

文章编号:1000-582X(2011)08-103-06

含瓦斯煤的有效体积应力与渗透率关系

李晓泉¹,尹光志^{2a,2b}

(1. 广西大学 资源与冶金学院,广西南宁 530004;2. 重庆大学 a. 资源及环境科学学院;
b. 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室,重庆 400044)

摘要:在现有有效应力计算公式基础上,考虑多孔介质在三轴压缩状态下产生损伤的影响,修正了有效应力计算公式,并通过试验验证了该公式可以较好的描述含瓦斯煤在三轴压缩下的全应力-应变过程。三轴压缩下渗流试验表明:含瓦斯煤样在峰值点前的有效体积应力和渗透率为负指数关系;在峰值点后,有效体积应力和渗透率仍然存在指数关系,但系数发生了变化,和峰值点前不同。含瓦斯煤样的渗透率同有效体积应力呈反方向变化,即在有效体积应力增大时,渗透率减小,反之亦然。

关键词:含瓦斯煤;有效体积应力;渗透率;多孔介质;损伤变量

中图分类号:O357.3

文献标志码:A

Relationship between effective volumetric stress and permeability of gas-filled coal

LI Xiao-quan¹, YIN Guang-zhi^{2a,2b}

(1. College of Resources and Environment of Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, P. R. China;
2a. College of Resource and Environmental Science; b. Key Laboratory of Exploitation of Southwest
Resources and Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education,
Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: Considering the damage effect of porous media under triaxial compression, the calculation formula of effective stress is modified. It is verified that the formula can very well describe complete stress-strain process of gas-filled coal under triaxial compression. The permeability experiments under triaxial compression show that the relationship between the effective volumetric stress and permeability of gas-filled coal samples is negative exponent before the peak stress. It is still exponentially after the peak point, but the coefficient changes. The permeability of the gas-filled coal samples changes in reverse direction with the effective volumetric stress, that is, the effective volumetric stress increases when the permeability decreases, and vice versa.

Key words: gas-filled coal; effective volumetric stress; permeability; porous media; damage variable

有效应力一词最初应用于土力学研究,表示土颗粒之间的接触应力(或支撑应力)。有效应力概念

在研究多孔介质的渗流中得到广泛的应用。潘一山等认为煤体的瓦斯解吸量、解吸时间与有效应力变

收稿日期:2011-02-11

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2011CB201203);国家自然科学基金资助项目(50874124);
国家科技重大专项课题(2008ZX05034-002);重庆市自然科学基金计划重点项目(CSTC,2008BA6028)

作者简介:李晓泉(1972-),男,重庆大学博士,主要从事资源环境方向研究,(Tel)13878192401;
(E-mail)lxq0927@sina.com。

化规律均呈负指数递减关系,与受载方式无关^[1];范家文等通过试验得出煤体的有效应力与瓦斯排放时间服从对数规律,煤体的等效孔隙压系数与瓦斯排放时间服从对数规律^[2];许江等推导出基于敏感系数的煤样渗透率与有效应力的函数关系式^[3];李祥春等得出了膨胀应力与有效应力之间的关系式^[4];周军平等建立了包含煤基质收缩效应的煤层孔隙度和渗透率理论模型^[5];吴世跃等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^[6];卢平等修正了 Karl Terzaghi 多孔介质有效应力计算公式,揭示了等效有效孔隙压力系数在含瓦斯煤全程应力应变过程中的变化规律^[7];张凯等研究了作用岩石和土等多孔介质上的有效应力理论模型^[8];J. D. St. George 等研究了煤体吸附瓦斯后的有效应力计算模型^[9];Siavash Ghabezloo 等通过试验得出有效应力的变化对石灰岩渗透率的影响,并建立了石灰岩的有效应力-渗透率模型^[10];Luke D. Connell 等认为煤的渗透特性受有效应力和微观结构影响^[11];Phung Quoc Huy 等得出气体渗流的孔隙受有效应力影响而不是围压单纯作用^[12];D. Jasinge 等研究表明改变煤体中 CO₂ 压力,有效应力将改变,影响气体渗透特性^[13];Hema Siriwardane 等研究了围压对煤的渗透特性的影响,得出围压增大,渗透特性降低^[14];James G 等认为有效应力对渗透率影响是改变了多孔介质的孔隙结构^[15];Ghazal Izadi 等得出了流体压力增加,则有效应力降低,渗透率增大^[16]。

目前,有效应力对多孔介质渗流的影响研究,大都应用在对多孔介质的弹性阶段,即认为在服从胡克定律的前提下提出的,在塑性阶段适用性较差。针对此问题,在前人的研究成果基础上引入损伤变量,推导出含瓦斯煤的全应力应变过程的有效体积应力对含瓦斯煤的渗透率的影响公式,并通过试验数据对其进行验证。

1 含瓦斯煤渗透率计算方法

瓦斯在煤层中的运移是考察煤的突出危险性的重要指标,周世宁院士认为在一般情况下瓦斯在煤样中渗流视为符合达西定律,为研究在煤岩等多孔介质的渗流提供了方法。渗流试验中得到的是在不同应力水平下的瓦斯在煤样中的渗透速度,通过达西定律可以计算出瓦斯在煤样中的渗透率,则得出煤样的渗透特性。

瓦斯在多孔介质渗流的达西定律表达式为

$$K = \frac{2QP_a\mu L}{A(P_2^2 - P_1^2)}, \quad (1)$$

其中,

$$L = L' - \zeta_1, \quad (2)$$

$$A = \frac{\pi \left(D + \frac{\zeta_3}{\pi} \right)^2}{4}, \quad (3)$$

式中:K 为渗透率,mD;Q 为渗流速度,ml/s; μ 为瓦斯黏度,Pa·s;L 为煤样长度,mm;A 为煤样横截面积,m²;P₂ 为煤样入口瓦斯压力,MPa;P₁ 为煤样出口瓦斯压力,MPa;P_a 为大气压力,MPa;L' 为煤样原始长度,mm; ζ_1 为煤样轴向减少量,mm;D 为煤样初始直径,mm; ζ_3 为煤样周长增加量,mm。

2 有效体积应力与渗透率的关系

式(1)反映了煤样的瓦斯渗透率和瓦斯压力、瓦斯流速、试件长度及试件横截面积的关系,未直接体现出应力和渗透率的关系,而单纯的研究轴压或围压、孔隙压力(由瓦斯压力提供)和渗透率的关系,只能说明单向作用关系,渗透率是轴压、围压和瓦斯压力共同作用的结果,需综合考虑。因此,研究有效应力和渗透率的关系比单纯研究某种作用力和渗透率的关系更具有实际意义,对研究煤与瓦斯突出亦有一定的积极意义。

2.1 有效体积应力的计算方法

在研究含瓦斯煤的有效体积应力计算方法时需作如下假设:①含瓦斯煤为均质和各向同性的弹塑性体;②含瓦斯煤是均匀连续介质;③含瓦斯煤在受压变形时未发生颗粒重组;④含瓦斯煤样在峰值前未出现贯通裂隙,峰值后等效孔隙压力系数为 1。

则含瓦斯煤样在峰值前有效体积应力与等效孔隙压力系数为^[17-18]

$$\Theta' = \Theta - \alpha P = (\sigma_1 + 2\sigma_3) - \alpha P, \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{\sigma(1-\varphi)}{P} + \varphi, \quad (5)$$

其中:

$$\sigma = (1-D)E\epsilon = \frac{2apRT(1-2\nu)}{3V_m} \ln(1+bP) + \frac{(1-D)E\beta\Delta T}{3} - (1-2\nu)\Delta P, \quad (6)$$

$$D = 1 - \frac{E'}{E}, \quad (7)$$

$$\varphi = \frac{\varphi_0 + e - \epsilon_P + K_Y\Delta P(1-\varphi_0) - \beta\Delta T(1-\varphi_0)}{1+e}, \quad (8)$$

$$\epsilon_P = \frac{2pRTaK_Y}{3V_m} \ln(1+bP), \quad (9)$$

式中: Θ 为体积应力, MPa; Θ' 为有效体积应力, MPa; α 为孔隙压力系数; P 为孔隙压力, 取试件中部孔隙压力 $P = (P_1 + P_2) / 2$, MPa; σ_1 为轴向应力, MPa; σ_3 为围压, MPa; ρ 为气体密度, kg/m^3 ; σ 为总应力, MPa; ν 为泊松比; φ, φ_0 分别为当前孔隙率、初始孔隙率; e 为体积应变; ϵ_P 为单位体积煤吸附瓦斯产生的膨胀应变; K_V 为体积压缩系数, MPa^{-1} ; ΔP 为孔隙压力变化量, MPa; β 为煤的体积热膨胀系数, $\text{m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{K}$; ΔT 为绝对温度改变量, K; V_m 为气体摩尔体积, m^3/mol ; ρ 为煤的视密度, t/m^3 ; R 为普适气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为绝对温度, K; a 为单位质量煤在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} ; D 为损伤变量; E' 为发生损伤变形后的弹性模量, MPa。

2.2 有效应力计算公式应用效果检验

为检验修正后的式(4)、(5)正确性,在三汇三矿 K4 煤层发生延期突出现场取得突出后的煤粉,在实验室制取型煤标准试样,尺寸为: $\varphi = 50 \text{ mm}$, $h = 100 \text{ mm}$,型煤成型压力为 200 kN,保压 30 min,煤粉粒径为 60~40 目。对煤样进行含瓦斯煤的渗透特性试验及瓦斯吸附试验。试验参数:围压分别为 2 MPa、4 MPa 和 6 MPa,煤样入口瓦斯压力 P_2 为 0.5 MPa,出口瓦斯压力 P_1 为大气压,因试验是固定瓦斯,即孔隙压力变化量 $\Delta P = 0$,试验前试件需充分吸附瓦斯 24 h,轴向加载速度为 1 mm/min。得到了相应的参数,如表 1 所示。

根据式(4)得出含瓦斯煤样的轴向应变为

$$\epsilon_1 = \frac{\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)}{(1-D)E} - \frac{2a\rho RT(1-2\nu)^2 \ln(1+bP)}{3(1-D)EV_m} - \frac{\beta\Delta T(1-2\nu)}{3} + \frac{(1-2\nu)^2 \Delta P}{(1-D)E}, \quad (10)$$

式中, ϵ_1 为轴向应变。

不同围压下的延期突出煤样轴向应变的理论计算值和实测值对比如图 1 和表 2 所示。可以看出用式(10)得出的理论计算值和试验实测值有很好的对应性。说明式(10)可以计算出全应力-应变整个过程的应变变化情况。式(4)作为有效体积应力计算公式是合理的和可行的。

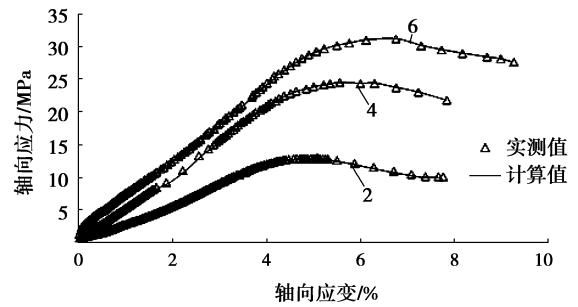


图 1 不同围压下的理论计算值和试验实测值曲线

从图 1 和表 2 可以看出理论计算值可以很好的描述试验实测值,对试验值和计算值进行误差检验如表 2 所示。从中可以看出在应力应变的压实段,二者误差较大,随着应力的提高,此差值逐渐减小。误差较大的原因是将压实段按照弹性段处理,使用的弹性模量过大等原因引起的。

另外,从表 1 还可以看出:煤样的初始渗透率受围压影响较大,围压越大初始渗透率越低;煤样的弹性模量、屈服强度和抗压强度均随着围压增大而增加。煤矿现场生产可视为煤层中某一单元体处于卸围压状态,围压降低势必引起煤层的渗透率增加,弹性模量、屈服强度和抗压强度的降低,煤层发生失稳破坏的可能性增加,使突出的危险性增加。在煤矿现场应采用有效的支护形式,使新暴露出的煤岩体尽快恢复到三向应力状态,可以降低煤与瓦斯突出危险性。

表 1 含瓦斯煤样相关实验参数

围压/MPa	试验温度/K	吸附常数		弹性模量/MPa	初始渗透率/mD	泊松比	屈服强度/MPa	抗压强度/MPa
		a/(m ³ /t)	b/MPa ⁻¹					
2	303	30.925	1.067	272	1.372	0.219	9.52	12.93
4	303	30.925	1.067	478	0.755	0.229	19.98	24.44
6	303	30.925	1.067	540	0.564	0.231	25.89	31.18

表2 含瓦斯煤样有效体积应力与渗透率

σ_1 /MPa	σ_3 /MPa	P /MPa	Θ /MPa	α	Θ' /MPa	ϵ_1	ϵ_1'	$\frac{ \epsilon_1 - \epsilon_1' }{\epsilon_1}$	K /mD	D	备注
1.10	2	0.3	5.10	0.181	4.94	0.27	0.44	0.397	1.294	0	
2.10	2	0.3	6.10	0.222	5.90	0.74	0.93	0.204	1.140	0	
3.10	2	0.3	7.10	0.268	6.86	1.11	1.28	0.130	1.017	0	
4.13	2	0.3	8.13	0.303	7.85	1.51	1.66	0.092	0.888	0	
5.15	2	0.3	9.15	0.339	8.85	1.86	2.00	0.075	0.789	0	
6.23	2	0.3	9.15	0.339	8.85	1.86	2.00	0.075	0.789	0	
7.21	2	0.3	11.21	0.408	10.85	2.47	2.58	0.043	0.653	0	
8.30	2	0.3	12.30	0.447	11.90	2.77	2.87	0.034	0.614	0	
9.24	2	0.3	13.24	0.491	12.80	3.06	3.15	0.028	0.589	0	
10.32	2	0.3	14.32	0.534	13.84	3.35	3.42	0.022	0.571	0	
11.32	2	0.3	15.32	0.600	14.78	3.70	3.76	0.017	0.567	0	
12.39	2	0.3	16.39	0.719	15.75	4.19	4.24	0.010	0.580	0.033	屈服点后
12.93	2	0.3	16.93	0.991	16.04	5.07	5.07	0.000	0.657	0.206	峰值点
2.12	4	0.3	10.12	0.162	9.98	0.25	0.33	0.283	0.715	0	
3.15	4	0.3	11.15	0.188	10.98	0.53	0.62	0.172	0.668	0	
4.13	4	0.3	12.13	0.217	11.93	0.73	0.82	0.121	0.629	0	
5.11	4	0.3	13.11	0.239	12.89	0.94	1.02	0.092	0.598	0	
6.20	4	0.3	14.20	0.260	13.96	1.16	1.24	0.072	0.559	0	
7.19	4	0.3	15.19	0.277	14.94	1.36	1.44	0.059	0.520	0	
8.17	4	0.3	16.17	0.295	15.90	1.55	1.63	0.050	0.496	0	
11.10	4	0.3	19.10	0.355	18.78	2.21	2.28	0.032	0.411	0	
14.39	4	0.3	22.39	0.401	22.03	2.75	2.81	0.022	0.371	0	
17.37	4	0.3	25.37	0.457	24.96	3.30	3.35	0.016	0.339	0	
20.35	4	0.3	28.35	0.529	27.88	3.86	3.90	0.011	0.321	0	屈服点后
23.25	4	0.3	31.25	0.654	30.66	4.63	4.66	0.007	0.315	0.061	
24.44	4	0.3	32.44	1	31.53	6.30	6.30	0.000	0.359	0.322	峰值点
1.18	6	0.3	13.18	0.104	13.08	0.00	0.00	0.359	0.564	0	
3.09	6	0.3	15.09	0.147	14.95	0.16	0.19	0.157	0.548	0	
4.04	6	0.3	16.04	0.172	15.88	0.32	0.36	0.121	0.532	0	
6.97	6	0.3	18.97	0.217	18.77	0.87	0.94	0.067	0.453	0	
10.02	6	0.3	22.02	0.278	21.77	1.49	1.56	0.044	0.367	0	
13.13	6	0.3	25.13	0.328	24.84	2.11	2.18	0.031	0.304	0	
16.43	6	0.3	28.43	0.372	28.09	2.68	2.75	0.023	0.257	0	
19.41	6	0.3	31.41	0.415	31.03	3.20	3.26	0.019	0.233	0	
22.26	6	0.3	34.26	0.460	33.85	3.68	3.74	0.015	0.210	0	
25.55	6	0.3	37.55	0.506	37.09	4.16	4.21	0.012	0.201	0	
28.25	6	0.3	40.25	0.585	39.72	4.75	4.80	0.009	0.191	0.026	屈服点后
31.18	6	0.3	43.18	0.986	42.37	6.76	6.78	0.002	0.201	0.291	峰值点

表中: ϵ_1 为轴向应变理论计算值。

由表2可以看出:在峰值前孔隙压力系数 α 是不断增加的,直到峰值点形成贯通裂隙后, α 不再增加,此后煤样发生破坏,有效体积应力为体积应力和孔隙压力的差值。渗透率在屈服点前是不断降低的,屈服点后渗透率开始逐渐增加。因此,考察有效体积应力和渗透率之间的关系有一定的积极意义。

2.3 有效体积应力与渗透率关系

图2反映出延期突出煤样在围压2 MPa、4 MPa和6 MPa和入口瓦斯压力0.5 MPa情况下的峰值点前的有效体积应力和渗透率关系曲线,此阶段的渗透率和有效体积应力为负指数关系。即

$$K = K_0 \exp(-b\Theta'), \quad (11)$$

式中, K_0 为初始渗透率,mD; b 为材料参数。

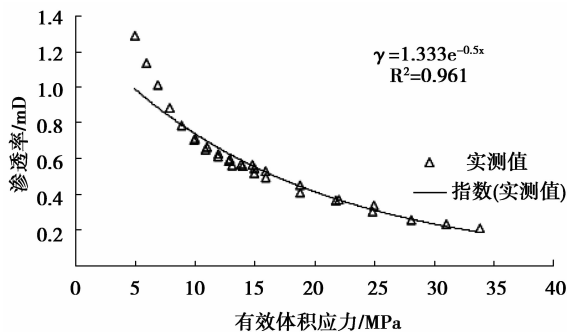


图2 含瓦斯煤样在峰值点前的有效体积应力和渗透率关系

式(11)反应出在峰值前,煤样的渗透率和有效体积应力存在负指数关系,而与围压大小无关,这可以推演出对于某一种煤样只要知道有效体积应力,即可根据式(11)直接计算出峰值前的渗透率,其意义在于不必通过实测数据就可以计算出渗透率,减少许多工作量。

受压煤岩体在峰值点后将产生宏观裂隙孔隙,不再适用式(11)的表达方式,需按不同围压情况分别考虑其变化关系,以含瓦斯煤样在围压2 MPa、入口瓦斯压力0.5 MPa时的有效体积应力和渗透率关系说明此问题,如图3所示。

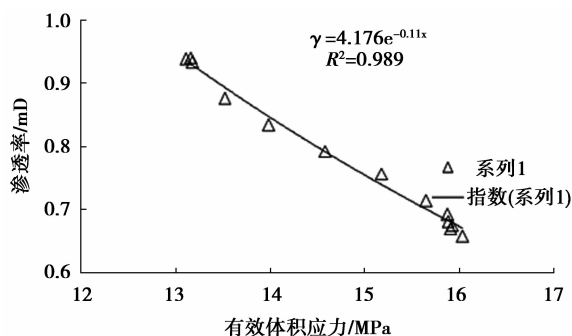


图3 含瓦斯煤样在峰值点后的有效体积应力和渗透率关系

由图3可知:在峰值点后,延期突出煤样的有效体积应力和渗透率仍然存在负指数关系,但系数发生了变化,和峰值点前不同。表达式为

$$K = c \exp(-d\Theta'), \quad (12)$$

式中, c 、 d 为材料参数。

根据式(12)分别列出延期突出煤样在围压分别为2 MPa、4 MPa、6 MPa峰值点后的有效体积应力和渗透率关系拟合函数

围压为2 MPa时:

$$K = 4.176 \exp(-0.11\Theta'), R^2 = 0.989;$$

围压为4 MPa时:

$$K = 1.076 \exp(-0.003\Theta'), R^2 = 0.943;$$

围压为6 MPa时:

$$K = 1.267 \exp(-0.04\Theta'), R^2 = 0.949.$$

从以上分析可以看出煤样在三轴压缩状态下的瓦斯渗透率和有效体积应力存在负指数关系,即二者呈负相关关系。作用在同一种煤样上的有效体积应力大时,渗透率就小,反之亦然。

3 结论

1)考虑多孔介质在压缩状态下产生损伤的影响,修正了有效应力计算公式,并通过试验验证该公式可以较好的描述含瓦斯煤在三轴压缩下的全应力-应变过程。

2)依据延期突出煤样在峰值点前和峰值点后的有效体积应力和渗透率均为负指数关系的实验结果,建立了含瓦斯煤有效体积应力和渗透率的关系方程。

3)含瓦斯煤样的渗透率同有效体积应力呈反方向变化,即在有效体积应力增大时,渗透率减小,反之亦然。

参考文献:

- [1] 唐巨鹏,潘一山,李成全,等. 有效应力对煤层气解吸渗流影响试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(8):1563-1568.
TANG JU-PENG, PAN YI-SHAN, LI CHENG-QUAN, et al. Experimental study on effect of effective stress on desorption and seepage of coalbed methane [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(8): 1563-1568.
- [2] 范家文,冯增朝. 瓦斯排放过程中煤体有效应力规律的实验研究[J]. 太原理工大学学报,2008,39(4):397-399,403.
FAN JIA-WEN, FENG ZENG-CHAO. Research on the law of effective stress of coal-mass during methane

- drainage [J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2008, 39(4): 397-399, 403.
- [3] 彭守建, 许江, 陶云奇, 等. 煤样渗透率对有效应力敏感性实验分析[J]. *重庆大学学报*, 2009, 32(3): 303-307.
PENG SHOU-JIAN, XU JIANG, TAO YUN-QI, et al. Coefficient of sensitiveness between permeability and effective pressure of coal samples [J]. *Journal of Chongqing University*, 2009, 32(3): 303-307.
- [4] 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 XIANG-CHUN, GUO YONG-YI, WU SHI-YUE, et al. Relation between effective stress and swelling stress of coal body [J]. *Journal of Liaoning Technical University*, 2007, 26(4): 535-537.
- [5] 周军平, 鲜学福, 姜永东, 等. 考虑有效应力和煤基质收缩效应的渗透率模型[J]. *西南石油大学学报: 自然科学版*, 2009, 31(1): 4-8.
ZHOU JUN-PING, XIAN XUE-FU, JIANG YONG-DONG, et al. A permeability model considering the effective stress and coal matrix [J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2009, 31(1): 4-8.
- [6] 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 SHI-YUE, ZHAO WEN. Analysis of effective stress in adsorbed methane-coal system [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(10): 1674-1678.
- [7] 卢平, 沈兆武, 朱贵旺, 等. 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): 686-693.
LU PING, SHENG ZHAO-WU, ZHU GUI-WANG, et al. The effective stress and mechanical deformation and damage characteristics of gas-filled coal [J]. *Journal of China University of Science and Technology*, 2001, 31(6): 686-693.
- [8] ZHANG K, ZHOU H, HU D. Theoretical model of effective stress coefficient for rock/soil-like porous materials[J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2009, 22(3): 251-260.
- [9] GEORGE J D, BARAKAT M A. The change in effective stress associated with shrinkage from gas desorption in coal [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2001, 45(2): 105-113.
- [10] SIAVASH G Z, JEAN S L, SYLVINE G D, et al. Effective stress law for the permeability of a limestone [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2009, 46(2): 297-306.
- [11] LUKE D C, LU M, PAN Z J. An analytical coal permeability model for tri-axial strain and stress conditions [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2010, 84(2): 103-114.
- [12] PHUNG Q H, KYURO S K, SUGAI Y, et al. Carbon dioxide gas permeability of coal core samples and estimation of fracture aperture width [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2010, 83(1): 1-10.
- [13] JASINGE D, RANJITH P G, CHOI S K. Effects of effective stress changes on permeability of latrobe valley brown coal [J]. *Fuel*, 2010, 12: 30-32.
- [14] HEMA S, HALJASMAA I, MCLENDON R, et al. Influence of carbon dioxide on coal permeability determined by pressure transient methods [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2009, 77(1): 109-118.
- [15] JAMES G B. Mechanics of layered anisotropic poroelastic media with applications to effective stress for fluid permeability [J]. *International Journal of Engineering Science*, 2011, 49(1): 122-139.
- [16] GHAZAL I, WANG S G, ELSWORTH D, et al. Permeability evolution of fluid-infiltrated coal containing discrete fractures [J]. *International Journal of Coal Geology*, Available online, 2010, 27(10): 27-32.
- [17] 陶云奇. 含瓦斯煤 THM 耦合模型及煤与瓦斯突出模拟研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- [18] 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.

(编辑 侯湘)