

有效应力对煤层气解吸渗流影响试验研究

唐巨鹏, 潘一山, 李成全, 石 强, 董子贤
(辽宁工程技术大学 力学与工程科学系, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 以阜新高瓦斯矿井孙家湾矿为例, 将煤样放入自制的三轴瓦斯解吸渗透仪中, 通过先加载后卸载、连续进行煤层气解吸渗流试验, 模拟煤层气在复杂地应力条件下的赋存和运移开采过程, 得到有效应力与煤层气解吸和渗流特性间的关系, 并拟合了其关系表达式, 揭示一些新的相互作用规律: (1) 解吸量、解吸时间与有效应力变化规律均呈负指数递减关系, 与受载方式无关; (2) 有效应力存在一分界点, 当小于此值时, 解吸量和解吸时间随有效应力增加而迅速提高, 而当有效应力大于此值时, 两者随之增加幅度不大, 对于孙家湾 2[#]煤样分界点所对应有效应力为 3.0 MPa 左右; (3) 存在一临界有效应力值(类似于临界解吸压力), 有效应力大于此临界值则解吸量极少或几乎没有, 解吸时间趋于 0, 而孙家湾 2[#]煤样临界有效应力值为 10.0 MPa 左右; (4) 在加载过程中, 有效应力与渗透率、渗透系数关系曲线呈正指数减小, 这表明煤体在较小的有效应力范围内、孔隙压力不断增加的加载过程中, 吸附作用是影响渗透率和渗透系数的主控因素; (5) 卸载过程中, 有效应力与渗透率和渗透系数呈抛物线关系, 这从试验角度证明了煤层气开采中三阶段主导作用的存在, 即有效应力主导作用阶段、基质收缩效应主导作用阶段和滑脱效应主导作用阶段。

关键词: 采矿工程; 三维应力; 煤层气; 解吸渗流; 有效应力

中图分类号: TD 713

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)08 - 1563 - 06

EXPERIMENTAL STUDY ON EFFECT OF EFFECTIVE STRESS ON DESORPTION AND SEEPAGE OF COALBED METHANE

TANG Jupeng, PAN Yishan, LI Chengquan, SHI Qiang, DONG Zixian

(Department of Mechanics and Engineering Sciences, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

Abstract: Based on the typical high gassy mine, taking Sunjiawan Mine in Fuxin for example, the experiment of desorption and seepage of coalbed methane(CBM) was performed continuously through first loading and last unloading after the sample was placed into the home-made triaxial osmoscope. The exploration and transportation processes of CBM were simulated under the condition of the complicated stresses. The relationships among effective stress, desorption character, and seepage character were presented. The relationship expressions were studied. Some novel interaction laws were obtained as follows: (1) the variation laws among desorption quality, desorption time and effective stress all have negative exponential decrement relationship, and the relationship is not correlated with the loading method. (2) a cut-off point in the effective stress exists, and the desorption quality and time will increase rapidly with the increase of effective stress when it is smaller than the cut-off point value. On the contrary, the increase extent will become smaller. For the Sun sample No.2, the cut-off point value is about 3.0 MPa. (3) a critical effective stress(such as critical desorption pressure) is found. The desorption quantity and time will be approached to zero when the effective stress is larger than the critical value. The critical value is about 10.0 MPa for Sun sample No.2. (4) in the loading processes, the relationship curves among effective stress, permeability and permeability coefficient show positive exponential decrement. This above indicates that the adsorption of CBM is the main control factor for the scope of smaller effective stress in the process of pore

收稿日期: 2005 - 05 - 09; **修回日期:** 2005 - 07 - 23

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(50490275); 国家自然科学基金面上项目(50374040, 10502023)

作者简介: 唐巨鹏(1976 -), 男, 博士, 1999年毕业于辽宁工程技术大学, 现任讲师, 主要从事煤层气开采理论、数值计算与试验方面的教学与研究。E-mail: jupengt@126.com

pressure increase. (5) in the unloading process, the relationship curves among effective stress, permeability and permeability coefficient are found with parabolic shapes. This demonstrates the existence of three main phases in the exploration of CBM in the experimental view: they are effective stress, matrix shrinkage and slippage effects.

Key words: mining engineering; three-dimensional stresses; coalbed methane; desorption and seepage; effective stress

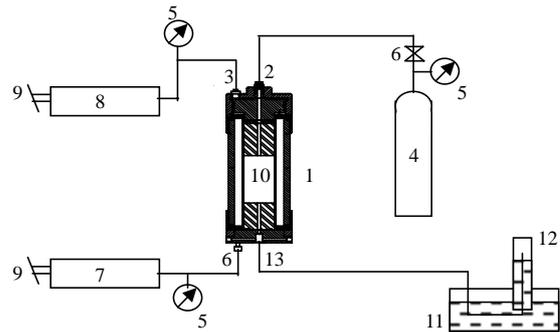
1 引言

煤层气的开采实际上经了解吸、扩散、渗流 3 个连续阶段, 首先煤体微孔隙内表面吸附煤层气因孔隙压力降低而解吸, 扩散至裂隙中转变为游离态煤层气, 然后由于裂隙和钻井井孔之间的压力梯度和煤层气的浓度梯度而产生煤层气渗流, 从而游离态气体向井孔移动, 最后由井孔抽出。在此过程中, 当煤储层压力降至解吸临界压力以下时, 解吸量随煤储层压力继续下降而不断增多, 从而提高解吸速度; 另一方面, 在煤层气的运移过程中, 随着煤储层压力降低使得煤体发生变形, 促进煤体孔隙和裂隙的扩展和延伸, 煤层渗透系数增大, 进而提高渗流作用效果, 因此地应力是影响煤层气解吸、扩散、渗流和产量高低的重要因素。目前, 国内外学者在应力对煤岩体渗透性影响方面进行一些研究工作, 国外有: W. J. Sommerton 等^[1]研究应力对煤体渗透性的影响; W. F. Brace^[2]进行了应力作用下岩体渗透率变化规律研究; C. R. McKee 等^[3]开展了应力与煤体孔隙度和渗透率间关系研究; J. R. E. Enever 和 A. Henning^[4]得到煤体有效应力与渗透率间影响规律。国内有: 周世宁和林柏泉^[5]、赵阳升和胡耀青^[6]、孙培德等^[7]、吴世跃和赵文^[8]等一些学者在此方面也取得大量研究成果, 且大多考虑了有效应力的影响。但前人的研究集中于考察有效应力与煤岩体渗透率间的关系^[1~10], 而同时考虑煤体中有效应力与煤层气解吸渗流特性间的相互作用规律研究鲜见报道。本文即从这一角度出发, 以典型的高瓦斯矿井阜新孙家湾矿为研究对象, 将煤样置于自主开发研制的三轴渗透仪中, 分别拟合解吸量、解吸时间、渗透率、渗透系数与有效应力的关系曲线, 并得到一些新的认识, 该试验结果与前人结论吻合较好, 对孙家湾矿瓦斯灾害的有效防治和瓦斯开发利用具有一定参考价值。

2 试验设计

试验煤样取自阜新孙家湾矿太上层, 该煤层为

中富灰长焰煤。煤层厚度 17.0 m, 瓦斯含量为 15.1 m³/t。本文试验煤样均为垂直层理, 试验装置如图 1 所示。由于煤层气以瓦斯为主, 因此试验气体为瓦斯气。



1—解吸渗透仪; 2—进瓦斯口; 3—油压口; 4—瓦斯罐; 5—压力表; 6—调节阀; 7—手动水压泵; 8—手动油压泵; 9—操作阀; 10—煤样; 11—水槽; 12—量筒; 13—瓦斯出口

图 1 三维应力下煤层气解吸渗透试验装置示意图

Fig.1 Experimental scheme of CBM desorption and seepage under three-dimensional stresses

试验方法: 将煤样加工成 3 块 5 cm×5 cm×10 cm(长×宽×高)规格的标准煤试样, 放入三轴煤层气解吸渗透仪中, 先对煤样施加轴压至设定值, 接着施加围压和孔隙压力, 用排水取气法测定煤层气渗透率, 然后关闭出气阀门, 取标准吸附时间 24 h 后, 关闭进气阀门, 打开出气阀门开始记录煤层气解吸量和解吸时间, 以上步骤为一个试验循环。

本试验不同于前人的试验特点在于: 试验过程中不取出煤样, 只是改变不同三轴应力组合, 试验顺序设计为先孔隙压力增加、后轴压增加、再轴压减小、最后孔隙压力减小, 用以模拟煤体加卸载应力条件, 重复共同的试验步骤, 才能更好地搞清同一煤样、不同受载方式下有效应力对煤层气解吸渗流影响规律, 但本文忽略前一荷载条件下煤体残余变形的影响。试验所得结果与前人已有结论基本吻合, 说明此试验设计是合理的。由于孙家湾 2[#]煤样具有代表性, 因此本文主要对其规律进行重点阐述, 其煤样尺寸为 4.9 cm×5.2 cm×10.0 cm(长×宽×高), 试验中各受载阶段试验参数和结果如表 1 所示。

表 1 试验参数和结果
Table 1 Experimental parameters and results

受载状态	轴压 /MPa	围压 /MPa	孔隙压力 /MPa	有效应力 /MPa	渗透率 / $(10^{-3} \mu\text{m}^2)$	渗透系数 / $(10^{-9} \text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	解吸时间 /min	解吸量 /mL
轴压、围压不变， 孔隙压力增加，有 有效应力减小	4	2	0.5	3.5	2.680	25.93	1 510	560
	4	2	1.0	3.0	1.095	10.60	2 450	1 000
	4	2	1.5	2.5	0.645	6.24	3 000	1 160
轴压增加，围压增 加，孔隙压力减小， 有效应力增加	8	4	1.0	7.0	0.125	1.21	1 560	30
轴压减小，围压和 孔隙压力不变，有 有效应力减小	6	4	1.0	5.0	0.050	0.48	1 890	50
轴压减小，围压减 小，孔隙压力不变， 有效应力减小	4	2	1.0	3.0	0.389	3.76	4 000	740

3 有效应力与解吸特性的关系

有效应力概念最早是由 Terzaghi 在 1923 年所做试验基础上提出来的，并引入土力学中。1960 年 Cook 将其进行了修正并应用于岩石类材料中，煤体骨架所受有效应力可用数学张量表示，即

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

式中： σ'_{ij} 为煤体骨架所受有效应力(MPa)； σ_{ij} 为煤体骨架所受总应力(MPa)； α 为与煤体有关的系数，且 $0 \leq \alpha \leq 1$ ，本文为简便起见， α 取为 1； p 为煤体骨架所受孔隙压力(MPa)； δ_{ij} 为 Kronecker 符号。

由式(1)可知：煤体骨架中任意一点的有效正应力等于该点所受总应力减去孔隙压力。本文主要考虑加载和卸载条件下煤体所受的有效应力与煤层气吸附和解吸的关系，有效应力定义为煤体所受轴压与孔隙压力之差，其关系曲线如图 2，3 所示。

试验表明加卸载条件下有效应力与解吸量、解吸时间关系的规律为：

(1) 解吸量、解吸时间与有效应力呈负指数递减关系，与受载方式无关，即随有效应力增加，解吸量和解吸时间减少，但并不因加载和卸载条件而异，因此有效应力是影响解吸量和解吸时间的重要

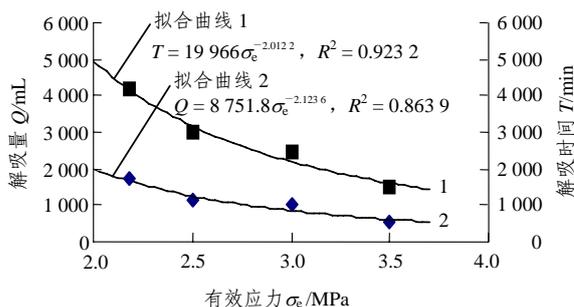


图 2 加载条件下有效应力与煤层气解吸量、解吸时间关系
Fig.2 Relationship curves among effective stress, desorption quantity, and desorption time under loading

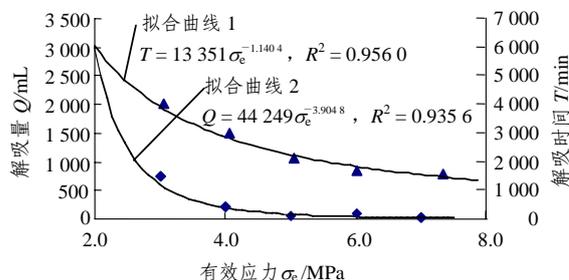


图 3 卸载条件下有效应力与煤层气解吸量和解吸时间关系
Fig.3 Relationship curves among effective stress, desorption quantity, and desorption time under unloading

因素。在实际瓦斯抽放和煤层气开采时，应尽可能

降低有效应力，从而提高煤层气解吸量，保证安全生产和煤层气采收率。

(2) 经拟合三者间关系曲线后发现，有效应力与解吸量和解吸时间均为负指数形式递减，即

$$\left. \begin{aligned} Q &= A_1 \sigma_e^{-B_1} \\ T &= A_2 \sigma_e^{-B_2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中： Q 为解吸量(mL)； T 为解吸时间(min)； σ_e 为煤样所受有效应力(MPa)；拟合系数 A_1 (mL/MPa)， A_2 (min/MPa)， B_1 ， B_2 均为量纲一的量，且 A_1 ， A_2 ， B_1 ， B_2 均大于 0。

孙家湾 2# 煤样加卸载过程中有效应力与解吸量、解吸时间关系拟合为幂指数方程见图 2，3。

(3) 有效应力存在一临界值，但其值大于临界值则解吸量极少或几乎没有，解吸时间也趋近于 0，这与实际情况是相符的。当有效应力达到一定临界值时，煤体裂隙、孔隙结构发生变形，原有孔隙、裂隙闭合，煤内表面积迅速减小，从而吸附瓦斯量极少甚至没有。从图 2，3 可推断，孙家湾煤样有效应力临界值应在 10.0 MPa 左右。

(4) 当有效应力小于 3.0 MPa 时，解吸量和解吸时间随有效应力增加而迅速提高，而当有效应力大于 3.0 MPa 时，两者随之增加幅度不大。比较图 2，3 可知，加载条件下降低的幅度值大于卸载条件下增加的幅度值，这也间接证明了煤体是非弹性体，卸载较加载过程中由于煤体存在残余变形而使解吸量和解吸时间增加幅度减小。

4 有效应力与渗流特性的关系

由于煤样受载方式的不同，加上煤样是非弹性体，因此在加卸、载时其渗透率和渗透系数的变化规律必然具有差异性。有效应力是导致煤样变形的重要因素，在加卸载过程中研究有效应力与渗透率及渗透系数的关系可进一步弄清煤层气运移规律，并搞清煤层气运移的主控因素，为煤层气开采提供科学依据。煤试件渗透率公式服从达西定律：

$$K = \frac{\mu q L}{A(P_1 - P_2)} \quad (3)$$

式中： K 为煤试件渗透率($10^{-3} \mu m^2$ ，即 1 md)； μ 为气体即瓦斯黏度(Pa·s)； q 为标准状态下流体流量(cm^3/s)； L 为煤试件长度(cm)； A 为煤试件截面积

(cm^2)； P_1 为煤试样入口压力(MPa)； P_2 为出口压力(即大气压)，取 0.1 MPa。

煤层气(即瓦斯)渗透系数用 K_x 表示，即

$$K_x = \frac{K \gamma_g}{\mu} \times 10^6 \quad (4)$$

式中： K_x 为瓦斯渗透系数($10^{-9} m/s$)， γ_g 为煤层气的重度(N/m^3)。

试验首先模拟煤层气集聚过程，将轴压和围压各保持 4.0 MPa 和 2.0 MPa 不变，孔隙压力逐级增加，即 0.5，1.0 和 1.5 MPa。孙家湾 2# 煤样长度为 10.0 cm，渗透截面积为 25.48 cm^2 ，室温 20 $^\circ C$ 时煤层气黏度 $\mu = 1.09 \times 10^{-5} Pa \cdot s$ 。试验过程中，试验参数、煤样受载方式、渗透率等如表 1 所示。同前所述，本试验中由于轴压对煤样变形影响最大，因此考察加卸载过程中有效应力与渗透率及渗透系数的关系，由于渗透率和渗透系数与有效应力关系相似，故本文以加(卸)载时渗透率与有效应力关系曲线为例加以说明，如图 4，5 所示。

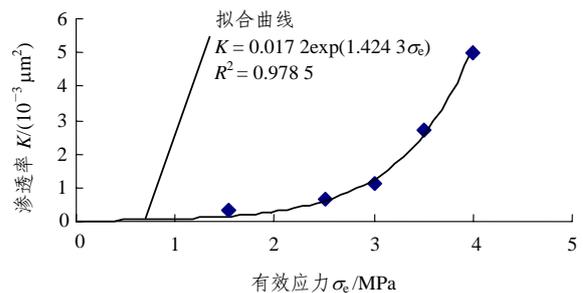


图 4 加载时渗透率与有效应力关系曲线图

Fig.4 Relationship between permeability and effective stress under loading

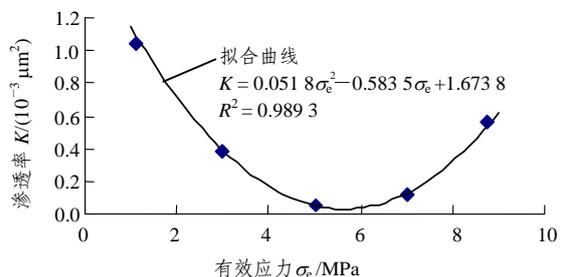


图 5 卸载时渗透率与有效应力关系曲线图

Fig.5 Relationship between permeability and effective stress under unloading

由试验结果可知，有效应力与渗透率和渗透系数间关系规律为：

- (1) 在加载过程中，有效应力也是影响渗透率

和渗透系数变化的重要参数, 随有效应力减小, 渗透率和渗透系数也随之减小, 其关系曲线呈正指数减小趋势。经回归得到加载时有效应力与渗透率和渗透系数拟合的正指数方程形式为

$$\left. \begin{aligned} K &= a \exp(b\sigma_e) \\ K_x &= a_1 \exp(b_1\sigma_e) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: $a(\text{md})$, $a_1(10^{-9} \text{ m/s})$, $b(\text{MPa}^{-1})$ 及 $b_1(\text{MPa}^{-1})$ 均为拟合系数, 且均大于 0。对于孙家湾 2[#] 煤样, 得到其拟合方程分别为

$$\left. \begin{aligned} K &= 0.0172 \exp(1.4243\sigma_e) \\ K_x &= 0.1668 \exp(1.4244\sigma_e) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

由于本试验中加载过程是孔隙压力增加, 有效应力不断减小的过程。有效应力减小会使得煤孔隙结构变形得以部分恢复, 而孔隙压力增加会使煤孔隙结构扩张、瓦斯吸附量增加、孔隙吸附瓦斯层增厚, 导致瓦斯渗流孔道缩小。在此过程中有效应力减小和孔隙压力增加共同作用导致煤孔隙扩张的程度小于因孔隙压力增大使得瓦斯层增厚而阻碍瓦斯渗流的程度(如图 4 所示), 渗透率和渗透系数减少。以上规律得到了新的认识, 即煤体在较小的有效应力范围内、孔隙压力不断增加的加载过程中, 吸附作用是影响渗透率和渗透系数的主控因素。

(2) 在对煤体卸载时, 即轴压和孔隙压力减少的过程中, 有效应力与渗透率和渗透系数呈抛物线关系, 即随轴压和孔隙压力减少, 有效应力不断减小, 渗透率和渗透系数先减小, 后增大。经过回归得到卸载时有效应力与渗透率和渗透系数的抛物线拟合方程形式为

$$\left. \begin{aligned} K &= a_2\sigma_e^2 - b_2\sigma_e + c_2 \\ K_x &= a_3\sigma_e^2 - b_3\sigma_e + c_3 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: $a_2(\text{md}\cdot\text{MPa}^{-2})$, $a_3(10^{-9} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{MPa}^{-2})$, $b_2(\text{md}\cdot\text{MPa}^{-1})$, $b_3(10^{-9} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{MPa}^{-1})$, $c_2(\text{md})$ 及 $c_3(10^{-9} \text{ m/s})$ 均为拟合系数, 且均大于 0。

应用到孙家湾 2[#] 煤样, 则拟合方程为

$$\left. \begin{aligned} K &= 0.0518\sigma_e^2 - 0.5835\sigma_e + 1.6738 \\ K_x &= 0.5012\sigma_e^2 - 5.6500\sigma_e + 16.1990 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

本试验卸载过程旨在模拟煤层气开采过程中的煤层气解吸和运移规律。随有效应力减少, 渗透率和渗透系数表现出的先减小后增大, 是和煤体本身的物理力学性质和煤层气解吸特性密切相关的, 具有典型煤层气开采的三阶段特征(如图 5 所示)。在卸载初期, 有效应力起主导作用, 此时随有效应力降低, 渗透率和渗透系数逐渐减小; 当有效应力降低到 5.6 MPa 左右时, 从煤样中解吸的煤层气增多, 加大了基质收缩率, 这时基质收缩对渗透率和渗透系数影响起主导作用, 导致渗透率和渗透系数开始升高, 而随着有效应力的进一步降低, 滑脱效应逐渐显现, 使得渗透率和渗透系数迅速提高, 从而滑脱效应起主导作用。这一试验结果和 S. Harpalani 等^[11, 12]的实验室研究结果基本吻合, 说明本试验方法是可行的。

5 结 语

本文将孙家湾煤样放入自制的三轴瓦斯渗透仪中, 通过先加载后卸载、连续进行煤层气解吸渗流试验, 模拟了煤层气在复杂地应力条件下的赋存和运移开采过程, 得到了有效应力与煤层气解吸和渗流特性间的关系, 拟合其关系表达式, 揭示了一些新的相互作用规律, 所得试验结论与前人结果吻合较好, 说明该试验是合理的, 对孙家湾矿瓦斯灾害的有效防治和开发利用具有一定参考价值。

参考文献(References):

- [1] Sommerton W J, Soylemezoglu I M, Dudley R C. Effect of stress on permeability of coal[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., 1975, 12(2): 129 - 145.
- [2] Brace W F. A note on permeability changes in geologic material due to stress[J]. Pageoph, 1978, 116(4/5): 627 - 632.
- [3] McKee C R, Bumb A C, Koenig R A. Stress-dependent permeability and porosity of coal[A]. In: Fassett J E ed. Geology and Coal-bed Methane Resources of the Northern San Juan Basin[C]. Colorado, USA: Rocky Mountain Association of Geologists Guidebook, 1988. 143 - 153.
- [4] Enever J R E, Henning A. the relationship between permeability and effective stress for Australian coal and its implications with respect to coalbed methane exploration and reservoir model[A]. In: Proceedings

of the 1997 International Coalbed Methane Symposium[C]. Tuscaloosa, AL, USA: University of Alabama, 1997. 13 - 22.

[5] 周世宁, 林柏泉. 煤层瓦斯赋存与流动理论[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1999.(Zhou Shining, Lin Boquan. Theory of Gas Flow and Storage in Coal Seams[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1999.(in Chinese))

[6] 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. Experimental study on the law of effective stress by methane pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(3): 26 - 31.(in Chinese))

[7] 孙培德, 鲜学福, 钱耀敏. 煤体有效应力规律的试验研究[J]. 矿业安全与环保, 1999, (2): 353 - 355.(Sun Peide, Xian Xuefu, Qian Yaomin. Experimental study on effective stress in coal seam[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 1999, (2): 353 - 355.(in Chinese))

[8] 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): 1 674 - 1 678.(Wu Shiyue, Zhao Wen. Analysis of effective stress in adsorbed methane-coal system[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(10): 1 674 - 1 678.(in Chinese))

[9] 贺玉龙, 杨立中. 围压升降过程中岩体渗透率变化特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 415 - 419.(He Yulong, Yang Lizhong. Testing study on variational characteristics of rockmass permeability under loading-unloading of confining pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(3): 415 - 419.(in Chinese))

[10] 常宗旭, 赵阳升, 胡耀青, 等. 三维应力作用下单一裂缝渗流规律的理论与试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 620 - 624.(Chang Zongxu, Zhao Yangsheng, Hu Yaoqing, et al. Theoretic and experimental studies on seepage law of single fracture under 3D stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(4): 620 - 624.(in Chinese))

[11] Harpalani S, Schraufnagel R A. Shrinkage of coal matrix with release of gas and its impact on permeability of coal[J]. Fuel, 1991, 69(5): 551 - 556.

[12] Harpalani S, Chen G. Gas slippage and matrix shrinkage effects on coal permeability[A]. In: Proceedings of the 1993 International Coalbed Methane Symposium[C]. Tuscaloosa, AL, USA: University of Alabama, 1993. 285 - 294.

(上接第 1 549 页)

本刊 2006 年第 5 期被 EI 收录论文(34 篇, 收录率为 100%)题录(II)

No.	论 文 题 目	作 者 名	页 码
19	滑坡体下挂帮矿开采方案与分析	李 辉 邓建辉	985 - 990
20	基于地理信息系统和信息量模型的滑坡危险性评价——以重庆万州为例	高克昌 崔 鹏 赵纯勇等	991 - 996
21	土石坝沥青混凝土心墙三轴力学特性研究	李志强 张鸿儒 侯永峰等	997 - 1 002
22	黄土抗剪强度的水敏感性特征研究	李保雄 苗天德	1 003 - 1 008
23	轨道结构参数对隧道地面点动力响应的影响分析	张昀青 刘维宁 张玉娥等	1 009 - 1 014
24	用 OpenGL 开发地下结构工程三维有限元图形系统	陈俊涛 肖 明 郑永兰	1 015 - 1 020
25	岩石流变特性及长期强度的试验研究	崔希海 付志亮	1 021 - 1 024
26	岩石试件在不同圆柱荷载作用下的破坏特征	于永江 王来贵 何 峰等	1 025 - 1 028
27	地表水体下煤炭资源开采研究	武 雄 于青春 汪小刚等	1 029 - 1 036
28	钻孔高压压水试验的数值模拟	魏 宁 李金都 傅旭东	1 037 - 1 042
29	堆石体流变对分期浇筑的面板变形影响研究	周 伟 常晓林 曹艳辉	1 043 - 1 048
30	岩体分类的二元相对模糊评判法	苏永华 赵明华 刘晓明	1 049 - 1 055
31	风火山多年冻土隧道施工爆破技术研究	谭忠盛 况成明 杨小林等	1 056 - 1 061
32	青藏铁路片石气冷护坡措施实体工程试验研究	魏 静 许兆义 包黎明等	1 062 - 1 068
33	万福煤矿深部水压致裂地应力测量	蔡美峰 陈长臻 彭 华等	1 069 - 1 074
34	施工时序对边坡稳定性影响的离心模型试验及数值分析	姚裕春 姚令侃 袁碧玉等	1 075 - 1 080

(摘自“EI 中国”)