

# Pressure Dynamic Analysis of Stress-Sensitive Shale Gas Reservoir

Ziyu Zhao, Ermeng Zhao

College of Petroleum Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing Heilongjiang  
Email: 18745941136@163.com

Received: Aug. 1<sup>st</sup>, 2016; accepted: Aug. 19<sup>th</sup>, 2016; published: Aug. 22<sup>nd</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.  
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

Based on the theory of Langmuir isothermal adsorption, the mathematical model of double media seepage in fractured shale gas reservoirs which considers stress sensitivity under different boundary conditions is established in this paper. Taking the strong nonlinearity of the model into account, desorption effect can be considered as the increase of isothermal compressibility of matrix during the resolution to decrease the degree of nonlinearity of the model. The analytical solution of the mathematical model in Laplace space is obtained by means of Laplace transformation and perturbation transformation. Finally, pressure transient curves are drawn with the aid of computer programs, and its characteristics have been analyzed, and parameter sensitivity analysis for the contributing factors affecting the dynamic curve of pressure also has been done. The results can provide scientific basis for well test analysis of shale gas reservoirs.

## Keywords

Shale Gas, Pressure Behavior, Stress Sensitivity

---

# 应力敏感页岩气藏压力动态分析

赵梓瑜, 赵二猛

东北石油大学石油工程学院, 黑龙江 大庆  
Email: 18745941136@163.com

收稿日期: 2016年8月1日; 录用日期: 2016年8月19日; 发布日期: 2016年8月22日

文章引用: 赵梓瑜, 赵二猛. 应力敏感页岩气藏压力动态分析[J]. 自然科学, 2016, 4(3): 327-332.  
<http://dx.doi.org/10.12677/ojns.2016.43038>

## 摘要

本文在Langmuir等温吸附理论的基础上,建立了考虑应力敏感作用的裂缝性页岩气藏在不同边界条件下的双重介质渗流数学模型。考虑到模型存在很强的非线性,在求解过程中将解吸作用考虑成基质等温压缩系数的增加,降低了模型的非线性程度。通过Laplace变换、摄动变换最终得到了数学模型在Laplace空间的解析解,最后通过编程绘制了压力动态曲线,分析了压力动态曲线的特征,并对影响压力动态曲线的因素进行了参数敏感性分析,研究结果可为页岩气藏的试井分析提供科学依据。

## 关键词

页岩气, 压力动态, 应力敏感

## 1. 引言

页岩气是新兴的能源资源,对于页岩气的渗流机理及压力动态分析尤为重要。国内外学者围绕页岩气的渗流机理做了很多研究工作[1]-[3],John Lee等(1990)将Langmuir等温吸附定律应用在Warren & Root提出的经典双重介质模型中,得到了考虑吸附的双重介质模型并对其求解[4];King(1993)指出页岩气的吸附解吸、扩散和渗流为一个相互影响相互制约的整体过程,扩散模型认为扩散不可忽略[5];Ozkan等(2009)建立了非达西渗流的扩散机制的基岩—裂缝双重介质模型[6]。段永刚(2010)等人研究了页岩气在基质和裂缝中的单相流动[7]。尹虎(2012)等人建立了考虑启动压力梯度的双孔介质页岩气藏数学模型,应用有限差分法得到了数值模型,编制相应程序对数值模型求解,并且分析了启动压力梯度对气井井底压力变化的影响[8]。但是,页岩气在开发过程中存在应力敏感作用,势必会对页岩气藏的压力动态及气井产能造成不可忽略的影响,而以往的研究基本上都认为渗透率是不变的。为此,本文建立了考虑应力敏感作用的裂缝性页岩气藏在不同边界条件下的双重介质渗流数学模型,并通过Laplace变换和Stehfest数值反演技术得到了页岩气藏的拟压力及拟压力导数公式。最后编制计算机程序绘制了相关试井曲线并对影响压力动态的几种因素进行了分析。

## 2. 数学模型

### 2.1. 数学模型的建立

根据Langmuir方程:

$$V_E = \frac{V_L p}{p_L + p} \quad (1)$$

式中 $V_E$ 为等温吸附量,  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ;  $V_L$ 为Langmuir体积,  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ;  $p_L$ 为Langmuir压力, MPa;  $p$ 为气体压力, MPa。

由Pedrosa [9]等提出的指数形式渗透率变化式:

$$K = K_i e^{-\gamma(\psi_i - \psi)} \quad (2)$$

式中 $K$ 为地层渗透率,  $\text{m}^2$ ;  $K_i$ 为原始地层渗透率,  $\text{m}^2$ ;  $\psi$ 为气藏拟压力,  $\text{Pa}^2/(\text{Pa}\cdot\text{s})$ ;  $\psi_i$ 为原始气藏拟压力,  $\text{Pa}^2/(\text{Pa}\cdot\text{s})$ ;  $\gamma$ 为渗透率模数,  $(\text{Pa}\cdot\text{s})/\text{Pa}^2$ 。

并定义如下无因次变量: 无因次拟压力 $\psi_{jD} = \frac{2\pi K_i h}{q_{sc} \mu B_g} (\psi_i - \psi_j)$ , 无因次时间 $t_{D} = \frac{K_i t}{(\phi_f C_{if} + \phi_m C_{tm}) \mu r_w^2}$ ,

弹性储能比  $\omega = \frac{\phi_f C_{if}}{\phi_f C_{if} + \phi_m C_{im}}$ , 窜流系数  $\lambda = \alpha \frac{K_m}{K_{fi}} r_w^2$ , 无因次距离  $r_D = \frac{r}{r_w}$ , 无因次应力模数  $\gamma_D = \frac{q_{sc} \mu B_g}{2\pi K_{fi} h} \gamma$ 。

可得无因次的渗流数学模型:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \psi_{ID}}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial \psi_{ID}}{\partial r_D} - \gamma_D \left( \frac{\partial \psi_{ID}}{\partial r_D} \right)^2 = e^{\gamma_D \psi_{ID}} \left[ \omega \frac{\partial \psi_{ID}}{\partial t_D} + (1-\omega) \frac{\partial \psi_{mD}}{\partial t_D} \right] \\ \lambda (\psi_{ID} - \psi_{mD}) = (1-\omega) \frac{\partial \psi_{mD}}{\partial t_D} \\ \psi_{mD}(r_D, 0) = \psi_{ID}(r_D, 0) = 0 \\ \left. r_D \frac{\partial \psi_{ID}}{\partial r_D} \right|_{r_D=1} = -e^{\gamma_D \psi_{ID}} \Big|_{r_D=1} \\ \psi_{ID}(\infty, t_D) = \psi_{mD}(\infty, t_D) = 0 \quad (a) \\ \left. \frac{\partial \psi_{ID}}{\partial r_D} \right|_{r_D=r_{eD}} = \left. \frac{\partial \psi_{mD}}{\partial r_D} \right|_{r_D=r_{eD}} = 0 \quad (b) \\ \psi_{ID} \Big|_{r_D=r_{eD}} = \psi_{mD} \Big|_{r_D=r_{eD}} = 0 \quad (c) \end{cases} \quad (3)$$

式中(a)、(b)、(c)分别对应无限大、圆形封闭以及圆形定压边界三种情况。

## 2.2. 数学模型的求解

该数学模型是一个强非线性方程组, 无法直接求解, 为了简化方程组, 引入如下变换:

$$\psi_{jD}(r_D, t_D) = -\frac{1}{\gamma_D} \ln [1 - \gamma_D \eta_{jD}(r_D, t_D)] \quad (j = m, f) \quad (4)$$

关于  $\gamma_D$  的正则扰动:

$$\eta = \eta_0 + \gamma_D \eta_1 + \gamma_D^2 \eta_2 + \dots \quad (0 < \gamma_D < 1) \quad (5)$$

根据摄动技术可得到其近似解。根据同登科等人[10]的研究, 当  $\gamma_D$  很小时, 模拟压力敏感地层的动态特征使用零阶逼近即可。经过 Laplace 变换后得到 Laplace 空间中的解所满足的方程组:

$$\begin{cases} \frac{d^2 \bar{\eta}_{0fD}}{dr_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{d \bar{\eta}_{0fD}}{dr_D} - sf(s) \bar{\eta}_{0fD} = 0 \\ \bar{\eta}_{0mD} = \frac{\lambda}{(1-\omega)s + \lambda} \bar{\eta}_{0fD} \\ \left. r_D \frac{\partial \bar{\eta}_{0fD}}{\partial r_D} \right|_{r_D=1} = -\frac{1}{s} \\ \bar{\eta}_{0fD}(\infty, s) = \bar{\eta}_{0mD}(\infty, s) = 0 \quad (a) \\ \left. \frac{\partial \bar{\eta}_{0fD}}{\partial r_D} \right|_{r_D=r_{eD}} = \left. \frac{\partial \bar{\eta}_{0mD}}{\partial r_D} \right|_{r_D=r_{eD}} = 0 \quad (b) \\ \bar{\eta}_{0fD} \Big|_{r_D=r_{eD}} = \bar{\eta}_{0mD} \Big|_{r_D=r_{eD}} = 0 \quad (c) \end{cases} \quad (6)$$

其中:  $f(s) = \frac{\omega(1-\omega)s + \lambda}{(1-\omega)s + \lambda}$ 。

上述方程的形式与常规气藏类似, 可以得到 Laplace 空间中不同边界条件下的解。

1) 无限大外边界

因此通解为

$$\bar{\eta}_{0\text{D}} = \frac{K_0(r_{\text{D}}\sqrt{sf(s)})}{s\sqrt{sf(s)}K_1(\sqrt{sf(s)})} \quad (7)$$

2) 圆形封闭边界

因此其通解为

$$\bar{\eta}_{0\text{D}} = \frac{K_1(r_{\text{eD}}\sqrt{sf(s)})I_0(r_{\text{D}}\sqrt{sf(s)}) + I_1(r_{\text{eD}}\sqrt{sf(s)})K_0(r_{\text{D}}\sqrt{sf(s)})}{s\sqrt{sf(s)}\left[K_1(\sqrt{sf(s)})I_1(r_{\text{eD}}\sqrt{sf(s)}) - K_1(r_{\text{eD}}\sqrt{sf(s)})I_1(\sqrt{sf(s)})\right]} \quad (8)$$

3) 圆形定压外边界:

因此其通解为

$$\bar{\eta}_{0\text{D}} = \frac{I_0(r_{\text{eD}}\sqrt{sf(s)})K_0(r_{\text{D}}\sqrt{sf(s)}) - K_0(r_{\text{eD}}\sqrt{sf(s)})I_0(r_{\text{D}}\sqrt{sf(s)})}{s\sqrt{sf(s)}\left[K_0(r_{\text{eD}}\sqrt{sf(s)})I_1(\sqrt{sf(s)}) + K_1(\sqrt{sf(s)})I_0(r_{\text{eD}}\sqrt{sf(s)})\right]} \quad (9)$$

令  $r_{\text{D}} = 1$  便可得到井底压力解  $\eta_{0\text{wD}}$ 。如果要考虑井筒存储系数和表皮效应对压力以及产能的影响, 可以通过以下关系式对井底压力解进行修正:

$$\bar{\eta}_{0\text{wD}} = \frac{s\bar{\eta}_{0\text{D}} + S}{s[1 + C_{\text{D}}s(s\bar{\eta}_{0\text{D}} + S)]} \quad (10)$$

由于上面求得的井底拟压力是拉普拉斯空间的, 所以要根据拉普拉斯空间的反演公式进行反演, 得到真实空间中  $\eta_{0\text{wD}}$  与  $\eta'_{0\text{wD}}$  的解之后可得到井底附近拟压力与拟压力导数值。

### 3. 页岩气压力动态影响因素分析

#### 3.1. 应力模数的影响

如图 1, 考虑应力敏感后, 压力导数曲线从井筒储集阶段之后的过渡阶段便开始出现上移。尤其在后期阶段, 无因次渗透率模数  $\gamma_{\text{D}}$  越大, 曲线上翘现象越明显, 表现出与封闭边界类似的特征。因此可以得出结论, 在页岩气藏中, 应力敏感作用的存在会使得裂缝性气藏压力下降速度变快, 即使油藏范围很大, 单井的控制范围也有限。

#### 3.2. 外边界类型的影响

由图 2 可知, 无限大地层时, 边界的影响非常小, 因此压力曲线接近于一条直线, 压力导数曲线为一条水平线。外边界为封闭边界时, 当封闭边界影响到井筒以后, 压力曲线末端压力趋近 45°线而压力导数为 45°线。定压边界时, 后期流动将达到稳定流动阶段, 因此曲线末端为压力水平线而压力导数急剧下滑。

#### 3.3. Langmuir 体积的影响

通过(图 3)曲线对比可以得到如下结论: 由于吸附气主要存在于基质系统中, 在压力导数曲线上表现为过渡段的“凹子”变深, 随着 Langmuir 体积的不断增大, 气藏中的吸附气的解吸量增大, 补偿井底压力损失明显, 井底压力降低缓慢。

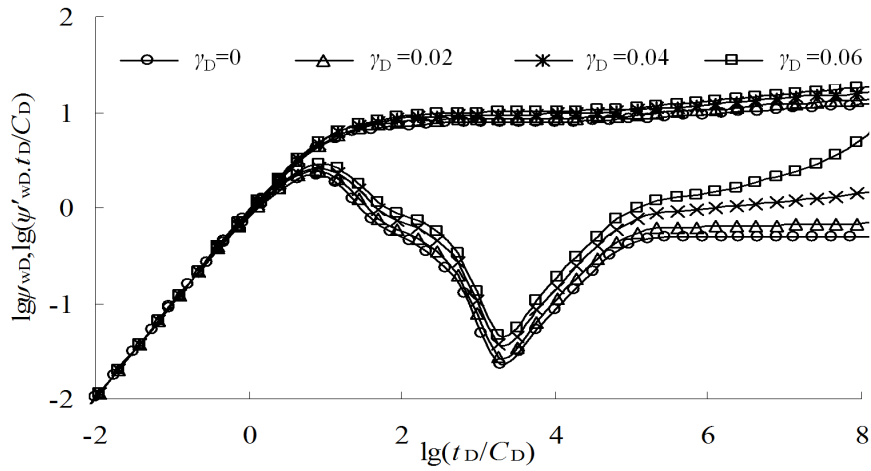


Figure 1. Dynamic curve of pressure under different permeability modulus  
图 1. 不同渗透率模数下压力动态曲线

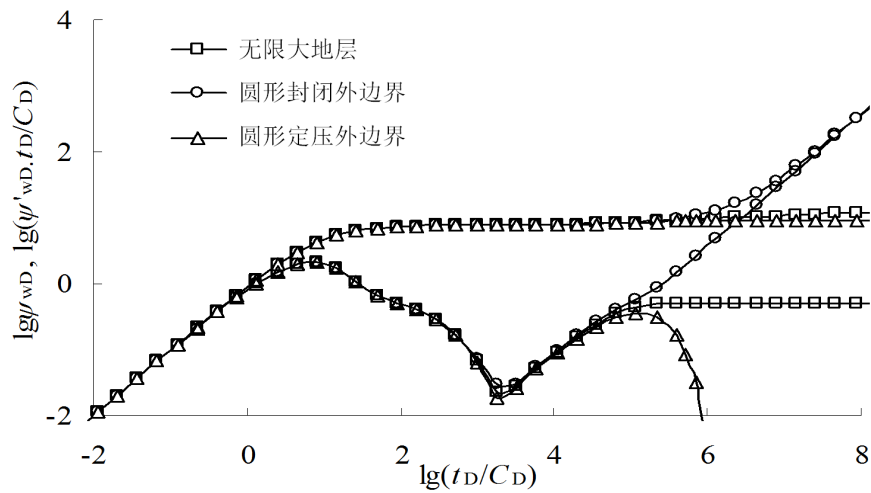


Figure 2. Dynamic curve of pressure of shale gas reservoirs with different boundary types  
图 2. 不同边界类型页岩气藏压力动态曲线

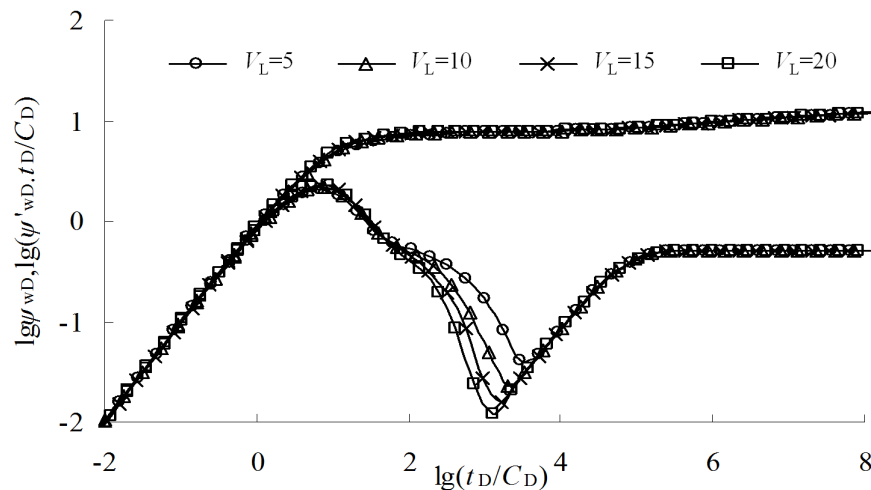


Figure 3. Dynamic curve of pressure under different Langmuir volume  
图 3. 不同 Langmuir 体积下压力动态曲线

## 4. 结论

- 1) 建立并求解了考虑应力敏感作用的裂缝性页岩气藏在不同边界条件下的双重介质渗流数学模型。
- 2) 页岩气藏应力敏感作用的存在使得气藏压力降落速度变快, 并使得单井控制程度有限, 所以对于应力敏感性较强的储层, 要合理控制压差, 以防对储层造成损害。
- 3) 不同的外边界条件前期压力动态曲线是一样的, 只是在流动阶段后期有不同的表现。供给半径的大小只影响外边界反映阶段, 供给半径越大, 探测到外边界的时间越晚。
- 4) 随着 Langmuir 体积的不断增大, 在压力导数曲线上表现为过渡段的“凹子”变深, 补偿井底压力损失明显, 井底压力降低缓慢。

## 参考文献 (References)

- [1] 段永刚, 魏明强, 李建秋, 唐艳. 页岩气藏渗流机理及压裂井产能评价[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(4): 62-66.
- [2] 李建秋, 曹建红, 段永刚, 何玮. 页岩气井渗流机理及产能递减分析[J]. 天然气勘探与开发, 2011, (2): 34-37, 81.
- [3] 于荣泽, 张晓伟, 卞亚南, 李阳, 郝明祥. 页岩气藏流动机理与产能影响因素分析[J]. 天然气工业, 2012, 32(9): 10-15, 126.
- [4] John, L.W., Ted, W.A. and Gatens III, J.M. (1990) An Analytical Model for History Matching Naturally Fractured Reservoir Production Data. SPE 18856.
- [5] King, G.R. (1993) Material-Balance Techniques for Coal-Seam and Devonian Shale Gas Reservoirs with Limited Water Influx. *Reservoir Engineering*, 8, 67-72. <http://dx.doi.org/10.2118/20730-PA>
- [6] Ozkan, E. and Raghavan, R. (2009) Modeling of Fluid Transfer from Shale Matrix to Fracture Network. SPE 134830-MS.
- [7] 段永刚, 李建秋. 页岩气无限导流压裂井压力动态分析[J]. 天然气工业, 2010, 30(3): 26-29, 116.
- [8] 尹虎, 王新海, 刘洪, 等. 考虑启动压力梯度的页岩气藏数值模拟[J]. 天然气与石油, 2012, 30(4): 43-45.
- [9] Pedrosa, Jr. (1986) Pressure Transient Response in Stress-Sensitive Formations. SPE 15115.
- [10] 同登科, 周德华, 陈钦雷. 具有应力敏感于地层渗透率的分形油气藏渗流问题的近似解吸研究[J]. 石油勘探与开发, 1999, 26(3): 53-57.

### 期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>