

文章编号:1000-582X(2011)04-030-06

# 多场耦合作用下煤层气的渗流特性与数值模拟

姜永东, 阳兴洋, 熊 令, 郑 权

(重庆大学 a. 复杂煤层气层瓦斯抽采国家地方联合工程实验室;

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:**根据实验研究煤样在轴向应力、围压、气压、温度单一因素作用下的渗流规律。利用 Ansys12.0 数值模拟了单场与多场耦合作用下煤层气的渗流规律,煤体的变形、孔隙压力、渗流场的分布规律。数值模拟得出:单场作用下煤层气在煤体中的渗流规律实验与数值模拟结果基本相同;多场耦合作用下煤的渗透率与平均有效应力曲线呈负指数关系;对试件变形的影响应力场大于渗流场,轴向应力对试件的变形大于围压;围压对渗流场的影响大于轴向应力,轴向应力对孔隙压力的影响大于围压,多场作用下孔隙压力大于单场作用。多场作用下数值模拟的结果与实验研究是一致的,因此研究煤层气的渗流规律必须考虑气-固-热的同时作用。

**关键词:**煤层气;应力场;温度场;渗流场;数值模拟

**中图分类号:**TD712,Q357.3

**文献标志码:**A

## Multi-field coupling effect on coalbed methane seepage characteristics and numerical simulation

JIANG Yong-dong, YANG Xing-yang, XIONG Ling, ZHENG Quan

(a. Engineering Lab of the union by contry and state for Complexiy of Coal bel methane gas extraction;

b. Key Laboratory of Ministry of Education for the Exploitation of Southwestern Resources &

Environmental Disaster Control Engineering, Chongqing University, Chongqing, 400044, P. R. China)

**Abstract:** This paper studies the seepage of coal samples under the influence of each single factor, the axial stress, confining pressure, gas pressure, and temperature by experiments. It uses Ansys12.0 to numerically simulate the law of coalbed methane seepage, coal deformation, pore pressure, the distribution of flow field under the influence of each single field and multi-field coupled. The numerical simulation show that the result of numerical simulation of gas seepage law in the coal under each single fields is basically the same as the experimental result. The curve of gas seepage and average effective stress under the condition of multi-field coupled is negative exponential relationship. Stress influenced the deformation of the specimen is greater than the seepage field. The axial stress on the deformation of the specimen is greater than confining presses The influence on the flow field by confining pressure is greater than axial stress, the influence of axial stress on the pore pressure is greater than confining pressure, pore-pressure under the action of multi-field is bigger than pro-pressure under each single field. To study the seepage law of coalbed methane, it should consider the influence of gas-solid-heat at the same time.

**Key words:** coalbed methane; stress field; temperature field; seepage field; numerical simulation

**收稿日期:**2010-11-20

**基金项目:**国家自然科学基金创新研究群体基金资助项目;国家自然科学基金青年基金资助项目(50904082);教育部科学技术研究重点项目(109130);重庆市科委院士专项(CSTC2010BC6006);重庆大学“211工程”三期创新人才培养计划建设项目(S-10220)

**作者简介:**姜永东(1977-),男,重庆大学副研究员,博士,主要从事采矿工程的研究,(E-mail)jyd@cqu.edu.cn.

THM耦合主要研究温度场-渗流场-应力场3场耦合数学模型、模型求解方法与数值分析等方面。Terzaghi<sup>[1]</sup>通过研究可变形、饱和的多孔介质中流体流动的耦合问题,建立了一维固结模型。Biot在Terzaghi理论的基础上研究了三维固结问题,给出了一些经典的解析公式和算例<sup>[2-4]</sup>。Verrujit建立了多相饱和和渗流与孔隙介质耦合作用的理论模型<sup>[5]</sup>。在THM耦合的应用方面,国外绝大部分都是围绕地热资源的开发和利用、核废料深埋处理、石油热采等课题开展,文献[6-8]研究了地应力、地温以及岩石的渗透率变化规律。文献[9]研究了三维应力作用下煤样渗透率变化规律。文献[10]研究得出渗透率随有效围压增大而减小。文献[11]研究得出围压对试件渗透率的影响比轴向应力大,渗透率与有效围压成负指数关系。文献[12]研究得出,温度增加煤样的渗透率增加,渗透率随有效应力增大而减小。文献[13]得出在不同外围应力下,温度对渗透率具有不同的影响,在低平均有效应力时,渗透率随温度的增加而增加,在高平均有效应力时,渗透率随温度的增加而减小。文献[14]提出了将煤层气流动看作可变形固体骨架中可压缩流体的流动,得到了采动影响下煤岩层煤层气流动的耦合数学模型,在此基础上,提出了煤体-煤层气耦合理论。文献[15]模拟煤岩固气耦合得出在轴向应力与气压线性增大情况下,渗透率随之减小。文献[16-20]开创性地研究了地球物理场作用下煤层气的渗流特性,建立了地应力场、温度场、电场、声场作用下煤层气的渗流理论。以上研究表明:煤层气的渗流与应力场、温度场、渗流场、物理场作用密切相关,因此结合实验研究结果,采用数值模拟研究了单场与多场作用下煤层气的渗流规律,以及单场与多场作用下煤体的变形与流场的变化规律。

## 1 单场与多场作用下煤层气渗流实验研究与数值模拟

根据上述分析,利用自制的煤层气渗流系统实验研究了多场耦合下甲烷的渗流特性,在实验研究的基础上,综合FORTRAN数学编辑方法,应用Ansys12.0多孔介质孔隙压力模型对多场作用下煤层气渗流规律进行了数值模拟。建立的结构模型直径为50 mm,高为100 mm的圆柱体试件,数值模拟边界条件与煤体常规三轴渗流实验一致,其边界为:试件下端位移约束,加气压为 $P_2$ ,试件上端为自由面,加轴向应力和气压为 $P_1$ ,试件四周为自由面,加围压。本构关系为弹塑性,屈服准为DP准则。输入的煤体泊松比为0.31,密度为 $1\ 320\text{ kg/m}^3$ ,弹性模量为 $1\ 350\text{ MPa}$ ,内摩擦角为 $18^\circ$ ,内聚力为 $0.8\text{ MPa}$ ,煤体初始渗透率为 $2.4 \times 10^{-8}\text{ cm}^2$ ,煤体热膨

胀系数为0.82,甲烷的密度为 $0.714\text{ kg/m}^3$ ,甲烷动力黏度为 $0.0108 \times 10^{-6}\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。数值模拟与实验结果计算甲烷的渗透率、有效应力均采用文献[11]中的计算公式。

### 1.1 轴向应力对煤层气渗流特性的影响

轴向应力对煤层气渗流特性的影响实验与数值模拟条件为:围压、孔隙压力、温度一定,轴向应力是变化的。文献[20]的实验条件为:围压 $\sigma_a=4\text{ MPa}$ ,孔隙压力( $p_2=0.8\text{ MPa}$ , $p_1=0.1\text{ MPa}$ ),温度 $T=21.5\text{ }^\circ\text{C}$ 。实验与数值模拟结果如图1所示,可以看出:数值模拟得出的渗流特性与实验曲线基本一致,实验得出该条件下煤体的三轴抗压有效强度为 $25.02\text{ MPa}$ ,当轴向有效应力 $\sigma'_1$ 较小时,处于应力-应变全过程曲线的初始压密与弹性阶段,数值模拟与实验得到的渗透率 $K$ 随轴向有效应力 $\sigma'_1$ 增大而减小。当轴向有效应力 $\sigma'_1$ 较大时,处于应力-应变全过程曲线的应变硬化阶段,数值模拟与实验得到的渗透率 $K$ 随轴向有效应力 $\sigma'_1$ 增大而增大,达到试件破坏时,渗透率 $K$ 骤增。

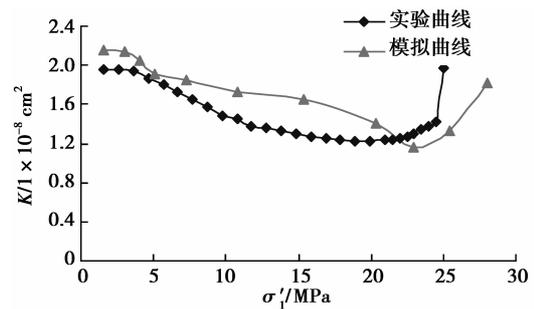


图1 渗透率与轴向有效应力曲线

### 1.2 围压对煤层气渗流特性的影响

围压对煤层气渗流特性的影响实验与数值模拟条件为:实验中轴向有效应力、孔隙压力、温度一定,围压是变化的。文献[20]的实验条件为:轴向应力 $\sigma_1=0\text{ MPa}$ ,孔隙压力( $p_2=1.2\text{ MPa}$ , $p_1=0.1\text{ MPa}$ ),温度 $T=23.0\text{ }^\circ\text{C}$ 。实验与数值模拟结果如图2所示,可以看出:数值模拟与实验结果得出的渗透率随有效围压 $\sigma'_a$ 增大而减小,且渗透率与有效围压呈负指数函数关系。

### 1.3 温度对煤层气渗流特性的影响

温度对煤层气渗流特性的影响实验与数值模拟条件为:实验中轴向有效应力、孔隙压力、围压一定,温度是变化的。图3(a)是文献[21]实验研究结果,模拟的轴向应力 $\sigma_1=0.98\text{ MPa}$ ,围压 $\sigma_a=0.5\text{ MPa}$ ,孔隙压力差 $0.4\text{ MPa}$ 。图3(b)是文献[13]实验研究结果,模拟的平均有效应力 $=6\text{ MPa}$ ,孔隙压力( $p_2=0.5\text{ MPa}$ , $p_1=0.12\text{ MPa}$ )。从图3中可以看

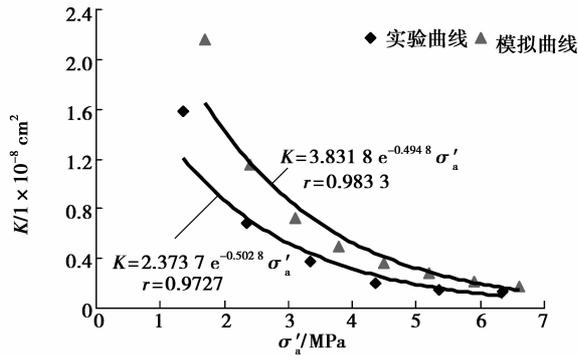
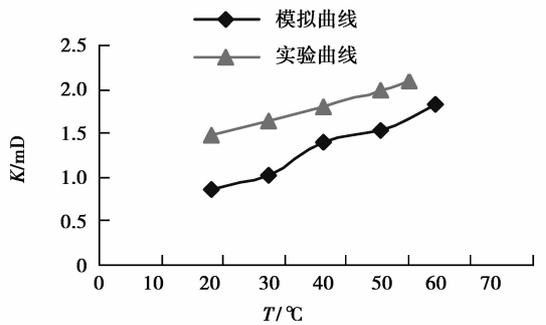
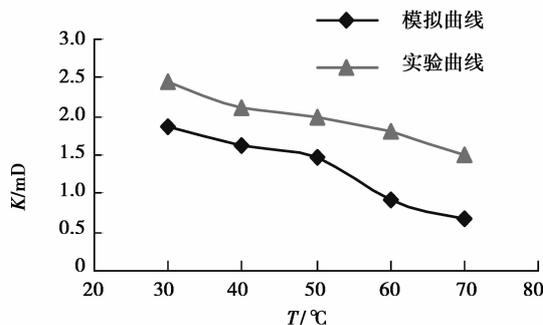


图 2 渗透率与有效围压曲线

出: 2 种实验结果与数值模拟相一致, 温度对煤体渗透率的影响, 在低平均有效应力时, 渗透率随温度的增加而增加, 在高平均有效应力时, 渗透率随温度的增加而减小, 这种现象文献[13]用“内膨胀效应”进行了解释。



(a) 低平均有效应力



(b) 高平均有效应力

图 3 不同有效应力下渗透率与温度曲线

#### 1.4 孔隙压力对煤层气渗流特性的影响

孔隙压力对煤层气渗流特性影响的实验与数值模拟条件为: 轴向有效应力、温度、围压一定, 孔隙压力是变化的。文献[20]的实验条件为: 轴向应力  $\sigma_1 = 0$  MPa, 围压  $\sigma_a = 3$  MPa, 温度  $T = 22.0$  °C, 孔隙压力是变化的 ( $p_2$  变化,  $p_1 = 0.1$  MPa), 数值模拟与实验结果如图 4 所示, 可以看出: 渗透率随着平均有效应力  $\sigma_0$  的增大而减小, 且呈负指数函数关系。其原因为, 孔隙压力  $p_2$  增大, 气压使煤体骨架产生变

形, 煤体的微观孔隙、裂隙增大, 从而渗透率增加; 孔隙压力  $p_2$  增大, 导致有效轴向应力  $\sigma'_1$ 、有效围压  $\sigma'_a$  减小, 煤体的流透率增大。

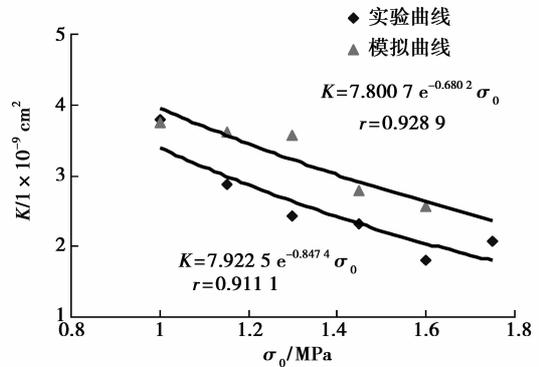


图 4 渗透率与平均有效应力曲线

#### 1.5 多场耦合作用下煤层气渗流特性

前面的实验与数值模拟分析了单因素影响下煤层气的渗流特性, 煤层气渗流在实际过程中, 应力场、温度场、渗流场均同时变化。图 5 模拟了不同温度、多场同时作用下煤层气的渗流特征, 模拟条件为: 不同温度条件下, 试件的轴向应力、围压、试件上端气压  $p_2$  均随时间呈线性增长, 轴向应力从 2 MPa 增加到 25.47 MPa, 围压 2 MPa 增加到 7 MPa, 试件上、下两端的气压差 0.3 MPa 增加到 1.8 MPa。从图 5 可以看出: 多场耦合作用下, 煤的渗透率与平均有效应力呈负指数函数关系。与图 2、图 4 的变化规律基本一致。因为试件受轴压、围压的同时作用, 煤体将被压密, 裂隙闭合, 导致渗透率迅速减低。

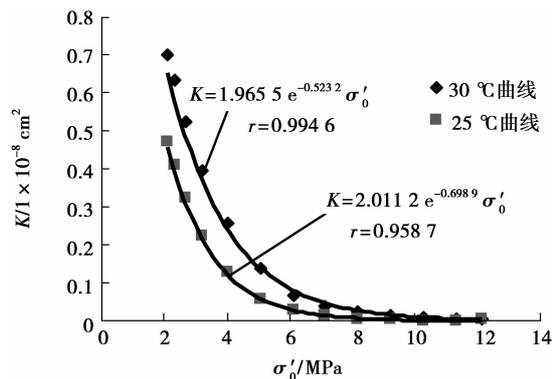


图 5 多场作用下渗透率与平均有效应力曲线

## 2 单场与多场耦合作用下煤体的变形与渗流

数值模拟了单场与多场耦合作用下煤体的变形、渗流场、孔隙压力的特征。模拟条件为: 1) 围压 6 MPa, 气压 ( $p_2 = 0.7$  MPa,  $p_1 = 0.1$  MPa), 轴向应

力从 6 MPa 线性增加到 30 MPa,平均有效应力为  $\sigma_0 = 13.6$  MPa;2)轴向应力 6 MPa,气压( $p_2 = 0.7$  MPa,  $p_1 = 0.1$  MPa),围压从 6 MPa 线性增加到 18 MPa,平均有效应力为  $\sigma_0 = 13.6$  MPa;3)轴向应力 30 MPa,围压均 18 MPa,气压( $p_2$  从 1 MPa 线性增加到 16.7 MPa,  $p_1 = 0.1$  MPa),平均有效应力为  $\sigma_0 = 13.6$  MPa;4)轴向应力从 6 MPa 线性增加到 30 MPa,围压从 6 MPa 线性增加到 18 MPa,气压( $p_2$  从 1 MPa 线性增加到 16.7 MPa,  $p_1 = 0.1$  MPa),平均有效应力为  $\sigma_0 = 13.6$  MPa。模拟结果如图 6~图 8 所示。

图 6 为单场作用与多场作用下试件的轴向变形,可以看出:围压作用,试件产生轴向膨胀,其它场作用,试件产生压缩。相同平均有效应力,轴压作用

产生的试件变形最大,气压作用与多场耦合作用产生的变形基本相同。因此得出应力场对试件变形的影响较大。

图 7 为单场作用与多场作用下试件内部的渗流场,可以看出:相同平均有效应力,围压作用下流量最小,是其它场作用的 0.5 倍,说明围压对渗透率的影响大于轴向应力。多场作用下的流量介于其它场之间,是耦合作用的效果。

图 8 为单场作用与多场作用下试件内部的孔隙压力,可以看出:孔隙压力,围压作用 < 轴压作用 < 气压作用 < 多场耦合作用。从图 6 可知,轴压作用产生的变形大于围压,试件孔隙变化较大,因此轴向应力作用的孔隙压力高于围压作用,因多场耦合作用的影响产生的孔隙压力最大。

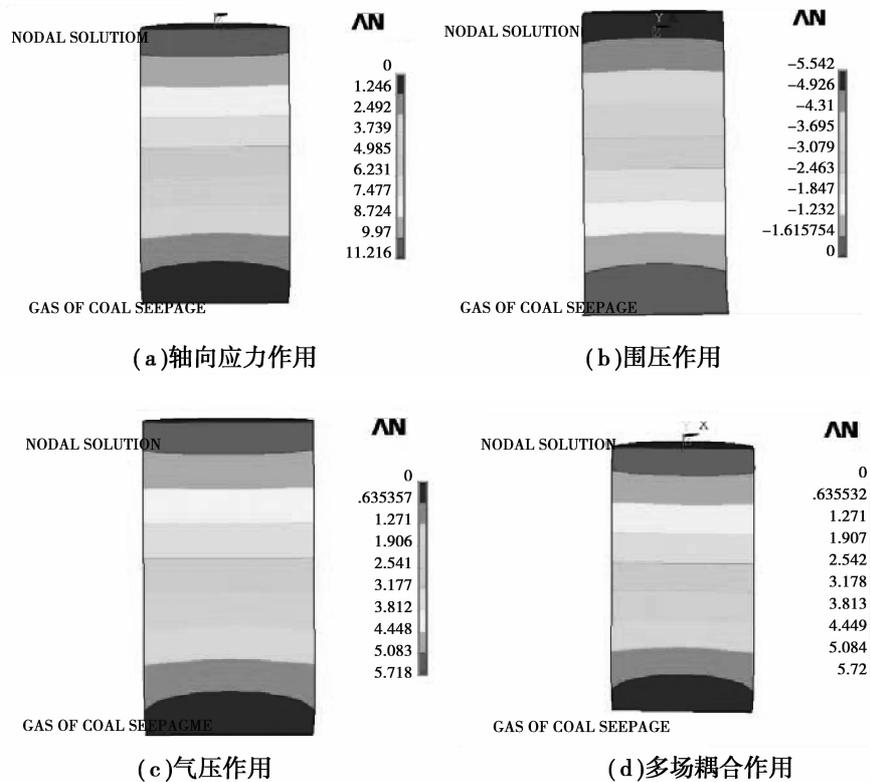
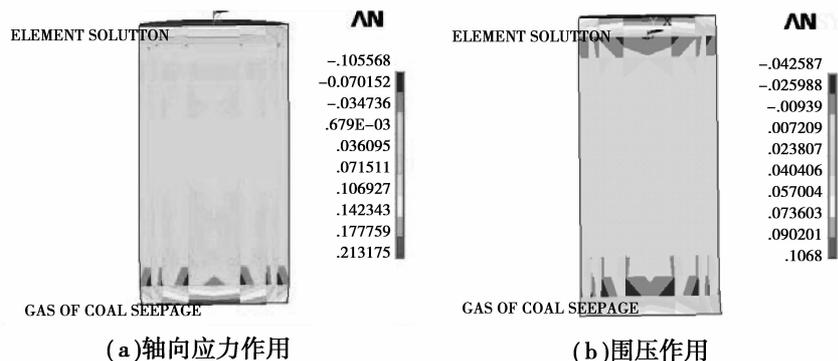


图 6 单场与多场作用下试件的轴向位移



(a)轴向应力作用

(b)围压作用

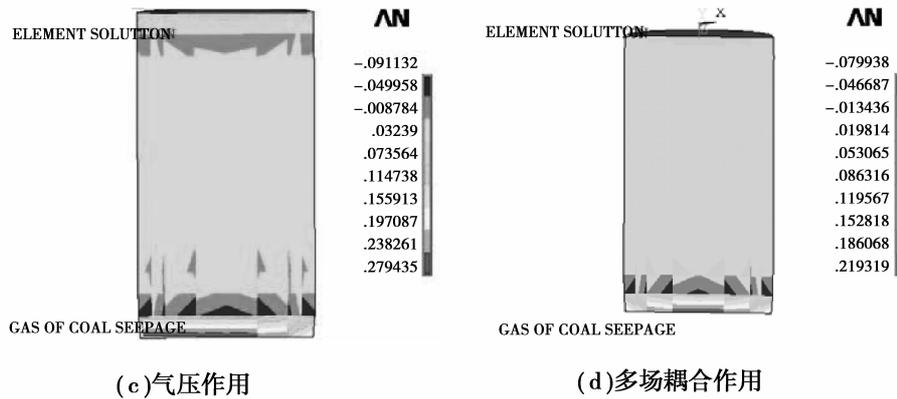


图 7 单场与多场作用下的渗流场

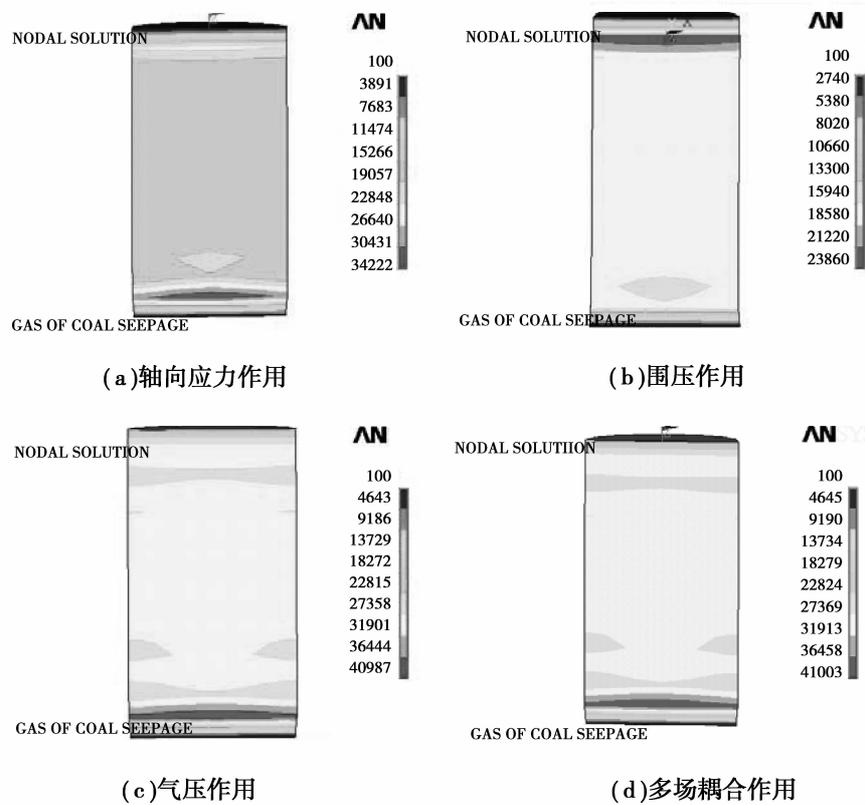


图 8 单场与多场作用下的孔隙压力

### 3 结 论

1) 数值模拟了单场与多场耦合作用下煤层气的渗流规律与实验结果基本一致,在煤层气抽采过程中,必须考虑气-固-热对煤层渗透性的影响,可以根据数值模拟结果作为参考。

2) 多场耦合作用下煤体的变形、孔隙压力、渗流场数值模拟得出:煤体变形的影响应力场大于渗流场,轴向应力对试件的变形大于围压;围压对渗流场的影响大于轴向应力,轴向应力对孔隙压力的影响

大于围压,多场作用下孔隙压力大于单场作用,数值模拟结果与国内外一些实验研究结果基本相同。

#### 参考文献:

[ 1 ] TERZAGHI K. Theoretical soil Mechanics [M]. New York: John Wiley and Sons, 1943.  
 [ 2 ] BIOT M A. General theory of three-dimension consolidation[J]. Journal of Applied Physics, 1941(12): 155-164.  
 [ 3 ] BIOT M A. Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid [J]. Journal of Applied Physics, 1954(26): 182-191.

- [4] BIOT M A. General solution of the equation of elasticity and consolidation for porous material[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1956, 78:91-96.
- [5] VERRUIJT A. Elastic storage of aquifers[C]//*Flow through Porous Media*. New York: Academic Press, 1969:331-376.
- [6] BEAR J, CORAPCIOGLU M Y. A mathematical model for consolidation in a thermoelastic aquifer due to hot water injection or pumping [J]. *Water Resource Research*, 1981(17):723-736.
- [7] VAZIRI H H. Coupled fluid flow and stress analysis of oil sand subject to heating[J]. *Journal of Cardiovascular Pharmacology and Therapeutics*, 1988, 27(5):84-91.
- [8] LEWIS R W, SUKIRMAN Y. Finite element modelling of three phase flow in deforming saturated oil reservoirs [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1993, 17(8):577-598.
- [9] 孙培德, 凌志仪. 三轴应力作用下煤渗透率变化规律实验[J]. *重庆大学学报: 自然科学版*, 2000, 23 (S1): 28-31.  
SUN PEI-DE, LIN ZHI-YI. Experimental study of the law for permeability of coal under action of 3-triaxial compression [J]. *Journal of Chongqing University: Natural Science Edition*, 2000, 23(S1):28-31.
- [10] 姜德义, 张广洋, 胡耀华, 等. 有效应力对煤层气渗透率影响的研究[J]. *重庆大学学报: 自然科学版*, 1997, 20 (5):22-25.  
JIANG DE-YI, ZHANG GUANG-YANG, HU YAO-HUA, et al. Study on affection to permeability of gas of coal layers by effective stress [J]. *Journal of Chongqing University: Natural Science Edition*, 1997, 20 (5):22-25.
- [11] 黄启翔, 尹光志, 姜永东, 等. 型煤试件在应力场中的瓦斯渗流特性分析[J]. *重庆大学学报: 自然科学版*, 2008, 31(12):1436-1440.  
HUANG QI-XIANG, YIN GUANG-ZHI, JIANG YONG-DONG, et al. Gas seepage characteristics of briquette samples in a stress field [J]. *Journal of Chongqing University: Natural Science Edition*, 2008, 31(12):1436-1440.
- [12] 易俊, 姜永东, 鲜学福. 应力场、温度场瓦斯渗流特性实验研究[J]. *中国矿业*, 2007, 16(5):113-116.  
YI JUN, JIANG YONG-DONG, XIAN XUE-FU. An experimental research on the characters of methane seepage in stress field and temperature field[J]. *China Mining Magazine*, 2007, 16(5):113-116.
- [13] 李志强, 鲜学福, 隆晴明. 不同温度应力条件下煤体渗透率实验研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2009, 38(4): 523-527.  
LI ZHI-QIANG, XIAN XUE-FU, LONG QING-MING. Experiment study of coal permeability under different temperature and stress[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2009, 38(4): 523-527.
- [14] 赵阳升. 煤体-瓦斯耦合理论及其应用[D]. 上海: 同济大学, 1992.
- [15] 尹光志, 王登科, 张东明, 等. 含瓦斯煤岩固气耦合动态模型与数值模拟研究[J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(10): 1430-1436.  
YIN GUANG-ZHI, WANG DENG-KE, ZHANG DONG-MING, et al. Solid-gas coupling dynamic model and numerical simulation of coal containing gas [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30 (10):1430-1436.
- [16] 杜云贵. 地球物理场中煤层瓦斯吸附、渗流特性研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 1993.
- [17] 王宏图, 杜云贵, 鲜学福, 等. 地球物理场中的煤层瓦斯渗流方程[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(5): 32-34.  
WANG HONG-TU, DU YUN-GUI, XIAN XUE-FU, et al. Seepage equation of coalbed gas in geophysical field [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(5):32-34.
- [18] 孙培德. 煤层气越流的固气耦合理论及其计算机模拟研究[D]. 重庆: 重庆大学, 1998.
- [19] 易俊, 姜永东, 鲜学福, 等. 声场促进煤层气渗流的应力-温度-渗流压力场的流固动态耦合模型[J]. *岩土力学*, 2009, 30(10):2945-2960.  
YI JUN, JIANG YONG-DONG, XIAN XUE-FU, et al. A liquid-solid dynamic coupling model of ultrasound enhanced coalbed gas desorption and flow[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(10):2945-2960.
- [20] 姜永东, 阳兴洋, 鲜学福, 等. 应力场、温度场、声场作用下煤层气渗流方程[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(3): 434-438.  
JIANG YONG-DONG, YANG XING-YANG, XIAN XUE-FU, et al. The infiltration equation of coal bed under the cooperation of stress field, temperature field and sound field [J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(3):434-438.
- [21] 程瑞端, 陈海焱, 鲜学福, 等. 温度对煤样渗透系数影响的实验研究[J]. *矿业安全与环保*, 1998(1):13-16.  
CHENG RUI-DUAN, CHEN HAI-YAN, XIAN XUE-FU, et al. Experiments on the affection of temperature on permeability coefficient of coal samples [J]. *Mining Safety and Environmental Protection*, 1998(1):13-16.