

文章编号: 1000-7598(2009)10-2945-06

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

易俊^{1,2}, 姜永东², 鲜学福², 罗云¹, 张瑜²

(1.重庆科技学院, 重庆 401331; 2.重庆大学 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 400041)

摘要:从煤层气单相流动的吸附平衡质量守恒、声场作用下的热平衡及应力平衡等方面入手,建立了声场作用下煤层气流动的应力-温度-渗流压力场流固动态耦合数学模型。利用数值模拟,分析了声场促进煤层中甲烷解吸-扩散-渗流的机制。分析得出,声场作用可明显地提高煤-气系统的温度,提高煤层的孔隙度,增大煤层气流动的渗透率,降低煤层骨架的应力;超声在煤层中衰减形成热效应和超声振动,超声振动影响范围与超声衰减距离一致,超声热效应向煤层纵深传播,转化为煤-气层系统的热能,提高系统的温度。

关键词:煤层气;声场;应力场;温度场;渗流压力场;动态耦合模型;数值模拟

中图分类号:TD 823

文献标识码:A

A liquid-solid dynamic coupling model of ultrasound enhanced coalbed gas desorption and flow

YI Jun^{1,2}, JIANG Yong-dong², XUAN Xue-fu², LUO Yun¹, ZHANG Yu²

(1. Chongqing University of Science & Technology, Chongqing 401331, China; 2. Key Laboratory of Exploitation of Southwest Resources & Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Using the adsorption equation of coalbed gas desorption, the heat energy equation and the stress equation of coal framework when taking ultrasound into consideration, a liquid-solid dynamic coupling numerical modeling of ultrasound enhanced coalbed gas desorption and flow including stress, temperature and pressure fields is presented; the desorbing-diffusing-flowing mechanism of methane on coal beds by numerical simulating is discussed. The results show that the ultrasound field enhances temperature of the system of coal and gas, increases porosity and penetrability, depresses stress of coalbed. Moreover, ultrasound attenuation forms vibrating and heating; the spread distance of vibrating equal to ultrasound attenuating, another, the bound of ultrasound heating effecting the deep distance in coalbed.

Key words: coalbed gas; ultrasound field; stress field; temperature field; penetrating pressure field; dynamic coupling modeling; numerical simulation

1 前言

煤储层由基质微孔和裂缝割理宏观孔隙系统组成,煤层气的运移包含从煤颗粒表面的解吸、从基质微孔到裂缝的扩散和从裂缝到生产井的渗流过程。在这一过程中对储层物理性质和地质环境给予人为干扰和积极导向,可有效地改善煤层气的运移。国内外许多学者围绕这一课题开展了大量的室内研究工作,原苏联学者 Γ apacob^[1],何学秋等^[2]研

究了地电场和交变电磁场对甲烷吸附特性的影响,杜云贵^[3]、刘保县^[4]、易俊^[5]、姜永东^[6]等研究了静电场、交变电场、声场作用下的甲烷吸附、解吸和渗流特性。

煤层施加声场作用后,声场的机械振动、热效应将影响煤层气的解吸、扩散和渗流,改变煤层的应力、温度和渗流状态,促进煤层气流动。本文以向煤层采空区单相排采为研究对象,从煤层气单相流动的吸附平衡质量守恒、声场作用下的热平衡及

收稿日期: 2008-05-27

基金项目: 重庆市院士基金专项 (No. CSTS, 2005AB6007); 中国博士后科学基金 (No. 20070410205) 资助。

第一作者简介: 易俊,男,1965年生,工学博士,教授,主要从事油气田开发和煤层气开采方面的教学与科研工作。E-mail: yijun2366@yahoo.com.cn

应力平衡等方面入手,建立煤层气从微孔到宏观裂缝割理流动的应力-温度-渗流压力场流固动态耦合数学模型,利用数值求解方法分析声场促进煤层中甲烷解吸-扩散-渗流的机制,为研究声场作用下煤层气在煤层中气水两相流动奠定理论基础。

2 流固动态耦合模型的建立

2.1 煤层气单相平衡吸附的质量守恒方程

考虑多孔介质煤层为连续介质,煤层水平,等厚,均质,且各向同性。煤层气吸附遵循 Langmuir 方程,游离气运移遵循达西定律。煤层气解吸与扩散同时进行,吸附气体始终与孔隙压力保持平衡。其单相平衡吸附的质量守恒方程的一维极坐标形式可以表示为

$$\frac{1}{r} \left[\frac{\partial(r \rho_g u_r)}{\partial r} \right] = - \frac{\partial(\phi \rho_g)}{\partial t} - \frac{\partial \rho_\mu}{\partial t} \quad (1)$$

式中: ρ_g 为煤层气的密度 (kg/m^3); u_r 为煤层气流入控制体的速度 (m/s); ρ_μ 为煤层中吸附气密度 (kg/m^3); ϕ 为煤层孔隙度,无因次; r 为传播距离 (m); t 为煤层气径向流动时间 (s)。

2.2 声场作用下煤层气单相流动的热平衡方程

声场作用下,考虑煤基质的热传导,吸附液相与煤基质之间的热交换和由于煤层气脱附而产生的热量,忽略吸附液相的热传导和热力弥散以及吸附液相与煤基质之间的热交换和煤层气在煤层孔隙中的热辐射。声场作用的能量全部转化为热能。同时,假设热物性参数,如气体的热容量、传热系数等不随温度变化发生变化。煤层气单相流动热平衡方程写为

$$\begin{aligned} (\phi \rho_g c_{pg} + (1-\phi) \rho_s c_{ps}) \frac{\partial T}{\partial t} &= (\phi \rho_g c_{pg} u_r) \frac{\partial T}{\partial r} + \\ (c_{pg} T + \Delta H) \frac{\partial \rho_\mu}{\partial t} &+ \lambda_s \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + J(r) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: ρ_s 为煤基质的密度 (kg/m^3); c_{pg} 为煤层中游离气比热 ($\text{J/kg} \cdot \text{K}$); c_{ps} 为煤基质的比热 ($\text{J/kg} \cdot \text{K}$); T 为煤-气系统的温度 (K); ΔH 为煤气系统吸附或脱附热 (J/kg); λ_s 为系统煤介质的有效热传递系数, (J/mKs); $J(r)$ 为某一位置声场作用的声强 (W/m^2)。

2.3 煤层气流动过程中煤层应力与煤层孔隙压力的关系

研究表明,在甲烷吸附或解吸过程中,煤层的应力-应变关系可用线弹性多孔介质应力-应变关系来表示,煤基质发生的收缩或膨胀符合 Langmuir 曲

线^[7-9]。在单轴应力作用下,煤层应力与煤层孔隙压力的关系可以表示为^[9]

$$\sigma - \sigma_0 = - \frac{\nu}{1-\nu} (p - p_0) + \frac{E}{3(1-\nu)} \varepsilon_l \left(\frac{bp}{1+bp} - \frac{bp_0}{1+bp_0} \right) \quad (3)$$

式中: ν 为煤层泊松比; E 为煤层的变形模量 (MPa); ε_l 为煤样的膨胀/收缩系数 (MPa^{-1}); σ 、 σ_0 分别为煤层的应力和初始应力 (MPa); p 、 p_0 分别为煤层孔隙的初始压力 (MPa); b 为 Langmuir 吸附压力常数 (MPa^{-1})。

2.4 煤层孔隙度与煤层压力关系

Palmer 和 Mmansoori^[8]给出的孔隙度与煤层孔隙压力的关系:

$$\phi - \phi_0 = \frac{1}{M} (p - p_0) + \left(\frac{K}{M} - 1 \right) \varepsilon_l \left[\frac{bp}{(1+bp)} - \frac{bp_0}{(1+bp_0)} \right] \quad (4)$$

式中: M 为轴向模数 (MPa); K 为体积模量 (MPa)。

2.5 煤层气渗流方程

煤层气的渗流可看作线性渗流,遵循达西定律,即

$$u_r = - \frac{k}{\mu_g} \nabla p = -10^{-6} \frac{k}{\mu_g} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (5)$$

式中: k 为煤层渗透率 (mD); ∇ 为哈密顿算符; μ_g 为煤层气的黏度 ($\text{mPa} \cdot \text{s}$)。

2.6 煤层气状态方程

将煤层气考虑为理想气体,即

$$\rho_g = 10^6 \frac{M_g}{RT} p \quad (6)$$

式中: R 为气体常数 ($8.314 \text{ cm}^3 \cdot \text{MPa} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$); M_g 为甲烷的摩尔重 (kg/mol)。

2.7 煤层气平衡吸附方程

考虑水分和温度的影响,修正后的 Langmuir 公式^[3]可以用密度形式表示为

$$\rho_\mu = 10^3 \times \frac{\rho_{\max} bp}{1+bp} e^{n(T_0-T)} \frac{1}{1+0.31W} \frac{100-A-W}{100} \quad (7)$$

式中: ρ_μ 为吸附瓦斯的密度 (kg/m^3); $\rho_{\max}$ 为饱和煤层气的密度 (kg/m^3); p 为吸附压力 (MPa); b 为与温度有关的值; A 、 W 分别为灰分、水分; T_0 为实验室测定煤的 a 、 b 值时的实验温度; n 为实验系数,它与 p 值有关,可表示为 $n = 0.02 / (0.993 + 0.0714p)$ 。

2.8 声场在煤层中的衰减方程

声场作用时,声波在多孔介质煤层中的衰减,

可表示^[10]为

$$J = J_0 e^{-2\alpha r} \quad (8)$$

式中: J_0 为初始声强 (W/m^2); r 为衰竭距离 (m); α 为衰减系数 (m^{-1}), $\alpha = 2 - \nu/(1 - \nu)$ 。

2.9 声场作用下, 煤层渗透率的实验式

实验研究表明, 包含应力场、温度场和声场作用下的煤的渗透率表达式^[8]为

$$k = k_0 (1 + \beta J)(1 + T)^m e^{-B\sigma} \quad (9)$$

式中: k_0 、 β 、 m 、 B 为实验常数。

2.10 模型建立

将式 (5)~(7) 代入式 (1), 简化得

$$f(T, \sigma, J) \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial p}{\partial r} \right] = \left[10^6 \times \frac{M_g}{RT} \left(\frac{\partial \phi}{\partial p} + \frac{\phi}{p} \right) + f_1(p) \frac{1}{(1 + bp)} \right] \frac{\partial p}{\partial t} - \left[10^6 \times \phi \frac{M_g}{RT^2} + \eta f_1(p) \right] \frac{\partial T}{\partial t} \quad (10)$$

式中:

$$\left. \begin{aligned} f(T, \sigma, J) &= \frac{M_g}{RT} \frac{k}{\mu_g} \\ f_1(p) &= \frac{\rho_{\max} b}{1 + bp} e^{n(T_0 - T)} \frac{1}{1 + 0.31w} \frac{100 - A - W}{100} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式 (10) 反映了煤层温度、外加声场强度、煤体骨架应力对煤层气渗流的影响。同样, 声场的热平衡方程可以写为

$$\left(10^6 \phi c_{pg} \frac{M_g}{RT} p + \rho_s c_{ps} + \eta f_1(p) \right) \frac{\partial T}{\partial t} = (c_{pg} T + \Delta H) f_1(p) \frac{1}{(1 + bp)} \frac{\partial p}{\partial t} + \lambda_s \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + J(r) \quad (12)$$

式 (3)、(4)、(8)~(10) 和式 (12) 构成了声场作用下煤层骨架应力-温度场-煤层气渗流压力场三场动态耦合的数学模型, 模型中含有 p 、 σ 、 J 、 T 等参数, 可描述声场作用下煤层气在煤层中解吸、扩散和渗流的全过程。

3 模拟分析方法

3.1 初始及边界条件

假设生产之前, 整个煤层气藏处于平衡状态, 气体压力为地层原始压力 p_i , 煤层气藏中心单井以定井底压力生产, 在半径为 r_e 的气藏外边界没有流体流动, 则初始条件为

$$p(r, t = 0) = p_i; \quad T(r, t = 0) = T_0; \quad \sigma(r, t = 0) = \sigma_0 \quad (13)$$

式中: p_i 为原始地层压力 (MPa); T_0 为初始煤层温度 (K); σ_0 为初始煤层应力 (MPa)。

如果煤层气井以定井底压力生产, 则内边界条件:

$$p(r_w, t) = p_{wf} \quad (14)$$

式中: p_{wf} 为煤层气井的井底压力 (MPa); r_w 为井半径 (m)。

同时, 外边界条件为

$$\left(\frac{\partial p}{\partial r} \right)_{r=r_e} = 0; \quad \left(\frac{\partial \sigma}{\partial r} \right)_{r=r_e} = 0; \quad \left(-\lambda_s \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=r_e} = h_e (T - T_0) \quad (15)$$

式中: r_e 为煤层边界或单井供给半径 (m); h_e 为煤层与边界的有效热传导系数 ($\text{J}/\text{m}^2 \text{sK}$)。

3.2 求解方法

式 (3)、(4)、(8)~(10) 和式 (12) 与对应的初始和边界条件构成了模型的解, 其求解方法可借助于 matlab 软件, 将模型转化为含有时间变量 t 和位置变量 r , 由初值和边界值决定和用空间离散化的 ODE 方程进行求解^[11]。笔者依据南桐煤矿煤样实验数据和文献[12]进行了模拟分析, 输入的参数值见表 1。

表 1 输入的气体 and 煤层特征参数
Table 1 inputting parameters for Properties of gas and coal materials

参数	量值	参数	量值
σ_0 / MPa	13.73	M / MPa	4.2×10^4
γ	0.2~0.4	$Q_{\max} / (\text{mL/g})$	35.461
k_0 / mD	0.221	m	0.3
$\mu_g / (\text{mPa} \cdot \text{s})$	0.017	$B / (\text{MPa}^{-1})$	0.31
E / MPa	2.1×10^4	β	0.035
K / MPa	1.51×10^4	b / MPa^{-1}	0.362 5

注: 符号意义同前。

4 分析与讨论

4.1 声场改善煤层渗透率

图 1 为模拟得到的声场 (51 kW) 作用下煤层气渗流压力场、温度场和应力场三场耦合得到的煤层渗透率的变化曲线。随生产时间的增加, 煤层渗透率出现增大的趋势。同一时间, 井底附近渗透率最高, 随着渗流半径的增加, 渗透率降低, 在距离井中心约 18 m 处渗透率降低到初始水平。图 2 为有、无声场作用下煤层渗透率和孔隙度变化图。在井底附近, 声场作用使煤层气的渗透率从 0.32 mD 增加到 0.6 mD, 增加值为 0.28 mD, 提高了 87%。

随着压力波及范围的增加,渗透率增加幅度逐渐降低,直至增加幅度降为0。同时,井底附近煤层孔隙度从0.0303增加到0.0315,提高了4%左右。图3(a)为同一时间(生产时间为30 d)声场作用下煤层中压降漏斗变化情况。从图中清楚地看出,不考虑煤层应力得到的甲烷压降漏斗最小,考虑应力时次之,声场作用下气体压降漏斗最大,说明声场的作用更有利于煤层气参与流动而被采出。图3(b)为声场为51 kW时煤层的温度分布。作用时间15 d时,井底附近的温度上升大约4℃;作用30 d时,井底附近温度上升约为5℃,温度上升对煤层渗流的促进作用明显。

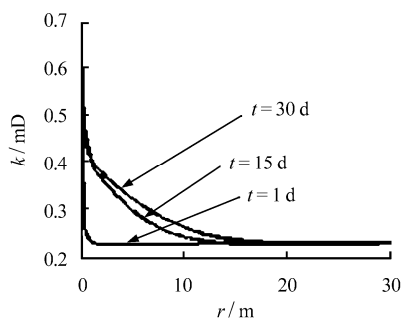


图1 声场作用下煤层渗透率变化曲线

Fig.1 Estimated methane penetrability versus time and radius under ultrasound field

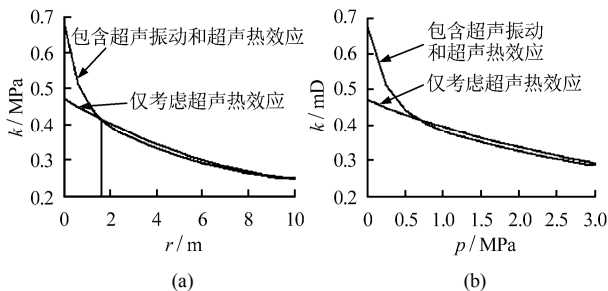


图2 有声场作用下煤层渗透率、孔隙度变化

Fig.2 Estimated methane penetrability, porosity versus radius with or without ultrasound field

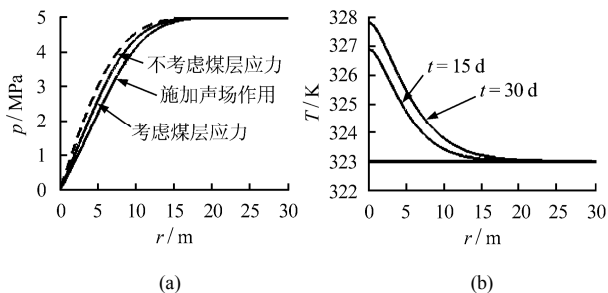


图3 声场作用下煤层压力、温度分布

Fig.3 Estimated methane pressure and temperature versus radius under ultrasound field

4.2 声场衰减对煤层气流动的影响

声波对多孔介质的作用,不同学者有不同观点,主要包括热量观:声波衰减的能量全部转化为系统热能,主要学者有 Lama^[13]、王家胜^[14]、穆林^[15]等;热量和振动观:声波在介质中衰减产生热量的同时产生机械振动,改变介质的物性,主要包括 Schuller^[16]、Breitbach^[17]等。

式(8)说明,超声波在煤层中的传播无论其频率如何,或无论煤层泊松比(0.2~0.4)如何,超声传播距离也只有几米,这与实验中观察到的情况基本一致。因此,超声波对煤层的作用表现为两个方面,近井地带为超声振动和热效应,当声波衰减为0后,则主要靠超声衰减热效应的传递作用影响井的纵深。

图4为超声功率为51 kW和煤层泊松比为0.25考虑超声振动和超声热效应对煤层气渗透率 k 的影响情况。图4(a)中,包含超声热效应和超声振动时煤层气的渗透率从0.68 mD下降到0.42 mD时,与包含超声热效应的煤层气渗透率开始出现重叠,之后基本一致。重叠点与超声衰减的距离大致一致,也就是说超声振动对煤层气渗透率的提高相当明显,且与超声衰减的距离一致。

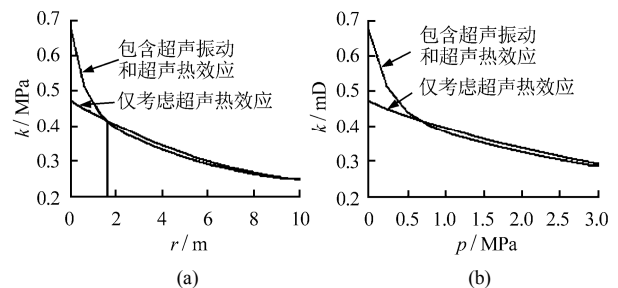


图4 超声热能和振动对煤层气渗透率的影响

Fig.4 Estimated methane permeability with ultrasound heating and vibrating

图5为声场不同超声功率、井半径为0.11 m、煤层厚度为5 m、作用时间为15 d时煤层温度分布。井壁处3种功率作用引起煤层温度升高分别为4、7℃和11℃。随着距离的增加这种温度升高逐渐降低,到17 m左右恢复到地层温度,也就是说温度的影响半径与压力波及半径相同。图6显示,超声作用功率越大,煤层孔隙度、渗透率增加越大,因此提高作用于煤层的超声功率,可明显地提高煤层气的流动性能,改善煤层气的流动。

4.3 煤层气吸附对煤层气流动参数的影响

图7为不同煤层膨胀系数时声场(51 kW)作用下煤层气渗透率、孔隙度和应力的变化。当 $\varepsilon_l = 0$

时, 煤样的体积不发生变化, 甲烷在煤层中不发生解吸或吸附, 相当于常规天然气流动, 此时, 随着压力波及范围的扩大, 煤层气压力降低, 煤层应力增加, 渗透率和孔隙度均降低; 当 $\varepsilon_l > 0$ 时, 煤层

发生吸附, 随着煤层气压力降低, 煤层气开始解吸, 如果瓦斯脱附引起的应力降低程度大于由于压力降低而引起的应力增加程度, 则应力降低。相应地, 孔隙度和渗透率也有类似的结果。从图 7 的 $\varepsilon_l = 0.025$ 和 $\varepsilon_l = 0.035$ 曲线可见, 随着煤层气压力的降低, 煤层孔隙度和渗透率增加, 煤层应力降低。

5 结 论

(1) 声场作用下, 煤层气在煤层微孔和裂缝割理宏观孔隙系统的流动过程, 可通过煤层渗流压力场、温度场和应力场三场的动态流固耦合来描述。

(2) 声场作用可明显地提高煤-气系统的温度, 提高煤层孔隙度, 增大煤层渗透率, 降低煤层应力, 有效地促进煤层气解吸和流动。

(3) 超声在煤层中衰减形成热效应并产生超声振动, 超声振动影响范围与超声衰减距离一致, 超声热效应向煤层纵深传播, 转化为煤-气层系统的热能, 提高系统的温度。

参 考 文 献

- [1] 格·德李 李金. 煤和瓦斯突出[M]. 于不凡译. 北京: 煤炭工业出版社, 1959.
- [2] 何学秋. 交变电磁场对煤吸附瓦斯特性的影响[J]. 煤炭学报, 1996, 21(1): 63—67.
HE Xue-qiu. The effect of alternative electromagnetic field on adsorption of gas coal[J]. **Journal of China Coal Society**, 1996, 21(1): 63—67.
- [3] 杜云贵. 地球物理场中煤层气吸附、渗流特性研究[博士论文D]. 重庆: 重庆大学, 1993.
- [4] 刘保县, 鲜学福, 王宏图, 等. 交变电场对煤瓦斯渗流特性的影响实验研究[J]. 重庆大学学报, 2000, 23(增刊): 41—43.
LIU Bao-xian, XIAN Xue-fu, WANG Hong-tu, et al. Experimental investigation gas seepage characteristics in coal under alternating electric field[J]. **Journal of Chongqing University**, 2000, 23(Supp.): 41—43.
- [5] 易俊, 姜永东, 鲜学福. 在交变电场声场作用下煤解吸吸附瓦斯特性分析[J]. 中国矿业, 2005, 14(5): 70—73.
YI Jun, JIANG Yong-dong, XIAN xue-fu. The research on the traits of the absorption and desorption of coal to gas in alternating electric field or sound field[J]. **China Mining Magazine**, 2005, 14(5): 70—73.
- [6] 姜永东, 鲜学福, 刘保县, 等. 地应力、地温、声场中的煤层瓦斯渗流方程[J]. 西安石油大学学报, 2007, 22(增刊 1): 141—144.

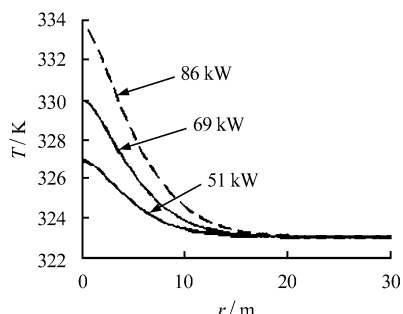


图 5 不同声场作用下煤层温度变化
Fig.5 Estimated coalbed temperature under different ultrasound fields

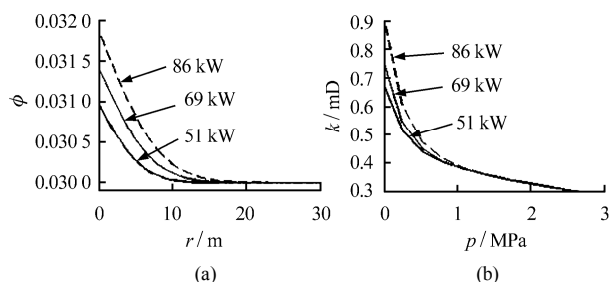


图 6 不同声场作用下煤层孔隙度和渗透率变化
Fig.6 Estimated methane permeability and porosity under different ultrasound fields

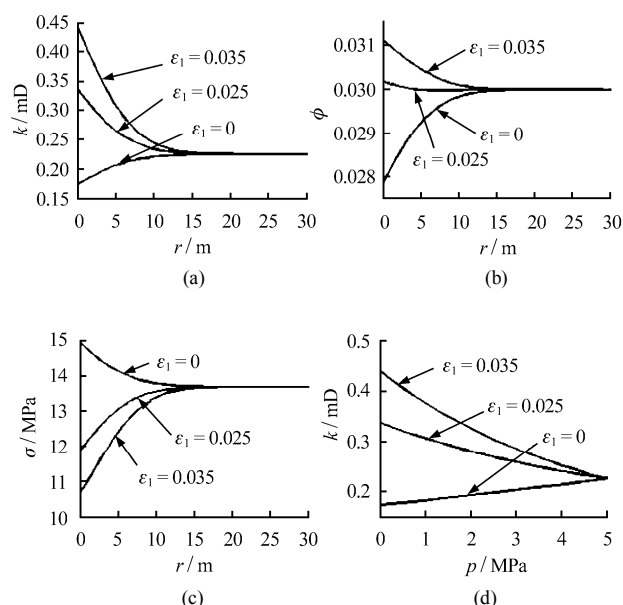


图 7 不同煤层膨胀系数对煤层渗透率、孔隙度与煤层应力的影响
Fig.7 Estimated methane permeability, porosity and stress under different shrinkage coefficients under ultrasound field

- [7] HARPALANI S, SCHRAUFNAGEL R A. Influence of Matrix Shrinkage and Compressibility on Gas Production from Coalbed Methane Reservoirs[C]//Paper SPE 20729 presented at the SPE Annual Technical Conf. and Exhibition. New Orleans; Louisiana: Society of Petroleum Engineers, 2006: 23—26.
- [8] PALMER I, MANSOORI J. How permeability depends on stress and pore pressure in coalbeds[J]. **Spere**, 1998, 12: 539—544.
- [9] SHI J Q, DURUCAN S. A model for changes in coalbed permeability during primary and enhanced methane recovery[J]. **SPE Reservoir Evaluation & Engineering**, 2005, 8: 291—299.
- [10] 《超声波探伤》编写组. 超声波探伤[M]. 北京: 电力工业出版社, 1980.
- [11] HIGHAM D J. Matlab guide[M]. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2000.
- [12] BARBOSAMOTA J R, SAATDJIAN D, TONDEUR D. A simulation model of a high-capacity methane adsorptive storage system[J]. **Adsorption**, 1995, 1: 1—27.
- [13] LAMA R D, BODZIONY J. Management of outburst in underground coal mines[J]. **Int. J. Coal Geology**, 1998, 35(1): 83—115.
- [14] 王家胜, 董文中. 超声波在煤粉中的衰减特性的仿真[J]. 锅炉技术, 2005, 36(1): 49—52.
- WANG Jia-sheng, DONG Wen-zhong, ZENG sheng, et al. The attenuation characters of ultrasonic in coal[J]. **Boiler Technology**, 2005, 36(1): 49—52.
- [15] 穆林, 范惠珍, 宁显宗. 黄土层内的声波传播衰减[J]. 运用声学, 1995, 14(1): 19—22.
- MU Lin, FAN Hui-zhen, NING Xian-zong. Attenuation of sound waves in soil[J]. **Applied Acoustics**, 1995, 14(1): 19—22.
- [16] SCHUELLER B S, YANG R T. Ultrasound enhanced adsorption and desorption of phenol on activated carbon and polymeric resin[J]. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, 2001, 40(22): 4912—4918.
- [17] BREITBACH M, BATHEN D, SCHMIDT-TRAUB H. Effect of ultrasound on adsorption and desorption processes[J]. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, 2003, 42(22): 5635—5646.