

# 考虑多效应作用的页岩气变流量压力数据分析方法

谢德湘<sup>1</sup>, 靳凯<sup>1</sup>, 易志东<sup>2</sup>, 徐瑶<sup>1</sup>, 周鸿城<sup>1</sup>

1. 赣中南地质矿产勘查研究院 江西南昌 330026

2. 江西省国土资源厅 江西南昌 330025

通讯作者: Email: 382558132@qq.com

项目支持: 中国石油科技创新基金“孔压下超临界 CO<sub>2</sub> 压裂液对页岩气储层力学特性影响”(2017D-5007-0313)

引用: 谢德湘, 靳凯, 易志东, 等. 考虑多效应作用的页岩气变流量压力数据分析方法[J]. 油气井测试, 2018, 27(3): 14-21.

Cite: XIE Dexiang, JIN Kai, YI Zhidong *et al.* Pressure data analysis method for shale gas in production with variable rate with consideration of multi-effect [J]. Well Testing, 2018, 27(3): 14-21.

**摘要** 页岩气是世界基础资源的重要组成部分, 由于页岩气井试井测试资料较少, 难以对地层开展评价, 利用页岩气生产数据评价地层对页岩气的开发具有重要的指导意义。考虑页岩气吸附、压敏、扩散及渗流等效应, 通过定义物质平衡拟时间、归一化压力与产量等参数, 将复杂的页岩气流动方程线性化, 通过定义无量纲量, 形成无量纲化的流动方程并求解, 得到页岩气井底压力及产量表达式, 绘制了用于生产数据分析的归一化压力或产量图版。利用变流量的压力图版, 采用曲线拟合方法解释出渗透率、裂缝半长等参数。利用解释结果、压力及产量表达式分析了双对数图版中典型的流动段, 研究了裂缝条数、裂缝半长及气体吸附的 Langmuir 参数对产量的影响。结果表明, 随着裂缝条数和裂缝半长的增加, 页岩气日产量增加, 但与日产量之间不是线性增长关系, 需要对压裂规模进行优化; 在压力较高时, Langmuir 压力常数和 Langmuir 吸附常数对产量影响较小。

**关键词** 页岩气; 生产数据分析; 物质平衡拟时间; 归一化压力; 产量; 压裂; 吸附

中图分类号: TE353

文献标识码: A

DOI: 10.19680/j.cnki.1044-4388.2018.03.003

## Pressure data analysis method for shale gas in production with variable rate with consideration of multi-effect

XIE Dexiang<sup>1</sup>, JIN Kai<sup>1</sup>, YI Zhidong<sup>2</sup>, XU Yao<sup>1</sup>, ZHOU Hongcheng<sup>1</sup>

1. Ganzhongnan Institute of Geology and Mineral Exploration, Nanchang, Jiangxi 330026, China

2. Department of Land and Resources of Jiangxi Province, Nanchang, Jiangxi 330025, China

**Abstract:** Shale gas is an important part of the world's basic resources. For lack of well testing data for shale gas well to evaluate the formation, it may be feasible to use the production data to do that. Based on the shale gas adsorption, pressure sensitivity, diffusion and seepage effects, the complex shale gas flow equation was linearized by defining the material balance pseudo-time, normalized pressure and flow parameters. In addition, a non-dimensional flow equation was formed by defining a dimensionless quantity and the bottom-hole pressure and flow rate expressions of the shale gas well were obtained by solving the equation. Thus, a normalized pressure or production rate chart for the production data analysis was established. The typical flow section in the log-log plot was analyzed based on the pressure and flow rate expressions. Meanwhile, the effects of the number and half-length of fractures, and the Langmuir parameters of gas adsorption on the flow rate were studied. The results show that the daily production of shale gas increases with the increase of the number and half-length of fractures, but they do not show a linear growth relationship. Therefore, the fracturing scale needs to be optimized. It is also found that the Langmuir pressure constant and the Langmuir adsorption constant have little effect on the production when the pressure is relatively high.

**Keywords:** shale gas; production data analysis; matter balance pseudo-time; normalized pressure; production rate; fracturing; adsorption

页岩气生产由于采用水平井多段压裂技术, 井底压力恢复测试相对困难, 实际的页岩气生产中,

使用压力恢复试井分析技术进行压裂效果评价相对较少, 使得没有进行压力恢复测试的页岩气井,

难以了解地层渗透率、裂缝闭合及产出等情况。但在页岩气开发中,始终对地面的压力和产量进行监测,利用地面监测的压力及产量数据进行压裂效果评价及解释地层参数,已成为页岩气开发中重要的评价手段之一,这类地面监测数据中,压力和流量都随时间变化,无法采用试井分析技术来处理这类数据,需要发展一种新的方法解释分析变流量的压力数据。生产数据分析最开始用于产量预测,随着数值计算及计算机软件等技术发展逐渐形成了生产数据分析技术。1945年 Arps 给出了三种产能递减曲线分析方法:指数递减、调和递减和双曲递减方法<sup>[1]</sup>,从而诞生了生产数据分析技术,这些方法目前已成为分析预测产量的常规技术,但 Arps 方法是通过对实测数据统计而得出的经验公式。1980年 Fetkovich 根据不稳定渗流方程,通过求解定井底流压下无量纲产量,得到无量纲产量的图版,再由图版拟合进行生产数据分析<sup>[2]</sup>。Fetkovich 方法考虑了无限作用流动以及边界控制流动状态对瞬态产量的影响,通过引入泄油区半径及地层参数定义递减曲线的无量纲产量及时间,将 Fetkovich 解析解与 Arps 的经验公式相结合,组合后的曲线不仅实现了产量衰减预测,还可以进行地层参数分析。之后 Blasingame (1988)<sup>[3]</sup>、McCray (1990)<sup>[4]</sup>、Palacio (1993)<sup>[5]</sup>、Doublet (1996)<sup>[6]</sup>进一步发展了生产数据分析方法,针对产量与压力同时变化定义了物质平衡时间及归一化产量和归一化压力等概念,从而形成了基于物质平衡时间及归一化产量(或归一化压力)新图版。Mattar (1997)采用拟压力及拟物质平衡时间,将生产数据分析由油井延伸到气井<sup>[7]</sup>。本世纪初非常规油气的开发推动了生产数据分析技术的应用,非常规油气开发的显著标志为水平井多段压裂技术。Medeiros 等(2010)研究了裂缝沿水平井分布的水平井多段压裂井底压力计算问题,通过对井底压力分析,Medeiros 等给出了水平井多段压裂可能会出现裂缝径向流、系统线性流、径向-线性或双线性流、地层线性流、拟径向流、系统线性流和系统径向流六种流动,并分析了每种流态的压力及导数形状<sup>[8]</sup>。Raghavan 及 Cipollade 等考虑页岩气中岩石压敏效应(岩石应力变化对地层孔隙度及渗透率的影响)的渗流问题,并通过定义拟合压力得到线性化的渗流方程,为页岩气试井分析及生产数据分析提供基本的渗流方程<sup>[9-12]</sup>。页岩存在纳米孔隙及微米量级的天然微裂缝,导致页岩气的流动机

理非常复杂,渗流、吸附、扩散及应力敏感同时存在。针对我国页岩气开发中的产量递减分析,白玉湖(2013)采用常规的 Arps 产量递减方法对页岩气的递减规律进行了粗略研究<sup>[13]</sup>。牛聪等(2014)采用 Newman 乘积原理得到页岩气水平井多段压裂下地层拟压力流动方程的解析解表达式<sup>[14]</sup>。吴永辉(2017)等考虑页岩解吸气的影响,基于三线性流解析模型,建立了产量递减分析模型<sup>[15]</sup>。欧阳伟平(2018)采用视渗透率方法建立了考虑多种效应的压裂水平井非线性数学模型,获得了非线性条件下压裂水平井的试井理论曲线和产量递减 Blasingame 曲线<sup>[16]</sup>。郑爱维等(2018)基于基质线性流理论,推导出页岩气分段压裂水平井非稳态线性流产能方程,并建立了图版,提出了页岩气井产能系数<sup>[17]</sup>。

考虑页岩气渗流、吸附、扩散及应力敏感等多效应联合作用,建立页岩气流动方程,通过定义拟压力、物质平衡时间及拟时间等将页岩气流动方程线性化,结合水平井多段压裂的内边界条件、外边界条件和初始条件,形成页岩气生产数据分析完备的偏微分方程体系,通过半解析半数值方法获得页岩气生产数据分析图版,最后通过实例说明页岩气生产数据分析的应用。本文的研究将是对页岩气试井分析方法的补充,是获取页岩气地层参数另一种重要的方法,对页岩气开发具有重要的意义。

## 1 数学模型的建立

页岩气本身就是多组份气体,其流动涉及到渗流、吸附、气体滑脱及扩散等多种流动机理,同时在页岩气生产期间还需考虑压力变化后地层渗透率、孔隙度随压力的变化,基本假设如下:

(1)页岩储层存在压敏效应,其孔隙度、渗透率随压力变化,孔隙度变化关系满足指数式变化,渗透率变化满足 Palmer-Mansoori 公式<sup>[18-21]</sup>;

(2)地层水平方向初始渗透率相同,渗透率变化遵从同一方程,垂向渗透率不随压力变化;

(3)不考虑重力对页岩气流动的影响;

(4)气体考虑多组份,并采用真实气体的状态方程进行描述;

(5)地层中存在一口水平井,水平井段中有多条裂缝,裂缝半长互不相等,裂缝位置任意;

(6)裂缝中假定为无限传导。

假设矩形页岩储层中有一口多段压裂水平井,图1给出了水平井井位及裂缝位置的分布,根据上

述假设,可建立页岩气流动方程。

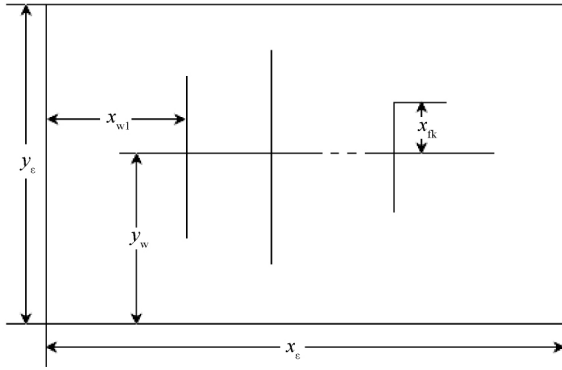


图1 页岩气流动区域示意图

Fig.1 Diagram of flow zone of shale gas

### 1.1 页岩应力敏感关系

页岩的孔隙度变化采用指数关系,渗透率变化采用 Palmer 和 Mansoori 提出的渗透率与孔隙度的关系式<sup>[22-24]</sup>,即

$$\frac{\phi}{\phi_i} = \exp[-C_f(p_i - p)] \quad (1)$$

$$\frac{K}{K_i} = \left(\frac{\phi}{\phi_i}\right)^3 \quad (2)$$

式中: $C_f$ 为页岩压缩系数, $\text{MPa}^{-1}$ ;  $p_i$ 为原始地层压力, $\text{MPa}$ ;  $K_i$ 为原始压力下的渗透率, $\mu\text{m}^2$ ;  $\phi_i$ 为原始压力下的孔隙度。

### 1.2 页岩气中的渗流方程

页岩储层中的气体是以甲烷为主的混合气体,根据连续性方程、混合气体的状态方程及达西定律,结合假设条件,压力满足的微分方程可以表示为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Kp}{\mu z} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{Kp}{\mu z} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\phi p}{z} \right) + \frac{p_{sc} T}{3.6 T_{sc}} \frac{\partial V}{\partial t} \quad (3)$$

式中: $V$ 为页岩气中由于解吸附产生混合气体的浓度, $\text{std m}^3/\text{m}^3$ ;  $p$ 为气体在地层中的压力, $\text{MPa}$ ;  $T$ 为气体在地层中的温度, $\text{K}$ ;  $\mu$ 为气体的黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ;  $z$ 为真实气体状态方程中的气体偏差因子;  $K$ 为地层渗透率, $\mu\text{m}^2$ ; 下标  $sc$  为标准状态。

### 1.3 页岩中的气体扩散方程

页岩中的气体浓度可由以下关系给出:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{6D\pi^2}{R^2} (V_E - V - V_{ic}) \quad (4)$$

式中: $D$ 为页岩中气体扩散系数, $\text{m}^2/\text{h}$ ;  $R$ 为页岩中气体扩散的外半径, $\text{m}$ ;  $V_E$ 为平衡状态下气体的浓度, $\text{std m}^3/\text{m}^3$ ;  $V_{ic}$ 为  $t=0$  时气体的浓度  $\text{std m}^3/\text{m}^3$ 。

### 1.4 无量纲形式的方程

考虑压敏及气体 PVT 后,定义标准压力,即

$$m = \frac{1 - \phi_i \mu_i z_i}{K_i} \int \frac{p}{\mu z} \left( \frac{K(p)}{1 - \phi(p)} \right) dp \quad (5)$$

考虑产量变化的气体拟物质平衡时间  $t_a$ , 即

$$t_a = \frac{\mu_{gi} C_{gi}}{q(t)} \int_0^t \frac{q(\tau)}{\mu_g C_g} d\tau$$

定义以下参量:

无量纲标准压力:

$$m_D = \frac{[m_i - m(x, y, t) K_i h]}{1.842 \times 10^{-3} q_{sc} B_{gi} \mu_i}$$

无量纲时间:

$$t_D = \frac{3.6 K_i t_a}{\beta L^2}$$

储容比:

$$\omega = \frac{\phi \mu C_g}{\beta}$$

窜流系数:

$$\lambda = \frac{3.6 K_i \tau}{\beta L^2}$$

无量纲距离:

$$x_D = \frac{x}{L}, \quad y_D = \frac{y}{L}$$

其中

$$\tau = \frac{R^2}{6\pi^2 D}$$

$$\beta = \phi \mu C_g + \frac{K_i h p_{sc} T z_i}{1.842 \times 10^{-3} q_{sc} B_{gi} T_{sc} p_{ai}}$$

$$L = \sum_{i=1}^n x_{fi}$$

式中: $\tau$ 为页岩气中的吸附时间; $\beta$ 为综合储容系数; $L$ 为裂缝半长总和; $x_{fi}$ 为第  $i$  条裂缝的半长; $n$ 为裂缝条数。

无量纲后的方程如下:

$$\frac{\partial^2 m_D}{\partial x_D^2} + \frac{\partial^2 m_D}{\partial y_D^2} = \omega \frac{\partial m_D}{\partial t_D} - (1 - \omega) \frac{\partial V_D}{\partial t_D} \quad (6)$$

$$\frac{\partial V_D}{\partial t_D} = \frac{1}{\lambda} (V_{ED} - V_D) \quad (7)$$

对方程(6)和(7)进行 Laplace 变换,得到

$$\frac{\partial^2 \bar{m}_D}{\partial x_D^2} + \frac{\partial^2 \bar{m}_D}{\partial y_D^2} = \omega s \bar{m}_D - (1 - \omega) s \bar{V}_D \quad (8)$$

$$s \bar{V}_D = \frac{1}{\lambda} (\bar{V}_{ED} - \bar{V}_D) \quad (9)$$

式中: $s$ 为 Laplace 变量。

如果在标准压力条件下,页岩气的吸附方程

写成:

$$V_E = \frac{V_L m}{m_L + m}, \quad V_{ic} = \frac{V_L m_{ic}}{m_L + m_{ic}}$$

那么

$$V_{ED} = V_E - V_{ic} = \frac{V_L m_L (m - m_{ic})}{(m_L + m)(m_L + m_{ic})} \quad (10)$$

式中:  $m_L$ 、 $m_{ic}$  分别为压力  $p_L$ 、 $p_{ic}$  下的标准气体压力。

如果假定:

$$\alpha = \frac{1.842 \times 10^{-3} q_{sc} B_i \mu_i}{K_i h} \frac{m_L V_L}{(m_L + m)(m_L + m_{ic})}$$

是常数,那么(10)式可写成

$$V_{ED} = -\alpha m_D \quad (11)$$

于是方程(9)可写成

$$s \bar{V}_D = \frac{1}{\lambda} (-\alpha \bar{m}_D - \bar{V}_D) \quad (12)$$

$$\bar{V}_D = \frac{\alpha \bar{m}_D}{s\lambda + 1} \quad (13)$$

将方程(13)代入方程(8),得到

$$\frac{\partial^2 \bar{m}_D}{\partial x_D^2} + \frac{\partial^2 \bar{m}_D}{\partial y_D^2} = f(s) \bar{m}_D \quad (14)$$

其中

$$f(s) = \left[ \omega + \frac{\alpha(1 - \omega)}{s\lambda + 1} \right] s$$

## 1.5 方程求解

由于页岩气采用水平井多段压裂,各裂缝产量的总和即为总产量,Laplace 空间下的产量与井底标准压力的关系如下:

$$\sum_{j=1}^n \bar{q}_{Dj} = \frac{1}{s} \quad (15)$$

$$\bar{m}_{wDi}(f(s)) = \sum_{j=1}^n s \bar{q}_{Dj} \bar{m}_{wDi}(f(s)) \quad (16)$$

其中

$$\bar{m}_{Dij}(f(s)) = \pi \int_0^\infty m_D(t_D) e^{-f(s)t_D} dt_D$$

$$m_D(t_D) = \int_0^{t_D} G_{xD}(\tau_D) G_{yD}(\tau_D) d\tau_D$$

对矩形全封闭地层  $G_{xD}$  及  $G_{yD}$  分别为

$$G_{xD}(\tau_D) =$$

$$\frac{1}{x_{eD}} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 (\tau_D)}{2x_{eD}^2}\right) \cos \frac{n\pi x_{wD}}{x_{eD}} \cos \frac{n\pi x_D}{x_{eD}} \right]$$

$$G_{yD}(\tau_D) = \frac{2}{y_{eD}} \times$$

$$\left[ 1 + \frac{2y_{eD}}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 (\tau_D)}{2y_{eD}^2}\right) \sin \frac{n\pi}{y_{eD}} \cos \frac{n\pi y_{wD}}{y_{eD}} \cos \frac{n\pi y_D}{y_{eD}} \right]$$

联合方程(15)和(16),最终得到如下线性方

程组:

$$\begin{bmatrix} f(s) \bar{m}_{D1,1} & f(s) \bar{m}_{D1,2} & f(s) \bar{m}_{D1,3} & \cdots & f(s) \bar{m}_{D1,n} \\ f(s) \bar{m}_{D2,1} & f(s) \bar{m}_{D2,2} & f(s) \bar{m}_{D2,3} & \cdots & f(s) \bar{m}_{D2,n} \\ & & \cdots & & \\ f(s) \bar{m}_{Dk,1} & f(s) \bar{m}_{Dk,2} & f(s) \bar{m}_{Dk,3} & \cdots & f(s) \bar{m}_{Dk,n} \\ & & \cdots & & \\ f(s) \bar{m}_{Dn,1} & f(s) \bar{m}_{Dn,2} & f(s) \bar{m}_{Dn,3} & \cdots & f(s) \bar{m}_{Dn,n} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} s & s & s & \cdots & s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{q}_{1D} \\ \bar{q}_{2D} \\ \cdots \\ \bar{q}_{kD} \\ \cdots \\ \bar{q}_{nD} \\ \bar{m}_{wD} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \cdots \\ 0 \\ \cdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

求解方程(17)得出的  $\bar{m}_{wD}$  是未考虑井筒存储和表皮时的井底标准压力,当产量恒定时,考虑表皮  $S$  和井筒存储  $C_D$  后的页岩气水平井多段压裂无量纲标准压力  $\bar{m}_{cWD}$  为

$$\bar{m}_{cWD} = \frac{f(s) \bar{m}_{wD}(f(s)) + S}{S \{ 1 + C_{Dsf} S [f(s) \bar{m}_{wD}(f(s)) + S] \}} \quad (18)$$

其中

$$C_{Dsf} = \frac{C}{2\pi\phi C_i h L^2}$$

式中:  $C_{Dsf}$  为无量纲井筒存储常数;  $C$  为井筒存储常数,  $m^3/MPa$ ;  $S$  为裂缝系统总表皮。

## 2 图版特征及产量递减分析

图 2 是矩形中考虑表皮和井储效应的定产量下,页岩气水平井多段压裂井底无量纲标准压力及导数双对数图,计算参数为:水平井中均匀分布 10 条裂缝,裂缝间的无量纲间距为 1,  $C_{Dsf} = 10^{-4}$ ,  $S = 0.05$ ,  $\omega = 0.2$ ,  $\lambda = 1$ ,  $\alpha = 5$ , 矩形边长  $x_{eD} = y_{eD} = 50$ 。

从图 2 可以看出,页岩气水平井多段压裂井底无量纲标准压力及导数双对数图上存在 7 个典型的流动段:①早期井储流动,压力及导数双对数图上有一条斜率为 1 的直线段;②由于裂缝表皮,存在井储到单一裂缝的线性流过渡段;③单条裂缝形成各自的裂缝线性流;④单条裂缝形成各自径向流;⑤裂缝干扰后形成的全体裂缝线性流;⑥全体裂缝径向流;⑦矩形边界效应形成拟稳态流。

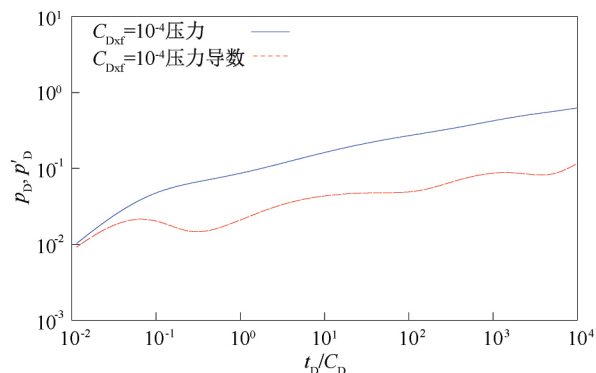


图2 无量纲标准压力及导数双对数图

Fig.2 Double logarithmic curves of dimensionless standard pressure and derivatives

图3是采用拟物质平衡时间计算得到的无量纲产量及累积量双对数图,计算采用的参数同图2中的计算参数,这个图版也称作 Blasingame 图版<sup>[25-27]</sup>,也可用于生产数据分析,因该图版采用产量的积分(即累积量),流动段特征不明显。

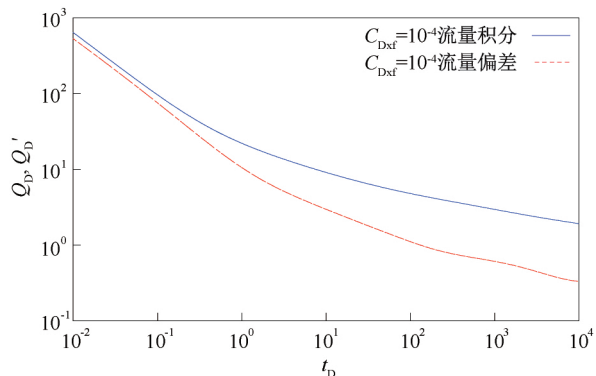


图3 无量纲产量及累积量双对数图

Fig.3 Double logarithmic curves of dimensionless production rate and cumulative production rate

水平井段压裂是页岩气开发的重要技术,同时页岩的气体性质也影响页岩气的产量,采用国内某页岩气开发区块的数据对页岩气产量进行敏感参数分析,计算参数如下:矩形边长  $x_{eD} = 2\ 000\text{ m}$ 、 $y_{eD} = 1\ 000\text{ m}$ ,水平井位置  $x_w = 500\text{ m}$ 、 $y_w = 500\text{ m}$ ,原始地层压力  $p_i = 40\text{ MPa}$ ,地层有效厚度  $h = 38\text{ m}$ ,产层深度  $2\ 760\text{ m}$ ,气藏温度  $T = 103\text{ }^\circ\text{C}$ ,水平井长  $1\ 000\text{ m}$ ,裂缝条数  $N = 10$ ,裂缝半长  $x_f = 60\text{ m}$ ,油井半径  $r_w = 0.1\text{ m}$ ,地层孔隙度  $\phi = 0.05$ ,地层渗透率  $K = 0.01 \times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$ ,压敏效应指数  $C_f = 10^{-3}\text{ MPa}^{-1}$ ,甲烷 95%,乙烷 3%,丙烷 2%,Langmuir 压力常数  $p_L = 8.63\text{ MPa}$ ,Langmuir 吸附常数  $V_L = 3.64\text{ m}^3/\text{t}$ 。

利用上述参数,研究裂缝条数对页岩气产量的影响。图4给出了井底流压  $p_{wf} = 35\text{ MPa}$ ,生产时间

为1年时不同裂缝条数产量的递减情况。从图4可以看出,在开采的早期页岩气日产量较高(超过  $10 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ ),随着生产时间的增加日产量递减较快,1年后产量维持在  $2 \times 10^4 \sim 3 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ ,产量递减超过70%,但之后产量几乎能维持稳定。这与目前我国在焦石坝及长宁、威远等页岩气示范区产能递减规律一致。图4也表明,随着裂缝条数的增加日产量增加,但产量的增加与裂缝条数不是正比关系。

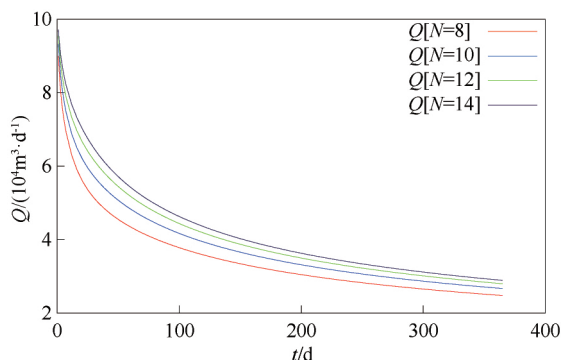


图4 不同裂缝条数对产量影响

Fig.4 Influence of fracture number on production

裂缝半长对页岩气日产量也有较大的影响,图5给出了井底流压  $p_{wf} = 35\text{ MPa}$ ,生产时间为1年时裂缝半长  $x_f$  分别为  $50\text{ m}$ 、 $70\text{ m}$ 、 $90\text{ m}$  和  $110\text{ m}$  下页岩气日产量的递减情况,图5也存在早期产量递减较快后期产能稳定的现象,随着裂缝半长的增加产量也增加。

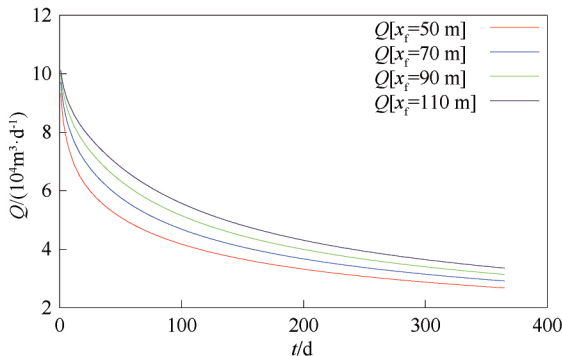


图5 不同裂缝半长对产量影响

Fig.5 Influence of fracture semi-length on production

图4和图5可以看出,压裂规模(裂缝条数和裂缝半长)对页岩气的产量影响较大,由于页岩气产量递减速度较快,压裂规模对稳定后的产量影响就变得较小。考虑到压裂成本及对环境的影响,页岩气压裂规模优化十分必要,其优化的理论基础就是前文的产能计算。

图6和图7分别给出了Langmuir压力常数和Langmuir吸附常数不同时对产能的影响,从图中可

以看出吸附对产量的影响较小,因计算中井底压力  $p_{wf}=35\text{ MPa}$ ,这时地层中的流动主要是游离气的贡献。

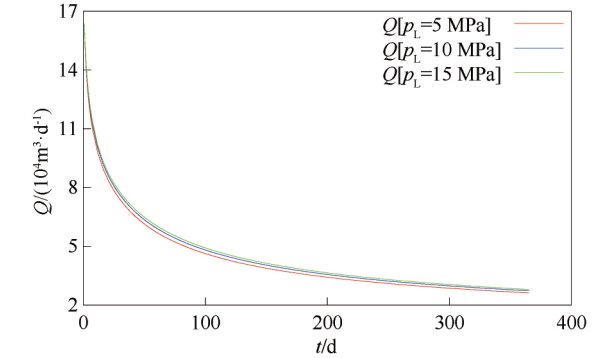


图 6 Langmuir 压力常数不同对产量影响  
Fig.6 Influence of Langmuir constant on production

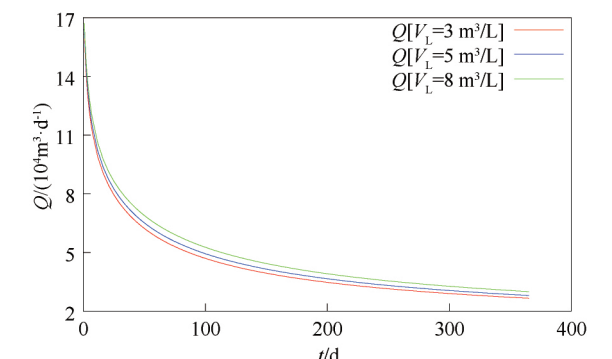


图 7 Langmuir 吸附常数不同对产量影响  
Fig.7 Influence of Langmuir adsorption constant on production

3 实例分析

利用上述理论,研制开发相应的页岩气生产数据分析软件,采用该软件对礁石坝、长宁、威远进行多井次的解释分析,这里以四川某页岩气井的解释分析为实例,并对未来产能进行预测。

该井 2015 年 2 月压裂后投产,其生产数据分析的基本参数如下:原始地层压力  $p_i=42.41\text{ MPa}$ ,地层有效厚度  $h=38\text{ m}$ ,产层深度  $3\ 200\text{ m}$ ,气藏温度  $T=107\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,裂缝条数  $N=16$ ,油井半径  $r_w=0.0\ 623\text{ m}$ ,地层孔隙度  $\phi=0.042$ ,压敏效应指数  $C_f=1\times 10^{-3}\text{ MPa}^{-1}$ ,甲烷  $96.37\%$ ,乙烷  $2.14\%$ ,丙烷  $1.2\%$ ,二氧化碳  $0.59\%$ ,硫化氢  $0.63\%$ ,岩石密度  $\rho=2\ 300\text{ kg/m}^3$ 。

由混合气体 PVT 及地面测试的压力与产量数据,可以计算基于物质平衡时间、标准压力。按生产数据分析要求进行曲线拟合,图 8 给出了归一化标准压力及导数拟合图,图 9 给出了基于

Blasingame 的归一化产量及其积分拟合图。通过曲线拟合可以解释出地层渗透率  $K=4.422\times 10^{-6}\text{ }\mu\text{m}^2$ ,共 18 条裂缝,裂缝半长  $x_f=126.526\text{ m}$ ,Langmuir 压力常数  $p_L=7.735\text{ MPa}$ ,Langmuir 吸附常数  $V_L=3.644\text{ m}^3/\text{t}$ ,总储量  $G=6.9295\times 10^8\text{ m}^3$ ,其中吸附气的储量  $G=2.76\times 10^8\text{ m}^3$ 。

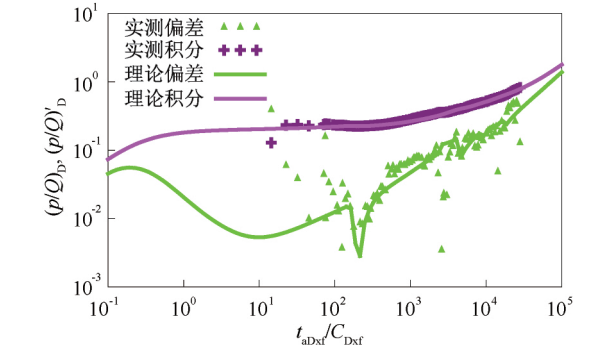


图 8 归一化标准压力及导数拟合图  
Fig.8 Matching curves of normalized standard pressure and derivatives

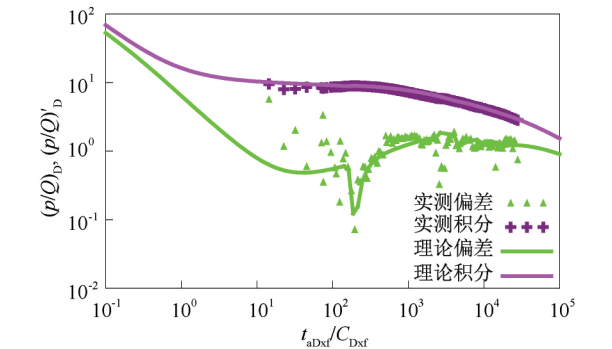


图 9 Blasingame 图版拟合图  
Fig.9 Matching curves of Blasingame type curve

图 10 是该井的压力历史拟合图,可以看出计算压力与实测压力非常好地拟合,说明解释参数较可靠。图 11 是采用拟合的参数进行的产量拟合,前期的实测产量与计算的产量也很好地实现了拟合。

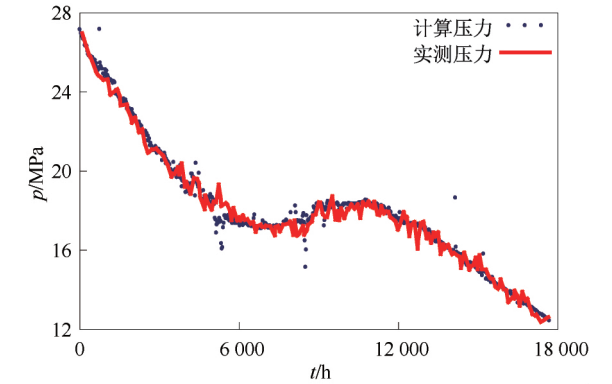


图 10 压力历史拟合图  
Fig.10 Matching curves of historical pressure



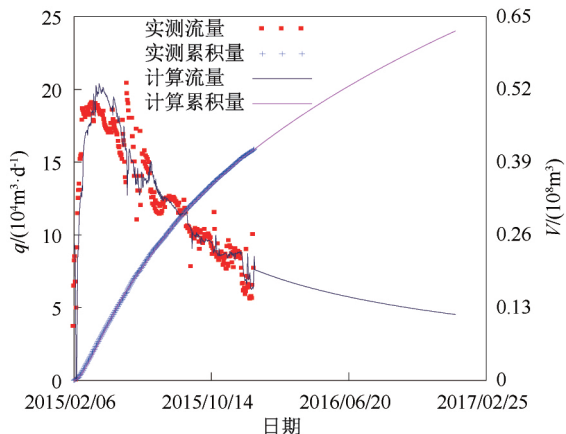


图 11 产量-累积量拟合及预测图

Fig.11 Matching and prediction curves of production vs. cumulative production

对 1 年的产量进行预测,累计产量拟合及预测结果如图 11 所示。从预测的产量趋势来看,未来 1 年产量仍然快速下降,产量还没有得到稳定期。

## 4 结论

(1)给出了页岩气生产数据分析满足的基本流动方程及定解条件。通过定义基于物质平衡的拟时间、归一化标准压力(归一化标准产量)和无量纲量得到线性化后的偏微分方程,结合水平井多段压裂的内边界条件,通过 Laplace 变换计算压力及产量。

(2)页岩气产能在开采的早期日产量较高,之后产能快速递减,大约 1 年后日产量要衰减 60%~70%。

(3)页岩储层由于渗透率很小,一般都采用水平井多段压裂技术开采,水平井中的裂缝条数及裂缝半长都对产量产生较大的影响,裂缝条数多、裂缝半长长日产量都增加,但裂缝条数和裂缝半长与日产量之间不是线性增长关系,因此需要对压裂规模进行优化。

(4)页岩气中吸附气也影响井底压力及产量,在压力较高时 Langmuir 压力常数  $p_L$  和 Langmuir 吸附常数  $V_L$  对产量影响较小。

(5)地面长期监测的页岩气压力及产量数据,可以通过生产数据分析方法进行解释分析,不仅可以得到地层参数,还可以得到 Langmuir 常数、地质总储量及吸附气的储量等参数。利用解释出的渗透率、Langmuir 常数等参数可以进行产能预测,为页岩气的合理工作制度的确定提供基本数据。

致谢:感谢赣中南地质矿产勘查研究院同意本文公开发表;感谢中国科技大学卢德堂教授对本文的修改和建议。

## 参 考 文 献

- [1] ARPS J J. Analysis of decline curves[J]. Petroleum Transactions, 1945, 160(1): 228-247.
- [2] FETKOVICH M J. Decline curve analysis using type curves [J]. Journal of Petroleum Technology, 1980, 32(6): 1065-1077.
- [3] BLASINGAME T A, LEE W J. The variable-rate reservoir limits testing of gas wells [C]. SPE 17708, 1988.
- [4] MCCRAY T L. Reservoir analysis using production decline data and adjusted time [D]. Texas A&M University, College Station, TX, 1990.
- [5] PALACIO J C, BLASINGAME T A. Decline curves analysis using type curves; analysis of gas well production data [C]. SPE 25909, 1993.
- [6] DOUBLET L E, BLASINGAME T A. Evaluation of injection well performance using decline type curves [C]. SPE 35205, 1996.
- [7] MaTTAR L, MCNEIL R. The "flowing" gas material balance [J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 1998, 37(2): 52-55.
- [8] MEDEIROS F, OZKAN E, KAZEMI H. A semianalytical approach to model pressure transients in heterogeneous reservoirs [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2010, 13(2): 341-358.
- [9] RAGHAVAN R, CHIN L Y. Productivity changes in reservoirs with stress-dependent permeability [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2004, 7(4): 308-315.
- [10] CIPOLLA C L. Modeling production and evaluating fracture performance in unconventional gas reservoirs [J]. Journal of Petroleum Technology, 2009, 61(9): 84-90.
- [11] YU W, LUO Z, JAVADPOUR F *et al.* Sensitivity analysis of hydraulic fracture geometry in shale gas reservoirs [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2014, 113(1): 1-7.
- [12] MI L, JIANG H, LI J *et al.* The investigation of fracture aperture effect on shale gas transport using discrete fracture model [J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering, 2014(21): 631-635.
- [13] 白玉湖,杨皓,陈桂华,等. 页岩气产量递减典型曲线应用分析[J]. 可再生能源, 2013, 31(5): 115-119. BAI Yuhu, YANG Hao, CHEN Guihua *et al.* Application and analysis of yield decline type curve of shale gas [J]. Renewable Energy Resources, 2013, 31(5): 115-119.
- [14] 牛聪,黄涛,王磊,等. 页岩气开采中的井底压力并行计算[J]. 计算力学学报. 2014, 32(3): 396-401. NIU Cong, HUANG Tao, WANG Lei *et al.* Parallel computing for bottom-hole pressure in shale gas reservoirs [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2014, 31(3): 396-401.
- [15] 吴永辉,程林松,黄世军,等. 页岩气压裂水平井产量

- 递减分析新方法[J]. 天然气工业, 2017, 37(1): 120-126.
- WU Yonghui, CHENG Linsong, HUANG Shijun *et al.* A new method of production decline analysis for multi-fractured horizontal wells from shale gas reservoirs [J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(1): 120-126.
- [16] 欧阳伟平. 致密气藏分段压裂水平井的不稳定压力与产量综合分析方法[J]. 油气井测试, 2018, 27(1): 14-21.
- OUYANG Weiping. Comprehensive analysis method for transient pressure and production of multistage fractured horizontal well in tight gas reservoirs [J]. Well Testing, 2018, 27(1): 14-21.
- [17] 郑爱维, 李继庆, 卢文涛, 等. 涪陵页岩气田分段压裂水平井非稳态产能评价方法[J]. 油气井测试, 2018, 27(1): 22-30.
- ZHENG Aiwei, LI Jiqing, LU Wentao *et al.* Unsteady productivity evaluation method of multi-stage fractured horizontal well for shale gas in Fuling shale gas field [J]. Well Testing, 2018, 27(1): 22-30.
- [18] PALMER I D, CAMERON J R, MOSCHOVIDIS Z A. Special report: Permeability changes affect CBM production predictions [J]. Oil and Gas Journal, 2006, 104(28): 43-50.
- [19] GORUCU F B, JIKICH S A, BROMHAL G S *et al.* Effects of matrix shrinkage and swelling on the economics of enhanced-coalbed-methane production and CO<sub>2</sub> sequestration in coal [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2007, 10(4): 382-392.
- [20] WICKS D E, SCHWERER F C, MILITZER M R *et al.* Effective production strategies for coalbed methane in the Warrior Basin[C]. SPE 15234, 1986.
- [21] 杨宇, 周文, 闫长辉, 等. 砂岩-页岩互层气藏物质平衡方程构建与应用[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 174-180.
- YANG Yu, ZHOU Wen, YAN Changhui *et al.* Application and derivation of material balance equation for shale gas reservoirs with laminated sandstone pay zones [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 174-180.
- [22] PALMER I, MANSOORI J. How permeability depends on stress and pore pressure in coalbeds: a new model [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 1996, 1(6): 539-544.
- [23] CONNELL L D. Coupled flow and geomechanical processes during gas production from coal seams [J]. International Journal of Coal Geology, 2009, 79(1): 18-28.
- [24] BALAN H O, GUMRAH F. Assessment of shrinkage - swelling influences in coal seams using rank-dependent physical coal properties [J]. International Journal of Coal Geology, 2009, 77(1): 203-213.
- [25] 孙贺东, 朱忠谦, 施英, 等. 现代产量递减分析 Blasingame 图版制作之纠错[J]. 天然气工业, 2015, 35(10): 71-77.
- SUN Hedong, ZHU Zhongqian, SHI Ying *et al.* Note on the Blasingame type curve plotting of production decline analysis [J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(10): 71-77.
- [26] WEI M, DUAN Y, DONG M *et al.* Blasingame decline type curves with material balance pseudo-time modified for multi-fractured horizontal wells in shale gas reservoirs [J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering, 2016(31): 340-350.
- [27] 陈民锋, 王兆琪, 孙贺东, 等. 考虑应力敏感影响的改进 Blasingame 产量递减分析方法[J]. 石油科学通报, 2017, 2(1): 53-63.
- CHEN Minfeng, WANG Zhaoqi, SUN Hedong *et al.* Improved Blasingame production-decline analysis method considering stress sensitivity [J]. Petroleum Science Bulletin, 2017, 2(1): 53-63.

编辑 刘述忍

**第一作者简介:**谢德湘,男,1963年出生,高级工程师,1979年毕业于赣州地质学校,现主要从事地质勘查及油气地质勘探工作。电话:18807910876; Email: 382558132@qq.com。地址:江西省南昌市解放西路658号,邮政编码:330026。