

文章编号: 0253-9993(2011)03-0412-05

非等温吸附变形条件下瓦斯运移多场耦合模型研究

秦玉金^{1,2}, 罗海珠¹, 姜文忠¹, 田富超¹

(1. 煤炭科学研究总院 沈阳研究院, 辽宁 沈阳 110016; 2. 辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘 要: 基于已有相关渗流理论和多物理场耦合理论, 初步探讨了煤体的吸附解吸变形及温度对瓦斯含量的影响, 并建立了关于应力场、渗流场和温度场之间瓦斯运移的多物理场耦合模型, 借助数值分析软件(Comsol Multiphysics)对模型进行了有限元分析求解, 分析了淮南矿业集团潘三煤矿13₋₁煤层瓦斯压力、含量等随埋深的变化规律及煤层温度和煤的吸附变形对瓦斯分布的影响。结果表明: 该模型模拟结果与煤层实际瓦斯赋存特征基本相符。

关键词: 瓦斯运移; 多物理场耦合; 数值模型; Comsol Multiphysics; 控制方程

中图分类号: TD712.5 **文献标志码:** A

The research of gas migration multi-physics coupling model under the non-isothermal adsorption distortion

QIN Yu-jin^{1,2}, LUO Hai-zhu¹, JIANG Wen-zhong¹, TIAN Fu-chao¹

(1. Shenyang Research Institute, China Coal Research Institute, Shenyang 110016, China; 2. Department of Safety Science & Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: Based on percolation theory and the related multi-physics coupling theory, discussed the adsorption and desorption of coal deformation and temperature on gas content, and established the gas migration multi-physics coupling model which was among the stress field, flow field and temperature field, and used numerical analysis software Comsol Multiphysics to carry on the finite element analysis and solution of the model, analyzed the influence of gas distribution about gas pressure and content of the variation with depth, temperature and coal seam deformation on the adsorption of gas distribution in Huainan Mining Industry Co. Ltd. Pansan Coal Mine 13₋₁ coal seam. The simulation indicates that: the coupling of the model results which consistent with the actual coalbed gas occurrence and migration characteristics.

Key words: gas migration; multi-physics coupling; model; Comsol Multiphysics; control equation

煤层渗透率是研究煤层瓦斯运移规律的重要参数, 煤层受力变化、瓦斯压力的变化、温度的变化及吸附解吸等都会对煤层渗透率产生重要影响^[1]。煤体吸附瓦斯后要发生体积膨胀变形, 而解吸瓦斯后则要发生相应的收缩变形^[2], 同时瓦斯在吸附解吸过程中本身伴随有热效应, 会引起煤体温度的变化^[3]。地层温度随深度增加而增大, 温度对瓦斯含量的影响以及变温引起的煤体变形等不可忽略^[4]。由于从实

验角度较难实现综合分析考虑上述各因素对瓦斯运移的影响, 故目前相关研究相对较少。

本文在已有相关渗流理论和多物理场耦合理论的基础上, 采用前人相关实验结果^[5-6], 综合考虑煤体的吸附解吸变形以及温度对瓦斯含量的影响, 导出瓦斯渗流过程中渗透率的动态表达式, 建立瓦斯运移的多物理场耦合模型, 并借助数值分析软件 Comsol Multiphysics 对数学模型进行有限元求解, 最终实现

收稿日期: 2010-11-04 责任编辑: 毕永华

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)(2011CB201206); 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(2008ZX0540-01, 2008ZX0540-02)

作者简介: 秦玉金(1975—), 男, 内蒙古乌兰察布人, 高级工程师, 博士研究生。联系人: 田富超, Tel: 024-24117796, E-mail: ttf5@163.com

分析其中各因素对瓦斯运移的影响。

1 控制方程

1.1 力平衡方程

假设煤体为理想线弹性体,满足广义胡克定律。同时温度场为非等温场,温度的变化会引起体积应变(正应变)。考虑到煤体吸附、解吸瓦斯会引起体积膨胀或收缩,同样会引起正应变。由此可得到煤体总应变 ε_{ij} 与总应力 σ_{ij} (拉为正)、瓦斯压力 p 、变温 T 以及吸附应变 ε_s 之间的关系^[7]

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2G}\sigma_{ij} - \left(\frac{1}{6G} - \frac{1}{9K}\right)\sigma_{kk}\delta_{ij} + \frac{\alpha}{3K}p\delta_{ij} + \frac{\alpha_T}{3}T\delta_{ij} + \frac{\varepsilon_s}{3}\delta_{ij} \quad (1)$$

式中, G 为剪切模量; K 为煤体的体积模量, $K = 2G(1 + \nu)/3(1 - 2\nu)$; ν 为泊松比; δ_{ij} 为 Kronecker 符号,定义为:当 $i = j$ 时 $\delta_{ij} = 1$,当 $i \neq j$ 时 $\delta_{ij} = 0$; α (≤ 1)为 Biot' s 系数; α_T 为煤体的体积热膨胀系数, $^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

ε_s 是由于煤体吸附瓦斯引起的体积应变, ε_s 与 p 的关系满足 Langmuir 类型曲线,即

$$\varepsilon_s = \varepsilon_L \frac{p}{p + p_{L1}} \quad (2)$$

式中, ε_L 为孔隙压力无限大时的体应变常数; p_{L1} 为当体应变等于 $0.5\varepsilon_L$ 时的孔隙压力。

取 T_0 (300 K)为煤体自由应力状态时对应的绝对参考温度^[8], T 为煤层温度相对于 T_0 的变化(K),即变温,这样煤体的实际温度就是 $(T_0 + T)$ 。由式(1)可得

$$\sigma_{ij} = 2G\varepsilon_{ij} + \frac{2G\nu}{1 - 2\nu}\varepsilon_{kk}\delta_{ij} - \alpha p\delta_{ij} - K\alpha_T T\delta_{ij} - K\varepsilon_s\delta_{ij} \quad (3)$$

假定 F_i 和 u_i ($i = x, y, z$)分别是净体力和位移在 i 方向的分量,则由式(1)~(3)可得

$$Gu_{i,j} + \frac{G}{1 - 2\nu}u_{j,i} - \alpha p_{,i} - K\alpha_T T_{,i} - K\varepsilon_{s,i} + F_i = 0 \quad (4)$$

式(4)为综合考虑瓦斯压力、变温以及吸附应变后的煤体变形控制方程。

1.2 瓦斯渗流方程

煤体由固体骨架和包含瓦斯的孔隙组成。当瓦斯压力、温度或孔隙发生变化时,会引起瓦斯的解吸或吸附,进而引起瓦斯在孔隙中的渗流,瓦斯在煤体中渗流的质量守恒方程^[9]为

$$\frac{\partial m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g q_g) = Q_p \quad (5)$$

其中, ρ_g 为瓦斯密度, kg/m^3 ; q_g 为渗流速度, m/s^{-1} ;

Q_p 为汇源项, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; m 为瓦斯含量, kg/m^3 ,包括游离态瓦斯和吸附态瓦斯,定义^[10]为

$$m = \varphi \rho_g + \rho_{ga} \rho_c \frac{V_L p}{p + p_{L2}} \times \exp \left[-\frac{0.02}{0.993 + 0.07p} (T_0 + T - T_1) \right] \quad (6)$$

式中, φ 为孔隙率; ρ_{ga} 为标准条件下的瓦斯密度, kg/m^3 ; ρ_c 为煤体密度, kg/m^3 ; V_L 为 Langmuir 体积常数, m^3/kg ; p_{L2} 为 Langmuir 压力常数,MPa; $T_0 + T$ 为煤层温度; T_1 为实验温度。

将瓦斯看作理想气体,由式(6)可得标准条件下瓦斯的状态方程为

$$\rho_{ga} = \frac{M_g p_a}{RT_a} \quad (7)$$

式中, M_g 为瓦斯摩尔质量, kg/kmol ; p_a 和 T_a 分别为标准条件下的瓦斯压力与温度,取值为 $p_a = 0.1$ MPa, $T_a = 273$ K。

假设瓦斯在煤体中的渗流符合 Darcy 定律,同时假设重力效应相对较小,可以忽略,那么渗流速度 q_g 可表达^[11]为

$$q_g = -\frac{k}{\mu} \nabla p \quad (8)$$

式中, k 为煤体的渗透率, m^2 ; μ 为瓦斯的动力黏性系数, $(\text{N} \cdot \text{s})/\text{m}^2$ 。

假设煤体温度为 T_0 ,瓦斯压力为0,煤体处于零应力状态,孔隙率为 φ_0 。则式(3)可以进一步变形为

$$\varphi = \alpha - (\alpha - \varphi_0) \exp \left[-\left(\varepsilon_v + \frac{p}{K_s} - \varepsilon_s - \alpha_T T \right) \right] \quad (9)$$

式中, ε_v 为煤体的体应变; K_s 为煤颗粒的有效体积模量。

此外,渗透率与孔隙率之间可认为满足如下幂函数关系式

$$k = k_0 (\varphi/\varphi_0)^3 \quad (10)$$

式中, k_0 为在零应力状态下的渗透率, m^2 。

将式(7)~(9)代入式(6),可以得到

$$\begin{aligned} & \frac{1}{T_0 + T} \left[\varphi + \frac{(\alpha - \varphi)p}{K_s} - \frac{(\alpha - \varphi)\varepsilon_L p_{L1} p}{(p + p_{L1})^2} \right] \frac{\partial p}{\partial t} + \\ & \frac{p_a \rho_c V_L}{T_a} \left\{ \frac{p_{L2}}{(p + p_{L2})^2} \exp \left[-\frac{0.02}{0.993 + 0.07p} \times \right. \right. \\ & \quad \left. \left. (T + T_0 - T_1) \right] \right\} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{p}{(p + p_{L2})} \times \\ & \exp \left[-\frac{0.02}{0.993 + 0.07p} (T + T_0 - T_1) \right] \times \\ & \frac{0.02 \times 0.07}{(0.993 + 0.07p)^2} (T + T_0 - T_1) \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{p}{(p + p_{L2})} \times \end{aligned}$$

$$\exp\left[-\frac{0.02}{0.993+0.07p}(T+T_0-T_1)\right]\frac{0.02}{0.993+0.07p}\times$$

$$\frac{\partial T}{\partial t}\left\{-\frac{\varphi p}{(T_0+T)^2}\frac{\partial T}{\partial t}-\frac{p(\alpha-\varphi)\alpha_T}{T_0+T}\frac{\partial T}{\partial t}-\right.$$

$$\left.\frac{1}{\mu}\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{pk}{T_0+T}\frac{\partial p}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{pk}{T_0+T}\frac{\partial p}{\partial y}\right)\right]\right\}=$$

$$\frac{R}{M_g}Q_p-\frac{p(\alpha-\varphi)}{(T_0+T)}\frac{\partial \varepsilon_V}{\partial t} \quad (11)$$

式(11)为综合考虑煤体变形、吸附变形及温度效应的瓦斯渗流控制方程。

1.3 温度场方程

忽略热渗透效应,煤体中的热传导过程可由 Fourier 定律^[12]表示为

$$q_T = -\lambda_c \nabla T \quad (12)$$

式中, q_T 为煤体中的热流量; λ_c 为煤体的热传导系数, $J/(s \cdot m \cdot ^\circ C)$ 。

这里只考虑煤体与瓦斯的热传导效应,则由能量守恒方程可得煤体中温度场的控制方程为

$$(\rho_c C_c) \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_c \nabla^2 T \quad (13)$$

式中, C_c 为煤体的比热系数, $J/(kg \cdot ^\circ C)$ 。

这样方程(4)、(11)和(13)就构成了描述煤体中瓦斯运移的完整控制方程组,其中考虑了应力场、渗流场和温度场之间的耦合作用,考虑了温度对瓦斯含量的影响,考虑了变温引起的煤体变形,以及瓦斯吸附解吸引起的煤体体积变化。

由于上述方程组在时间和空间域上都是高度非线性的,只能用有限元等数值方法求解。Comsol Multiphysics 是基于偏微分方程求解的有限元数值分析软件,是专门针对多物理场耦合问题求解而设计的,易于实现耦合方程的建立和有限元实施,因此本文将采用该软件对所建模型进行数值求解和相关分析。

2 数值模型

本文所建数值模型来自潘一煤矿 13₋₁煤层,数值模型如图 1 所示。

模型上方受上覆岩石重力作用,大小为 10 MPa,模型下方及两侧受位移约束。煤层瓦斯压力分布 800 m 深处瓦斯压力为 5.5 MPa;400 m 深处瓦斯压力为 0.4 MPa。煤层温度分布:800 m 深处温度为 37 °C;400 m 深处温度为 27 °C。模型采用稳态计算。本文所建数值模型所需参数:煤体弹性模量 $E = 2\,713$ MPa,煤颗粒弹性模量 $E_s = 8\,139$ MPa,煤体泊松比 $\nu = 0.339$,煤体的密度 $\rho_c = 1\,250$ kg/m³,标准条件下的瓦斯密度 $\rho_{ga} = 0.717$ kg/m³,Langmuir 应变常

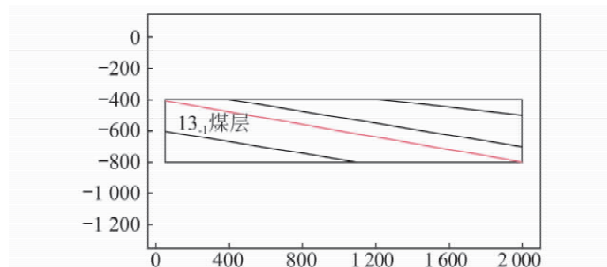


图 1 数值计算模型(单位:m)

Fig. 1 The numerical calculation model

数 $\varepsilon_L = 0.005$; Langmuir 压力常数 $p_{L1} = 1.4$ MPa,自由状态时的孔隙率 $\varphi_0 = 0.02$,自由状态时的渗透率 $k_0 = 1.0 \times 10^{-15}$ m²,瓦斯的动力黏性系数 $\mu = 1.84 \times 10^{-5}$ Pa · s, Langmuir 体积常数 $V_L = 0.026$ m³/kg, Langmuir 压力常数 $p_{L2} = 1.4$ MPa; 煤体绝对参考温度 $T_0 = 300$ K,煤体体积热膨胀系数 $\alpha_T = 2.4 \times 10^{-5}$ K⁻¹,煤体热传导系数 $\lambda_c = 0.2$ J/(s · m · K),煤体的热容 $C_c = 1\,200$ J/(kg · K),标准条件下气体压力 $p_a = 0.101\,325$ MPa,标准条件下的温度 $T_a = 273$ K。

3 计算结果与分析

3.1 瓦斯压力、含量等随深度的变化规律

基于前文所述数值模型及边界条件进行数值求解,求解结果如图 2 所示。

由图 2(a) 可以看出,瓦斯压力随深度增加呈非线性变化,但非线性程度不明显,可以近似用线性方程来代替。由于游离瓦斯密度和吸附瓦斯含量均是瓦斯压力及温度的函数,同时煤层的孔隙率、渗透系数不是一常数,而是随地应力、瓦斯压力、温度等而动态变化的,因此瓦斯压力随深度的分布规律出现这种非线性形式,其非线性程度与上述相关参数有关。

由图 2(b) 可以看出,瓦斯含量随深度增加呈明显的非线性分布,且瓦斯含量梯度随深度增加而减小,即瓦斯含量先是随深度增加而迅速增大,而后梯度逐渐减小,最后趋于零。这主要是由于温度的升高所导致的吸附甲烷量的减少抵消了压力增大导致的吸附甲烷量的增高,因此任何地区都有一个吸附量最大平衡点的埋深^[14]。

由图 2(c)、(d) 可以看出,随着深度的增加,煤层的孔隙率和渗透率相应减小,并且孔隙率和渗透率先是随深度增加而迅速减小,而后随深度增加而缓慢减小,几乎呈线性分布,这是由于地应力随深度增加而增大,煤岩体被压缩的缘故。

3.2 煤层温度对瓦斯分布的影响

为进一步分析煤层温度对瓦斯分布的影响,针对

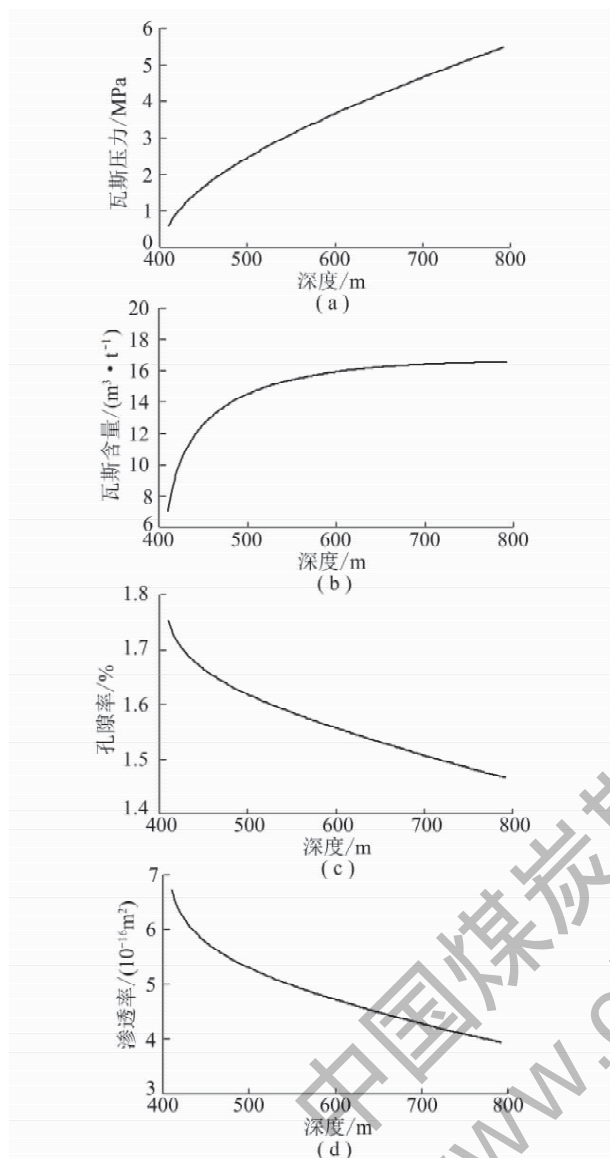


图2 煤层瓦斯压力、瓦斯含量、孔隙率、渗透率与埋藏深度的关系

Fig. 2 The relationships of coalbed gas pressure, gas content, porosity, permeability with depth

图1所述数值模型,设定400 m深处温度为27℃,分别对800 m深处温度为32、37和47℃三种情况进行数值计算,相关计算结果如图3(a)所示。

由图3(a)可以看出,煤层渗透率随温度升高而降低,这是由于温度升高会引起煤体的膨胀,但深部煤体由于受到围岩的约束而不能自由膨胀,导致煤体中产生压应力,进而造成煤体渗透率的降低。

3.3 煤的吸附变形对瓦斯分布的影响

煤吸附瓦斯后会产生体积膨胀,排放瓦斯后煤体会收缩。针对图1所述数值模型,分别考虑不同的极限吸附变形量,分别取 $\varepsilon_s = 0.001$ 、0.005和0.010,进一步分析煤的吸附变形对瓦斯分布的影响,相关计算结果如图3(b)所示。

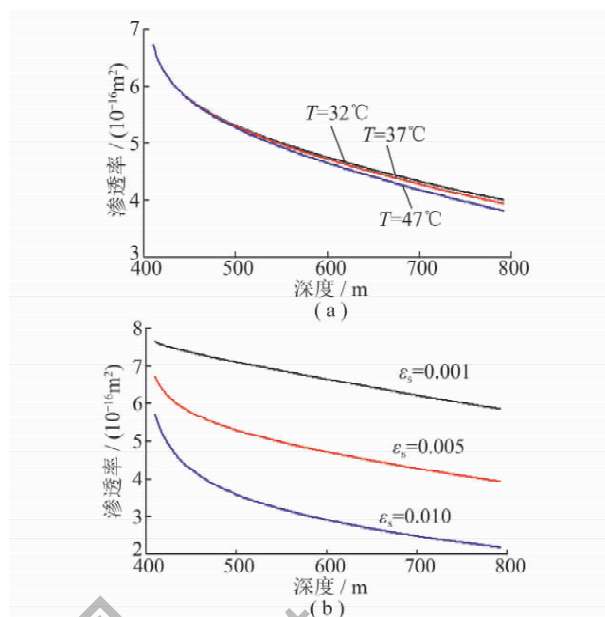


图3 不同温度、变形量下煤层渗透率与埋藏深度的关系

Fig. 3 The relationship between coalbed permeability and depth under different temperatures, deformation

由图3(b)可以看出,煤层渗透率随极限吸附变形量 ε_s 的增大而降低,这是由于煤吸附瓦斯后会产生体积膨胀,但埋于深部的煤体由于受到围岩的约束而不能自由膨胀,导致在煤体中产生压应力,进而造成煤体渗透率的降低。低渗透率不利于瓦斯排放和煤层气开采,但从反方面来说,随着瓦斯的排出,煤体会逐渐收缩,煤层渗透率会增大,而这又有利于瓦斯排放和煤层气开采。

4 结 论

(1) 基于已有相关渗流理论和多物理场耦合理论,分析了煤体温度对瓦斯含量的影响,变温及瓦斯吸附解吸引起的煤体体积变化,初步探讨了非等温吸附变形条件下煤体中瓦斯运移规律。

(2) 总结了力平衡方程、瓦斯渗流方程和温度场方程之间耦合作用下煤体瓦斯运移的控制方程组,导出了瓦斯渗流过程中渗透率的动态表达式,建立了关于应力场、渗流场和温度场之间瓦斯运移的多物理场耦合模型。

(3) 借助数值分析软件(Comsol Multiphysics)对模型进行有限元分析求解,分析了淮南矿业集团潘三煤矿13₁煤层瓦斯压力、含量等随埋深的变化规律及煤层温度和煤的吸附变形对瓦斯分布的影响。

(4) 该模型模拟结果与煤层实际瓦斯运移特征基本相符,剖析了煤层多物理场耦合模型与瓦斯赋存的关系,揭示了深部煤层瓦斯赋存特征,为煤矿进行入深部开拓采取瓦斯防治措施提供了理论支撑。

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):1 563-1 569.
Tang Jupeng, Pan Yishan, Li Chengquan, 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): 1 563-1 569.
- [2] 李祥春,郭勇义,吴世跃,等.考虑吸附膨胀应力影响的煤层瓦斯流-固耦合渗流数学模型及数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2007,26(S1):2 743-2 744.
Li Xiangchun, Guo Yongyi, Wu Shiyue, et al. Mathematical model and numerical simulation of fluid-solid coupled flow of coal-bed gas considering swelling stress of adsorption[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S1): 2 743-2 744.
- [3] 郭立稳,俞启香,蒋承林,等.煤与瓦斯突出过程中温度变化的实验研究[J].岩石力学与工程学报,2000,19(3):366-367.
Guo Liwen, Yu Qixiang, Jiang Chenglin, et al. Testing study on the variation of coal temperature during the process of coal and gas outburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(3): 366-367.
- [4] 梁冰.温度对煤的瓦斯吸附性能影响的试验研究[J].黑龙江矿业学院学报,2000,10(1):20-22.
Liang Bing. Research on temperature effects on the gas absorption performance[J]. Journal of Heilongjiang Mining Institute, 2000, 10(1): 20-22.
- [5] 张春会.非均匀随机裂隙展布岩体渗流应力耦合模型[J].煤炭学报,2009,34(11):1 461-1 462.
Zhang Chunhui. Seepage-stress coupled model of heterogeneous and random fractured rock mass[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(11): 1 461-1 462.
- [6] 王亮,程远平.巨厚火成岩下采动裂隙场与瓦斯流动场耦合规律研究[J].煤炭学报,2010,35(8):1 288-1 289.
Wang Liang, Cheng Yuanping. The coupling laws between fissure field and gas flow field under an extremely thick igneous rock[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(8): 1 288-1 289.
- [7] Zhang Hongbin, Liu Jishan, Elsworth D. How sorption-induced matrix deformation affects gas flow in coal seams: a new FE model[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2008, 45(8): 1 226-1 236.
- [8] Zhou Y, Rajapakse R K N D, Graham J. A coupled thermoporoelastic model with thermo-osmosis and thermal-filtration[J]. Int. J. Solids Structures, 1998, 35: 4 659-4 683.
- [9] Detournay E, Cheng A H D. Fundamentals of poroelasticity [A]. Fairhurst C. Comprehensive Rock Engineering, vol. 2 [C]. Oxford: Pergamon, 1993: 113-71.
- [10] Cui X, Bustin R M. Volumetric strain associated with methane desorption and its impact on coalbed gas production from deep coal seams[J]. AAPG Bull, 2005, 89: 1 181-1 202.
- [11] Robertson E P, Christiansen R L. Modeling permeability in coal using sorption-induced strain data [A]. Proceedings of the 2005 SPE annual Technical Conference and Exhibition [C]. Dallas, 2005.
- [12] Liu J, Sheng J C, Zhu W C, et al. Effects of heterogeneity on the multiphysics of fractured rocks [A]. Proceedings of the 2nd International Conference on Coupled THMC Processes in Geo-systems: Fundamentals Modeling, Experiments and Applications [C]. Nanjing, 2006: 45-61.
- [13] 张新民,张遂安,钟玲文,等.中国煤层气甲烷[M].西安:陕西科学技术出版社,1991:56-80.
Zhang Xinmin, Zhang Suian, Zhong Lingwen, et al. Coalbed methane of China [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1991: 56-80.