

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2014.01.016

页岩气压裂水平井生产数据分析方法

王军磊^{1a,1b}, 位云生^{1a}, 程敏华^{1a}, 罗万静²

(1. 中国石油勘探开发研究院 a. 鄂尔多斯分院; b. 研究生部, 北京 100083;
2. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083)

摘要:气井生产数据分析是评价气井动态储量、储层物性、水力裂缝等参数的有效方法,但在页岩气藏中,气体解吸、多段压裂、体积压裂区(SRV)的存在使得常规的评价模型不能满足现场需要。笔者在充分考虑了气体解吸、裂缝干扰、边界影响的基础上,利用 Laplace 变换和压力叠加原理求解压裂水平井的不稳定产能动态,并利用渐进分析给出新的无量纲物质平衡时间和产量,绘制页岩气压裂水平井 Agarwal-Gardner 型产量递减图版。图版可分为两大阶段:在不稳定递减阶段,页岩气的吸附特性会对发散的曲线产生显著影响;在拟稳态递减阶段,递减曲线归一,呈现 Arps 调和递减规律。矿场实例表明,通过拟合实际的生产数据,可以得到气藏有效泄流面积、天然裂缝渗透率及水力裂缝长度等参数,以此评价页岩气藏地质储量和水力压裂效果。

关键词:页岩气;不稳态渗流;物质平衡时间;渐进分析;Agarwal-Gardner 图版;生产数据分析
中图分类号: TE319 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-582X2014(01)-102-08

A method of production data analysis for multi-fractured horizontal well in shale gas reservoir

WANG Junlei^{1a,1b}, WEI Yunsheng^{1a}, CHENG Minhua^{1a}, LUO Wanjing²

(1a. Ordos Branch Institute; 1b. Postgraduate Department, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China; 2. School of Energy Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Production data analysis is an effective method of evaluating gas in place, parameters of reservoir and hydraulic fractures. Current model of production data analysis fails to make sense because of the existence of absorption, multi-fracturing, and stimulated reservoir volume (SRV). Considering the effect of desorption, fracture interacting and closed boundary, the authors calculate the productivity of multi-fractured horizontal well in shale gas by Laplace transform and pressure superposition principle. Then theoretical charts of Agarwal-Gardner production decline curves are presented by employing new definition of dimensionless material balance time and dimensionless production, which is based on asymptotic approximations. The result shows that Agarwal-Gardner curves can be divided into two parts where they are scattered in early transient period, and where their shape was influenced by parameters relevant to adsorption, position of each fracture and reservoir geometry, and then drawn to Arps harmonious decline in pseudo steady state period. Reservoir parameters, hydraulic fracture characteristics and gas in place are evaluated by using the type curve matching with actual production data.

收稿日期:2013-08-03

基金项目:国家重大科技专项资助项目(2011ZX05015)

作者简介:王军磊(1986-),男,中国石油勘探开发研究院博士研究生,从事非常规气藏工程、渗流力学及数值模拟研究,
(E-mail)williamwang_2@126.com。

Key words: shale gas; unsteady state flow; material balance time; asymptotic approximations; Agarwal-Gardner curves; production data analysis

随着油气供需矛盾的日益突出,页岩气作为一种高效的能源资源受到了越来越多的重视,中国目前正在逐步加大页岩气的勘探开发力度^[1]。页岩储层的渗透率低、非均质性强,微裂缝发育普遍,气体流动具有吸附、滑脱等特性^[2],而且在开采过程中广泛应用水力压裂技术^[3-4],虽然一定程度上提高了气井产能,但同时也极大增加了分析生产数据的难度。目前非常规气井生产数据分析方法多采用 Wattenbarger 等^[5]和 Brown 等^[6]提出的线性流模型,李欣等^[7]利用不稳定线性流数据计算了压裂缝形态和压裂区渗流能力,但没有分析解吸扩散流、复合线性流等流态下反映的生产数据;Nobakht 等^[8]利用新定义气体拟压力、拟时间,结合解吸作用修正下的气体偏差因子分析了页岩气直井的产量递减特征;段永刚等^[9]给出了考虑页岩气吸附解吸特征的垂直裂缝井产能公式,并分析了 Langmuir 体积等相关参数对页岩气井产能的影响;Zhao 等^[10]和 Guo 等^[11]建立了页岩气双重介质渗流数学模型,通过点源函数法和压力叠加原理分析了无限大地层中分段压裂水平井的流动特征。

笔者采用的生产数据分析方法以不稳定渗流理论和物质平衡时间为理论基础,集中了现代试井分析和气藏工程的优点,通过实际数据与理论图版的拟合来计算相关参数。基于瞬时扩散模型来考虑气体的解吸作用,建立了适用于页岩气压裂水平井的不稳定渗流模型,通过 Laplace 变换和压力叠加求

解气井的产能动态,应用渐进分析的方法定义新的无量纲物质平衡时间和产量,以将定产条件下的无量纲井底压力倒数转化为物质平衡时间下的产量,进而给出不同解吸参数影响下的 Agarwal-Gardner 型产量递减图版,最终利用典型曲线拟合的方法计算气藏泄流面积、地质储量及水力裂缝长度,以此形成一套分析页岩气压裂水平井生产数据的方法。

1 页岩气压裂水平井不稳态渗流规律

水平井分段压裂导致了地应力发生明显的改变,在影响区域内原生微裂缝二次发育,形成了体积压裂区域。通过微地震等技术预测可知,实际的裂缝分布极为复杂无法精确描述其形态,故体积压裂区域可简化为原生基质与天然裂缝形成的双重孔隙地层,Medeiros 研究表明体积压裂区外的地层渗透率极小($10^{-5} \sim 10^{-4}$ mD),其对体积压裂区的流量供给可忽略^[10-11],所以这里可将页岩气体积压裂区域抽象为带有矩形封闭边界的双孔介质地层,为便于计算假设裂缝垂直于井筒且均匀分布,各裂缝长度相等(见图 1)。

基于页岩气变产量点源的 Laplace 解,利用点源积分可以得到单条裂缝解,根据压力叠加可得到压裂水平井的井底压力方程组,通过数值反演计算的不稳定压力动态可以作为生产数据分析方法的理论基础。

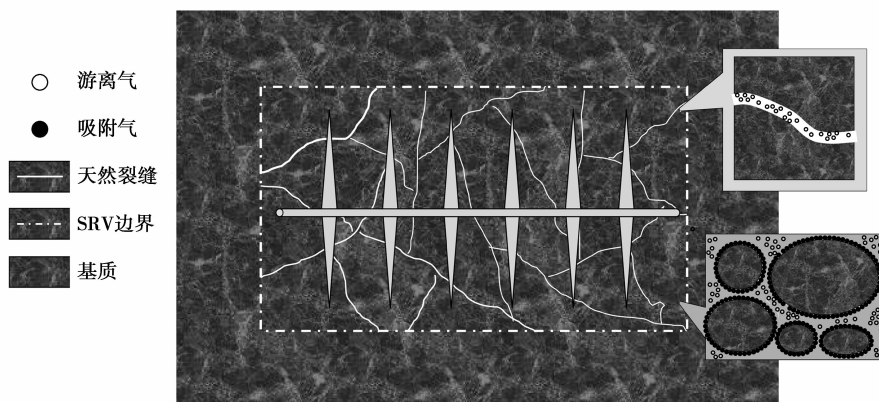


图 1 页岩气体积压裂及压裂水平井简化模型

1.1 封闭地层中变产量点源渗流模型

在原始条件下,气体分子以吸附态的形式分布在基质颗粒表面,在裂缝中为游离气。随着开采的

进行压力不断降低,气体分子逐渐从颗粒表面解吸形成游离气,在基质中扩散至颗粒外表面,通过窜流作用流入裂缝系统,最终在裂缝中形成以对流为主

的渗流流动。利用瞬时扩散模型求解解吸气体的扩散作用^[12],通过 Laplace 变换可得到变产量点源模型在二维平面无限大裂缝系统中的无量纲拟压力控制方程:

$$\frac{1}{r_D} \frac{\partial}{\partial r_D} \left[r_D \frac{\partial \tilde{m}_{D0}}{\partial r_D} \right] = sf(s) \tilde{m}_{D0} \quad (1)$$

气体的解吸扩散特性体现在 $f(s)$ 函数中,

$$f(s) = \omega + \sigma(1 - \omega) [\sqrt{\lambda s} \coth(\sqrt{\lambda s}) - 1] / \lambda s \quad (2)$$

点源生产条件:

$$\lim_{\epsilon \rightarrow 0^+} 2\pi \left(r_{fD} \frac{\partial \tilde{m}_{D0}}{\partial r_{fD}} \right)_{r_{fD}=\epsilon} = -\tilde{q}_{D0}(s) \quad (3)$$

其中气体拟压力为:

$$m(P) = \int_{P_i}^P \frac{\xi}{\mu_g(\xi) Z_g(\xi)} d\xi \quad (4)$$

无量纲压力、产量、时间及坐标为:

$$m_D = k_g L_{ref} TP_{sc} m_0 / (\mu_g T_{sc} q_{ref}); \quad (5)$$

$$q_D = q / q_{ref}; \quad (6)$$

$$t_D = k_t t / [(\varphi_i \mu_g c_g + 6P_{sc} T / T_{sc}) L_{ref}^2]; \quad (7)$$

$$\zeta_D = \zeta / L_{ref}, \quad (8)$$

$$\zeta = x, y, z.$$

吸附气和游离气的储容比、窜流系数和解吸系数为

$$\omega = \varphi_i \mu_g c_g / (\varphi_i \mu_g c_g + 6P_{sc} T / T_{sc}), \quad (9)$$

$$\lambda = k_f R_m^2 / [(\varphi_i \mu_g c_g + 6P_{sc} T / T_{sc}) DL_{ref}] \quad (10)$$

$$\sigma = V_L m_L \{ [m_L + m(P_f)] [m_L + m(P_{fi})] \}, \quad (11)$$

式中: P 为实际压力, Pa; V_L 为 Langmuir 体积, m^3 / m^3 ; t 为时间, s; r 为径向坐标; x_e, y_e 为地层几何量; h 为地层厚度; x_w, y_w 为裂缝坐标; x_f 为裂缝长度, m; T 为温度, K; c_g 为气体压缩系数, Pa^{-1} ; μ_g 为气体粘度, $Pa \cdot s$; k 渗透率, D; R_m 为颗粒最大半径, m; D 为扩散系数, m^2 / s ; 下标 f 为裂缝, m 为基质, sc 为标准状况, ref 为参考量, D 为无量纲, 0 为空间点源基本量; 上标“~”为 Laplace 量, “—”为平均量。

方程(1)~(3)满足 0 阶 Bessel 方程, 则二维无限大地层中变产量点源的 Laplace 解满足^[13]

$$\frac{2h_D x_{eD} \tilde{m}_{D0}(s)}{\tilde{q}_0(s)} = K_0(\sqrt{(x_D - x_{wD})^2 + (y_D - y_{wD})^2} \sqrt{u}) \quad (12)$$

利用镜像反演和压力叠加原理处理式(12), 经过相关的数学处理可以得到矩形封闭地层中变产量点源的 Laplace 解,

$$\frac{2h_D x_{eD} \tilde{m}_{D0}(s)}{\tilde{q}_0(s)} = \frac{\cosh \sqrt{u} (y_{eD} - |y_D \pm y_{wD}|)}{\sqrt{u} \sinh(\sqrt{u} y_{eD})} + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \cos k\pi \frac{x_D}{x_{eD}} \cos k\pi \frac{x_{wD}}{x_{eD}}$$

$$\frac{\cosh \sqrt{u + k^2 \pi^2 / x_{eD}^2} (y_{eD} - |y_D \pm y_{wD}|)}{\sqrt{u + k^2 \pi^2 / x_{eD}^2} \sinh \sqrt{u + k^2 \pi^2 / x_{eD}^2} y_{eD}} \quad (13)$$

1.2 页岩气封闭地层中压裂水平井渗流模型

假设沿裂缝的流量分布均匀, 裂缝半长为 x_f , 利用点源积分原理处理式(13)可得到单条裂缝的压力公式

$$\tilde{m}_D(s) = \int_{x_{wD}-x_{fD}}^{x_{wD}+x_{fD}} \tilde{m}_{D0}(x_D, y_D, \beta, y_{wD}) d\beta \quad (14)$$

式(14)可写为如下形式:

$$\frac{2h_D x_{eD} \tilde{m}_D(s)}{\tilde{q}_D(s)} = \frac{\cosh \sqrt{u} (y_{eD} - |y_D \pm y_{wD}|)}{\sqrt{u} \sinh \sqrt{u} y_{eD}} + \frac{2x_{eD}}{\pi x_{fD}} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \left[\cos \frac{n\pi x_D}{x_{eD}} \cos \frac{n\pi x_{wD}}{x_{eD}} \sin \frac{n\pi x_{fD}}{x_{eD}} \cosh \alpha_n (y_{eD} - |y_D \pm y_{wD}|) \right] / \left[n \alpha_n \sinh \alpha_n y_{eD} \right] \right\} \quad (15)$$

式中,

$$u = sf(s), \quad (16)$$

$$\alpha_n = \sqrt{u + n^2 \pi^2 / x_{eD}^2}, \quad (17)$$

$$q_D = 2x_{fD} h_D q_{D0} \quad (18)$$

式(15)代表的均匀流量解与无限导流裂缝引起的压力动态相差不大^[14], 这里采用均匀流量解的积分平均值代表无限导流裂缝的压力动态。

假设各条裂缝均垂直于水平井筒, 井筒与裂缝均为无限导流, 利用压力叠加原理可得到压裂水平井井底压力线性方程组

$$\mathbf{A}(s) \cdot \mathbf{X}(s) = \mathbf{B}(s) \quad (19)$$

当定井底压力时, 式(19)为 $n_f \times n_f$ 阶矩阵, 未知量为各裂缝产量, 其中 $A_{ij} = \Delta \tilde{m}_{Dij}(x_{wDi}, y_{wDi}, x_{wDj}, y_{wDj})$; $X_i = \tilde{q}_{fDi}$; $B_i = 1/s$ 。

当定井口流量时, 为 $(n_f + 1) \times (n_f + 1)$ 阶矩阵, 未知量为各裂缝产量及井底压力, 其中,

1) 当 $1 \leq i, j \leq n_f$ 时, $A_{ij} = \Delta \tilde{m}_{Dij}(x_{wDi}, y_{wDi}, x_{wDj}, y_{wDj})$, $X_i = \tilde{q}_{fDi}$, $B_i = 0$;

2) 当 $i = n_f + 1$ 或 $j = n_f + 1$ 时, $A_{ij} = 1$, $X_i = \tilde{P}_{wD}$, $B_i = 1/s$ 。

在页岩气压裂水平井不稳态渗流理论的基础上, 引入物质平衡时间、定义相应的无量纲量后即可获得无量纲产量递减图版, 但物质平衡时间为生产数据分析方法的另一支撑理论, 目前还没有专门针对页岩气压裂水平井的适用性研究。

2 页岩气压裂水平井产能分析的物质平衡时间

使用物质平衡时间的目的在于利用定产条件下的无量纲井底压力倒数 $1/P_{wD}(t_D)$ 来表示普通的产

量递减 $q_{wD}(t_{mbD})$ 。Anderson 和 Mattar^[15]证明了物质平衡时间适用于均质地层中的线性流、径向流及拟稳态流;而在页岩气压裂水平井中,受气体解吸作用、裂缝相互干扰、地层封闭作用的影响,实际的流态更为复杂,但通过下面的演绎研究不难证明,物质平衡时间的适用与井型、介质类型无关,对于页岩气压裂水平井也是适用的。

井口定压是一种特殊的产量递减规律,利用

Stehfest 数值反演计算式(19)中的 2 种情况,可以得到实际时间下的 $t_D \sim 1/P_{wD}(t_D)$, $t_D \sim t_D/P_{wD}$ 与物质平衡时间下的 $t_{mbD} \sim q_D(t_{mbD})$, $t_{mbD} \sim Q_D(t_{mbD})$ 的对比关系图(图 2)。图中 $1/P_{wD}$ (实线)与无量纲物质平衡时间下的无量纲产量(离散点)、 t_D/P_{wD} (实线)与无量纲物质平衡时间下的累积产量(离散点),从不稳态到拟稳态阶段逐渐精确成立,演绎证明了物质平衡时间适用于页岩气压裂水平井。

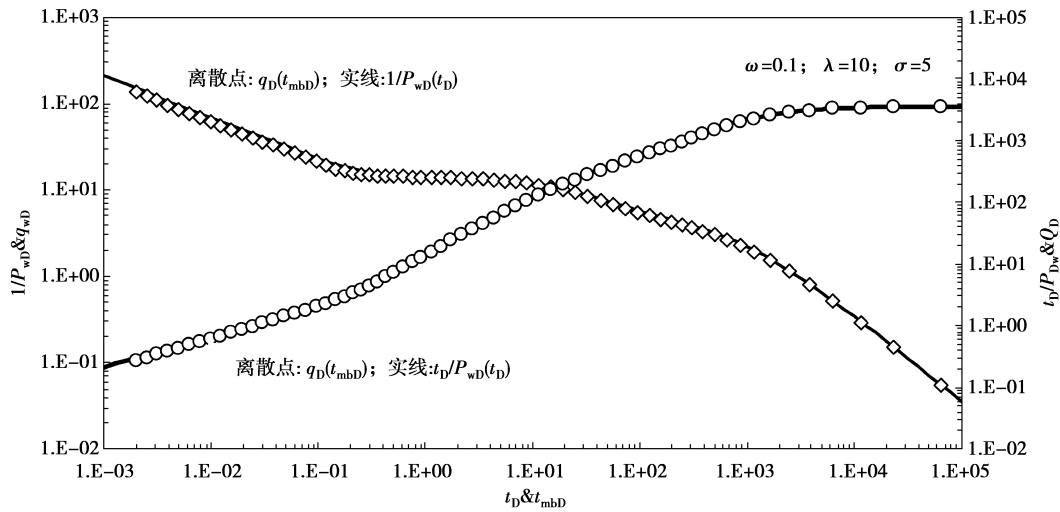


图 2 页岩气压裂水平井产量转化对比

基于物质平衡时间的思想,利用 Duhanmel 褶和压力叠加原理可以得到 n_f 条裂缝的广义拟稳态压力通式,

$$A \cdot \frac{P_{wD}(t_D)}{q_{Dtal}(t_D)} = t_{mbD}(t_D) + b_{pss} \quad (20)$$

其中

$$q_{Dtal}(t_D) = \sum_{i=1}^{n_f} q_{fDi}(t_D), \quad (21)$$

$$t_{mbD}(t_D) = \frac{\int_0^{t_D} [\sum_{i=1}^{n_f} q_{fDi}(\tau)] d\tau}{\sum_{i=1}^{n_f} q_{fDi}(t_D)} \quad (22)$$

在拟稳态阶段,式(2)满足

$$\lim_{s \rightarrow 0} f(s) = \omega + \frac{\sigma(1-\omega)}{\lambda s} [\sqrt{\lambda s} \coth(\sqrt{\lambda s}) - 1] = \omega + \frac{\sigma(1-\omega)}{3} \quad (23)$$

基于式(2),并利用 Laplace 域与实空域的变换关系 $L^{-1}[1/s^2] = t, L^{-1}[1/s] = 1$ 对式(15)做渐进分析,可得

$$A = x_{eD} y_{eD} \left(\omega + \sigma \frac{1-\omega}{3} \right), \quad (24)$$

$$b_{pss} = \left(\omega + \sigma \frac{1-\omega}{3} \right) \sum_{i=1}^{n_f} b_{pssi}(x_{wDi}, y_{wDi}, x_{fDi}), \quad (25)$$

$$b_{pssi} = y_{eD}^2 \left[\frac{1}{3} - \frac{|y_{wDi} \pm y_D|}{2y_{eD}} + \frac{y_{wDi}^2 + y_D^2}{2y_{eD}^2} \right] + \frac{x_{eD}^2 y_{eD}}{x_{fDi} \pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi x_{fDi}}{x_{eD}} \cos \frac{n\pi x_{wDi}}{x_{eD}} \cos \frac{n\pi x_D}{x_{eD}}}{n^2} \frac{\cosh \frac{n\pi [y_{eD} - |y_{wDi} \pm y_D|]}{x_{eD}}}{\sinh(n y_{eD} \pi / x_{eD})} \quad (26)$$

b_{pss} 值由油藏几何形状、各条裂缝的相对位置及缝长决定。式(20)~(26)是页岩气压裂水平井广义拟稳态公式,反映了流动后期的生产特征,从式(20)可以分析出不同参数形成的广义拟稳态公式不同,这样在拟稳态阶段就不能形成归一的曲线,为了能更清晰的反映不稳态和拟稳态流动,需要定义新的无量纲量以绘制图版。

3 页岩气压裂水平井 Agarwal-Gardner 型生产数据分析图版

利用式(20)重新定义压裂水平井的无量纲产量与时间变量

$$q_{Dde} = \frac{b_{pss}}{x_{eD}y_{eD}} \frac{\sum_{i=1}^{n_f} q_{fDi}(t_D)}{P_{wD}(t_D)}, \quad (26)$$

$$t_{Dde} = \frac{3t_{mbD}}{b_{pss}(3\omega + \sigma - \sigma\omega)}. \quad (27)$$

使用新的无量纲量计算定产条件下的无量纲井口压力倒数 $1/P_{wD}(t_{Dde})$ 即可得到页岩气压裂水平井 Agarwal-Gardner 生产数据分析图版,如图 3~5 所示。式(19)表明 A-G 图版形态受吸附参数、裂缝相对位置、体积压裂几何形状等因素的控制,为突出页岩气的渗流特性,这里集中讨论了吸附参数对 A-G 图版形态的影响。

总体上图版可分为两大阶段:前一阶段为不稳定递减阶段,此时压力波尚未传播到封闭边界,流态先后要经历线性流(导数斜率为 $-1/2$)、径向流(导数斜率为 0)、复合线性流(导数斜率为 -0.36),裂缝开始相互干扰)、解吸扩散流(导数“凸起”段,吸附气体从颗粒表面解吸扩散至裂缝)、拟径向流(导数斜

率为 0,裂缝相互干扰形成椭圆流)等阶段;后一段为主要为拟稳态递减阶段,压力波完全传播到封闭边界,此时两组曲线均归一且斜率均为 1,产量呈 Arps 调和递减规律 $q_{Dde} = 1/(t_{Dde} + 1)$ 。受参数的影响有些流态可能无法反应,其中 ω 控制着解吸扩散流持续的时间, ω 值越小扩散流越明显,径向流开始的时间也越早,其中 $\omega = 1$ 代表的均质地层不存在扩散流; σ 决定着吸附气对裂缝系统的供给能力, σ 越大扩散发生的越早越明显; λ 影响着复合线性流的持续时间, λ 越大解吸扩散发生的越晚,限于篇幅这里不做具体谈论。

在拟稳态阶段对式(20)做变形处理,可以得到无量纲累积产量与无量纲井口产量的线性关系式,满足流动物质平衡方程式(28),

$$Q_{Dde} = -b_{pss}[\omega + \sigma(1 - \omega)/3]q_{Dde} + b_{pss}[\omega + \sigma(1 - \omega)/3]. \quad (28)$$

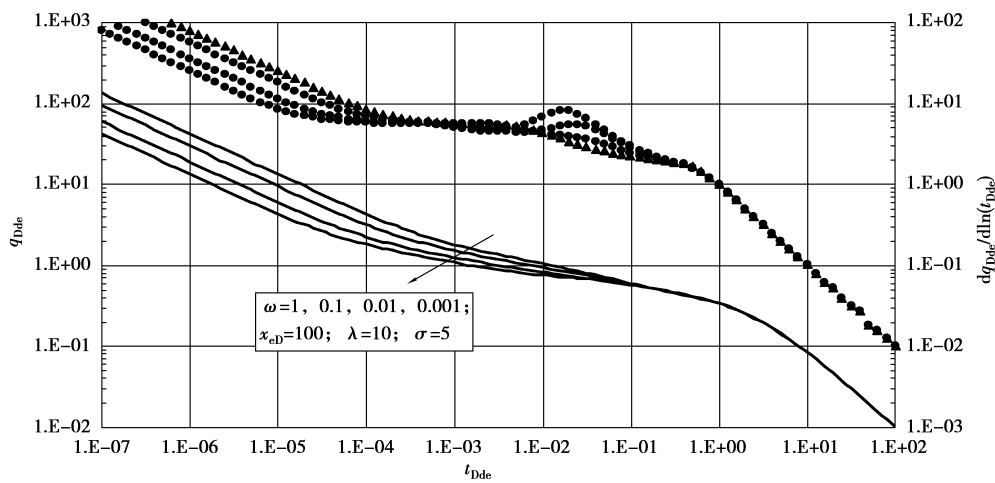


图 3 ω 影响下的页岩气压裂水平井 Agarwal-Gardner 生产数据分析图版

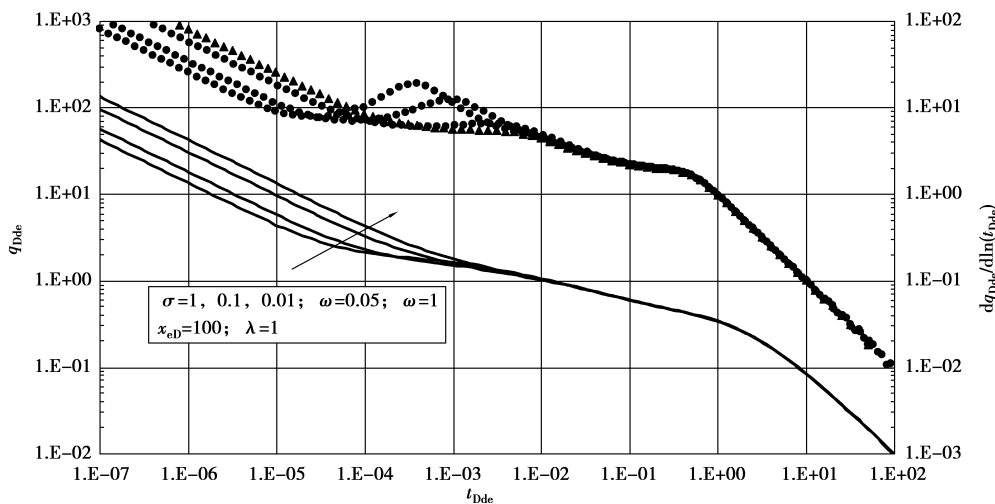


图 4 σ 影响下的页岩气压裂水平井 Agarwal-Gardner 生产数据分析图版

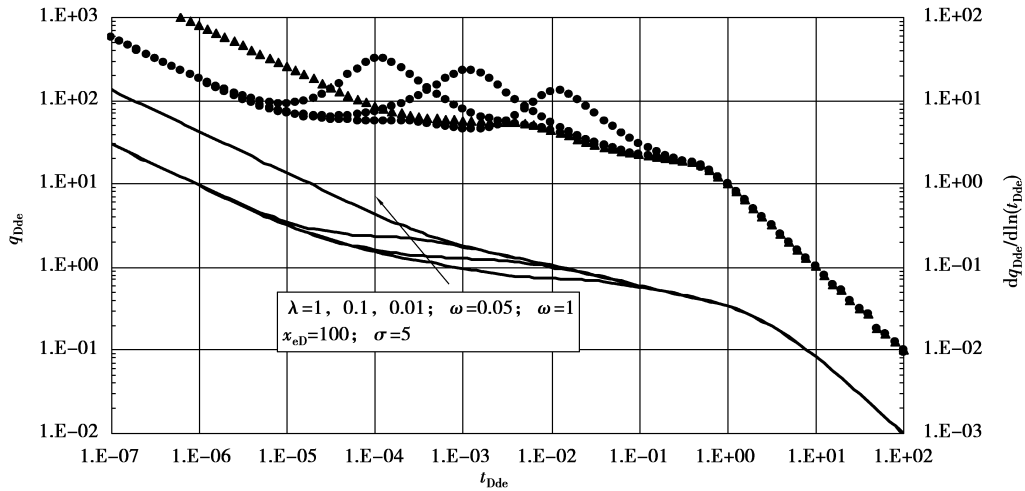


图 5 λ 影响下的页岩气压裂水平井 Agarwal-Gardner 生产数据分析图版

4 应用实例分析

利用国内某口页岩气井的生产数据,笔者给出典型曲线拟合方法。该井自 2011 年投产,体积压裂后测试产量 $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,水平段长 1 045 m,改造段数 10 段,原始地层压力 $P_i = 31.3 \text{ MPa}$,气体粘度 $\mu_i = 0.0199 \text{ MPa} \cdot \text{s}$,压缩系数 $c_{gi} = 0.1185 \text{ kPa}^{-1}$,Langmuir 吸附常数 $V_L = 3 \text{ m}^3/\text{t}$,Langmuir 压力 $P_L = 2.8 \text{ MPa}$,对应的储容比 $\omega = 0.23$,窜流系数 $\lambda = 1.24$,解吸系数 $\sigma = 2.11$,地层温度 T 为标准温度 $T_{sc} = 293.15 \text{ K}$,地层厚度 h 为 7.6 m,裂缝孔隙度 φ_f 为 20%,含水率 $s_w = 20\%$,油藏长宽比为 $y_e = 3x_e$;沿井筒等间距压裂。具体分析步骤如下:

- 1) 将井口压力转化为井底流压 P_{wf} ,并转化为对应的拟压力值 m_{wf} ;
- 2) 计算修正的井口产量 $q_d = q / (m_i - m_{wf})$,绘制 $q_d - t_{mb}$ 曲线;
- 3) 计算修正的累积产量 $Q_d = Q / (m_i - m_{wf})$,绘制 $q_d - Q_d$ 曲线;
- 4) 在 A-G 图版和流动物质平衡图版中完成典型曲线拟合,根据拟合参数计算裂缝长度和页岩气藏地质储量。

图 6 为实际生产数据与流动物质平衡图版中典型曲线的拟合效果,利用 $Q_d / (m_i - m_{wf}) \sim q_d / (m_i - m_{wf})$ 之间的线性关系拟合出直线斜率 S_{lo} ,可以得到

$$b_{pss} = \frac{[S_{lo}]_{MP}}{[\omega + \sigma(1 - \omega)/3]} = 1.477, \quad (29)$$

这里参考量 L_{ref} 取油藏面积 $(x_e \times y_e)^{1/2}$, A-G 典型曲线的拟合参数给出了计算结果,如图 7 所示。

1) 气藏面积

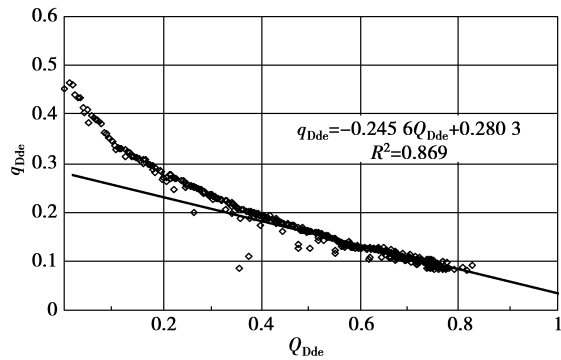


图 6 页岩气压裂水平井流动物质平衡典型曲线拟合效果

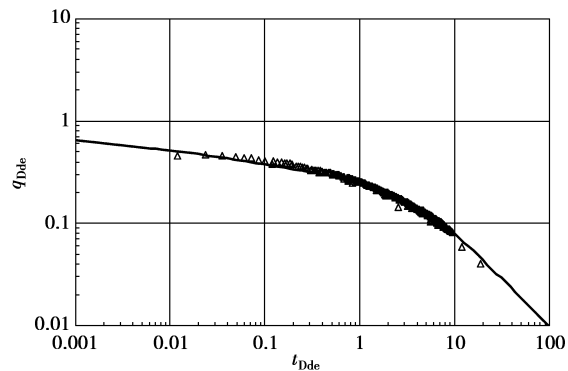


图 7 页岩气压裂水平井 A-G 典型曲线拟合效果

$$A = \frac{3\mu_{gi}}{(3\omega + \sigma - \alpha\omega)(\varphi_i \mu_{gi} c_{gi} + 6P_{sc} T/T_{sc})P_{sc}} \left[\frac{t_{mb}}{t_{Dde}} \right]_{MP} \left[\frac{q_d}{q_{Dde}} \right]_{MP} = 93126 \text{ m}^2. \quad (30)$$

2) 页岩气藏地质储量

$$G_p = A \frac{h\varphi_i Z_{sc}}{P_{sc}} \left[\frac{(1 - s_w)P_i}{Z_i} + \frac{P_{sc}}{\varphi_f Z_{sc}} \frac{V_L P_i}{P_L + P_i} \right] = 0.78 \times 10^8 \text{ m}^3 \quad (31)$$

3) 水力裂缝长度

$$x_f = 0.3x_e = 0.3\sqrt{A/3} = 52.86 \text{ m}. \quad (32)$$

如果已知各裂缝的位置,利用式 b_{pss} 和 x_e 值,也可使用牛顿迭代法计算式(25)得到水力裂缝长度 x_f 。

4) 天然裂缝介质的渗透率

$$k_f = \frac{\mu_{\text{gi}}}{P_{\text{sc}}} \frac{b_{\text{pss}}}{\sqrt{A}} \left[\frac{q_d}{q_{\text{Dde}}} \right]_{\text{MP}} = 0.125 \text{ mD}. \quad (33)$$

5 结 论

不稳定渗流理论、物质平衡时间和数据拟合是生产数据分析方法的理论基础,集中了现代试井分析和气藏工程的优点。笔者使用 Laplace 变换、压力叠加研究页岩气压裂水平井的不稳态渗流机理,根据渐进分析给出了新的广义拟稳态公式,从而定义新的物质平衡时间形成新的 A-G 图版,通过典型曲线拟合评价出气藏泄流面积、地质储量及裂缝渗透率等。

受气体解吸、裂缝干扰、边界封闭的影响,页岩气压裂水平井存在着复合线性流、解吸扩散流及拟稳态流等复杂流动阶段,新的 A-G 图版可将拟稳态阶段的产量递减曲线归一,达到能清晰区分不稳态和拟稳态流动、有效拟合实际生产数据的目的。

需要指出的是,只有利用拟稳态阶段的生产数据评价出的地质储量才有意义,而且只是体积压裂区内的地质储量,如果利用二区复合模型可以对页岩气藏地质储量进行更为有效的评价,此外重新定义气体拟压力也可以进一步地研究气体滑脱、介质压敏等实际问题。

参考文献:

- [1] 张大伟.《页岩气发展规划(2011—2015年)》解读[J]. 天然气工业, 2012, 32(4): 6-8, 117.
ZHANG Dawei. Important measures for promoting the shale gas exploration and development in China: An explanation of The Shale Gas Development Programming from 2011 to 2015 [J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(4): 6-8, 117.
- [2] Wu Y S, Fakcharoenphol P. A unified mathematical model for unconventional reservoir simulation[C] // SPE EUROPEC/EAGE Annual Conference and Exhibition, May 23-26, Vienna, Austria. Vienna: Society of Petroleum Engineers, 2011: 1-16.
- [3] Mayerhofer M J, Lonon E P, Warpinski N R, et al. What is stimulated reservoir volume [J]. SPE Production and Operations, 2010, 25(1): 89-99.
- [4] Soliman M Y, East L, Jody Augustine H. Fracturing design aimed at enhancing fracture complexity[C] // SPE EUROPEC/EAGE Annual Conference and Exhibition, June 14-17, 2010, Barcelona, Spain. Barcelona: Society of Petroleum Engineers Inc, 2010: 1-20.
- [5] Wattenbarger R A, El-Banbi A H, Villegas M E, et al. Production analysis of linear flow into fractured tight gas wells[C] // SPE Rocky Mountain Regional Low Permeability Reservoir Symposium and Exhibition, April 5-8, 1998, Denver Colorado. Colorado: Society of Petroleum Engineers, 1998: 1-12.
- [6] Brown M, Ozkan E, Raghavan R, et al. Practical solutions for pressure-transient responses of fractured horizontal wells in unconventional shale reservoirs[J]. SPE Reservoir Evaluation and Engineering, 2011, 14(6): 663-673.
- [7] 李欣, 段胜楷, 侯大力, 等. 多段压裂页岩气水平井的不稳定生产数据分析[J]. 天然气工业, 2012, 32(12): 1-5.
LI Xin, DUAN Shengkai, HOU Daili, et al. Production data analysis for multi stage fractured horizontal well in shale gas reservoir [J]. Gas Industries, 2012, 32(12): 1-5.
- [8] Nobakht M, Clarkson C R, Kaviani D. New and improved methods for performing rate-transient analysis of shale gas reservoirs [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2012, 15(3): 335-349.
- [9] 段永刚, 魏明强, 李建秋, 等. 页岩气藏渗流机理及压裂井产能评价[J]. 重庆大学学报, 2012, 34(4): 62-66.
DUAN Yonggang, WEI Mingqiang, LI Jiangqiu, et al. Shale gas seepage mechanism and fractured wells' production evaluation [J]. Journal of Chongqing University, 2012, 34(4): 62-66.
- [10] Zhao Y L, Zhang L H, Wu F. Pressure transient analysis for multi-fractured horizontal well in shale gas reservoirs [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2012, 90/91: 31-38.
- [11] Guo J J, Zhang L H, Wang H T, et al. Pressure transient analysis for multi-stage fractured horizontal wells in shale gas reservoirs[J]. Transport in Porous Media, 2012, 93(3): 635-653.
- [12] Anbarci K, Ertekin T. A comprehensive study of pressure transient analysis with sorption phenomena for single-phase gas flow in coal seams[C] // SPE Annual Technical Conference and Exhibition, September 23-26, 1990, New Orleans, Louisiana. New Orleans: Society of Petroleum Engineers, 1990: 411-423.
- [13] Ozkan E, Raghavan R. Some new solutions to solve problems in well test analysis problem; part I-analytical

- considerations [C] // SPE Joint Rocky Mountain Regional. Low Permeability Reservoirs Symposium and Exhibition, March 6-8, 1989, Denver, Colorado; [s. n.], 1989: 359-371.
- [14] Gringarden A C, Ramry H J, Raghavan R. Unsteady-state pressure distributions created by a well with a single infinite-conductivity vertical fracture [J]. SPE Journal, 1974, 14(4): 347-357.
- [15] Aanderson D M, Mattar L. Material-balance-time during linear and radial flow [C] // Petroleum Society's Canadian International Petroleum Conference. Calgary: Petroleum Society, 2003: 1-16.

(编辑 郑洁)