

考虑滑脱效应的欠饱和煤储层渗透率模型

薛培, 王延斌, 王晋, 张新, 范晶晶

中国矿业大学(北京)地球科学与测绘学院, 北京 100083

摘要 在多孔介质应力-应变本构公式基础上, 考虑有效应力效应、基质收缩效应、滑脱效应对煤储层渗透率的影响, 建立欠饱和煤储层的渗透率动态模型, 以沁水盆地某煤层气田为例, 模拟储层压力从初始值降至衰竭压力过程中煤储层渗透率变化, 分析模型参数敏感性。结果显示: 在开发初期, 欠饱和煤储层储层渗透率持续下降, 储层压力下降至临界解吸压力时, 渗透率降至最低点, 之后渗透率开始上升; 储层压力由初始值下降至临界解吸压力 3.80 MPa 时, 渗透率下降至最低值 $0.186 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 之后渗透率开始上升, 当储层压力下降至 2.77 MPa 时, 渗透率恢复至初始值, 储层压力下降至衰竭压力时, 渗透率上升至初始值的 3.182 倍; 兰氏体积应变、杨氏模量及滑脱系数数值越高, 储层最终渗透率改善幅度越大, 泊松比值越高, 储层最终渗透率改善幅度越小; 与其他参数相比, 兰氏体积应变对煤储层最终渗透率改善的影响最为重要。

关键词 欠饱和煤储层; 渗透率模型; 滑脱效应; 有效应力; 基质收缩

中图分类号 P618.11

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.27.009

A Permeability Model of Undersaturated Coal Reservoir Considering Slippage Effect

XUE Pei, WANG Yanbin, WANG Jin, ZHANG Xin, FAN Jingjing

College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining Technology, Beijing 100083, China

Abstract Based on the stress-strain constitutive equation of porous media, a permeability model of the undersaturated coal reservoir is presented considering the effective stress, matrix shrinkage and slippage effect. Using the model and parameters from the coal seam of Qinshui basin, the permeability variations of this block in the process of reservoir pressure changing from the initial value to the depletion pressure are predicted. The model parameter sensitivity is analyzed. The results indicate that at the initial stage of the undersaturated coal reservoir, the coal reservoir permeability declines until the reservoir pressure drops to the critical desorption pressure, after that the permeability rises. The simulated results show that the coal reservoir permeability in the Qinshui basin reduces to $0.186 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ when the pressure drops to the critical desorption pressure (3.80 MPa), then the permeability begins to rise with the pressure decline and rebounds to the initial value at 2.77 MPa, and finally at the depletion pressure 0.92 MPa, the permeability reaches to 3.182 times the initial value. Sensitivity analysis points out that the larger the value of Langmuir volume strain, Young's modulus and slippage coefficient, the better the improvement of the final permeability, while the Poisson ratio is just the reverse. The Langmuir volume strain is the most important influence parameter of the final permeability.

Keywords undersaturated coal reservoir; permeability model; slippage effect; effective stress; matrix shrinkage

煤储层渗透率作为影响煤层气井产能的关键参数, 在煤层气开发过程中, 主要受有效应力效应、基质收缩效应和滑脱效应的影响, 是动态变化的。目前国外报道, 应用较为广泛的渗透率动态模型主要包括 Palmer & Mansoori 模型^[1,2]、

收稿日期: 2014-07-09; 修回日期: 2014-07-30

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05042-003)

作者简介: 薛培, 博士研究生, 研究方向为煤层气及油气地质, 电子信箱: xuepei330@163.com

引用格式: 薛培, 王延斌, 王晋, 等. 考虑滑脱效应的欠饱和煤储层渗透率模型[J]. 科技导报, 2014, 32(27): 56-59.

Shi & Durucan 模型^[3,4]、Cui & Bustin 模型^[5,6]，国内学者如汪志明等^[7]、付玉等^[8]、艾池等^[9]和周军平等^[10]也建立了相应的渗透率模型。此类模型均考虑了有效应力效应及基质收缩效应对渗透率的影响，缺乏对滑脱效应考虑，且未明确欠饱和煤储层渗透率变化特征。

国内煤层气藏多为欠饱和煤层气藏。欠饱和煤储层在储层压力降至临界解吸压力之前，未发生气体解吸，此阶段渗透率变化仅受有效应力效应影响；当储层压力降至临界解吸压力之后，吸附气解吸，基质收缩效应开始影响储层渗透率；而在低渗条件下，储层压力下降至一定程度，气体滑脱效应十分显著。本文在前人研究基础上，建立考虑有效应力效应、基质收缩效应及滑脱效应的欠饱和煤储层渗透率动态模型。

1 模型建立

模型假设条件：1) 煤层层面为水平或近水平分布，煤层处于自重应力状态；2) 煤储层各向同性；3) 开发过程中储层温度恒定；4) 忽略煤颗粒的压缩性。

Seidle 等^[11]研究认为，割理渗透率与平均有效水平应力的关系为

$$K = K_0 e^{-3C_i(\sigma_{hmc} - \sigma_{hmc0})} \quad (1)$$

其中， K 为煤储层渗透率， $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ； K_0 为煤储层初始渗透率， $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ； C_i 为割理压缩系数， MPa^{-1} ； σ_{hmc} 为平均有效水平应力， $\sigma_{hmc} = \sigma_{hm} - p$ ， σ_{hm} 为平均水平应力， p 为储层孔隙压力， MPa ； σ_{hmc0} 为初始平均有效水平应力， MPa 。

Neuzil^[12]提出非恒温多孔弹性介质的应力-应变公式为

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

其中， $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ ， $\alpha = 1 - \frac{\kappa}{\kappa_s}$ ， κ 为多孔介质体积弹性模量， κ_s 为固体颗粒体积弹性模量， MPa 。 σ_{ij} 为*i, j*方向上的应力， MPa ； G 为剪切模量， MPa ； ν 为泊松比； ε_{ij} 为*i, j*方向上应变； ε_{kk} 为体积应变； δ_{ij} 为克罗内克常数； α 为 Biot 系数； α_T 为多孔介质线性热膨胀系数， K^{-1} ； T 为绝对温度， K ； E 为杨氏模量， MPa 。

Palmer 等^[12]研究认为，可将多孔介质非恒温条件下的线性热膨胀效应近似视为恒温条件下多孔介质吸附/解吸基质收缩效应，则应力-应变公式可为

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

其中， ε_s 为基质收缩应变。

在空间直角坐标系中对应力-应变公式进行分解得

$$\sigma_{xx} = 2G\varepsilon_{xx} + 2G\frac{\nu}{1-2\nu}\varepsilon_{kk} + p + \frac{2}{3}G\frac{1+\nu}{1-2\nu}\varepsilon_s \quad (4)$$

$$\sigma_{yy} = 2G\varepsilon_{yy} + 2G\frac{\nu}{1-2\nu}\varepsilon_{kk} + p + \frac{2}{3}G\frac{1+\nu}{1-2\nu}\varepsilon_s \quad (5)$$

$$\sigma_{zz} = 2G\varepsilon_{zz} + 2G\frac{\nu}{1-2\nu}\varepsilon_{kk} + p + \frac{2}{3}G\frac{1+\nu}{1-2\nu}\varepsilon_s \quad (6)$$

假设煤层层面为水平或近水平分布，处于原地应力状态，则剪切应力 $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{zx} = 0$ 。对主应力方向应力-应变公式求微分，则

$$d\sigma_{xx} = 2Gd\varepsilon_{xx} + 2G\frac{\nu}{1-2\nu}d\varepsilon_{kk} + dp + \frac{2}{3}G\frac{1+\nu}{1-2\nu}d\varepsilon_s \quad (7)$$

$$d\sigma_{yy} = 2Gd\varepsilon_{yy} + 2G\frac{\nu}{1-2\nu}d\varepsilon_{kk} + dp + \frac{2}{3}G\frac{1+\nu}{1-2\nu}d\varepsilon_s \quad (8)$$

$$d\sigma_{zz} = 2Gd\varepsilon_{zz} + 2G\frac{\nu}{1-2\nu}d\varepsilon_{kk} + dp + \frac{2}{3}G\frac{1+\nu}{1-2\nu}d\varepsilon_s \quad (9)$$

煤层受围岩围限，故 $d\varepsilon_{xx} = d\varepsilon_{yy} = 0$ ，则

$$d\sigma_{xx} = d\sigma_{yy} = 2G\frac{\nu}{1-2\nu}d\varepsilon_{kk} + dp + \frac{2}{3}G\frac{1+\nu}{1-2\nu}d\varepsilon_s \quad (10)$$

因 $\varepsilon_{kk} = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$ ，则 $d\varepsilon_{kk} = d\varepsilon_{xx} + d\varepsilon_{yy} + d\varepsilon_{zz} = d\varepsilon_{zz}$ 。假定煤层处于自重状态下，垂向应力恒定，则 $d\sigma_{zz} = 0$ ，代入式(9)得

$$2Gd\varepsilon_{zz} = \frac{1-2\nu}{1-\nu}\left(dp + \frac{2}{3}G\frac{1+\nu}{1-2\nu}d\varepsilon_s\right) \quad (11)$$

将式(11)代入式(10)得

$$d\sigma_{xx} = d\sigma_{yy} = \frac{1-2\nu}{1-\nu}dp + \frac{2}{3}G\frac{1+\nu}{1-\nu}d\varepsilon_s \quad (12)$$

即

$$d\sigma_{hmc} = \frac{1-2\nu}{1-\nu}dp + \frac{E}{3(1-\nu)}d\varepsilon_s \quad (13)$$

又 $d\sigma_{hmc} = d\sigma_{hmc} - dp$ ，得

$$d\sigma_{hmc} = \frac{-\nu}{1-\nu}dp + \frac{E}{3(1-\nu)}d\varepsilon_s \quad (14)$$

Seidle 等^[11]认为基质收缩应变可用朗格缪尔等温吸附方程表达，即 $\varepsilon_s = \varepsilon \frac{p}{p+p_{50}}$ ，则

$$d\varepsilon_s = \varepsilon \left(\frac{p}{p+p_{50}} - \frac{p_0}{p_0+p_{50}} \right) \quad (15)$$

其中， p_0 为煤储层初始孔隙压力， MPa ； p_{50} 为基质收缩应变达到最大值 50% 时的孔隙压力， MPa ； ε 为兰氏应变常数。将式(15)代入式(14)得

$$d\sigma_{hmc} = \frac{-\nu}{1-\nu}(p-p_0) + \frac{E}{3(1-\nu)}\varepsilon \left(\frac{p}{p+p_{50}} - \frac{p_0}{p_0+p_{50}} \right) \quad (16)$$

则渗透率公式可表示为

$$K = K_0 e^{-3C_i(\sigma_{hmc} - \sigma_{hmc0})} = K_0 \exp \left\{ -3C_i \left[\frac{-\nu}{1-\nu}(p-p_0) + \frac{E}{3(1-\nu)}\varepsilon \left(\frac{p}{p+p_{50}} - \frac{p_0}{p_0+p_{50}} \right) \right] \right\} \quad (17)$$

为表达方便，令

$$M = \exp \left\{ -3C_i \left[\frac{-\nu}{1-\nu}(p-p_0) + \frac{E}{3(1-\nu)}\varepsilon \left(\frac{p}{p+p_{50}} - \frac{p_c}{p_c+p_{50}} \right) \right] \right\} \quad (18)$$

式(17)包含了有效应力效应及基质收缩效应，在欠饱和煤储层开发初期，孔隙压力降至临界解吸压力 p_c 之前，吸附气未发生解吸，基质收缩效应并不存在，只存在有效应力效应。即当 $p > p_c$ 时

$$K = K_0 \exp \left[-3C_i \frac{-\nu}{1-\nu}(p-p_0) \right] \quad (19)$$

朱光亚等^[13]通过对低渗气藏气体渗流滑脱效应的研究，明确了天然气渗流计入滑脱效应的地层压力条件为孔隙压

力小于 1.50 MPa (即滑脱效应临界孔隙压力 p_k)。当孔隙压力降至临界解吸压力以下,但未达到滑脱临界压力 1.50 MPa 时,有效应力效应及基质收缩效应同时影响储层渗透率。即当 $p_k < p \leq p_c$ 时

$$K = K_0 M \quad (20)$$

当孔隙压力降至滑脱临界压力 p_k 时,滑脱效应开始影响煤储层渗透率,滑脱效应的数学表达式为

$$K_g = K_i \left(1 + \frac{4c\lambda}{r} \right) \quad (21)$$

其中, K_g 为平均气体压力下的气体渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; λ 为气体分子平均自由程, μm ; r 为孔道的平均半径, μm ; c 为比例因子; K_i 为气体克氏渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

当 $p \leq p_k$ 时

$$K = K_0 M \left(1 + \frac{b}{p} \right) / \left(1 + \frac{b}{p_k} \right) \quad (22)$$

其中, b 为滑脱系数。

综上所述,在欠饱和煤储层开发过程中,煤储层渗透率可表示为

$$K = \begin{cases} K_0 \exp \left[-3C_i \frac{-\nu}{1-\nu} (p-p_0) \right] & p > p_c \\ K_0 M & p_k < p \leq p_c \\ K_0 M \left(1 + \frac{b}{p} \right) / \left(1 + \frac{b}{p_k} \right) & p \leq p_k \end{cases} \quad (23)$$

其中

$$M = \exp \left\{ -3C_i \left[\frac{-\nu}{1-\nu} (p-p_0) + \frac{E}{3(1-\nu)} \varepsilon \left(\frac{p}{p+p_{s0}} - \frac{p_c}{p_c+p_{s0}} \right) \right] \right\}。$$

2 模型应用

以沁水盆地某煤层气田储层作为研究对象,该煤层气田初始渗透率为 $0.251 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,初始孔隙压力为 6.00 MPa,衰竭压力为 0.92 MPa,割理压缩系数为 0.13 MPa^{-1} ,泊松比为 0.26,杨氏模量为 4000 MPa,兰氏应变常数为 0.008,基质收缩应变达到最大值 50% 时的孔隙压力为 3.00 MPa,临界解吸压力为 3.80 MPa,滑脱系数为 0.08,将建立的煤储层渗透率动态模型应用到该储层中。

渗透率模拟结果如图 1 所示,当储层压力由初始值 6.00 MPa 下降至 3.80 MPa 时,由于此阶段煤储层只受有效应力效

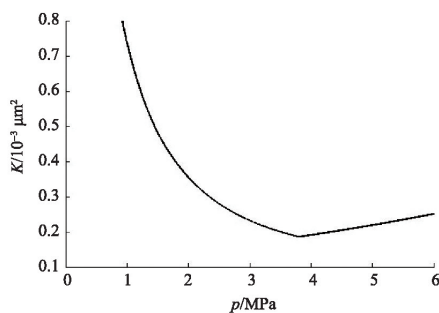


图 1 煤储层渗透率随孔隙压力变化关系

Fig. 1 Relation of coal reservoir permeability with pressure

应影响,渗透率降至最低值 $0.186 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,与初始渗透率相比下降了 26%;之后吸附气体开始解吸,基质收缩效应导致渗透率增大,当储层压力降至 2.77 MPa 时,渗透率恢复至初始值,此阶段煤储层受有效应力及基质收缩效应的双重影响;当储层压力降至 1.50 MPa 时,滑脱效应开始影响煤储层渗透率,此阶段煤储层受滑脱效应,基质收缩效应及有效应力效应的综合影响,渗透率上升较快,当储层压力至衰竭压力 0.92 MPa,煤储层最终渗透率增至初始值的 3.182 倍。

3 模型参数敏感性分析

煤层气开发过程中,渗透率变化影响因素较多,其中力学参数(杨氏模量、泊松比)、兰氏体积应变及滑脱系数对渗透率变化影响较大,杨氏模量直接决定了煤岩抵抗有效应力负效应的能力;兰氏体积应变则反映煤岩吸附膨胀与解吸收缩的能力,是衡量煤岩基质收缩效应的决定性因素;滑脱系数作为滑脱效应的表征参数决定了滑脱效应对储层渗透率的影响程度。因此选用以上 4 个参数作为参数敏感性分析对象,参数取值见表 1,其中 K_i/K_0 为最终无因次渗透率, K_c 为衰竭压力时储层渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

表 1 参数敏感性分析参数取值及分析结果

Table 1 Parameters of sensitivity analysis

E/MPa	ν	ε	b	K_i/K_0	s_a
3800				2.91	—
4000	0.26	0.008	0.08	3.18	1.76
4200				3.49	1.94
4400				3.82	1.98
	0.24			3.25	—
4000	0.26	0.008	0.08	3.18	0.27
	0.28			3.1	0.33
	0.30			3.03	0.32
		0.006		2.02	—
4000	0.26	0.008	0.08	3.18	1.72
		0.010		5.02	2.316
		0.012		7.97	2.9
			0.04	3.13	—
4000	0.26	0.008	0.08	3.18	0.02
			0.12	3.23	0.03
			0.16	3.25	0.03

参数敏感性分析显示,在其他因素与该煤层气田参数保持相同的条件下,兰氏体积应变、杨氏模量、滑脱系数与最终无因次渗透率正相关(表 1),随着参数取值的增加,最终无因次渗透率 K_i/K_0 提高,以杨氏模量为例,杨氏模量取值为 3800、4000、4200、4400 MPa 时,最终无因次渗透率为 2.91、3.18、3.49、3.82,即煤储层开发过程中,兰氏体积应变、杨氏模量、滑脱系数数值越高,储层最终渗透率的改善幅度越大;而泊松比与最终无因次渗透率负相关,随着泊松比取值的增加,最终无因次渗透率呈现减小的趋势,即泊松比值越高,储层

最终渗透率改善幅度越小。

为了分析具有不同量纲的参数对渗透率影响重要性的差异,定义参数 a 在 a_i 处的敏感性指数为 s_{ai} , 表达式为

$$s_{ai} = \frac{|K_i - K_{i-1}| a_{i-1}}{|a_i - a_{i-1}| K_{i-1}}, \text{ 计算结果见表 1。}$$

表 1 所示参数敏感性分析选用最终无因次渗透率作为分析指标,最终无因次渗透率代表煤储层在达到衰竭压力时储层渗透率的改善情况,即参数敏感性分析代表参数对最终渗透率改善情况影响的重要性。

参数敏感性指数计算结果(表 1)显示,杨氏模量、泊松比、兰氏体积应变和滑脱系数 4 个参数对煤储层最终无因次

渗透率影响的重要性存在差异,其重要性由高到低依次为兰氏体积应变>杨氏模量>泊松比>滑脱系数。随着兰氏体积应变、杨氏模量取值的增加,参数敏感性指数呈升高的趋势,即煤储层兰氏体积应变、杨氏模量越大,二者对煤储层最终渗透率的影响越发重要;随着泊松比、滑脱系数取值的增加,二者的参数敏感性指数趋于稳定。图 2 为不同参数取值下(参数取值见表 1),随孔隙压力下降,无因次渗透率变化曲线。由图 2 可知,在整个储层孔隙压力下降过程中,兰氏体积应变与杨氏模量对储层无因次渗透率的影响明显强于泊松比与滑脱系数,这与表 1 所揭示的各参数对储层最终无因次渗透率影响重要性差异特征一致。

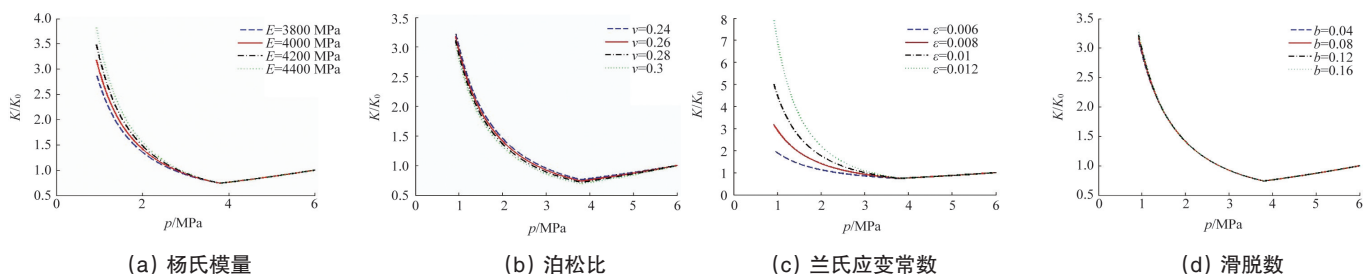


图 2 不同参数取值下无因次渗透率随孔隙压力改变曲线

Fig. 2 Relation of dimensionless permeability with pressure under different parameters

4 结论

1) 欠饱和煤储层在开发初期,渗透率持续下降,储层压力下降至临界解吸压力时,渗透率降至最低点,之后渗透率开始增大。

2) 沁水盆地某煤层气田储层压力由初始值下降至临界解吸压力 3.80 MPa 时,渗透率下降至最低值 $0.186 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,之后渗透率开始增大;当储层压力下降至 2.77 MPa 时,渗透率恢复至初始值;储层压力下降至衰竭压力时,储层最终渗透率增大至初始值得 3.182 倍。

3) 兰氏体积应变、杨氏模量、滑脱系数与最终无因次渗透率正相关,泊松比与最终无因次渗透率负相关。在煤储层开发过程中,以上因素对煤储层渗透率影响的重要性存在差异,兰氏体积应变对煤储层最终渗透率的影响最为重要。

参考文献 (References)

- [1] Palmer I, Mansoori J. How permeability depends on stress and pore pressure in coalbeds: A new model[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 1998, 1(6): 539-544.
- [2] Palmer I, Mansoori J. How permeability depends on stress and pore pressure in coalbeds: A new model[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado, October 6-9, 1996.
- [3] Ji Q S, 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: 1-16.
- [4] Ji Q S, Durucan S. A model for changes in coalbed permeability during primary and enhanced methane recovery[J]. Reservoir Evaluation & Engineering, 2005, 8(4): 291-299.
- [5] Cui X J, Bustin R M. Volumetric strain associated with methane desorption and its impact on coalbed gas production from deep coal seams[J]. The American Association of Petroleum Geologists, 2005,

89(9): 1181-1202.

- [6] Cui X J, Bustin R M, Chikatamarla L. Adsorption-induced coal swelling and stress: Implications for methane production and acid gas sequestration into coal seams[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112(B10): 202.
- [7] 汪志明, 王忠华, 张健. 煤储层渗透率动态预测模型适用性评价[J]. 中国煤炭地质, 2010, 22(10): 34-37.
Wang Zhiming, Wang Zhonghua, Zhang Jian. Applicability assessment of coal reservoir permeability dynamic prediction model[J]. Coal Geology of China, 2010, 22(10): 34-37.
- [8] 付玉, 郭肖, 贾英, 等. 煤基质收缩对裂隙渗透率影响的新数学模型[J]. 天然气工业, 2005, 25(2): 174-176.
Fu Yu, Guo Xiao, Jia Ying, et al. New mathematical model for effect of coal matrix shrinkage on fracture permeability[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(2): 174-176.
- [9] 艾池, 栗爽, 李净然, 等. 煤岩储层渗透率动态变化模型[J]. 特种油气藏, 2013, 20(1): 54-59.
Ai Chi, Li Shuang, Li Jingran, et al. Models of dynamic permeability variation of coal seam[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2013, 20(1): 54-59.
- [10] 周军平, 鲜学福, 姜永东, 等. 考虑有效应力和煤基质收缩效应的渗透率模型[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2009, 31(1): 4-8.
Zhou Junping, Xian Xuefu, Jiang Yongdong, et al. A permeability model considering the effective stress and coal matrix shrinkage effect [J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2009, 31(1): 4-8.
- [11] Seidle J R, Huitl L G. Experimental measurement of coal matrix shrinkage due to gas desorption and implications for cleat permeability increases[C]. International Meeting on Petroleum Engineering, Beijing, China, November 14-17, 1995.
- [12] Neuzil C E. Hydromechanical coupling in geologic processes[J]. Hydrogeology Journal, 2003, 11(1): 41-83.
- [13] 朱光亚, 刘先贵, 李树铁, 等. 低渗气藏气体渗流滑脱效应影响研究[J]. 天然气工业, 2007, 27(5): 44-47.
Zhu Guangya, Liu Xiangui, Li Shutie, et al. A study of slippage effect of gas percolation in low permeability gas pools[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(5): 44-47.

(责任编辑 刘志远)