

## 变温条件下深部煤层瓦斯分布规律的数值模拟

魏晨慧, 朱万成, 白羽, 盖迪  
(东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110819)

**摘 要:** 深部煤层瓦斯运移过程及分布规律与温度场、瓦斯渗流场及应力场耦合密切相关。基于深部煤层瓦斯运移的热流固耦合模型, 结合实际的煤层条件和实测数据, 开展了煤层瓦斯赋存规律的数值模拟, 研究了瓦斯压力和瓦斯含量分布规律的影响因素。结果表明: 煤层渗透率是影响瓦斯压力分布的主要因素, 其中煤体的有效应力系数、初始孔隙率、弹性模量以及吸附应变系数均对渗透率有着重要的影响; 煤层瓦斯含量受瓦斯压力和煤层温度的共同影响, 不考虑煤层温度预测得到的瓦斯含量结果偏大。

**关 键 词:** 瓦斯分布; 深部煤层; 变温条件; 热流固耦合; 数值模拟

**中图分类号:** TD 712.2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2015)07-1033-04

## Numerical Simulation on Methane Distribution Legularity in Deep Coal Seam Under Variable Temperatures

WEI Chen-hui, ZHU Wan-cheng, BAI Yu, GAI Di

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZHU Wan-cheng, professor, E-mail: zhuwancheng@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** Methane migration and distribution in deep coal seam is closely related to the coupled process among thermal, gas flow and mechanical fields. Based on the THM (thermal hydraulic mechanical) coupling model, coal seam condition and in-situ test data, numerical simulation was conducted to examine the factors affecting the distribution of methane pressure and content. It is shown that, permeability of coal seam is the main factor affecting gas pressure distribution, where the effective stress coefficient, initial porosity, elastic modulus and adsorption swelling coefficient all have important impacts on permeability. Methane content distribution is controlled by both gas pressure and coal temperature. Methane content may be overestimated without considering the coal seam temperature.

**Key words:** methane distribution; deep coal seam; variable temperatures; THM (thermal hydraulic mechanical) coupling; numerical simulation

煤层瓦斯压力和瓦斯含量是煤层瓦斯的基本参数,掌握煤层瓦斯压力和瓦斯含量的分布规律,对研究煤与瓦斯突出、煤层瓦斯赋存和涌出规律,以及评价煤层瓦斯含量和瓦斯抽放等均有非常重要的作用<sup>[1]</sup>。在影响煤层瓦斯含量的众多地质因素中,煤层埋深被认为是最具普遍性的因素之一。多年来,国内外学者针对该问题开展了大量的研究工作<sup>[2-4]</sup>,但主要是针对矿区特定的条件,根据实

测数据建立经验公式。简单来说,煤层瓦斯压力、瓦斯含量与埋藏深度之间基本满足线性关系<sup>[1-2]</sup>。

实际上,在深部煤层中,由于温度作用显著,在考虑瓦斯赋存规律时必须考虑温度场对瓦斯吸附量的影响。同时,温度场会在煤体中引起温度应力,从而影响力场和煤层渗透率。当然,应力场和渗流场也必然对温度场产生影响。因此,深部煤层瓦斯赋存规律及运移过程就成为温度场、应力场与

收稿日期: 2014-04-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51222401, 51374049, 51304037); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N120101001, N120301002); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20110042110035); 中国博士后科学基金资助项目(2013M541238)。

作者简介: 魏晨慧(1984-), 男, 山西长治人, 东北大学讲师, 博士; 朱万成(1974-), 男, 新疆呼图壁人, 东北大学教授, 博士生导师。

渗流场的三场耦合问题<sup>[5-9]</sup>,煤层瓦斯压力和含量随深度的变化关系也不可能是简单的线性关系。

针对该问题,本文作者前期已经建立了煤层瓦斯运移的温度场-渗流场-应力场耦合模型<sup>[8]</sup>,并开展了煤层气开采等问题的数值模拟研究,其中考虑了温度对游离瓦斯状态和吸附瓦斯含量的影响,以及变温引起的煤体变形;考虑了瓦斯渗流引起的热对流对温度场的影响,以及游离瓦斯压力对煤体变形的影响;考虑了瓦斯吸附、解吸引起的煤体体积变化,并给出了煤体渗透率的动态表达式。

本文基于已有的热流固耦合模型<sup>[8]</sup>,结合实际的煤层条件和实测数据,进一步开展煤层瓦斯赋存规律的数值模拟,研究弹性模量、有效应力系数、吸附应变系数、初始孔隙率和煤体温度等因素对瓦斯压力和瓦斯含量分布规律的影响机理。

## 1 数值模型

丁集井田 11-2 煤层厚度 2~3 m,地层倾角一般为 5°~20°。在地勘期间共获得合格瓦斯样 37 个,采样标高在 -500~1 050 m 之间,且 -800 m 以下水平居多<sup>[10]</sup>。针对该煤层的地质条件,将其简化为平面问题,垂直煤层走向建立几何模型,如图 1 所示。煤层厚 3 m,倾角 10°,模型整体宽 2 360 m,高 500 m,对应实际埋深为 500~1 000 m,除煤层外,其余部分简化为围岩。

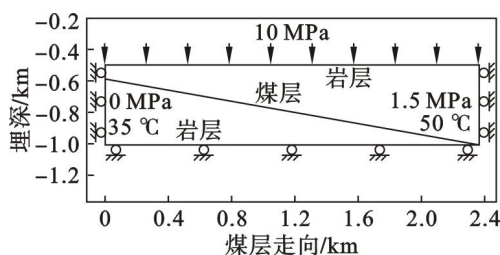


图 1 丁集井田 11-2 煤层的数值模型  
Fig. 1 Numerical model of Dingji 11-2 coal seam

考虑到地下煤层在开采之前已经历长时间的地质演变,本模型中将渗流场和温度场视为稳态问题来考虑。各物理场的边界条件设置见图 1。

应力场:模型左、右和下端采用位移约束,上部施加 10 MPa 荷载。渗流场:煤层浅部瓦斯压力为 0 MPa,深部为 1.5 MPa。温度场:煤层浅部温度为 35 °C,深部为 50 °C。

模型所用相关力学参数为:煤体弹性模量  $E = 2\,713\text{ MPa}$ ,有效应力系数  $\alpha = 0.8$ ,裂隙在自由状态时的孔隙率  $\phi_0 = 0.01$ ,渗透率  $k_0 = 2 \times$

$10^{-18}\text{ m}^2$ , Langmuir 吸附体积常数  $V_L = 0.042\text{ m}^3/\text{t}$ , Langmuir 吸附应变常数  $\varepsilon_L = 0.01$ , Langmuir 吸附压力常数  $p_L = 3.73\text{ MPa}$ 。模型中所用其他力学参数同文献<sup>[8]</sup>。

## 2 瓦斯分布的影响因素分析

### 2.1 温度对瓦斯分布的影响

图 2 所示为瓦斯压力及瓦斯含量随埋深的变化曲线。由图 2a 可以看出,瓦斯压力与埋深之间近似为分段线性的关系,浅部时瓦斯压力梯度较大,埋深增加几十米后瓦斯压力梯度有所减小,之后基本保持不变。由图 2b 可以看出,当考虑温度场时,数值计算结果与实测结果相吻合;如果不考虑温度场的影响,则得到的瓦斯含量分布与实测结果存在一定的差异,且埋深越大,差别越大,表现为计算结果比实测结果偏大。其机理:本文关于瓦斯运移的渗流场方程中,基本场变量是瓦斯压力  $p$ ,在数值模型中设置边界条件时只能设置煤层上下边界的瓦斯压力值,进而计算得到瓦斯压力随埋深的分布,所以瓦斯压力分布都是从 0 增加到 1.5 MPa。瓦斯含量则是根据瓦斯压力、温度,通过 Langmuir 方程计算出来的,对于同一瓦斯压力,温度不同,其瓦斯含量值也会不同,所以不考虑温

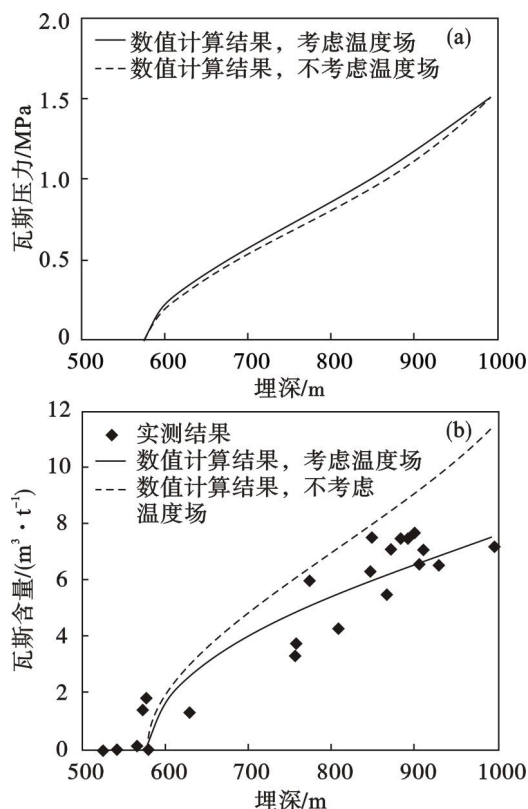


图 2 数值计算结果与实测结果的比较

Fig. 2 Comparison of numerical calculation results with in-situ measurement

度的影响时得到的瓦斯含量偏大.

## 2.2 有效应力系数对瓦斯分布的影响

图3所示为煤体有效应力系数 $\alpha$ 分别取0.2和1.0时的孔隙率、渗透率、瓦斯压力及瓦斯含量随埋深的分布. 由图3a和3b可以看出, $\alpha$ 越大,孔隙率和渗透率越低,且孔隙率和渗透率的降低幅度越大. 埋深从600 m增加到1 000 m, $\alpha$ 取为0.2时,孔隙率由0.93%降至0.86%,渗透率由 $16 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ 降至 $12.7 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ ,渗透率减小约20%; $\alpha$ 取为1.0时,孔隙率由0.66%降至0.24%,渗透率由 $5.8 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ 降至 $0.29 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ ,渗透率减小约95%.

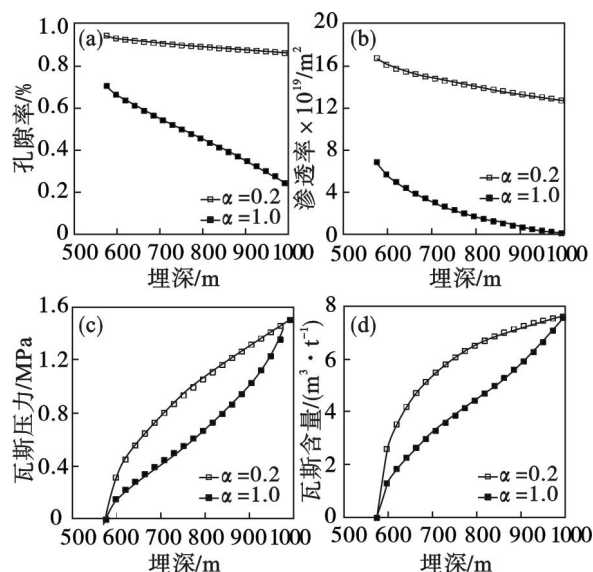


图3 不同有效应力系数时数值模拟结果

Fig. 3 Numerical simulation results for different effective stress coefficients

由图3c可以看出,随埋深增加,有效应力系数 $\alpha$ 取为1.0时的瓦斯压力梯度先减小后增加,而 $\alpha$ 取为0.2时的瓦斯压力梯度则是逐渐减小,趋于平稳. 分析其机理,本文将渗流场视为稳态问题,因此其瓦斯压力分布只与渗透率的相对大小有关,而与绝对大小无关. 随埋深增加, $\alpha$ 取为1.0时的渗透率相对其浅部时的变化幅度更大,导致其瓦斯压力梯度也随之增大. 图3d所示瓦斯含量分布图则是瓦斯压力和温度场共同影响的结果.

## 2.3 初始孔隙率对瓦斯分布的影响

图4所示为煤体节理-裂隙系统在自由状态时的孔隙率 $\phi_0$ 分别取0.8%和5%时,孔隙率、渗透率、瓦斯压力及瓦斯含量随埋深的分布. 由图4a和4b可以看出, $\phi_0$ 越小,孔隙率和渗透率越低,且孔隙率和渗透率的降低幅度越大. 埋深从600 m增加到1 000 m, $\phi_0$ 取为0.8%时,孔隙率由0.53%降至0.2%,渗透率由 $5.7 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ 降至

$0.3 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ ,渗透率减小约95%; $\phi_0$ 取为5%时,孔隙率由4.7%降至4.4%,渗透率由 $17 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ 降至 $14 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ ,渗透率减小约18%. 由文献[8]中孔隙率的表达式也可以看出, $\phi_0$ 对孔隙率变化的影响效果与有效应力系数 $\alpha$ 相反, $\phi_0$ 越小,孔隙率变化越大. 瓦斯压力和瓦斯含量分布图(见图4c,4d)与图3c,3d类似,不再赘述.

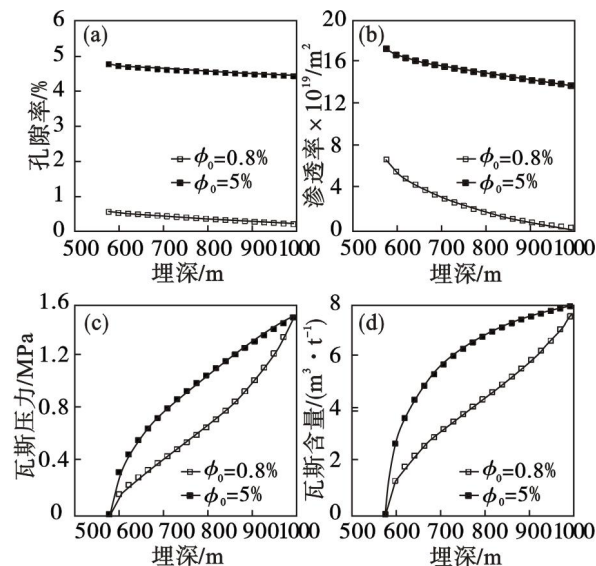


图4 不同孔隙率时的数值模拟结果

Fig. 4 Numerical simulation results for different porosities

## 2.4 弹性模量对瓦斯分布的影响

图5所示为煤体弹性模量分别取2 GPa和10 GPa时的孔隙率、渗透率、瓦斯压力及瓦斯含量随埋深的分布. 由图5a和5b可以看出,煤体弹性模量越小,在外载荷(地应力)作用下的变形越大,裂隙系统越容易被压缩,孔隙率和渗透率越低,且孔隙率和渗透率的变化幅度越大. 埋深从600 m增加到1 000 m,弹性模量取为2 GPa时,孔隙率由0.64%降至0.24%,渗透率由 $5.3 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ 降至 $0.3 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ ,渗透率减小约95%;弹性模量取为10 GPa时,孔隙率由0.88%降至0.7%,渗透率由 $13.5 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ 降至 $6.7 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ ,渗透率减小约50%. 瓦斯压力和瓦斯含量分布图(见图5c,5d)与图3c,3d类似,不再赘述.

## 2.5 吸附应变系数对瓦斯分布的影响

图6所示为煤体吸附应变系数 $\varepsilon_L$ 分别取0.002和0.02时的孔隙率、渗透率、瓦斯压力及瓦斯含量随埋深的分布. 由图6a和6b可以看出,煤层上部的孔隙率初值相同,渗透率初值也相同,不随 $\varepsilon_L$ 的取值不同而有所差异,这之前工况明显不同. 随着埋深的增加, $\varepsilon_L$ 越大,孔隙率和渗透率越低,且孔隙率和渗透率的降低幅度越大. 埋深从



600 m 增加到 1 000 m,  $\varepsilon_L$  取为 0.002 时, 孔隙率由 0.74% 降至 0.52%, 渗透率由  $8.2 \times 10^{-19} \text{ m}^2$  降至  $2.7 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ , 渗透率减小约 67%;  $\varepsilon_L$  取为 0.02 时, 孔隙率由 0.7% 降至 0.24%, 渗透率由  $6.9 \times 10^{-19} \text{ m}^2$  降至  $0.28 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ , 渗透率减小约 96%。瓦斯压力和瓦斯含量分布图与图 3c, 3d 类似, 不再赘述。

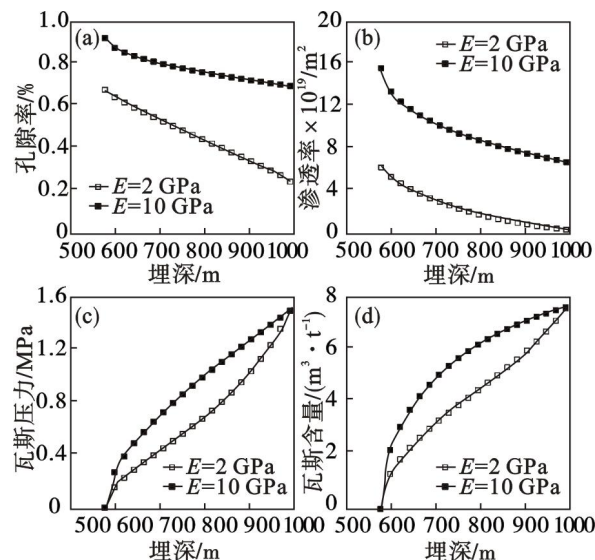


图 5 不同弹性模量时的数值模拟结果

Fig. 5 Numerical simulation results for different elastic modulus

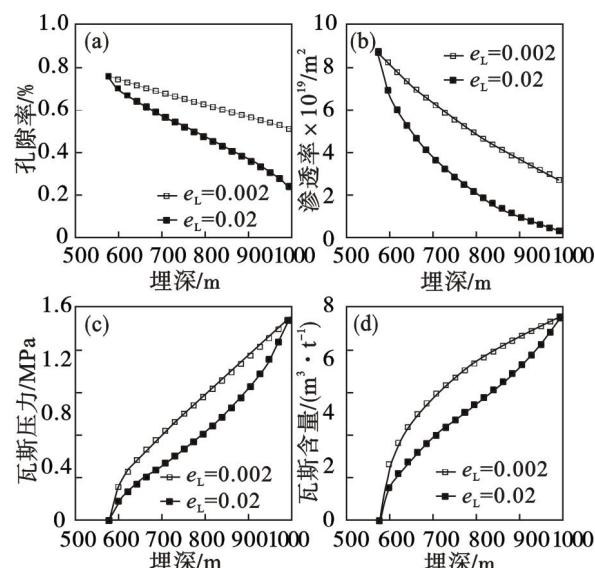


图 6 不同吸附应变系数时的数值模拟结果

Fig. 6 Numerical simulation results for different sorption strain coefficients

### 3 结 论

1) 煤层瓦斯含量受瓦斯压力和煤层温度的

共同影响, 不考虑煤层温度时预测得到的瓦斯含量偏大。

2) 煤层渗透率是影响瓦斯压力分布的主要因素, 其中煤体的有效应力系数、初始孔隙率、弹性模量以及吸附应变系数均对煤层渗透率及瓦斯赋存规律有着重要的影响。

### 参考文献:

- [1] 王宏图, 鲜学福, 尹光志, 等. 煤矿深部开采瓦斯压力计算的解析算法[J]. 煤炭学报, 1999, 24(3): 279-283.  
(Wang Hong-tu, Xian Xue-fu, Yin Guang-zhi, et al. Investigation of analytic method for coalbed gas pressure in high temperature and deeply mining mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 1999, 24(3): 279-283.)
- [2] 于不凡. 煤矿瓦斯灾害防治及利用技术手册[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2005: 32-59.  
(Yu Bu-fan. Technical manual of coal mine gas disasters prevention and utilization[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2005: 32-59.)
- [3] Scott A R. Hydrogeologic factors affecting gas content distribution in coal beds[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2002, 50(1): 363-387.
- [4] Bustin R M, Clarkson C R. Geological controls on coalbed methane reservoir capacity and gas content[J]. *International Journal of Coal Geology*, 1998, 38(1): 3-26.
- [5] Zhu W C, Liu J, Sheng J C, et al. Analysis of coupled gas flow and deformation process with desorption and Klinkenberg effects in coal seams[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, 44(7): 971-980.
- [6] Zhang H B, Liu J, Elsworth D. How sorption-induced matrix deformation affects gas flow in coal seams; a new FE model[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, 45(8): 1226-1236.
- [7] Levy J H, Day S J, Killingley J S. Methane capacities of Bowen basin coals related to coal properties[J]. *Fuel*, 1997, 76(9): 813-819.
- [8] Zhu W C, Wei C H, Liu J, et al. A model of coal-gas interaction under variable temperatures[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2011, 86(2): 213-221.
- [9] Qu H Y, Liu J, Chen Z W, et al. Complex evolution of coal permeability during CO<sub>2</sub> injection under variable temperatures[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2012, 9: 281-293.
- [10] 胡大鹏. 丁集煤矿煤与瓦斯突出特征及区域预测研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2011.  
(Hu Da-peng. Study on coal and gas outburst characteristics and regional prediction of Dingji coalmine[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2011.)