

耿玉林, 亓宪寅, 贾善坡. 考虑吸附-解吸效应的气固耦合模型[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2020, 35(1): 40-48. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2020.01.006

Geng Y L, Qi X Yi, Jia S P. Gas-solid Coupling Model by Considering Desorption Effect [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology( Natural Science Edition), 2020, 35(1): 40-48. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2020.01.006

# 考虑吸附-解吸效应的气固耦合模型

耿玉林, 亓宪寅, 贾善坡\*

(长江大学 城市建设学院, 湖北 荆州 434100)

**摘要:** 在研究煤层气单井抽采模型时, 首先根据有效应力和渗透率建立相关联系的方法, 确立了煤层气固耦合理论方程, 然后根据理论分析、数值模拟与常规理论实践规律相结合的方法, 考虑了地应力对煤层气解吸、煤层渗透率和孔隙度的相互影响, 建立了煤层气运移的数值模型, 并观测抽采产量的变化. 另外通过理论公式及数值模拟讨论吸附-解吸效应和 Langmuir 常量对气体压力、渗透率和抽采产量的影响, 从而提高抽采产量和生产效率. 研究表明: (1) 煤层气开采过程中, 有效应力和吸附-解吸效应都影响着孔隙通道直径的变化, 两者存在竞争关系, 导致煤层基质产生膨胀或收缩, 进而影响渗透率的变化; (2) 吸附-解吸效应能够显著提高抽采效率和产量.

**关键词:** 吸附-解吸效应; 渗透率; 气-固耦合; 数值模拟

**中图分类号:** TD712.6      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-9102(2020)01-0040-09

## Gas-solid Coupling Model by Considering Desorption Effect

Geng Yulin, Qi Xianyin, Jia Shanpo

(School of Urban Construction, Yangtze University, Jingzhou 434100, China)

**Abstract:** Coal bed methane has been received gradually attention because of its small combustion pollution, low cost of development, and huge reserves in the world. Studying the single well extraction model of Coal bed methane, the theoretical formula was firstly deduced separately from the solid field and the seepage field. Then the method of the correlation between effective stress and permeability was established, and the theoretical equation of gas-solid coupling was established. Finally, based on the method of theoretical analysis, numerical simulation and conventional theoretical practice, the interaction between ground stress on coal seam gas desorption, coal seam permeability and porosity was considered, and the numerical model of coalbed methane migration was established, and observing changes in extraction production. In addition, The effects of adsorption-desorption effect and Langmuir constant on gas pressure, permeability and extraction yield were discussed by theoretical formula and numerical simulation, and determining the contribution of desorption effect and Langmuir constant to improve extraction yield and production efficiency. Numerical study and test results both show that : (1) In the process of coal bed methane mining, the effective strain and desorption effect affect the change of the diameter of the pore channel. There is a competitive relationship between the two, which leads to the expansion or contraction of the coal bed matrix, and then affects the change of permeability. (2) The desorption effect can significantly improve the extraction efficiency and yield.

**Keywords:** absorption; permeability; gas-solid coupling; numerical simulation

收稿日期: 2019-03-06

\* 通信作者, E-mail: jiashanporsm@163.com

煤层气通俗称瓦斯<sup>[1]</sup>,是以煤为储层的非常规天然气,由 95% 以上的甲烷组成,另外 5% 的气体一般是 CO<sub>2</sub> 或氮气.煤层气是燃烧完全、热值高且污染小的新能源,它可以用来燃烧发电,并且给工业提供原料与燃料,给居民生活提供燃料.截至 2016 年底,全国累计探明煤层气地质储量  $6\ 869.12 \times 10^8\ \text{m}^3$ ,主要分布在山西、鄂尔多斯盆地东部等,且大部分分布于西气东输管运沿线,开发利用前景巨大<sup>[2]</sup>.

早在 1881 年, Kayser<sup>[3]</sup> 就提出“吸附”的概念,指出“吸附”是气体在自由表面上凝聚.现在,国际上将吸附(严格上说是指物理吸附)定义为一个或多个组分在界面上的富集(正吸附或简单吸附)或损耗(负吸附)<sup>[4]</sup>.

不同于常规气藏,煤岩储层孔隙结构复杂,气体主要以游离态和吸附态的形式储存于煤层<sup>[5]</sup>. V A KUUSKRAA 等<sup>[6]</sup> 人认为煤层中的瓦斯一部分以游离气态存在于煤体的孔隙、裂隙以及宏观腔体中,另一部分则以吸附态存在于煤体颗粒的内部表面和煤基质中.通常吸附态的瓦斯和游离态的瓦斯在煤体中处于动态平衡,当煤层受到扰动时(如采煤作业、钻井作业等)或外部条件变化时,吸附态就会解吸,并由高压区向低压区扩散流动.煤层气的开采过程中存在多种运移机制, E C AIFANTIS 等<sup>[7]</sup> 人提出了双孔隙流动模型和煤层气产出的“解吸-扩散-渗流”流动模型.另外,石军太等<sup>[8]</sup> 人指出游离态扩散是指气体在煤层孔隙中的扩散,吸附态扩散即通常所说的表面扩散,是指处于吸附态的气体在煤颗粒外表面和孔隙内表面上的扩散.

目前已有大量关于吸附-解吸问题的研究<sup>[9-10]</sup>,但是对于煤层气开采是否考虑解吸附效应而产生的影响,此类研究仍然较少.同时,煤层气与煤基质服从气-固 Langmuir<sup>[11]</sup> 吸附关系,其基本假设条件:(1) 吸附平衡时,体系中气体的吸附速率与解吸速率相等,吸附是可逆的,吸附与解吸之间煤岩滞后发生.吸附平衡时动态平衡.(2) 吸附剂表面均匀光洁,固体表面的吸附势能呈均质状态,活化能为零.(3) 被吸附的气体分子之间没有相互作用力.(4) 固体表面吸附平衡仅形成单分子层.解吸与吸附互为逆过程,遵循相同的规律<sup>[12]</sup>.目前关于 Langmuir 常量对煤层气抽采的影响这类的研究较少.基于以上提到的两个方面,本文做出系列研究.一方面,本文主要对固体场和渗流场分别进行理论公式推导,然后根据有效应力和渗透率建立相关联系的方法,最终结合数值模拟推导出气-固耦合控制方程,并针对煤层气的解吸附作用进行研究,以此分析解吸附作用对煤层气开采的影响;另一方面,通过数值模拟软件 COMSOL 观测 Langmuir 常量的变化对抽采效率及抽采产量的影响.

煤层气在煤岩中的运移是受到有效应力,解吸附效应,气体渗流,温度场和化学场等多物理场影响的一个长期复杂的时空变化过程,本文针对煤层气解吸附效应,有效应力变化和气体渗流各向同性特性等方面采用理论研究和数值模拟相结合的手段研究煤层力学特征与煤层气渗流特性,揭示煤层气抽采过程中的气-固耦合机理,主要研究内容包括:

1) 针对是否考虑解吸附效应,建立煤层气抽采的固体场、渗流场和气-固耦合的理论控制方程,并针对煤层基质变形、气体渗透、解吸附效应的规律和气体运移过程中发生的一系列变化进行了分析.

2) 分析了 Langmuir 压力常量、体积常量和体应变常量的变化对煤层渗透率、煤层气体压力和煤层气产量的影响.

3) 研究各向同性煤层气-固耦合模型在工程中的预估评价.以井下煤层气抽采为背景植入 COMSOL 计算平台研究不同力学边界条件下煤体力学行为和煤层气渗流场的分布,并对煤层气产量进行了预估.

## 1 渗透率模型

### 1.1 孔隙度动态模型

考虑到吸附过程中煤层的膨胀或收缩导致了孔隙直径的改变,即煤层的孔隙率发生变化,因此研究孔隙率在吸附作用中的动态变化十分必要.把孔隙介质看作连续介质,实际上是指孔隙度是平滑变化的.对于均质情形,我们假定多孔介质总体积包含基质体积  $V_s$  和有效孔隙体积  $V_p$ , 则煤层体积为  $V = V_s + V_p$ , 煤层孔隙度为  $\varphi = \frac{V_p}{V}$ . 在多孔介质中,压缩应力和气体压力的体积演化可以分别用  $\frac{\Delta V}{V}$  和  $\frac{\Delta V_p}{V_p}$  来描述<sup>[13]</sup>. 煤层的体积应力与多孔体应力关系是

$$\frac{\Delta V}{V} = -\frac{1}{K}(\bar{\sigma} - \alpha p); \quad (1)$$

$$\frac{\Delta V_p}{V_p} = -\frac{1}{K_p}(\bar{\sigma} - \beta p). \quad (2)$$

式中:  $K$  为煤层的体积模量,  $K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$  ( $E$  为煤层的杨氏模量;  $\nu$  为煤层的泊松比);  $p$  为气体压力变量;  $\bar{\sigma}$  为煤层的压缩应力,  $\bar{\sigma} = -\sigma_{kk}/3$ ,  $\sigma_{kk} = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}$ ;  $K_p$  为孔隙体积模量;  $\alpha$  为煤层的 Biot 系数, 取值范围  $0 \sim 1$ ;  $\beta$  为有效应力系数,  $\alpha = 1 - \frac{K}{K_s}$ ,  $\beta = 1 - \frac{K_p}{K_s}$  ( $K_s$  为煤层骨架的体积模量).

在不考虑气体吸附效应的情况下, 多孔介质的体积变化满足 Betti- Maxwell<sup>[7]</sup> 倒易定理, 即  $\left(\frac{\partial V}{\partial p}\right)_\sigma = \left(\frac{\partial V_p}{\partial \sigma}\right)_p$ , 可以得到:

$$K_p = \frac{\varphi}{\alpha} K. \quad (3)$$

使用孔隙度的定义  $\varphi = \frac{V_p}{V}$ , 可以导出:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta V_s}{V_s} + \frac{\Delta \varphi}{1 - \varphi}. \quad (4)$$

$$\frac{\Delta V_p}{V_p} = \frac{\Delta V_s}{V_s} + \frac{\Delta \varphi}{\varphi(1 - \varphi)}. \quad (5)$$

根据式(1)、式(2)、式(4)和式(5)可以得到:

$$\Delta \varphi = \varphi \left( \frac{1}{K} - \frac{1}{K_p} \right) (\bar{\sigma} - p). \quad (6)$$

把平衡方程  $\sigma_{ij,j} + f_i = 0$  和式(3)带入式(6)得

$$\Delta \varphi = (\alpha - \varphi) \left( \varepsilon_v + \frac{p}{K_s} \right) \quad (7)$$

当初始孔隙度为  $\varphi_0$  时, 当初始体积应变为零时, 即  $\varepsilon_0 = 0$ , 孔隙度可表示为

$$\varphi = \frac{1}{1 + S} [(1 + S_0) \varphi_0 + \alpha(S - S_0)] \quad (8)$$

式中:  $S_0 = \varepsilon_0 + \left(\frac{p_0}{K_s}\right) - \varepsilon_L p_0 / (p_0 + p_L)$ ;  $S = \varepsilon_v + \left(\frac{p}{K_s}\right)$  ( $\varepsilon_v$  为煤层的体应变);  $p$  为煤层的气体压力;  $p_0$  为初始气体压力;  $p_L$  为 Langmuir 压力常数;  $\varepsilon_L$  为 Langmuir 体应变. 有效应力可以简单地表示为  $\sigma_{eij} = \sigma_{ij} + \alpha p \delta_{ij}$ ,  $\sigma_{ij}$  是 Kronecker 函数, 即

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 0, & i \neq j; \\ 1, & i = j. \end{cases} \quad (9)$$

可以看出体应变与气体压力和孔隙度之间的关系, 当有效应力和煤层内气体压力改变时, 煤层基质会产生膨胀或收缩, 进而影响到孔隙度的变化, 即随着体应变与气体压力的增大, 孔隙度逐渐减小, 进而影响到渗透率的变化.

## 1.2 从应变角度推导的渗透率模型

以应变角度推导的渗透率模型是以立方定律作为研究基础的<sup>[14]</sup>, 通过研究应变和渗透率之间的关系, 从而得出渗透率的动态演化方程. G. V. Chilingar<sup>[15]</sup> 在 1964 年提出立方定律, 得出渗透率与孔隙率之间的关系, 简化后如式(10)所示.

$$\frac{k}{k_0} = \left(\frac{\varphi}{\varphi_0}\right)^3 \left(\frac{1 - \varphi_0}{1 - \varphi}\right)^2 \approx \left(\frac{\varphi}{\varphi_0}\right)^3. \quad (10)$$

基于体积应变与解吸气体体积成线性函数、煤基质比煤整体强度高的基本假定,考虑到多孔介质的渗透率和孔隙率之间的立方定律关系,张宏斌等<sup>[16]</sup>人可以推导出:

$$\frac{k}{k_0} = \left( \frac{\varphi}{\varphi_0} \right)^3 = \left( \frac{1}{1+S} \left[ (1+S_0) + \frac{\alpha}{\varphi_0} (S-S_0) \right] \right)^3. \quad (11)$$

式(11)即为渗流场的控制方程,  $(\varepsilon_v - \varepsilon_{v0})$  是解吸引起的体积应变变化量.可以看出,煤层渗透率的变化跟气体压力和孔隙直径相关,其中有效应力与气体压力负相关,煤层气体压力减小,有效应力增大,煤层基质收缩,渗透率减小.通过建立三者之间的联系推导出煤层气和煤层在开采瓦斯气过程中相互的耦合关系.

### 1.3 气-固耦合方程

#### 1.3.1 固体变形方程

基于多孔介质在弹性状态下的性质<sup>[13]</sup>,并通过吸附过程的热力学和能量守恒原理,建立了煤岩的膨胀与收缩应变的理论模型<sup>[17]</sup>.在不考虑外界温度变化的情况下,均质线性多孔弹性介质的本构关系可以用总应力  $\sigma_{ij}$  (正向拉伸),应变  $\varepsilon_{ij}$ , 孔隙流体压力变化  $p$  来表示:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2G} \sigma_{ij} - \left( \frac{1}{6G} - \frac{1}{9K} \right) \sigma_{kk} \delta_{ij} + \frac{\alpha}{3K} p \delta_{ij}. \quad (12)$$

式中:  $G$  为煤层的剪切模量,  $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ , 而  $\sigma_{kk} = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}$ . 式(12)即为不考虑吸附作用的骨架与气体因素组成的应变方程.根据式(12)可以推导出煤层体应力的表达式:

$$\varepsilon_v = -\frac{1}{K} (\bar{\sigma} - \alpha p). \quad (13)$$

式中:  $\varepsilon_v = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}$ . 结合几何方程与平衡方程可以得到煤层的变形方程:

$$G u_{i,kk} + \frac{G}{1-2\nu} u_{k,ki} - \alpha p_{,i} + f_i = 0. \quad (14)$$

式(14)即为固体场的控制方程,其中煤层中的气体压力  $p$  是讨论煤层渗透率变化的重要参数.

有效应力公式建立了有效应力、气体压力和煤层体应力之间的关系,简化了线性多孔介质内渗流扩散对介质变形的影响,将复杂的多孔煤层基质变形问题转化为有效应力作用下无孔隙等效变形的问题,并建立了煤层变形的理论控制方程.

#### 1.3.2 渗流场控制方程

在单向流体中用欧拉方程描述质量守恒定律,得微分形式的有源稳态渗流连续性方程.类比于流体,气体的质量守恒方程表示为

$$\frac{\partial m}{\partial t} + \nabla(\rho_g q_g) = Q_g. \quad (15)$$

式中:  $\rho_g$  为气体密度;  $q_g$  为 Darcy 速度矢量;  $Q_g$  为质量源;  $t$  为时间;  $m$  为气体总质量.渗流力学中常将连续性方程与 Darcy 定律联合起来消去速度,表示成压力与密度的关系式.煤层气质量  $m$  (分为游离态和吸附态两部分) 定义为

$$m = \rho_g \varphi + \rho_{ga} \rho_c \frac{V_L p}{p + P_L}. \quad (16)$$

式中:  $\rho_{ga}$  为标准大气压下的气体密度;  $\rho_c$  为煤层密度;  $V_L$  为 Langmuir 体积常数;通过 Langmuir 定理将吸附态气体转化为游离态标准,然后进行计算.其中煤层气体压力和密度之间的关系为

$$\rho_g = \frac{M_g}{RT} p. \quad (17)$$

式中:  $M_g$  为气体的摩尔质量;  $R$  为气体常数;  $T$  为气体温度.

忽略重力的影响, Darcy 速度矢量表示为

$$q_g = -\frac{k}{\mu} \nabla p. \quad (18)$$

式中: $k$  为煤层的渗透率; $\mu$  为气体的动力粘度,结合式(16)~式(18),代入式(15),可以得到气体的质量守恒方程.

$$\left[ \varphi + \frac{\rho_c p_a V_L P_L}{(p + P_L)} \right] \frac{\partial p}{\partial t} + p \frac{\partial \varphi}{\partial t} - \nabla \left( \frac{k}{\mu} p \nabla p \right) = Q_g \quad (19)$$

式中: $p_a$  为标准大气压.从式(19)可以看出渗透率  $k$  大小取决于孔隙率  $\varphi$  的变化.煤层气渗透率模型大多建立在多孔介质的基础上,基于弹性力学模型,推导孔隙率和渗透率的耦合关系,即式(14)和式(19),进而得到以应力或应变为基础的渗透率模型.

### 1.3.3 耦合控制方程

根据固体场和渗流场的相关耦合关系,推导出煤层气抽采时的气-固耦合理论方程.从式(8)中,对  $\varphi$  求时间的偏导数为

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\alpha - \varphi}{1 + S} \left[ \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + \frac{1}{K_s} \frac{\partial p}{\partial t} \right] \quad (20)$$

把式(20)代入式(19)得到煤层气固耦合控制方程.

$$\left[ \varphi + \frac{\rho_c p_a V_L P_L}{(p + P_L)} + \frac{(\alpha - \varphi) p}{(1 + S) K_s} \right] \frac{\partial p}{\partial t} - \nabla \left( \frac{k}{\mu} p \nabla p \right) = Q_g - \frac{(\alpha - \varphi) p}{(1 + S)} \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \quad (21)$$

如式(21)所示,渗流场的变化是有效应力和解吸附效应共同作用的结果.从耦合控制方程中可以看出,方程左侧括号内式子表示煤层孔隙率变化的影响因素,它既包括游离态气体的体积,也包含吸附态气体的体积.在煤层气开采过程中,吸附态的气体解吸附并扩散和渗透,导致煤层基质膨胀,有效应力减小,从而改变了煤层的孔隙率.方程右侧第 2 项表示气体和煤层基质的耦合,它包含了煤层变形引起的体积应力的变化.

## 2 单井煤层气开采的渗流规律模型

以煤层井下瓦斯单孔抽采为例,利用所建立的气-固耦合控制方程建立相应的数值模型进行数值求解,研究在不同的边界条件下,煤层的力学影响及瓦斯流场分布特征.如图 1 所示,模型尺寸为 100 m×100 m,钻孔位于模型的中央,半径为 0.1 m,四周为力学边界.数值模型的 4 条边的边界设置为无位移边界.对于煤层气运移方程,即煤层气的流场设置为无流出边界,钻孔与大气相连,即钻孔边界气体压力为恒定大气压力( $p = 0.1$  MPa),煤层内初始孔隙压力设定为 6.2 MPa,煤层内的初始温度为 293 K.为研究煤层的力学行为和煤层气流场分布,在模型中设置一个监测点  $A(1,1)$  和检测线  $BC$ .煤层模型参数列于表 1.

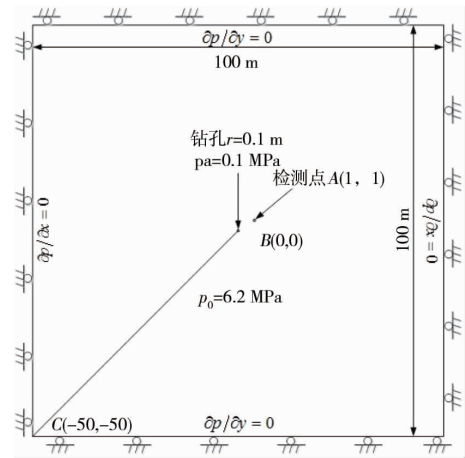


图 1 抽采井模型

表 1 煤层的基本性质<sup>[16]</sup>

参数	数值	参数	数值
煤层杨氏模量 $E_e/\text{Pa}$	$2.713 \times 10^9$	Langmuir 常量 $\varepsilon_L$	0.229 5
骨架杨氏模量 $E_s/\text{Pa}$	$8.139 \times 10^9$	初始孔隙度 $\text{phi}_0$	0.080 4
泊松比 $\nu_{\mu}$	0.339	初始渗透率 $k_0/\text{m}^2$	$3.799 \ 6 \times 10^{-17}$
线弹性材料密度 $\text{dense}/(\text{kg}/\text{m}^3)$	1 250	初始压力 $P_0/\text{Pa}$	$6.2 \times 10^6$
流体密度 $\text{densg}/(\text{kg}/\text{m}^3)$	0.717	大气压力值 $\text{Pa}$	$0.1 \times 10^6$
动力粘度 $\text{visco}/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	$1.84 \times 10^{-5}$	气体摩尔质量 $M/(\text{kg}/\text{mol})$	0.016
Langmuir 常量 $P_L/\text{Pa}$	$6.019 \times 10^6$	吸附气体温度 $T/\text{K}$	293
Langmuir 常量 $V_L/(\text{m}^3/\text{kg})$	0.015	气体常数 $R/(\text{J}/\text{mol}/\text{K})$	8.314 510

根据模拟数据结果得到煤层气渗透率、气体压力和抽采产量变化的趋势图,由图 2 可知:(1)考虑解吸附效应的模型气体压力迅速从 6.2 MPa 降到 1.5 MPa,最终趋于平稳值 1.1 MPa;而没有考虑解吸附效应

的模型气体压力也迅速从 6.2 MPa 降到 2.5 MPa,最终趋于平稳值 2 MPa.所以无论是否考虑解吸附效应,煤层孔隙气体压力变化呈现先迅速减小后缓慢减小的态势,最终趋于平稳.解吸附效应不影响气体压力改变的速率,但是减小了煤层中的气体压力稳定值.(2)考虑解吸附效应渗透率与初始渗透率的比值( $k_1/k_0$ )迅速从 1 上升至 6.5 最终趋于平稳值 7.2;而没有考虑解吸附效应的模型渗透率基本上没有变化.所以解吸附效应显著增加了煤层的孔隙直径,进而提高了渗透率.(3)在 2 a 时间内,考虑解吸附效应时抽采产量为  $3.5 \times 10^5 \text{ m}^3$ ;没有考虑解吸附效应时抽采产量为  $1.2 \times 10^5 \text{ m}^3$ .另外考虑解吸附效应的抽采效率明显较高.

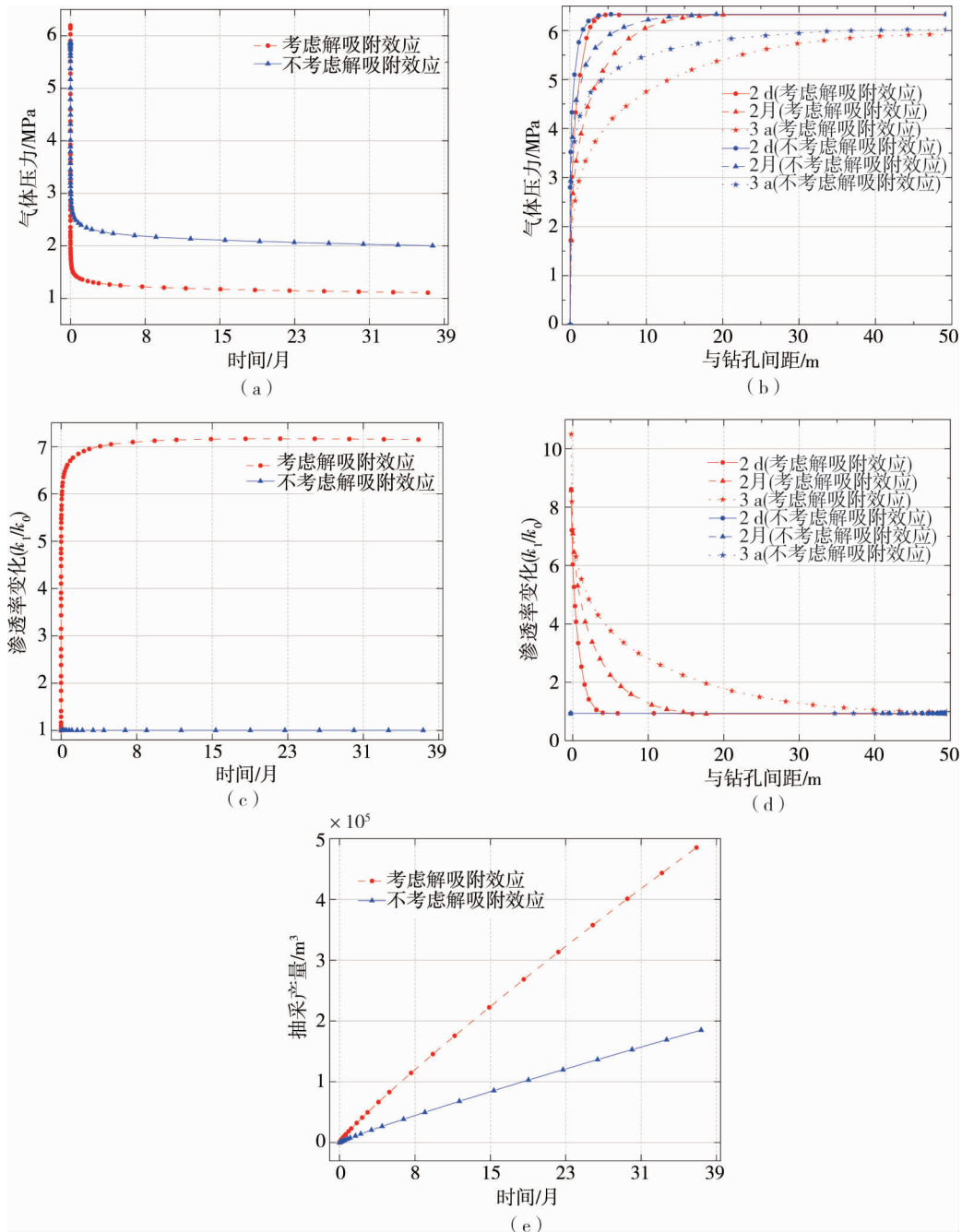


图 2 是否考虑解吸附效应对煤层气渗透率、气体压力和抽采产量变化的影响趋势

### 2.1 Langmuir 压力常量的影响

Langmuir 压力常量表示煤吸附的气体体积等于其最大容量一半的气体压力.在控制 Langmuir 体积常量和体应变不变的条件下,改变 Langmuir 压力常量  $P_L$  的数量级,即讨论当  $V_L = 0.015 \text{ m}^3/\text{kg}$ ,  $\varepsilon_L = 0.02295$  时, $P_L$  分别等于  $6.019 \times 10^5$ ,  $6.019 \times 10^6$  和  $6.019 \times 10^7 \text{ Pa}$  的时候,观测  $P_L$  引起孔隙气体压力、渗透率和抽采产量的变化情况(如图 3 所示).

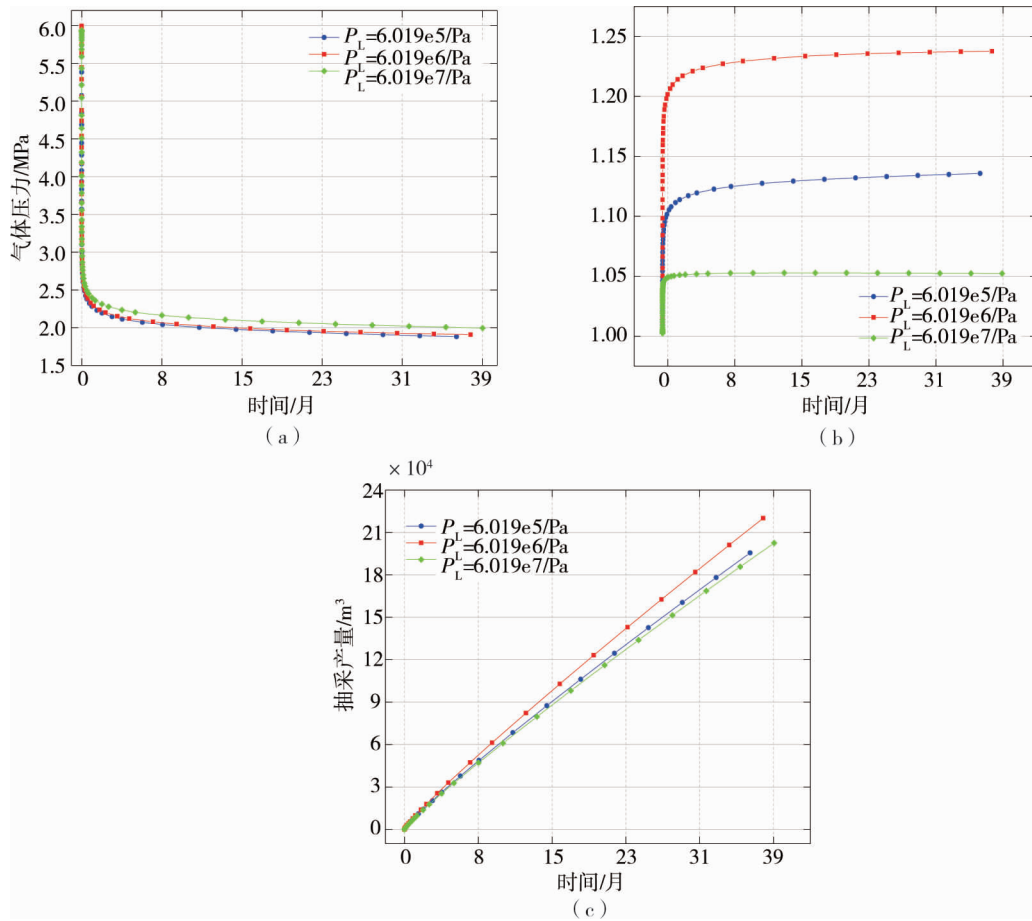


图3 不同 Langmuir 压力常量影响下煤层气气体压力(a)、渗透率(b)和抽采产量变化(c)趋势

由图3可知:(1)无论 Langmuir 压力常量取哪一个值,煤层气压力都迅速从 6.2 MPa 降到 2.5 Mpa,而后趋于平稳值,但是当 Langmuir 压力常量减少时,同一时间的气体压力稍有减少,但是影响不显著.(2)改变 Langmuir 压力常量时, $P_L = 6.019 \times 10^6$  Pa 时,渗透率变化比较明显,渗透率与初始渗透率的比值( $k_1/k_0$ )从 1 上升至 1.23,即 Langmuir 压力常量等于或接近初始气体压力时,煤层渗透率变化越大.(3)改变 Langmuir 压力常量时, $P_L = 6.019 \times 10^6$  Pa 时,2 年时间内抽采产量达到  $1.5 \times 10^5$  m<sup>3</sup>,相比于不同的 Langmuir 压力常量,抽采量和抽采效率有所提高,即 Langmuir 压力常量等于或接近初始气体压力时,煤层抽采效率越高.

### 2.2 Langmuir 体积常量的影响

Langmuir 体积常量表示煤的最大气体储存容量.在控制 Langmuir 压力常量和体应变不变的条件下,改变 Langmuir 体积常量  $V_L$  的数量级,即讨论当  $P_L = 6.019 \times 10^6$  Pa,  $\varepsilon_L = 0.022\ 95$  时, $V_L$  分别等于 0.150 0, 0.015 0和 0.001 5 m<sup>3</sup>/kg 的时候,观测  $P_L$  引起孔隙气体压力、渗透率和抽采产量的变化情况(如图4所示).

由图4可知:(1)无论 Langmuir 体积常量取哪一个值,煤层气压力都迅速从 6.2 降到 3 MPa,而后趋于平稳值,但是当 Langmuir 体积常量减少时,同一时间的气体压力稍有减少,但是影响不显著.(2)当 Langmuir 体积常量减少时,同一时间的渗透率稍有增加,但变化不明显.渗透率与初始渗透率的比值( $k_1/k_0$ )从 1 上升至最大值 1.24.(3)当 Langmuir 体积常量增加时,同等时间内抽采量和抽采效率都有所提高,即在 2 a 时间内抽采产量达到  $1.7 \times 10^5$  m<sup>3</sup>.

### 2.3 Langmuir 体应变的影响

Langmuir 体应变表示无限孔隙压力下的体积应变的常数.在控制 Langmuir 压力常量和体积常量不变的条件下,改变 Langmuir 体应力  $\varepsilon_L$  的数量级,即讨论当  $P_L = 6.019 \times 10^6$  Pa,  $V_L = 0.015$  m<sup>3</sup>/kg 时,  $\varepsilon_L$  分别等于 0.002 295, 0.022 95 和 0.229 5 的时候,观测  $\varepsilon_L$  引起孔隙气体压力、渗透率和抽采产量的变化情况(如图5所示).

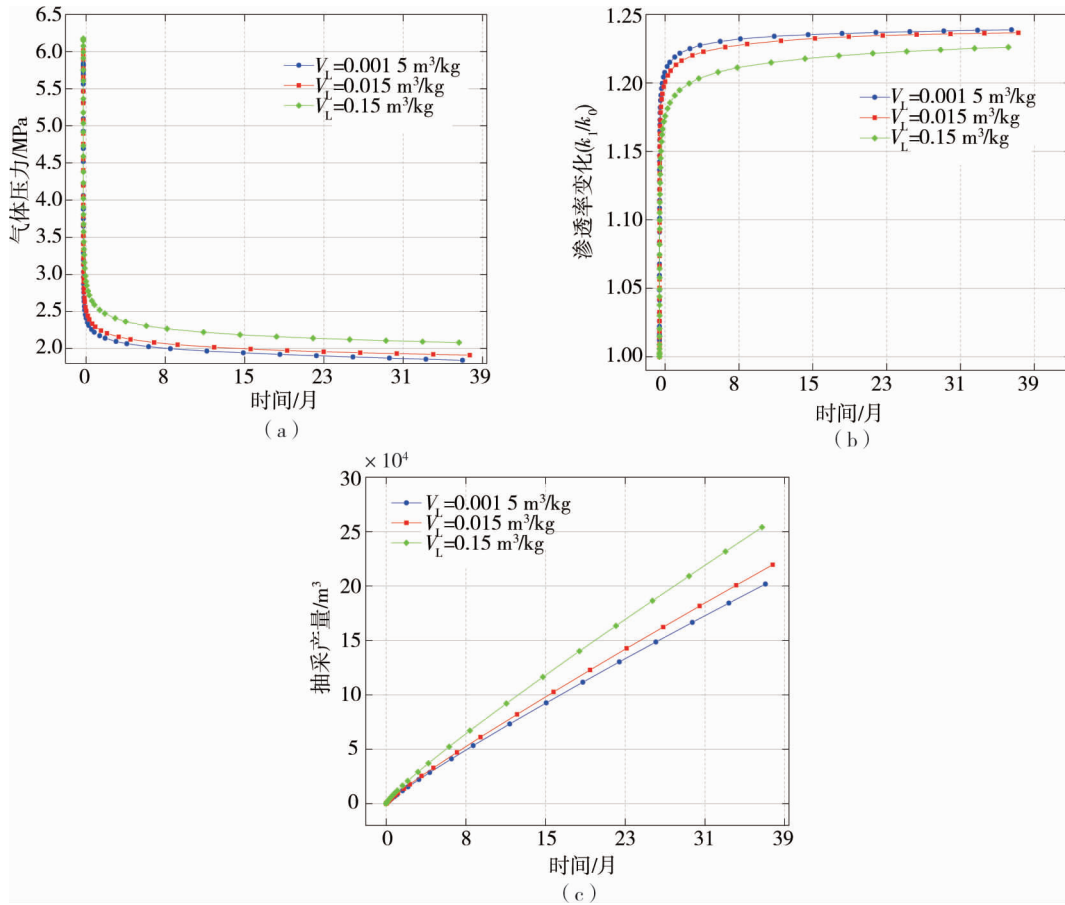


图 4 不同 Langmuir 体积常量影响下煤层气气体压力(a)、渗透率(b)和抽采产量变化(c) 趋势

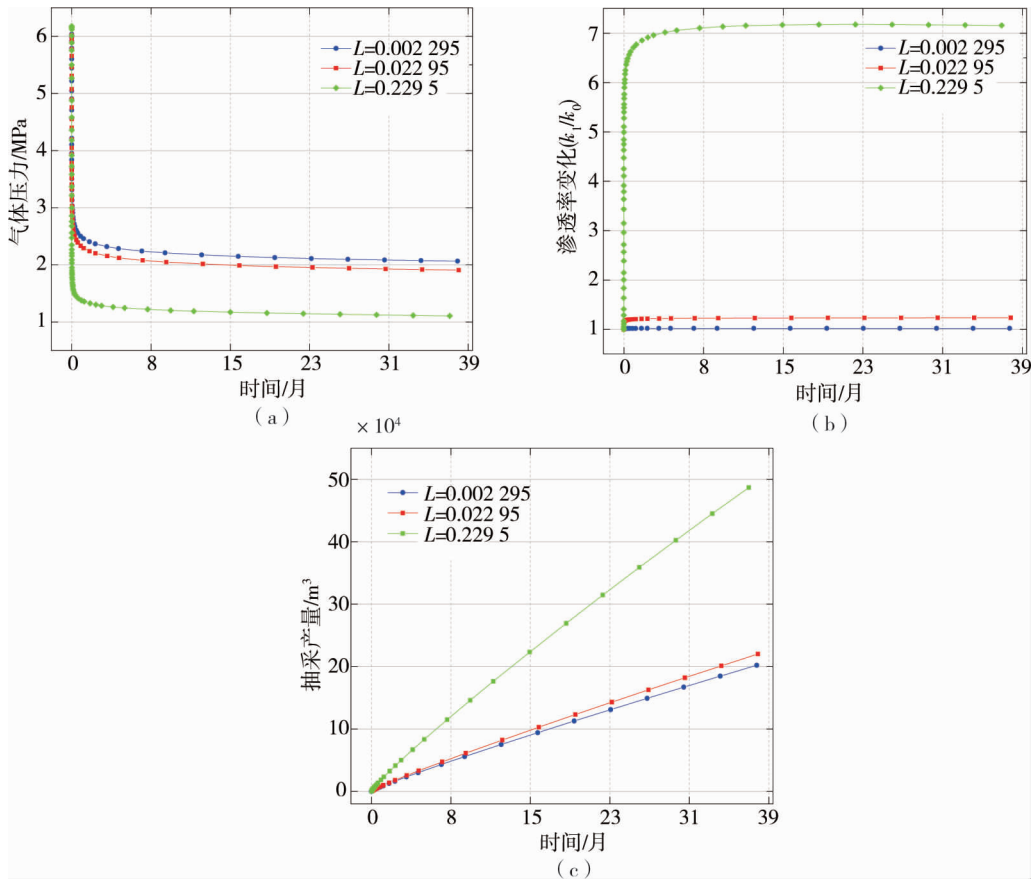


图 5 不同 Langmuir 体应变影响下煤层气气体压力(a)、渗透率(b)和抽采产量变化(c) 趋势



由图5可知:(1)无论Langmuir体应变取哪一个值,煤层气体压力都迅速从6.2降到3.3 MPa,而后趋于平稳值,但是当Langmuir体应变增大时,同一时间的气体压力稍有减少。(2)改变Langmuir体应变时, $\varepsilon_L=0.2295$ 时,渗透率变化十分明显,即渗透率与初始渗透率的比值( $k_1/k_0$ )从1.0上升至7.2。(3)改变Langmuir体应变时, $\varepsilon_L=0.2295$ 时,两年时间内抽采产量达到 $3.5 \times 10^5 \text{ m}^3$ ,相比于不同的Langmuir体应变,抽采量和抽采效率都显著提高。

通过改变Langmuir压力常量、体积常量和体应变的数值,在保持改变一个数量级的条件下,可以明显看出Langmuir体应变 $\varepsilon_L=0.2295$ 时对抽采产量的影响最大,相比于Langmuir压力常量、体积常量对应的最大值,抽采量和抽采效率提高了2~3倍。

### 3 结论

1)在考虑Langmuir压力常量时,通过运用单一变量原则可以观测,Langmuir压力常量在一定范围内变化时,气体压力的变化不大,但是渗透率变化、抽采量和抽采效率变化较为明显。在Langmuir压力常量等于或接近初始气体压力时,煤层抽采效率越高。

2)在考虑Langmuir体积常量时,通过运用单一变量原则可以观测,Langmuir体积常量在一定范围内变化时,气体压力的变化和渗透率变化不明显,抽采量和抽采效率有所提高。

3)在考虑Langmuir体应变时,通过运用单一变量原则可以观测,Langmuir体应变在一定范围内变化时,气体压力的变化不大,但是渗透率变化、抽采量和抽采效率变化十分明显。

#### 参考文献:

- [1] 周世宁,林柏泉.煤层瓦斯赋存与流动理论[M].北京:煤炭工业出版社,1999.
- [2] 叶建平,秦勇,林大扬.中国煤层气资源[M].徐州:中国矿业大学出版社,1998.
- [3] Kayser H. Ueber die verdichtung von gasen an oberflächen in ihrer abhangigkeit von druck and temperature[J]. Annalen der Physik, 1881,250(11):450-468.
- [4] Gregg S J, Sing K S W. Adsorption, surface area and porosity[M]. 2nd ed.London:Academic Press, 1982.
- [5] Rice D D. Composition and origins of coalbed gas[J]. Hydrocarbons from coal: AAPG Studies in Geology, 1993, 38(1): 159-184.
- [6] Kuuskraa V A, Brandenburg C F. Gas production report[J]. Oil and Gas Journal, 1989, 84(41): 49-72.
- [7] Aifantis E C. On the problem of diffusion in solids[J]. Acta Mechanica, 1980, 37(3/4): 265-296.
- [8] 石军太,李相方.煤层气解吸扩散渗流模型研究进展[J].中国科学:物理学 力学 天文学,2013,43(12):1548-1557.
- [9] 于洪观,范维唐,孙茂远,等.煤中甲烷等温吸附模型的研究[J].煤炭学报,2004,29(4):463-467.
- [10] 魏彬,赵宇,张玉贵.煤岩吸附-解吸变形各向异性特征试验分析[J].石油地球物理勘探,2019,54(1):112-117.
- [11] Langmuir I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum[J]. Journal of the American Chemical Society, 1918,40(9):1361-1403.
- [12] 刘曰武,苏中良,方虹斌,等.煤层气的解吸/吸附机理研究综述[J].油气井测试,2010,19(6):37-44.
- [13] Detournay E, Cheng A H D. Fundamentals of poroelasticity[C]//Analysis and design methods. Pergamon, 1993: 113-171.
- [14] 亓宪寅.各向异性煤岩气-固耦合机理研究[D].北京:中国科学院大学,2017.
- [15] Chilingar G V. Relationship between porosity, permeability, and grain-size distribution of sands and sandstones[J]. Developments in Sedimentology, 1964,1:71-75.
- [16] Zhang H, 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.
- [17] Shi J Q, Durucan S. Drawdown induced changes in permeability of coalbeds: a new interpretation of the reservoir response to primary recovery[J]. Transport in Porous Media, 2004, 56(1): 1-16.