要呈吸附状态, 固体煤和吸附气体之间的相互作用关系是目前人们关心的问题, 它与煤矿瓦斯防治和煤层气开采有关。根据表面物理化学和弹性力学原理, 推导了煤吸附膨胀变形、吸附膨胀应力及有效应力计算公式, 理论计算结果和试验结果基本一致。分析表明, 裂隙中自由气体的压力对煤层中的应力状态影响很小, 在煤层内部吸附膨胀应力和吸附膨胀变形规律服从虎克定律。

关键词: 采矿工程; 含吸附煤层气煤; 煤的孔隙结构; 表面张力; 吸附膨胀应力; 孔隙气体压力; 有效应力

中图分类号: TD 713

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)10-1674-05

ANALYSIS OF EFFECTIVE STRESS IN ADSORBED METHANE-COAL SYSTEM

WU Shi-yue^{1,2}, ZHAO Wen¹

(1. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China;

2. College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Most of gas (methane) in coal seam is in adsorbed state. At present, the attention of researchers is attracted to the relationship of the mutual action between the solid coal and the adsorbed methane because it is closely connected with the prevention and control of the burst of coal and gas in mining and the exploitation of methane. Terzaghi's effective stress formula can not be adapted in the calculation of the effective stress in adsorbed methane-coal system. Therefore, based on principles of surface physicochemistry and elastic mechanics, the calculation formulas on the swelling deformation of adsorption, the swelling stress of adsorption, and the effective stress in the adsorbed methane-coal system are derived. The computation solution of theory is essentially accordant with the experimental solution. The test and analysis show that the mechanical effect of the free gas pressure in pore is less important to coal seam because the porosity of coal is smaller than the porosity of soil by an order of magnitude, and that the changing law between the swelling strain of adsorption and the swelling stress of adsorption agrees with the Hooke's law because micropore-containing solid matrix of coal grains is separated by crevices discontinuously; and the swelling deformations of contact points of coal grains under constraint condition are similar to that in uniaxial compression

Key words: mining engineering; adsorbed methane-coal system; pore structure of coal; surface tension; swelling stress of adsorption; pore gas pressure; effective stress

1 引言

暴雨引起的山体滑坡、地基沉降、煤矿煤与瓦

斯的突出、石油天然气和煤层气开采等灾害和工程都与流体和多孔固体的相互力学作用有关, 而有效应力是反映它们之间相互影响和制约的关键因素之一。Terzaghi 于 1923 年提出的饱和土有效应力原理

收稿日期: 2004-01-13; 修回日期: 2004-03-30

基金项目: 山西省自然科学基金资助项目(991028)

作者简介: 吴世跃(1959-), 男, 1984年毕业于东北大学采矿工程专业, 现为在职博士研究生、教授, 主要从事渗流力学、安全工程方面的教学与科研工作。E-mail: wushiyue2000@yahoo.com.cn。

能解决土力学问题,但并不完全适应富含吸附煤层气的煤。煤的孔隙结构与土的孔隙结构不同,其孔隙率和孔径比土的小得多^[1]。煤层中煤层气主要是吸附状态(90%以上)气体,它是煤和气体分子间作用力的体现,吸附煤层气不传递气体压力,其力学性质接近固体,而土中的水主要是自由水,它受重力作用,能传递静水压。正是这些差别使二者的有效应力计算不同。文[1~5]对含吸附煤层气煤的有效应力规律进行了研究,但并未取得一致性研究结果,甚至有些结论相互矛盾,也没能很好地解释上述差别。例如文[2]认为孔隙压引起的吸附膨胀应力是孔隙压的几倍、几十倍,甚至超过上覆岩层的压力;而文[1]却认为自由气体的压力(孔隙压)对煤的变形影响很小,可以忽略不计;又如文[3,4]提出的双重有效应力原理并没有解释吸附膨胀应力的影响。因此,本文将对这一问题进行研究,愿与广大学者商榷。

2 煤的表面压力与吸附性能关系

煤层气的主要成分是 CH_4 。实验室研究表明煤对 CH_4 吸附属于物理吸附,吸附等温线服从 Languri 方程^[6],承压煤样和不承压煤样吸附量基本相同^[1]。生产实践证明其基本符合煤矿实际。

$$q = \frac{abp}{1+bp} \quad (1)$$

式中: q 为吸附平衡时吸附煤层气量(m^3/t), a 为在参考压力下的极限吸附量(m^3/t), p 为自由煤层气压力(孔隙压, Pa), b 为煤的吸附平衡常数(Pa^{-1})。

根据实测 q, p 和式(1)通过回归分析可计算出吸附特征常数 a, b , 由 a 根据下式可以计算出煤的比表面积:

$$S = aAN/V \quad (2)$$

式中: S 为煤的比表面积(m^2/t), A 为气体分子吸附截面积(m^2), $N = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ 为阿伏加德罗常数, $V = 22.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mol}$ 为摩尔容积,其余符号同前。

煤分子之间及煤分子与气体分子间引力和煤表面积越大,则表面张力及吸附气体能力也越大,即 a, b 越大,煤和气体间吸附能力越强。固体吸附气体后表面张力降低。根据表面物理化学原理^[6,7],固体表面超量和表面张力的变化量可分别表示为

$$\Gamma = \frac{q}{VS} \quad (3)$$

$$\pi = \gamma_0 - \gamma_s = -\int_0^p \Gamma RT d \ln p \quad (4)$$

式(1)代入式(4)得

$$\pi = \frac{RT}{VS} \int_0^p \frac{abp}{1+bp} \frac{1}{p} dp = \frac{aRT \ln(1+bp)}{VS} \quad (5)$$

式(2)代入式(5)得

$$\pi = \frac{RT \ln(1+bp)}{AN} \quad (6)$$

式中: Γ 为表面区域物质的量浓度与体内物质的量浓度之差,即表面超量(mol/m^2); π 为表面张力(N/m); γ_0, γ_s 分别为真空状态和吸附气体后的表面张力(N/m); R 为通用气体常数, $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为绝对温度(K)。

由式(5)知道煤表面张力的变化量(减小量)随体系的热力参数 T, p, b 增大而增大,随气体分子吸附截面积 A 增大而减小。

3 吸附膨胀变形及膨胀应力与表面压力的关系

表面张力的降低,说明固体表面分子与内部分子间引力减小,距离增大,体积膨胀。试验研究表明煤的体积膨胀率与吸附量成正比^[7]。据 Banghan, Fakhouny 的研究,固体多孔材料在自由空间内(无约束)吸附气体后,膨胀线应变(膨胀率) ε 与表面压力有如下关系^[8,9]:

$$\varepsilon = \lambda \pi \quad (7)$$

根据 Yate 的研究^[8,9], λ 与体积模量、比表面积和多孔材料的密度有关,即

$$\lambda = \frac{2S\rho}{9K} \quad (8)$$

式中: K 为体积模量(Pa), ρ 为煤的视密度(t/m^3)。

将式(5),(8)代入式(7)得到煤吸附膨胀线应变:

$$\varepsilon = \frac{2a\rho RT \ln(1+bp)}{9VK} \quad (9)$$

煤在约束条件因吸附膨胀会产生膨胀应力。假设煤为各向吸附性能相同,力学性能相同的弹性体,吸附性能不受外力影响,骨架接触点吸附变形处于单向压缩状态(关于这些假设的分析见下文),又由于孔隙压力各向相同,则煤的各向膨胀应力相同,且与膨胀应变的关系服从虎克定律:

$$\sigma = E\varepsilon = \frac{2a\rho RTE \ln(1+bp)}{9VK} =$$

$$\frac{2a\rho RT(1-2\mu)\ln(1+bp)}{3V} \quad (10)$$

式中： σ 为膨胀应力(Pa)， E 为煤的弹性模量(Pa)， μ 为煤的泊松比。

根据式(9)，(10)通过吸附热力参数可很方便地计算出膨胀应变和应力，由公式可知，在相同的 T ， p 条件下，煤和气体之间吸附能力越强，膨胀变形和膨胀应力越大；体积模量越大，变形越小，泊松比越小，膨胀应力就越大。

4 有效应力与膨胀应力之间的关系

由于膨胀应力的存在，将引起有效应力计算发生变化，二者关系及吸附常数和孔隙压之间的关系可根据煤的孔隙结构和煤粒变形的物理过程建立。

煤是由含分子尺度的孔隙的煤粒组成的骨架及煤粒间裂隙组成的二重孔隙介质，而天然煤又是固体煤、吸附煤层气和自由煤层气组成的类三相体；煤粒中的孔隙及裂隙表面是吸附煤层气存在的场所，吸附煤层气不传递孔隙压力，占煤层气含量的90%以上，运移服从斐克扩散定律；裂隙是自由煤层气存在的场所，自由煤层气能传导孔隙压力，运移服从达西定律^[7, 10, 11]。煤结构如图1所示。无外应力时(在自由空间内)煤粒由于吸附煤层气，表面张力降低，煤粒体积膨胀，即一部分表面能和吸附热转化为固体的弹性膨胀变形能；又由于煤粒间相互接触而表现为骨架整体体积膨胀，且二者膨胀率相同。由于煤粒内中的孔径很小几乎被吸附煤层气充满，并和煤成为一个整体，在外应力 $\sigma_i (i=1, 2, 3, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ 也即后文中所指总应力)作用下，煤粒间产生支撑应力 σ' ，并产生平衡外力的膨胀应力。支撑作用力是外力引起煤骨架变形的有效作用力，支撑作用力与垂直外力作用方向的横截面面积之比，即有效应力 σ_e 。被裂隙分割的各煤粒间处于不连续的点接触状态，煤粒变形并未完全限制，即要向裂隙空间发展，煤粒接触点相当于单向受压状态，因此，在式(10)中计算约束条件下的膨胀应力时假定应力-应变服从虎克定律，由式(10)计算的膨胀应力与有效应力一样是整个横截面积的平均值。此外，裂隙中的孔隙压作用在裂隙表面及自由气体上也平衡一部分外应力，但煤的孔隙和裂隙总体积与煤的总体积比一般小于10%，比土的孔隙率小得多，在任意截面上裂隙截面很小，如图1中A-

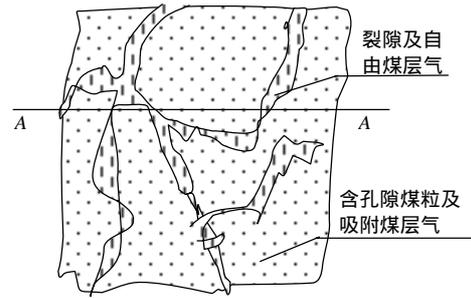


图1 含煤层气煤结构示意图

Fig.1 Structure of adsorbed methane-coal system

A 截面所示，即孔隙压在该截面上对外力支撑作用很小，可以忽略不计。基于上述分析提出如下煤的有效应力计算公式：

$$\sigma_e = \sigma_i - \sigma = \sigma_i - \frac{2aRT\rho(1-2\mu)\ln(1+bp)}{3V} \quad (11)$$

将式(10)改写成有效应力习惯表达式形式：

$$\sigma_e = \sigma_i - \alpha p \quad (12)$$

式中： $\alpha = 2aRT\rho(1-2\mu)\ln(1+bp)/(3Vp)$ 为孔隙压系数，计算表明其值小于1。

在三向应力作用下，煤的变形服从广义虎克定律(以下讨论只列出一个方向的)，即

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E}[\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)] - \frac{2aRT\rho(1-2\mu)^2 \ln(1+bp)}{3EV} \quad (13)$$

式中： ε_1 为 σ_1 方向上的线应变。

5 试验研究与算例

根据式(1)，(2)，采用吸附容量法，笔者测试了阳泉煤业集团三矿3#煤层在30时的吸附性能参数，结果如下： $a = 25.57 \text{ m}^3/\text{t}$ ， $b = 0.96 \text{ MPa}^{-1}$ ， $\rho = 1.362 \text{ kg/m}^3$ ， $S = 1.215 \times 10^8 \text{ m}^2/\text{t}$ 。文[5]测得同一矿井同一煤层的力学性能参数为： $E = 2179 \text{ MPa}$ ， $\mu = 0.313$ ，并研究了三向应力状态下，含瓦斯煤层的有效应力及变形规律，提出如下有效应力计算公式：

$$\left. \begin{aligned} \sigma_e &= \sigma_i - \alpha p \\ \varepsilon_1 &= \frac{1}{E}[\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)] - \frac{(1-2\mu)\alpha p}{E} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中： $\alpha = a_1 - a_2\theta + a_3p - a_4\theta p$ ，其中， $\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ ，试验条件下 $\sigma_2 = \sigma_3$ 都等于围压， $a_1, a_2,$

a_3, a_4 为试验回归系数。 α 由式(14)第 2 式根据实测的轴向应变、轴压、围压和孔隙压经计算和统计回归分析得到，试验表明 α 值小于 1。

根据表 1 轴压和围压的组合^[5]，将吸附性能和力学性能参数代入式(13)，可计算出不同轴压和围压下轴向应变与孔隙压的关系，如图 2 曲线所示。图中的点是按实测的平均孔隙压系数^[5]、表 1 数据及式(14)第 2 式计算的值。由此可以看出二者变化趋势基本一致。

表 1 试验时的轴压和围压^[5]

Table 1 Axial pressure and confining pressure of the test^[5]

图中曲线序号	轴压/MPa	围压/MPa
1	3	2
2	6	4
3	6	3
4	9	6
5	9	5
6	9	4
7	12	8
8	12	7
9	12	6
10	12	5

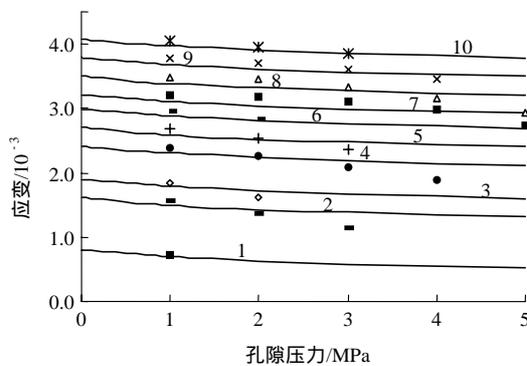


图 2 有效应力作用下煤体的变形

Fg.2 Deformation of coal under effective stress

6 分析讨论

(1) 文[2]给出膨胀应力计算公式：

$$\sigma = K(v_0 - v) / v_0 \quad (15)$$

式中： K 为体积模量； v_0, v 分别为煤吸附变形前、后的体积。由此计算的膨胀应力达几十到几百 MPa，是孔隙压的几倍到几十倍，且远远超过一定深度

(1 000 m)煤层上覆岩层产生的应力。从作者给出的计算公式可以看出作者实际上认为在约束条件下吸附变形全部转化为膨胀应力，这与前面分文的实际情况不符，因此，在式(10)计算中假设膨胀应力和应变服从虎克定律。

(2) 文[1]研究了煤层中自由气体的力学作用，给出如下支撑应力计算公式：

$$\sigma' = \gamma H / (1 - \chi) - \chi p / (1 - \chi) \quad (16)$$

$$\chi = S_p / S = 0.84n \quad (17)$$

由此可得有效应力计算公式：

$$\sigma_e = \sigma'(1 - \chi) = \gamma H - \chi p \quad (18)$$

式中： γ 为上覆岩层平均容重， H 为煤层深度， S_p 为有效孔隙截面积， S 为总截面积， n 为煤的孔隙率。但作者通过分析认为：由于煤的孔隙率远远比土的孔隙率低，所以在大多数情况下，自由气体压力对煤的力学作用可以忽略不计。尽管作者没有考虑在煤层中占主导地位的吸附煤层气作用，但作者的分析对裂隙中的自由气体还是适应的。这与前文分析假设相一致。

(3) 尽管式(12)，(14)中孔隙压系数表达式不同，前者孔隙压系数是煤吸附特性参数、力学性能参数、温度和孔隙压的函数，与总应力无关；而后者是总应力和孔隙压的函数，没有直接反映其他因数的影响，但二者计算得到的煤的应变值变化趋势基本一致，如图 2 所示。这是因为自由气体压力对固体煤的作用主要是通过吸附膨胀应力而起作用的，而总应力几乎不改变具有分子尺度孔隙的吸附体积^[2]，所以总应力对煤的吸附性能及其膨胀应力的大小影响很小，从而对孔隙压系数影响也很小。因此，在无孔隙压系数试验资料时，可由吸附试验资料来计算含煤层气煤的有效应力。

7 主要结论

(1) 煤是一种含分子尺度的孔隙煤粒和裂隙组成二重多孔介质，而且煤的孔隙率远远低于土的孔隙率。孔隙和裂隙表面是吸附煤层气的存在场，裂隙是自由煤层气存在的场所。

(2) 煤层气在煤层中主要呈吸附状态，其对煤的力学作用主要是吸附煤层气引起的，吸附能使煤产生膨胀变形，在约束条件下产生膨胀应力，而煤粒接触点处相当于单向受压状态，所以膨胀应力与

膨胀变形符合虎克定律。

(3) 由于煤的孔隙率较低, 裂隙中自由气体对煤层的力学作用可以忽略不计。

(4) 试验研究了阳泉 3[#]煤层的吸附特性, 推出了煤的吸附膨胀变形、膨胀应力和有效应力计算公式, 理论计算结果和试验结论一致。所得结论对考虑弹性能驱动下的煤层气开采和煤矿瓦斯突出防治具有一定的指导意义。

参考文献(References):

- [1] Borisenko A A. Effect of gas pressure in coal strata[J]. Soviet Mining Science, 1985, 21(5): 88-91.
- [2] Éttinger I L. Swelling stress in the gas-coal system as an energy source in the development of gas bursts[J]. Soviet Mining Science, 1979, 15(5): 494-501.
- [3] 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. The effective stress and mechanical deformation and damage characteristics of gas-filled coal[J]. Journal of University Science and Technology of China, 2001, 31(6): 687-693.(in Chinese))
- [4] 李传亮, 杜志敏, 孔祥言, 等. 多孔介质的流变模型研究[J]. 力学学报, 2003, 35(2): 230-233.(Li Chuanliang, Du Zhimin, Kong Xiangyan, et al. A study on the rheological model of porous media[J]. Acta Mechanical Sinica, 2003, 35(2): 230-233.(in Chinese))
- [5] 赵阳升, 胡耀青. 孔隙瓦斯作用下煤体有效应力规律的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(3): 26-31.(Zhao Yangsheng, Hu Yaoqing. The experimental study of the law of effective stress by methane pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(3): 26-31.(in Chinese))
- [6] 王佑安, 吴继周, 杨思敬, 等. 矿井瓦斯防治[M]. 北京: 煤炭出版社, 1994.(Wang Youan, Wu Jizhou, Yang Sijing, et al. Prevention and Administration of Coal Mining Gas[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1994.(in Chinese))
- [7] Harpalani S, Chen G L. Estimation of changes in fracture porosity of coal with gas emission[J]. Fuel, 1995, 74(10): 1491-1498.
- [8] 亚当森 A W. 表面的物理化学(上)[M]. 北京: 科学出版社, 1984.(Adamson A W. Physical Chemistry of Surfaces(Volume One)[M]. Beijing: Science Press, 1984.(in Chinese))
- [9] 谈慕华, 黄蕴元. 表面物理化学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985. 33-53.(Tan Muhua, Huang Yunyuan. Physicochemistry of Surfaces[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1985. 33-53.(in Chinese))
- [10] 吴世跃, 郭勇义. 煤层气运移特征的研究[J]. 煤炭学报, 1999, 24(1): 65-69.(Wu Shiyue, Guo Yongyi. Study on the movement property of coal seam methane[J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(1): 65-69.(in Chinese))
- [11] 吴世跃, 郭勇义. 注气开采煤层气增产机制的研究[J]. 煤炭学报, 2001, 26(2): 199-203.(Wu Shiyue, Guo Yongyi. Study of mechanism of increasing production of exploitation coal-bed methane by gas injection[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(2): 199-203.(in Chinese))

下期内容预告

下期《岩石力学与工程学报》主要发表下列内容的文章:

- (1) 工程岩体三维构模中钻孔数据处理方法;
- (2) 岩石应力的电学效应及其断裂演化规律;
- (3) 抚顺西露天矿北帮边坡治理工程效果初步评价;
- (4) 典型岩石和土的 Skempton 系数特征;
- (5) 受酸腐蚀砂岩的统计本构模型;
- (6) 开滦矿区深部开采中巷道围岩稳定性研究;
- (7) 层状岩体边坡锚固的断裂力学原理;
- (8) 丰都楠竹崩滑体防治方案研究;
- (9) 研究进展与工程实录。