

考虑启动压力梯度的页岩气藏数值模拟

尹 虎¹ 王新海² 刘 洪¹ 汪金如³

1.长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室,湖北 荆州 434023

2.中国石油大学石油工程教育部重点实验室,北京 102249

3.华东石油局试采大队,江苏 泰州 225300

摘要:

页岩气作为一种重要的非常规能源,其渗流及开发原理越来越受到关注。在页岩气井开采过程中,为了全面认识井底压力的响应特征及影响因素,根据页岩气渗流机理、吸附气解吸特征、渗流理论和质量守恒定理,建立双孔介质页岩气藏数学模型。模型以启动压力梯度和等温吸附的原理为前提,应用有限差分法,得到数值模型,编制相应程序对数值模型求解,分析了启动压力梯度、几何因子、储容比、Langmuir 压力、Langmuir 体积对气井井底压力变化的影响。结果表明:双重介质模型能够准确描述吸附气在储层中的解吸过程、基质系统和裂缝系统之间的窜流过程;考虑启动压力梯度更加接近实际地层;考虑吸附解吸作用使井底压力缓慢降低,探测地层边界较晚;利用地层参数分析及室内实验可以间接求出页岩气藏解吸过程中 Langmuir 压力和 Langmuir 体积,这对气井井底压力分析和产能预测非常重要。

关键词:

页岩气;启动压力梯度;双重孔隙介质;数值模拟;井底压力

文献标识码:A

文章编号:1006-5539(2012)04-0043-03

0 前言

页岩气藏是一种非常规气藏,表现为原地成藏的模式。含气页岩既是烃源岩也是圈闭、储层和盖层,岩石组分包括纯页岩、细砂岩、粉砂岩、灰岩和粉砂质泥岩等;矿物成分包括粘土质、硅质、有机碳和钙质等。气藏中的天然气主要包括游离气、吸附气和溶解气,游离气储集在天然裂缝和岩石孔隙中,吸附气储集在粘土颗粒表面和干酪根中,溶解气含量较少,溶解在干酪根和沥青质中。聂海宽总结了“中国海相页岩”“一新二杂三高”和陆相页岩“一新一深二低”的特点^[1-2];

雷宇对鄂尔多斯盆地众生界页岩气藏地质条件进行了全面分析^[3];王祥、张金川及白兆华等对页岩气成藏影响因素及聚集机理进行了研究^[4-6];孙海成分析了储层裂缝系统对产能的影响^[7];段永刚建立页岩气藏双重介质压裂井数学模型,对渗流机理和产能评价进行了研究^[8-9]。目前对页岩气井井底压力分析研究处于起步阶段,考虑启动压力梯度、吸附气解吸特征,结合气体渗流机理和质量守恒定理,建立了双重介质页岩气藏渗流数学方程,并应用有限差分方法,求得数值模型,编制相应程序对数值模型求解,分析了各种地层参数对气井井底压力的影响。

收稿日期:

2012-05-05

基金项目:

国家油气重大专项“大型油气田及煤层气开发”(2011zx05015)

作者简介:

尹 虎(1987-),男,湖北襄阳人,硕士研究生,主要从事试井、油藏工程方面的研究工作。

1 启动压力梯度和等温吸附方程

低渗透低孔隙页岩气藏中,气体渗流规律不符合达西定律,在渗流时除粘滞阻力外,还要克服吸附层的阻力,当外加压力梯度大于启动压力梯度时,气体才发生流动;当外加压力梯度小于启动压力梯度时,气体不发生流动;当外加压力梯度较小时偏离线性。目前,采用具有启动压力梯度的简化模型^[10]:

$$\begin{cases} v=0 & \left| \frac{\partial P}{\partial r} \right| \leq \eta \\ v = -\frac{k}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial r} - \eta \right) & \left| \frac{\partial P}{\partial r} \right| > \eta \end{cases} \quad (1)$$

式中 v ——渗流速度, m/s;

k ——渗透率, μm^2 ;

μ ——粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$;

$\frac{\partial P}{\partial r}$ ——压力梯度, MPa/m ;

η ——启动压力梯度, MPa/m 。

页岩气藏中吸附气含量占总含量的 20%~85%,主要吸附在粘土颗粒表面和干酪根中,气井在开采过程中,地层压力不断降低,吸附在基质表面的吸附气发生解吸,变成游离气。随着吸附气的解吸,基质系统内部和表面形成浓度差,内部气体以扩散方式向外运移。Langmuir 在 1916 年提出固体对气体的吸附理论,并推导出等温吸附方程^[11],表示吸附量与地层压力的关系。Fick 在 1855 年提出的拟稳态扩散定律^[12],表示扩散量与吸附气平均含量变化率成正比。

$$V_e = \frac{V_L P_g}{P_L + P_g} \quad (2)$$

$$\frac{\partial V_m}{\partial t} = -D_m F_s (V_m - V_e) = -\frac{1}{\tau} (V_m - V_e) \quad (3)$$

$$q_m = -F_c \frac{\partial V_m}{\partial t} \quad (4)$$

式中 V_e ——等温吸附量, m^3/m^3 ;

V_L ——饱和吸附气含量, m^3/m^3 ;

P_L ——吸附气含量达到最大吸附量的 50% 压力, MPa ;

P_g ——气体压力, MPa ;

V_m ——吸附气平均含量, m^3/m^3 ;

D_m ——扩散系数;

F_s ——形状因子;

τ ——吸附时间常数;

q_m ——扩散量, $\text{m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{d})$;

F_c ——几何因子。

2 双重介质页岩气藏数学模型

2.1 假设条件

将页岩气藏简化成双重孔隙介质模型,建立考虑表皮系数和井筒储集系数的数学模型^[13],假设条件:

a) 气井以定产量生产,裂缝系统中的游离气以层流形式流向井筒,服从达西定律;地层压力降低,基质中的吸附气开始解吸变成游离气,服从 Langmuir 等温吸附方程和 Fick 扩散定律;基质系统和裂缝系统在压力差作用下发生窜流,视为拟稳态。

b) 地层岩石微可压缩,且压缩系数为常数。

c) 地层流体为单相微可压缩,压缩系数为变值。

d) 考虑表皮系数和井筒储集系数,忽略重力作用。

e) 不考虑开采过程中页岩气藏温度变化,渗流为等温过程。

f) 气体粘度为常数。

2.2 基本渗流方程

裂缝系统:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho_g v_f) + \rho_g \frac{\alpha k_m}{\mu} (P_m - P_f) = \frac{\partial (\rho_g \Phi_f)}{\partial t} \quad (5)$$

基质系统:

$$-\rho_g \frac{\alpha k_m}{\mu} (P_m - P_f) - \rho_g F_c \frac{\partial V_m}{\partial t} = \frac{\partial (\rho_g \Phi_m)}{\partial t} \quad (6)$$

根据质量守恒定律,综合式(1)~(6)可得页岩气渗流总方程:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \rho_g \frac{k_f}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial r} - \eta \right) \right) = \frac{\partial (\rho_g \Phi_f)}{\partial t} + \rho_g F_c \frac{\partial V_m}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_g \Phi_m)}{\partial t} \quad (7)$$

内边界条件:

$$2\pi \frac{k_f h}{\mu} \left(r \frac{\partial P_f}{\partial r} \right)_{r=r_w} - C \frac{dP_{wf}}{dt} = qB \quad (8)$$

$$P_{wf} = \left(P - S r \frac{\partial P_f}{\partial r} \right)_{r=r_w} \quad (9)$$

外边界条件:

$$\left(r \frac{\partial P}{\partial r} \right)_{r=r_e} = 0 \quad (10)$$

式中 q ——气体产量, m^3/d ;

B ——天然气体积系数;

r ——渗流半径, m ;

ρ_g ——气体密度, kg/m^3 ;

Φ_f ——裂缝孔隙度;

Φ_m ——基质孔隙度;

α ——形状因子, $1/\text{m}^2$;

P_m ——基质系统压力, MPa ;

P_f ——裂缝系统压力, MPa ;

P_{wf} ——井底压力,MPa;
 k_m ——基质渗透率, μm^2 ;
 k_f ——裂缝渗透率, μm^2 ;
 S ——表皮系数;
 C ——井筒储集系数, m^3/MPa 。

3 地层敏感参数分析

3.1 启动压力梯度对井底压力的影响

如图1所示,其它参数不变,不考虑启动压力梯度,压力导数中“凹子”后期出现水平段;考虑启动压力梯度,压力导数曲线中“凹子”后期出现上翘,随着启动压力梯度增加,渗流过程中能量损失增加,双双对数曲线整体上翘幅度增大。

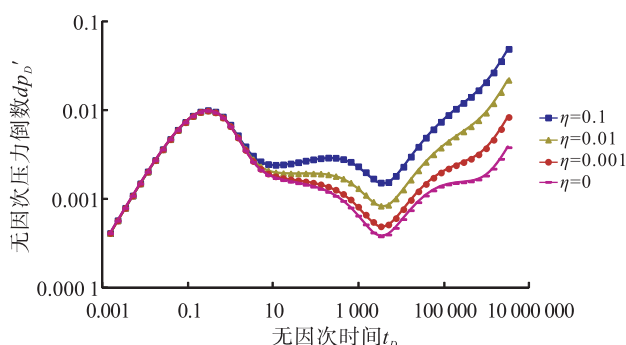


图1 启动压力梯度对压力导数曲线的影响

3.2 几何因子对井底压力的影响

如图2所示, F_c 表示扩散量的几何因子,当 $F_c=0$ 时,扩散量为0,即不考虑吸附气解吸作用;当 $F_c>0$ 时,表示吸附气解吸生产的游离气参与流体渗流,由于吸附气主要存在于基质系统中,在双双对数压力曲线上表现在过渡段的“凹子”变深和探测地层边界较晚。

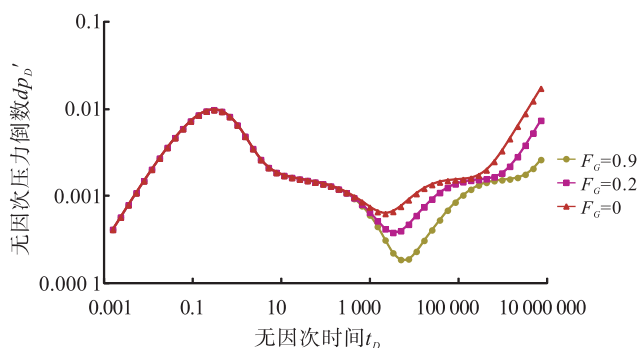


图2 几何因子对压力导数曲线的影响

3.3 储容比对井底压力的影响

如图3所示,弹性储容比(ω)表示裂缝系统中原油的弹性储量与总系统弹性储量之比。其它参数不变,储容比越小,基质系统向裂缝系统提高气量越多,双双对数压力导数曲线下凹越深。

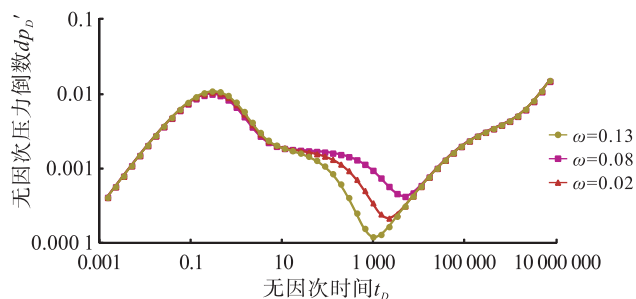


图3 储容比对压力导数曲线的影响

3.4 Langmuir 体积对井底压力的影响

如图4所示,Langmuir 体积即等温吸附方程中 V_L ,表示饱和和吸附气含量,其它参数不变,Langmuir 体积越大,气藏中吸附气含量越多,双双对数曲线上压力导数中“凹子”以后曲线向下移动,而 Langmuir 压力(P_L)对井底压力变化的影响在双双对数曲线上表现不明显。

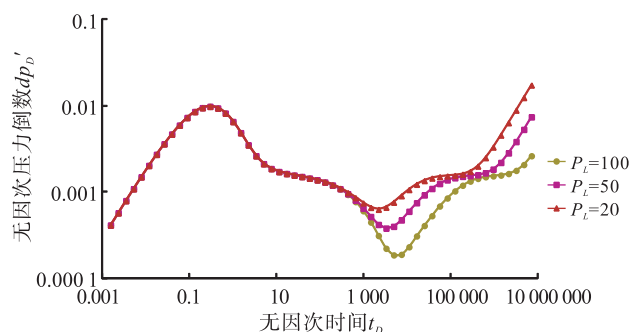


图4 Langmuir 体积对压力导数曲线的影响

4 结论

a)页岩气藏渗透率和孔隙度极低,气体渗流过程中,考虑启动压力梯度更加接近实际地层,考虑吸附解吸作用,使井底压力缓慢降低,探测地层边界较晚。

b)建立双重介质模型,能够准确描述吸附气在储层中的解吸过程、基质系统和裂缝系统之间的窜流过程,以及裂缝系统中的低速非达西渗流过程。

c)通过对地层参数分析及室内实验,求出页岩气藏解吸过程中 Langmuir 压力和 Langmuir 体积,对气井井底压力分析和产能预测非常重要。

参考文献:

- [1] 聂海宽,何发岐,包书景. 中国页岩气地质特殊性及其勘探对策[J]. 天然气工业,2011,31(11):1-6.
- [2] 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. (下转第57页)

(上接第 45 页)

- [3] 雷宇,王凤琴,刘红军,等.鄂尔多斯盆地中生界页岩气成藏地质条件[J].天然气与石油,2011,29(6):49-54.
- [4] 王祥,刘玉华,张敏,等.页岩气形成条件及成藏影响因素研究[J].天然气地球科学,2010,21(2):350-355.
- [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] 白兆华,时保安,左学敏.页岩气及其聚集机理研究[J].天然气与石油,2011,29(3):54-57.
- [7] 孙海成,汤达祯,蒋廷学.页岩气储层裂缝系统影响产能的数值模拟研究[J].石油钻探技术,2011,39(5):63-67.
- [8] 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,2011,34(4):62-65.
- [9] 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(10):1-4.
- [10] 张建国,雷光伦,张艳玉.油气层渗流力学[M].东营:中国石油大学出版社,2006,12-13.
- [11] King G R, Turgay E, Fred C. Numerical Simulation of the Transient Behavior of Coal Seem degasification Wells[J]. SPE Formation Evaluation, 1986, 1(2):165-183.
- [12] Juan A, Faruk C, Deepak F. Accurate Simulation of Shale-Gas Reservoirs[J]. Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition Held in Florence, 2010, 1-11.
- [13] Sawyer W K, Paul G W. Development and Application of a 3D Coal-bed Simulator [J]. Presented at the International Technical Meeting of CIM Petroleum Society and SPE, 1990, 7(4):1-9.