

煤层气藏三孔双渗直井井底压力响应数学模型

曹海涛¹, 伊向艺^{1,2}, 车星祥¹, 李成勇¹, 王晓蕾³

1. 成都理工大学能源学院, 成都 610059
2. 成都理工大学油气藏地质及开发国家重点实验室, 成都 610059
3. 大庆油田第五采油厂第三油矿, 大庆 163000

摘要 国内煤层储层压力和渗透率普遍偏低, 目前矿场主要采用注入/压降测试方法来求取地层参数, 但由于注入水无法进入基质孔隙, 测试数据无法反映基质解吸特征。针对这一问题, 本文建立能够真实反映煤层气藏地层参数的三孔双渗渗流数学模型, 利用拉氏变换和 Stehfest 数值反演方法对模型进行求解, 获取不同边界条件(径向无限大、外边界定压以及外边界封闭)下的直井井底拉氏空间拟压力解析解, 绘制无因次拟压力和无因次拟压力导数与无因次时间的双对数曲线, 并根据曲线特征对三孔双渗煤层储层直井渗流阶段进行划分, 对影响井底压力响应特征的关键参数进行分析, 为煤层气的试井精细解释提供理论依据。

关键词 煤层气; 三孔双渗; 解吸/吸附; 井底压力

中图分类号 TE357

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.18.004

Triple-porosity and dual-permeability mathematical model for CBM vertical well

CAO Haitao¹, YI Xiangyi^{1,2}, CHE Xingxiang¹, LI Chengyong¹, WANG Xiaolei³

1. College of Energy Resource, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China
2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China
3. The Third Oil Deposit of No.5 Oil Production Plant, Daqing Oil Field, Daqing 163000, China

Abstract Most of the coal reservoirs in China are of low-permeability and low-pressure, and the injection/fall off test is usually used to correctly evaluate formation parameters. But because water molecules can't enter the matrix porosity, the adsorption and desorption characteristics of the matrix can't be reflected. Concerning this issue, a triple-porosity and dual-permeability mathematical model has been established. Accurate solution to this model under different outer boundary conditions (Infinite, no flow and constant pressure) is obtained by use of Laplace transformation and Stehfest numerical inversion. According to the analysis in Laplace domain, the type curves of dimensionless pressure and pressure derivative are graphically illustrated. The pressure decline performance under the effects of CBM reservoir properties are discussed. A theoretical basis for CBM well test has been provided.

Keywords coal bed methane; triple-porosity/dual permeability; desorption/adsorption; bottom hole pressure

煤岩的微孔隙系统非常发育, 具有极大内表面, 吸附能力大^[1], 由于微孔隙的孔径多在 0.5~1.0 nm 之间, 致使注入压降测试过程中注入水无法进入其中^[2], 所以这一测试只能用双重介质渗流解释, 很难真实反映基质解吸特征。Reeves^[3]针

收稿日期: 2015-05-21; 修回日期: 2015-08-01

基金项目: 教育部博士学科点博导基金项目(20125122110017)

作者简介: 曹海涛, 博士研究生, 研究方向为油气田开发理论, 电子信箱: cht198701@126.com

引用格式: 曹海涛, 伊向艺, 车星祥, 等. 煤层气藏三孔双渗直井井底压力响应数学模型[J]. 科技导报, 2015, 33(18): 28-33.

对煤层气双孔单渗模型预测产气过早的不足,提出了三孔双渗模型,即在原模型中增加基质孔隙系统。张先敏等^[4,5]在此基础上建立了单相煤层气三孔双渗流数学模型,绘制了井底压力与时间的半对数和双对数曲线,并分析了压力动态响应影响因素,但数学模型中没有考虑微裂缝向割理系统的窜流,也没有阐述压力响应曲线所对应的流动特征。周芊芊^[6]建立了气-水两相三孔双渗数学模型,利用其数值解来拟合历史压力、产量,最终确定储层参数。本文针对注入/压降试井存在的问题,建立考虑解吸-扩散过程的煤层气直井三孔双渗流数学模型,阐述煤层气不同渗流阶段特征,真实反映煤层气渗流规律。

1 煤层气藏三孔双渗直井渗流物理模型

三孔双渗煤层气藏单相煤层气运移物理模型如图1所示(图中F、MF和M分别代表割理、微裂缝和基质)^[7,8],对该模型作出如下假设:1)煤层水平等厚,顶底板封闭,径向无限大;2)单相甲烷气在割理系统中流动,并且符合达西定律;3)煤层气由基质表面扩散到微裂缝过程遵循非稳态扩散定律,微裂缝与割理之间存在拟稳态窜流;4)煤层气解吸过程附过程符合Langmuir等温吸附规律;5)忽略重力和毛管力的影响,且不考虑生产过程中应力变化造成的基质变形。

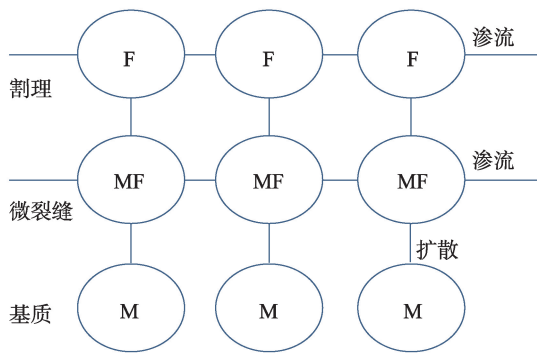


图1 三孔双渗煤层气藏渗流物理模型

Fig. 1 Triple-porosity and dual-permeability model

2 煤层气藏三孔双渗直井渗流数学模型

煤层气的解吸方程^[9]为

$$q_m = \rho_{sc} \frac{\partial V}{\partial t} \quad (1)$$

式中, q_m 为单位时间的解吸量; ρ_{sc} 为标况下煤层气的密度; V 为标况下单位体积煤岩中所吸附气体的体积。

解吸气通过扩散方式进入微裂缝系统,其扩散过程符合fick第二定律:

$$\frac{1}{r_i^2} \frac{\partial}{\partial r_i} \left(r_i^2 D \frac{\partial c}{\partial r_i} \right) = \frac{\partial c}{\partial t} \quad (2)$$

式中, r_i 为基质半径; D 为多孔介质中质量扩散系数,与空间

位置无关; c 为气体浓度。

甲烷在微裂缝和割理系统中的流动过程满足达西线性渗流规律,结合连续性方程和运动方程得到微裂缝和割理系统的渗流数学模型

$$\begin{cases} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \rho_g \frac{k_{mf}}{\mu_g} \frac{\partial p_{mf}}{\partial r} \right) - \frac{\alpha k_{mf} \rho_g}{\mu_g} (p_{mf} - p_f) + q_d = \rho_g \phi_{mf} C_{mf} \frac{\partial p_{mf}}{\partial t} & \text{微裂缝渗流} \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \rho_g \frac{k_f}{\mu_g} \frac{\partial p_f}{\partial r} \right) + \frac{\alpha k_{mf} \rho_g}{\mu_g} (p_{mf} - p_f) = \rho_g \phi_f C_f \frac{\partial p_f}{\partial t} & \text{割理渗流} \end{cases}$$

引入状态方程 $PV=nZRT$, 得

$$\rho_g = \frac{M}{RT} \frac{p}{Z(p)} \quad (3)$$

对于煤层气藏 μ 、 z 都是压力的函数,因此定义拟压力函数^[10-12]为

$$\psi = 2 \int \frac{p}{\mu z} dp \quad (4)$$

由此可以得到三孔双渗煤层气藏渗流数学模型

$$\begin{cases} q_d = -\rho_{sc} \frac{\partial V_d}{\partial t} = -\frac{M p_{sc}}{RT_{sc}} \frac{\partial V_d}{\partial t} & \text{基质扩散} \\ -\alpha \frac{k_{mf}}{k_f} (\psi_{mf} - \psi_f) + \frac{RT}{M} \frac{2q_d}{k_{mf}} = \frac{\mu \phi_{mf} C_{mf}}{k_{mf}} \frac{\partial \psi_{mf}}{\partial t} & \text{微裂缝渗流} \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \psi_f}{\partial r} \right) + \frac{\alpha k_{mf}}{k_f} (\psi_{mf} - \psi_f) = \frac{\mu \phi_f C_f}{k_f} \frac{\partial \psi_f}{\partial t} & \text{割理渗流} \end{cases} \quad (5)$$

式中, q_d 为气体的扩散量; p_{mf} 为微裂缝压力; p_f 为割理压力; k 为微裂缝渗透率; ϕ 为孔隙度; C 为压缩系数; μ 为黏度; ψ 为拟压力; α 为无量纲隙间流动系数; 下标 mf 和 f 分别代表微裂缝和割理。

为了方便应用和求解,将方程写为无量纲形式,定义以下无量纲参数。

无因次半径

$$r_D = \frac{r}{r_w}$$

无因次时间

$$t_D = \frac{3.6 k_f t}{r_w^2 \theta}$$

微裂缝储容比

$$\omega_{mf} = (\phi_{mf} C_{mf} \mu) / \theta$$

割理储容比

$$\omega_f = (\phi_f C_f \mu) / \theta$$

扩散系数

$$\lambda_1 = \frac{3.6 k_{mf} \tau}{\theta r_w^2}$$

窜流系数

$$\lambda_2 = \frac{\alpha k_{mf} r_w^2}{k_f}$$

无因次压力

$$\psi_D = \frac{\psi_i - \psi}{\psi_i q_D}$$

无因次产量

$$q_D = \frac{1.842 \times 10^{-3} q_{sc} p_{sc} T}{khT_{sc} \psi_i}$$

吸附时间

$$\tau = \frac{R^2}{D}$$

其中, $\theta = \phi_i c_i \mu + \phi_{mf} c_{mf} \mu + \frac{6p_{sc} T}{T_{sc} \psi_i q_D}$

由此建立煤层气藏三孔双渗无因次数学模型方程为

$$\begin{cases} \frac{1}{r_D^2} \frac{\partial}{\partial r_D} \left(r_{iD}^2 \frac{\partial c_D}{\partial r_{iD}} \right) = \lambda_1 \frac{\partial c_D}{\partial t_D} & \text{基质扩散} \\ \frac{(1 - \omega_f - \omega_{mf})}{\beta} \frac{\partial c_D}{\partial r_{iD}} + \lambda_2 (\psi_{iD} - \psi_{mD}) = \omega_m \frac{\partial \psi_{mD}}{\partial t_D} & \text{微裂缝渗流} \\ \frac{1}{r_D} \frac{\partial}{\partial r_D} \left(r_D \frac{\partial \psi_{iD}}{\partial r_D} \right) - \lambda_2 (\psi_{iD} - \psi_{mD}) = \omega_f \frac{\partial \psi_{iD}}{\partial t_D} & \text{割理渗流} \end{cases} \quad (6)$$

初始条件

$$\psi_{iD}(r_D, t_D) = \psi_{mD}(r_D, t_D) = \psi_D(r_D, t_D) \quad t_D = 0$$

内边界条件

$$\frac{\partial \psi_{iD}}{\partial r_D} (r_D = 1, t_D) = -1 \quad t_D > 0$$

外边界无限大

$$\lim_{r_D \rightarrow \infty} \psi_{iD} = \lim_{r_D \rightarrow \infty} \psi_{mD} = 0$$

外边界定压

$$\frac{\partial \psi_{iD}}{\partial r_D} \Big|_{r_D=r_{cD}} = 0 \quad t_D > 0$$

外边界封闭

$$\frac{\partial \psi_{iD}}{\partial r_D} \Big|_{r_D=r_{cD}} = 0 \quad t_D > 0$$

3 煤层气藏三孔双渗直井渗流数学模型的求解

对基质扩散方程进行拉氏变换,解得

$$\frac{\partial \bar{c}_D}{\partial r_{iD}} = \varepsilon \bar{\psi}_D (\sqrt{\lambda_1 s} \coth \sqrt{\lambda_1 s} - 1) \quad (7)$$

其中

$$\varepsilon = \frac{P_L V_L q_D \psi_i}{(p_L + \psi)(p_L + \psi_i)}$$

割理系统渗流方程经 Laplace 变换后,整理得

$$\frac{1}{r_D} \frac{\partial}{\partial r_D} \left(r_D \frac{\partial \bar{\psi}_D}{\partial r_D} \right) = f(u) \bar{\psi}_D \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} f(u) &= \omega_f u + \lambda_2 \cdot \\ & \frac{\omega_{mf} u + \frac{1 - \omega_f - \omega_{mf}}{\lambda_1} \varepsilon (\sqrt{\lambda_1 u} \coth \sqrt{\lambda_1 u} - 1)}{\lambda_2 + \omega_{mf} u + \frac{1 - \omega_f - \omega_{mf}}{\lambda_1} \varepsilon (\sqrt{\lambda_1 u} \coth \sqrt{\lambda_1 u} - 1)} \end{aligned} \quad (9)$$

方程(8)的通解为

$$\bar{\psi}_D = AK_0(\sqrt{f(u)} r_D) + BI_0(\sqrt{f(u)} r_D) \quad (10)$$

由边界条件得到系数 A 和 B,进而可求得拉氏空间拟压力分布表达式。

顶底封闭、径向无限大煤层气藏直井在拉氏空间拟压力分布表达式

$$\bar{\psi}_D(r_D, u) = \frac{1}{u \sqrt{f(u)}} \frac{K_0(\sqrt{f(u)} r_D)}{K_1(\sqrt{f(u)})} \quad (11)$$

顶底封闭、径向圆形定压煤层气藏直井在拉氏空间拟压力分布表达式

$$\begin{aligned} \bar{\psi}_D(r_D, u) &= \frac{1}{u \sqrt{f(u)}} \cdot \\ & \frac{K_0(\sqrt{f(u)} r_D) I_1(\sqrt{f(u)} R_D) - K_1(\sqrt{f(u)} R_D) I_0(\sqrt{f(u)} r_D)}{K_1(\sqrt{f(u)}) I_1(\sqrt{f(u)} R_D) + K_0(\sqrt{f(u)} R_D) I_1(\sqrt{f(u)})} \end{aligned} \quad (12)$$

顶底封闭、径向圆形封闭煤层气藏直井在拉氏空间拟压力分布表达式

$$\begin{aligned} \bar{\psi}_D(r_D, u) &= \frac{1}{u \sqrt{f(u)}} \cdot \\ & \frac{K_0(\sqrt{f(u)} r_D) I_1(\sqrt{f(u)} R_D) - K_1(\sqrt{f(u)} R_D) I_0(\sqrt{f(u)} r_D)}{K_1(\sqrt{f(u)}) I_1(\sqrt{f(u)} R_D) + K_1(\sqrt{f(u)} R_D) I_1(\sqrt{f(u)})} \end{aligned} \quad (13)$$

4 煤层气藏三孔双渗直井井底压力响应特征及影响规律

4.1 渗流阶段划分

根据井底压力拉氏空间解析解绘制了无因次压力和压力导数与无因次时间的双对数曲线(图2),以无限大外边界条件下井底压力响应特征为例,可以将其划分为6个流动阶段。

1) I段为井筒储集阶段。井底压力受煤层气藏早期井筒储集效应的影响,这一阶段的压力和压力导数在双对数曲线上重合,表现出斜率为1的直线段。

2) II段为过渡流动段。该阶段反映了井底附近的污染程度。

3) III段为第1径向流动段。该阶段反映了游离气在割理系统中的径向流动。

4) IV段为窜流段。由于微裂缝系统向割理系统的窜流,压力导数曲线出现下凹的特征。

5) V段为第2径向流动段。该阶段反映了游离气在微裂缝系统中的流动,主要受扩散系数 λ_1 和朗格缪尔吸附参数 ε 影响。

6) VI段为第3径向流动段。该阶段反映了系统之间在达到压力平衡后整个系统的径向流动。

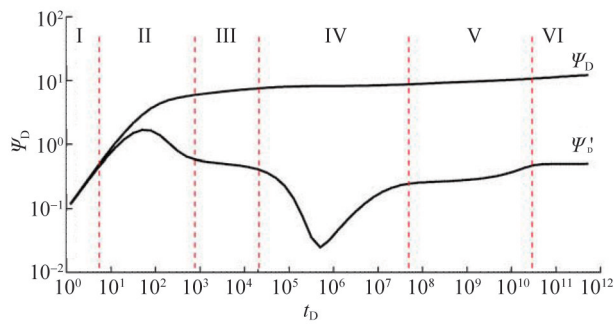


图2 三孔双渗煤层气藏直井典型曲线

Fig. 2 Typical curves of the vertical Wells in CBM reservoir

4.2 影响因素分析

图3显示了扩散系数 λ_1 对井底压力响应的影响。扩散系数主要影响气体由微裂缝向割理系统的窜流过程和第2径向流动阶段,从参数定义中可以看出 λ_1 与吸附时间 τ 成正比, τ 越小,解吸-扩散的时间就越短,系统之间的压力平衡所需时间越短。因此,扩散系数 λ_1 越小,第2径向流动段持续的时间就越短,甚至会被掩盖。此外,扩散系数 λ_1 对下凹段的宽度也有一定的影响,扩散系数 λ_1 越小,下凹段越宽。

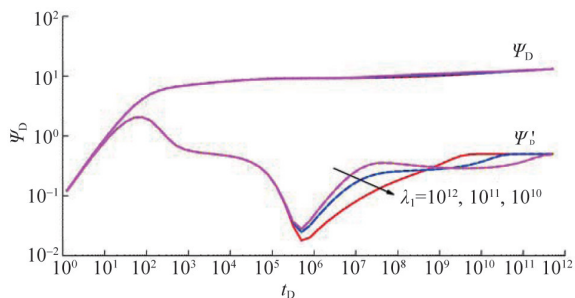


图3 扩散系数 λ_1 对三孔双渗直井井底压力影响

Fig. 3 Influence of the diffusion coefficient (λ_1) on vertical well bottom hole pressure

图4为窜流系数 λ_2 对直井井底压力动态影响关系图。从

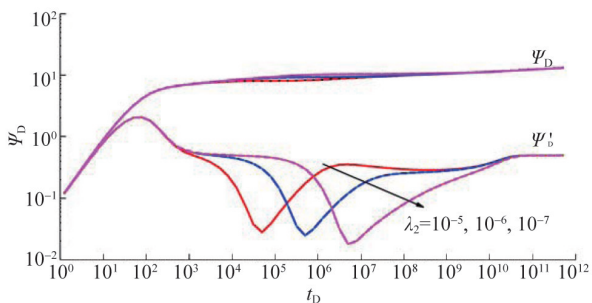


图4 窜流系数 λ_2 对三孔双渗直井井底压力影响

Fig. 4 Influence of the cross flow coefficient on the pressure of vertical well

图4可以看出窜流系数 λ_2 在图中主要影响下凹段出现时机的早晚,窜流系数 λ_2 越小,下凹段出现的越晚,这是因为 λ_2 越小,微裂缝与割理的渗透率差越大,微裂缝向割理的窜流越难,另外,下凹段出现得过早,会掩盖掉第1径向流动段,下凹段出现得过早,则会掩盖掉第2径向流动段。

图5显示了割理储容比 ω_f 对直井井底压力动态影响。割理储容比 ω_f 越大,则割理的孔隙度越大,微裂缝与割理之间的压力平衡所需时间越短。从图5可以看出,割理储容比 ω_f 对除井筒储集段和最后的径向流段以外的所有渗流阶段都会有影响。割理储容比 ω_f 越大,压力导数的驼峰越低,第1径向流段持续时间越长,窜流段的下凹段越浅,第2径向流段的压力导数值越大,当其大到一定程度后,第2径向流段会被掩盖。

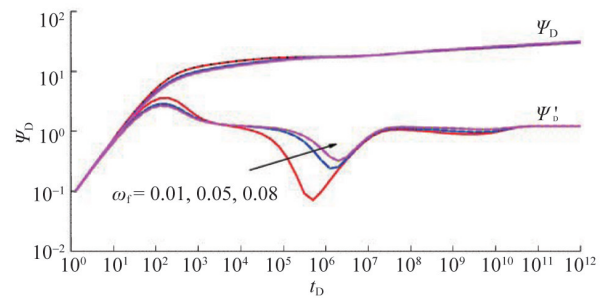


图5 储容比 ω_f 对三孔双渗直井井底压力影响

Fig. 5 Influence of the cleat storability ratio on the pressure of vertical well

图6显示了微裂缝储容比 ω_{mf} 对井底压力动态影响。储容比 ω_{mf} 越大,则微裂缝的孔隙度越大,微裂缝中的径向流过程越明显。从图6中可以看出,储容比 ω_{mf} 对窜流段下凹段的宽度和第2径向流段都会造成影响。储容比 ω_{mf} 越小,窜流段的凹子越宽,直至掩盖第2径向流动段。

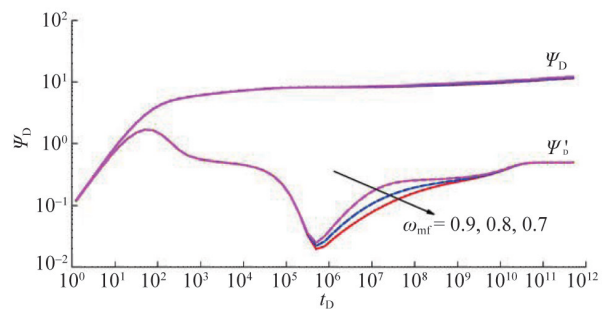


图6 储容比 ω_{mf} 对三孔双渗直井井底压力影响

Fig. 6 Influence of the micro storability ratio on the pressure of vertical well

图7显示了朗格缪尔吸附参数 ϵ 对井底压力动态影响。从图7中可以看出, ϵ 主要对微裂缝流动段有影响, ϵ 越大,流

动段无因次拟压力导数值越小,主要是因为随着 ϵ 的增大,煤岩的吸附能力随之增大,解吸-扩散现象也越明显。

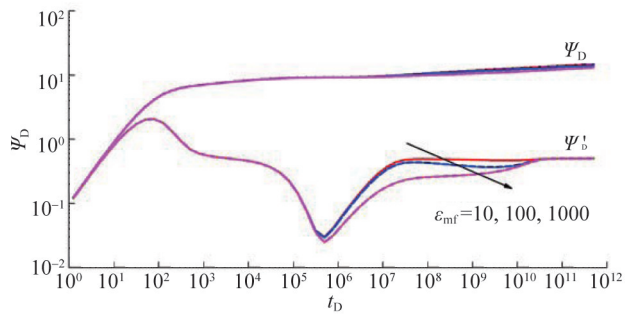


图7 朗格缪尔参数 ϵ 对三孔双渗直井井底压力影响

Fig. 7 Influence of ϵ on the pressure of vertical well

图8为不同外边界条件下井底压力响应特征图。从图8中可以看出,外边界条件只对最后一个流动段有影响:径向无限大边界压力导数尾端水平;径向定压边界压力导数尾端下掉;径向封闭边界压力导数尾端上翘。

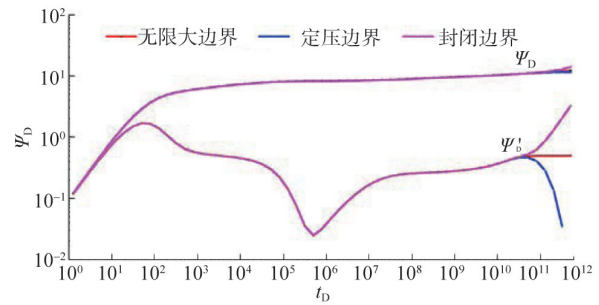


图8 不同边界下三孔双渗直井井底压力响应特征

Fig. 8 Effects of outer boundary condition on pressure response

5 实验分析

试验用煤样取自沁水盆地寺河煤矿3#煤层,选用30 g 14~40目(平均粒径0.9125 mm)的煤粉进行10 h甲烷吸附降压实验,并将实验得数据进行无因次转换,获得了双对数曲线(图9),根据本文建立模型进行拟合验证,结果显示理论曲线与实验数据拟合较好,表现出了微裂缝系统的流动特征。

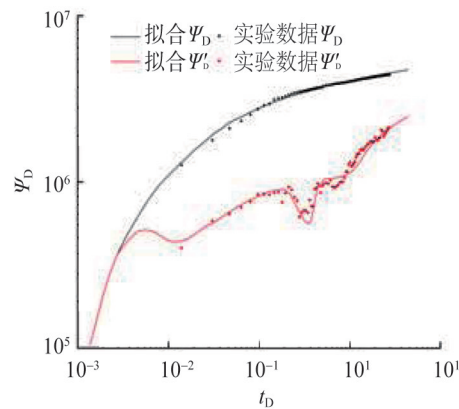
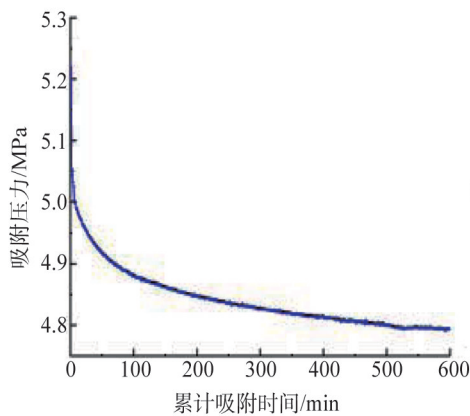


图9 吸附降压实验数据拟合

Fig. 9 Fitted curves of test data

6 结论

1) 建立了煤层气藏三孔双渗直井渗流物理、数学模型,利用点源函数理论进行求解,得到了3种外边界条件下的拉氏空间拟压力解析解。

2) 实验结果表明煤层气的流动过程确实存在微裂缝渗流,在煤层气注入压降试井解释应该采用三孔双渗物理模型。

3) 扩散系数、窜流系数、吸附参数和储容比等相关参数对不同阶段的压力传导过程有不同程度的影响,为煤层气的试井精细解释提供了理论依据。

参考文献 (References)

- [1] 石军太, 李相方, 徐兵祥, 等. 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): 1547-1557.
Shi Juntao, Li Xiangfang, Xu Bingxiang, et al. Review on desorption-diffusion-flow model of coal-bed methane[J]. Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica. 2013, 43(12): 1547-1557.
- [2] 雍进军. 基于数学最优化理论的煤层气开发选区模型建立及验证[J]. 煤炭技术, 2014, 33(4): 140-141.
Yong Jinjun. Coal bed methane development and validation of model selection based on mathematical optimization theory[J]. Coal Technology, 2014, 33(4): 140-141.

- [3] Reeves S, Pekot L. Advanced reservoir modeling in desorption-controlled reservoirs[C]. SPE Rocky Mountain Petroleum Technology Conference, Keystone, Colorado, May 21-23, 2001.
- [4] 张先敏, 同登科. 煤层气三孔双渗流动模型及压力分析[J]. 力学季刊, 2008, 29(4): 578-582.
Zhang Xianmin, Tong Dengke. Pressure transient analysis for coal seams with Triple-porosity/dual-permeability model[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2008, 29(4): 578-582.
- [5] 张先敏, 同登科. 考虑井筒储集和表皮系数的煤层气三孔双渗模型[J]. 特种油气藏, 2008, 15(2): 47-49.
Zhang Xianmin, Tong Dengke. Triple-porosity/dual-permeability model for coal bed methane considering wellbore storage and skin effects[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2008, 15(2): 47-49.
- [6] 周芊芊. 煤层气三孔双渗试井分析方法技术研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(9): 2357-2362.
Zhou Qianqian. CBM welltest analysis technology of Triple-porosity/dual-permeability[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(9): 2357-2362.
- [7] 石丽娜, 杜庆军, 同登科, 等. 煤层气窜流-扩散过程及其对开发效果的影响[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2011, 33(3): 137-140.
Shi Lina, Du Qingjun, Tong Dengke, et al. The channeling-diffusion process of coal bed methane and their influences on development effect [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2011, 33(3): 137-140.
- [8] 赵金, 张遂安. 煤层气井底流压生产动态研究[J]. 煤田地质与勘探, 2013, 41(2): 22-28.
Zhao Jin, Zhang Sui'an. Production dynamics of CBM bottom hole pressure[J]. Coal Geology & Exploration, 2013, 41(2): 22-28.
- [9] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010.
Kong Xiangyan. Advanced mechanics of fluid flow in porous media[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2010.
- [10] Xu B, Li X, Haghghi M, et al. An analytical model for desorption area in coal-bed methane production wells[J]. Fuel, 2013, 106: 766-772.
- [11] Rahman M K, Rahman M M, Joarder A H. Analytical production modeling for hydraulically fractured gas reservoirs[J]. Petroleum science and technology, 2007, 25(6): 683-704.
- [12] Pan Z, Connell L D. Modelling permeability for coal reservoirs: A review of analytical models and testing data[J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 92: 1-44.

(责任编辑 刘志远)

·学术动态·



中国科学技术协会

中国科协第102期“新观点新学说学术沙龙”聚焦新型含能材料

2015年8月10—11日,主题为“高能量密度材料的新原理与新结构”的中国科协第102期“新观点新学说学术沙龙”在北京举行。中国科学院院士王泽山、中国科学院上海有机化学所研究员吕龙、北京理工大学教授庞思平担任领衔科学家,来自高等学校、科研院所和企业的70余位专家与会交流。

高能量密度材料是一个多学科交叉研究领域。近年来,高能量密度材料的概念和体系不断发展,从传统的CHON体系拓展到多氮、全氮化合物、含氟化合物、笼型化合物、离子液体、复合(超分子)化合物等新体系。与会专家围绕新型含能材料的结构和储能原理、新型含能材料在复合体系中的释能作用与应用、新型含能材料的合成与制备方法3个中心议题进行了观点阐述和争论互动。

对高能量密度材料发展,与会专家提出:

1) 高能量密度材料的发展已由CHON系化合物向全氮、金属氢、纳米复合含能材料、含能离子液体和含氟硼硅炸药等新体系拓展,下一步研究应兼顾前沿探索和现实需求,在发展应用前景明确的含能材料的同时加强全氮和金属氢等基础理论研究。

2) 传统的含能材料合成是通过化学合成方法得到的,新型含能材料的合成制备难度增大,应该加强高能键形成及高能物质化学合成方法学基础研究,并加强与其他学科的交叉,如通过电子轰击、高压等物理方法制备氮原子簇、金属氢等,以及发展化学/物理等复合合成方法。

3) 高能量密度材料对于国防安全和国民经济建设具有重要作用和重大意义,其在混合炸药、发射药、固体推进剂和液体推进剂中的使用既有共性,也有各自的特点,发展新型高能量密度材料既要考虑通用性,也要考虑专用性和选择性,以更好满足具体的使用需求。

详见中国科协网<http://www.cast.org.cn/n35081/n35533/n38575/16606839.html>。