

# 页岩气无限导流压裂井压力动态分析

段永刚 李建秋

“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室·西南石油大学

段永刚等.页岩气无限导流压裂井压力动态分析.天然气工业,2010,30(3):26-29.

**摘 要** 我国页岩气可采资源量巨大,但页岩气藏大多数井的自然产能很低或无自然产能,开发过程中要实施储层压裂改造才具备生产能力。为此,在常规气藏压裂研究的基础上,针对页岩气产出过程中的降压、解析、扩散、渗流等特点,从页岩气渗流机理入手,以点源函数方法为基础,应用菲克拟稳态扩散模型,研究了页岩气在基质和裂缝中的单相流动,建立了页岩气藏无限导流压裂井评价模型,讨论了吸附系数、裂缝储容系数和窜流系数等参数对压力动态的影响,分析了页岩气藏压裂井动态特征及部分参数估计方法,解决了无法确定页岩气藏动态参数的难题,首次绘制了页岩气藏压裂井典型曲线。研究成果可为页岩气藏的合理高效开发提供技术支持。

**关键词** 页岩气 压裂井 无限导流 吸附系数 解析 扩散 数学模型

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2010.03.006

页岩气是以吸附、游离或溶解状态赋存于泥页岩中的非常规天然气,与常规天然气藏最显著的区别在于它是一个“自生、自储”系统<sup>[1]</sup>。其分布广、开发寿命长、清洁环保,可以作为常规天然气的替代能源,目前国内在页岩气成藏机理<sup>[2-7]</sup>、资源评价<sup>[8-10]</sup>等方面取得了巨大进步,但在页岩气藏渗流机理、压力动态分析等方向的研究仍处于一片空白。

页岩气藏储层是典型的低孔、超低渗储层<sup>[11]</sup>,一般需要实施压裂改造才具备生产能力,压裂效果是评价页岩气藏压裂井的重要指标。笔者从点源函数理论出发,运用 Laplace 变换方法建立了页岩气无限导流压裂井评价模型,并通过 Stehfest 数值反演绘制了适合于页岩气的压裂井图版。

## 1 页岩气渗流模型

页岩储层是由天然裂缝或人工诱导裂缝和基质构成的典型双重介质系统,裂缝是主要的流通通道,基质是页岩气的主要储集空间。页岩气在页岩中有其特殊的赋存运移机理,与常规气藏最主要的区别在于页岩气以吸附状态赋存于页岩的基质孔隙中,其流入生产井筒需要经历 3 个过程(图 1)<sup>[12]</sup>:

1)在钻井、完井降压的作用下,裂缝系统中的页岩气流向生产井筒并且基质系统中的页岩气在基质表面进行解析(图 1-a)。

2)在浓度差的作用下,页岩气由基质系统向裂缝系统进行扩散(图 1-b)。

3)在流动势的作用下,页岩气通过裂缝系统流向生产井筒(图 1-c)。

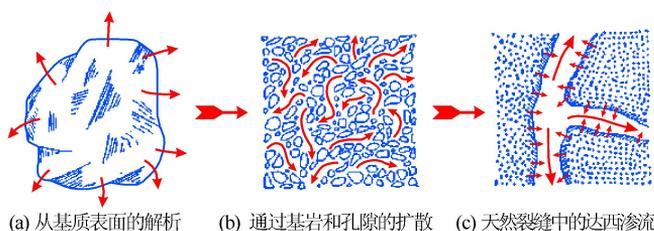


图 1 页岩气渗流过程图

### 1.1 假设条件

- 1)气藏为均匀分布的双重介质储层。
- 2)气藏各点的温度保持不变,即渗流过程为等温渗流。
- 3)裂缝中的流动服从低速非达西渗流规律。
- 4)单相气体渗流,忽略重力、毛细管力影响。

### 1.2 数学模型

根据地层单元体中物质守恒原理,运用 Langmuir 等温吸附方程<sup>[13]</sup>、菲克第一定理<sup>[14-15]</sup>以及 Ozkan 和 Raghavan<sup>[16-18]</sup>点源函数方法,建立页岩气拟稳态解析数学模型为:

$$\frac{1}{r_D^2} \frac{\partial}{\partial r_D} \left( r_D^2 \frac{\partial p_D}{\partial r_D} \right) = \omega \frac{\partial p_D}{\partial t_D} + (1 - \omega) \frac{\partial V_D}{\partial t_D} \quad (1)$$

$$\frac{\partial V_D}{\partial t_D} = \frac{1}{\lambda} (V_E - V_D - V_{ic}) \quad (2)$$

定义以下无因次变量。

气体拟压力:

$$\psi(p) = 2 \int_0^p \frac{p'}{\mu Z} dp'$$

无因次时间:

$$t_D = \frac{3.6 K t}{\Lambda r_w^2}$$

综合系数:

$$\Lambda = \frac{q_{sc} \mu}{1.842 \times 10^{-3} q_{sc} T_{sc} B_{gi} p_i} + \frac{K T Z_i h p_{sc} \mu}{1.842 \times 10^{-3} q_{sc} T_{sc} B_{gi} p_i}$$

储容系数:

$$\omega = \frac{q_{sc} \mu}{\Lambda}$$

串流系数:

$$\lambda = \frac{3.6 K \tau}{\Lambda r_w^2} \quad \tau = \frac{R^2}{D \pi^2}$$

裂缝的无因次半径:

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

基质的无因次半径:

$$r_{Dm} = \frac{r_m}{R}$$

无因次浓度:

$$V_D = V - V_{ic}$$

拟压力下,Langmuir 等温吸附公式为:

$$V = \frac{V_L \psi}{\psi + \psi_0}$$

吸附系数:

$$\sigma = \frac{1.842 \times 10^{-3} q_{sc} B_i \mu}{K h} \frac{\psi_0}{(\psi + \psi_0)(\psi + \psi_0)}$$

对式(1)、(2)进行 Laplace 变换,并假设吸附系数为定值,可得页岩气藏裂缝渗流与基质扩散的耦合方程为:

$$\frac{1}{r_D^2} \frac{d}{d r_D} \left( r_D^2 \frac{d \bar{p}_D}{d r_D} \right) - s f(s) \bar{p}_D = 0 \quad (3)$$

式中  $f(s)$  为串流函数,  $f(s) = \omega + \frac{(1-\omega)\sigma}{s+1/\lambda}$ 。

带入点源函数内外边界条件求解方程(3),并通过

叠加原理整理得:

$$\bar{\Delta \psi}(p) = \frac{\tilde{q} \mu}{4\pi K L} \frac{\exp(-\sqrt{u} \Omega)}{\Omega} \quad (4)$$

其中:

$$\Omega = \sqrt{(x_D - x_{wD})^2 + (y_D - y_{wD})^2 + (z_D - z_{wD})^2}$$

$$u = s f(s)$$

$$\tilde{q} = \tilde{q}/s$$

式(4)即为页岩气藏连续点源  $(x_{wD}, y_{wD}, z_{wD})$  压力分布的 Laplace 空间解。

## 2 页岩气藏压裂井模型

### 2.1 物理模型

无限大页岩气藏中 1 口垂直压裂井的物理模型如图 2 所示,假设条件为:

- 1) 储层顶部和底部为封闭边界,储层在水平方向无限延伸。
- 2) 不考虑各向异性,储层在各个方向渗透率相同。
- 3) 垂直裂缝长度为  $2L$ ,高度为  $h$ ,井中心在  $x_w, y_w, z_w$  处。
- 4) 忽略重力和毛细管力的影响。

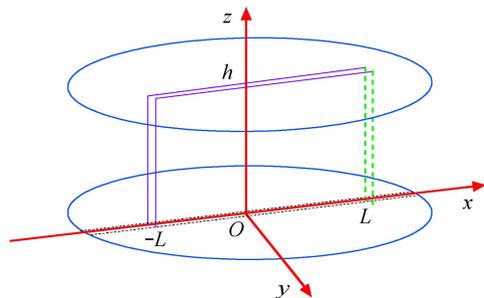


图 2 无限大储层垂直裂缝井的物理模型图

### 2.2 压力响应的求取

考虑顶底封闭边界,利用镜像反映法可以将 1 个点源通过顶底边界镜像反映成无数个相应的点源相叠加,使用泊松累加公式简化计算即可求得页岩气无限导流压裂井的压力响应为:

$$\bar{\psi}(p) = \frac{1}{2s} \int_{-1}^1 K_0[\sqrt{s} \sqrt{(x_D - \alpha)^2 + y_D^2}] d\alpha \quad (5)$$

采用 Everdingen 和 Hurst 方法<sup>[19]</sup>,考虑井筒储集和表皮效应的影响,即得考虑井筒储集和表皮效应的页岩气无限导流压裂井的压力响应解为:

$$\bar{\psi}_D = \frac{\bar{\psi} + S_{skin}}{1 + s^2 C_D (\bar{\psi} + S_{skin})} \quad (6)$$

式中  $\bar{\psi}$  为不考虑井筒储集和表皮效应的 Laplace 空间无因次拟压力解;  $S_{skin}$  为表皮系数,  $C_D$  是无因次井筒储集系数。

### 3 典型曲线分析

运用 Stehfest 数值反演<sup>[20]</sup>对式(6)进行数值反演,并通过计算机编程即可得页岩气藏压裂井的双对数典型曲线如图3~5所示。井筒压力动态有以下几个阶段:

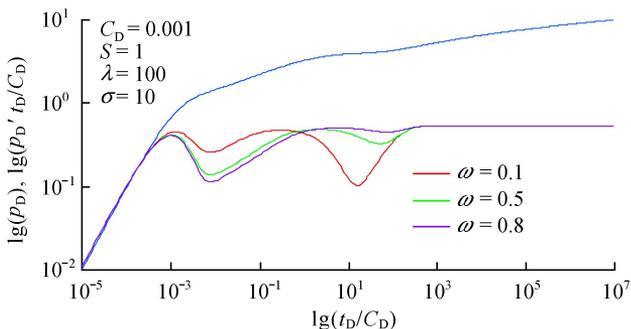


图3 储容系数对典型曲线的影响图

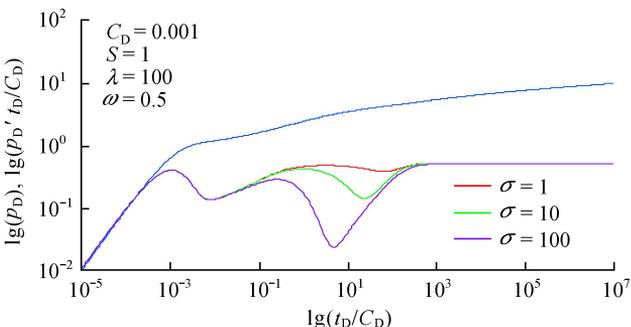


图4 吸附系数对典型曲线的影响图

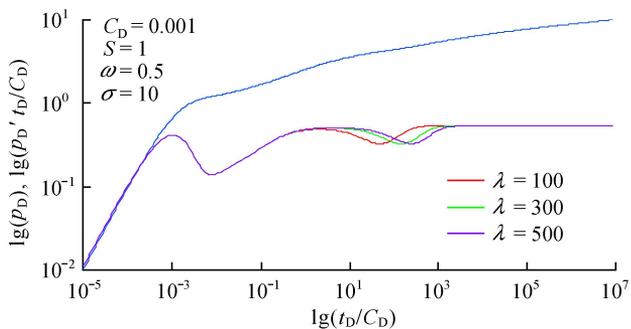


图5 串流系数对典型曲线的影响图

- 1)井筒储集阶段,无因次压力和压力导数曲线沿45°线变化。
- 2)裂缝系统线性流阶段,无因次压力和压力导数曲线为平行线变化。
- 3)过渡到裂缝系统的径向流阶段,无因次压力导数为0.5水平线变化。
- 4)基质系统向裂缝系统的窜流阶段,无因次压力

导数曲线显下凹变化。

5)整个双重介质系统的径向流阶段,无因次压力导数为0.5水平线变化。

图3表明储容系数( $\omega$ )决定页岩气压力导数曲线过渡段下凹的宽度和深度; $\omega$ 越小,过渡段越长,凹子就越宽并且越深。

图4表明吸附系数( $\sigma$ )决定页岩气压力导数曲线过渡段下凹深度及出现时间; $\sigma$ 越大,过渡段越长,凹子就越宽并且越深,过渡段出现的时间也就越早,串流阶段出现的时间也越早。

图5表明串流系数( $\lambda$ )决定页岩气压力导数曲线过渡段出现的早晚; $\lambda$ 越小,凹子越靠左边,过渡段出现时间越早,基质系统向裂缝系统的串流出现时间越早。

### 4 参数估计

根据页岩气压裂井双对数典型曲线及常规试井分析方法,可以对页岩气压裂井的部分参数进行估计。

#### 4.1 井筒储集阶段

压力和压力导数出现斜率为1的直线,通过  $p_{wD} = \frac{t_D}{C_D}$  可以估计C值。

#### 4.2 裂缝线性流阶段

无因次压力和压力导数曲线为平行线变化,通过关系式  $p_{wD} = \sqrt{\pi t_D}$  可以估计裂缝半长。

#### 4.3 径向流阶段

无因次压力和压力导数曲线为0.5线,通过关系式  $\frac{d p_{wD}}{d t_D} t_D = 0.5$  可以估计地层渗透率。

### 5 结论及建议

- 1)页岩气在页岩中有其特殊的赋存运移机理,页岩气流入生产井筒需要经历解析、扩散、渗流3个过程,在考虑扩散影响的情况下,以点源函数为基础建立了页岩气藏压裂井渗流数学模型。
- 2)分别比较了储容系数,吸附系数及串流系数对页岩气藏压裂井双对数曲线的影响。储容系数决定过渡段下凹的宽度和深度;吸附系数决定过渡段下凹深度及出现时间;串流系数决定了过渡段出现的早晚。
- 3)以常规试井分析方法为基础,讨论了井筒储集系数、裂缝半长、地层渗透率等参数的估计方法。
- 4)我国页岩气的开采具有很大的发展前景,加强页岩气渗流机理及压力动态方法研究能为页岩气藏开发提供可靠数据,从而加快我国页岩气勘探开发步伐。

符 号 说 明

$m$  表示裂缝无因次半径;  $p_D$  表示无因次压力;  $\omega$  表示储容系数;  $V_D$  表示无因次浓度;  $t_D$  表示无因次时间;  $\lambda$  表示窜流系数;  $V_E$  表示平衡状态下气体浓度,  $m^3/m^3$ ;  $V_{ic}$  表示初始条件下页岩气浓度,  $m^3/m^3$ ;  $\psi$  表示气体拟压力;  $p$  表示气体压力, MPa;  $Z$  表示气体偏差因子, 无量纲量;  $\mu$  表示气体粘度,  $mPa \cdot s$ ;  $K$  表示渗透率, mD;  $t$  表示时间, h;  $\Delta$  表示综合系数;  $r_w$  表示井半径, m;  $r$  表示径向距离, m;  $\phi$  表示孔隙度, 无量纲量;  $c_g$  表示气体压缩系数,  $MPa^{-1}$ ;  $T$  表示气体绝对温度, K;  $z_i$  表示气体偏差系数;  $h$  表示储层有效厚度, m;  $T_{sc}$  表示标准条件下温度, K;  $p_{sc}$  表示标准条件下压力, MPa;  $q_{sc}$  表示地面标准条件下的产量,  $10^4 m^3/d$ ;  $B_{gi}$  表示气体体积系数,  $m^3/m^3$ ;  $p_i$  表示原始地层压力, MPa;  $\tau$  表示页岩气吸附时间;  $R$  表示球形基质半径, m;  $D$  表示气体扩散系数,  $m^2/d$ ;  $\psi_L$  表示兰格缪尔拟压力, MPa;  $V_L$  表示兰格缪尔体积,  $m^3/t$ ;  $\sigma$  表示吸附系数;  $s$  表示 Laplace 变量;  $f(s)$  表示串流函数;  $\tilde{q}$  表示点源瞬间移走流体的有限体积,  $m^3$ ;  $x_D, y_D, z_D$  表示无因次空间坐标变量;  $x_{wD}, y_{wD}, z_{wD}$  表示空间任意点无因次坐标;  $K_0$  表示 0 阶修正二类贝塞尔函数;  $\bar{\psi}$  表示 Laplace 空间无因次拟压力解;  $S_{kin}$  表示表皮系数;  $C_D$  表示无因次井筒储集系数。

参 考 文 献

[1] 张金川,徐波,聂海宽,等.中国页岩气资源勘探潜力[J].天然气工业,2008,28(6):136-140.

[2] 《页岩气地质与勘探开发实践丛书》编委会.北美地区页岩气勘探开发新进展[M].北京:石油工业出版社,2009.

[3] 叶军,曾华盛.川西须家河组泥页岩气成藏条件与勘探潜力[J].天然气工业,2008,28(12):18-25.

[4] 张金川,聂海宽,徐波,等.四川盆地页岩气成藏地质条件[J].天然气工业,2008,28(2):151-156.

[5] 张金川,金之钧,袁明生.页岩气成藏机理和分布[J].天然气工业,2004,24(7):15-18.

[6] 张利萍,潘仁芳.页岩气的主要成藏要素与气储改造[J].中国石油勘探,2009,14(3):20-23.

[7] 蒲泊伶.四川盆地页岩气成藏条件分析[D].东营:中国石油大学,2008.

[8] 董大忠,程克明,王世谦,等.页岩气资源评价方法及其在四川盆地的应用[J].天然气工业,2009,29(5):33-39.

[9] 朱华,姜文利,边瑞康,等.页岩气资源评价方法体系及其应用——以川西坳陷为例[J].天然气工业,2009,29(12):130-134.

[10] 李艳丽.页岩气储量计算方法探讨[J].天然气地球科学,2009,20(3):466-470.

[11] 聂海宽,张金川,张培先,等.福特沃斯盆地 Barnett 页岩气藏特征及启示[J].地质科技情报,2009,28(2):87-93.

[12] KING G R. Material balance techniques for coal seam and Devonian shale gas reservoirs [C]// SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 23-26 September 1990, New Orleans, Louisiana; SPE 1990, SPE 20730.

[13] LANGMUIR I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum [J]. Journal of American Chemical Society, 1918, 40: 1361-1370.

[14] ANCELL K L, LAMBERT S, JOHNSON F S. Analysis of the coalbed degasification process at seventeen well pattern in the Warrior Basin of Alabama [C]// SPE Unconventional Gas Recovery Symposium, 18-21 May 1980, Pittsburgh, Pennsylvania; SPE, 1980, SPE8971.

[15] KING G R, TURGAY ERTEKIN, FRED C SCHWERTER. Numerical simulation of the transient behavior of coal-seam degasification wells [J]. SPE Formation Evaluation, 1986, 1(2): 165-183.

[16] OZKAN E, RAGHAVAN R. Some new solutions to solve problems in well test analysis: part 1—analytical considerations [J]. SPE Formation Evaluation, 1991, 6(3): 359-368.

[17] OZKAN E, RAGHAVAN R. Some new solutions to solve problems in well test analysis: part 2—computational considerations [J]. SPE Formation Evaluation, 1991, 6(3): 369-378.

[18] OZKAN E, RAGHAVAN R. Some new solutions to solve problems in well test analysis: part 3—additional algorithms [C]// SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 25-28 September 1994, New Orleans, Louisiana; SPE, 1994, SPE28424.

[19] VAN EVERDINGEN A F, HURST W. The application of the Laplace transformation to flow problem in reservoirs [J]. Petroleum Transactions, AIME, 1949, 186: 305-324.

[20] STEHFEST H. Algorithm 368 numerical inversion of Laplace transforms [J]. Communications of ACM, 1970, 13(1): 47-49.

(收稿日期 2010-09-08 编辑 韩晓渝)