

文章编号:0253-9985(2010)02-0240-04

考虑启动压力梯度下的火山岩气藏数值模拟研究

许进进,徐旭辉,凡哲元,胡建国,宋艳波,郭鸣黎,王树平

(中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:由于火山岩气藏储层存在基质和裂缝双重介质、原始含水饱和度较高的特点,导致渗流过程中存在启动压力梯度的影响,常规砂岩气藏的单一介质、达西渗流理论已经不适用于此类气藏。从物质守恒理论出发,建立了考虑启动压力梯度的双重介质气、水两相渗流数学模型,利用有限差分方法进行数值求解,编写了数值模拟计算程序;结合室内实验研究结果,确定了模型中的相关参数的取值,渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、束缚水饱和度大于 20% 时,要考虑启动压力梯度的影响。利用 XS 气田实际单井进行数值模拟研究表明:模拟结果符合客观实际,考虑比不考虑启动压力梯度影响时的稳产时间、稳产期产气量、稳产期采出程度、最终采收率等生产开发指标小。在生产过程中,应考虑启动压力梯度对火山岩气藏生产开发的影响。

关键词:双重介质;启动压力梯度;数值模拟;生产开发指标;火山岩气藏

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

A numerical simulation of volcanic gas reservoirs under consideration of start-up pressure gradient

Xu Jinjin, Xu Xuhui, Fan Zheyuan, Hu Jianguo, Song Yanbo, Guo Mingli, and Wang Shuping

(Research Institute of Petroleum Exploration & Production, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: The Darcy flow theory suitable to conventional sandstone gas reservoirs with a single medium can not be applied to volcanic gas reservoirs, because they are characterized by the dual media of matrix and fracture and the higher original water saturation, resulting in an impact of start-up pressure gradient on a percolation process. According to the theory of mass conservation, a mathematical model of two-phase (gas and water) flow in dual media was built under consideration of start-up pressure gradient, for which the finite difference approach was used to obtain numerical solution and a calculation program of numerical simulation was compiled. In combination with laboratory experiment results, the values of this model parameters are determined, and it is shown that the impact of start-up pressure gradient has to be considered when permeability is lower than $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ and irreducible water saturation is over 20%. The numerical simulation results of a single well in XS gas field are consistent with the actual situation, and several indices of production and development, such as production plateau time, gas output during production plateau, recovery degree of production plateau and final recovery efficiency, are lower when the impact of start-up pressure gradient is considered than not. It is obvious that the impact of start-up pressure gradient has to be considered during the production of volcanic gas reservoirs.

Key words: dual media, start-up pressure gradient, numerical simulation, production and development index, volcanic gas reservoir

近年来,随着对国内外油气资源需求增大,非常规天然气藏的研究也逐渐受到重视,火山岩气藏就是其中一个主要部分^[1~3]。火山岩气藏在储、渗、流体特性上有别于常规均质砂岩气藏,主

要有两点:一是储层存在基质和裂缝双重介质,二是气藏原始含水饱和度往往较高,导致渗流过程中存在启动压力梯度的影响。常规的砂岩气藏单一介质、适用于达西渗流理论,而达西渗流理论已

收稿日期:2009-07-29。

第一作者简介:许进进(1982—),男,博士后,油气田开发工程。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“973”)项目(2007CB209500)。

经不适用于火山岩类气藏,亟待建立能够反映火山岩气藏复杂流体渗流规律的模型。

1 启动压力梯度的影响分析

考虑到火山岩气藏气水两相流动,所以存在水吸附于基质孔隙中,描述低渗透、低速流体渗流运动方程为^[4]:

$$\begin{cases} \vec{u} = -\frac{K}{\mu}(\nabla p - G) = -\frac{K}{\mu}\left(1 - \frac{G}{|\nabla p|}\right)\nabla p & (\nabla p > G) \\ \vec{u} = 0 & (\nabla p \leq G) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\vec{u}$ 为渗流速度,cm/s; K 为渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; μ 为流体粘度,mPa·s; G 为启动压力梯度,MPa/m; ∇p 为压力梯度,MPa/m。

尽管许多学者对气藏启动压力梯度做了大量研究^[5~11],然而研究束缚水饱和度对气藏启动压力梯度影响的较少。依呷^[12]通过一系列实验研究,得到了低渗透气藏中气体渗流存在启动压力梯度的条件:

- 1) 无束缚水或气藏有效渗透率大于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 或束缚水饱和度低于 20% 时,不存在启动压力梯度;
- 2) 当束缚水饱和度大于 20% 时,启动压力梯度和束缚水饱和度之间为直线递增关系。

根据 XS 气田实验数据,进行分析得到了同样的结论。

从图 1 中可以得到类似的结论:

- 1) XS 火山岩气藏储层含水饱和度高于 40% 时才出现启动压力梯度的影响;
- 2) 对同一块岩心,含水越高,启动压力梯度值越大;
- 3) 在相同含水饱和度下,渗透率越小,启动压力梯度值越大。

本文将采用与 XS 火山岩气田相近的理想模型进行渗流规律研究,因此采用廊坊分院提供的实验数据进行参数的赋值^[13],从上图中回归得到:

$$G = 0.348S_w - 15.02 \quad (2)$$

式中: G 为启动压力梯度,MPa/m; S_w 为含水饱和度,%。

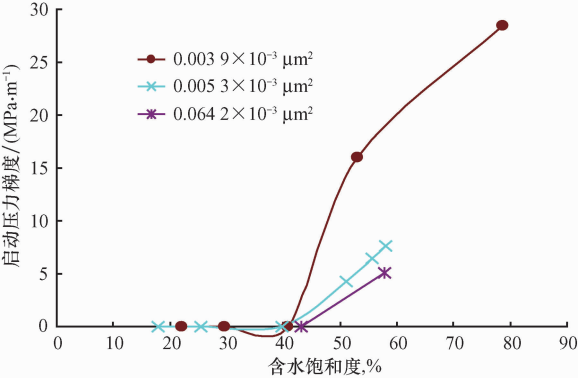


图1 XS 气田不同渗透率下启动压力梯度
随含水饱和度的变化^①

Fig. 1 Changes of start-up pressure gradient with water saturation under different permeability in XS gas field

2 复杂渗流数学模型建立

2.1 假设条件

- 1) 火山岩气藏被认为是由低渗透、高储存能力的火山岩基质微孔系统和高渗透、低储存能力的火山岩基质裂隙宏观孔隙系统组成,但是由于裂缝中的渗透率很大,不存在启动压力梯度,而基质渗透率较小,存在启动压力梯度。因此,考虑基质和裂缝中均有渗流,即双孔双渗模型;
- 2) 孔隙介质中的气水两相流体为牛顿流体;
- 3) 流体在裂隙和孔隙中的流动是相互独立的(有各自独立的控制方程),而又相互重叠的。

2.2 建立渗流数学模型

考虑气水两相二维双重介质双孔双渗模型,建立基质中的气相和水相方程以及裂隙中的气相和水相方程。

基质中气相连续性方程:

$$\nabla \left[\frac{\alpha \rho_{gm} K_{rgm} K_m}{\mu_{gm}} (\nabla P_{gm} - \gamma_{gm} \nabla D - G_g) \right] - \alpha \lambda_g (P_{gm} - P_{gf}) + \alpha q_{gm} = \frac{\alpha \partial (\phi_m S_{gm} \rho_{gm})}{\partial t} \quad (3)$$

基质中水相连续性方程:

$$\nabla \left[\frac{\alpha \rho_{wm} K_{rwm} K_m}{\mu_{wm}} (\nabla P_{wm} - \gamma_{wm} \nabla D - G_w) \right] - \alpha \lambda_w (P_{gm} - P_{gf}) + \alpha q_{wm} = \frac{\alpha \partial (\phi_m S_{wm} \rho_{wm})}{\partial t} \quad (4)$$

① 霍凌静. 火山岩岩心实验研究. 中石油研究院廊坊分院,2009

裂缝中气相连续性方程:

$$\nabla\left[\frac{\alpha\rho_{\text{gf}}K_{\text{r}\text{gf}}K_{\text{f}}}{\mu_{\text{gf}}}(\nabla P_{\text{gf}}-\gamma_{\text{gf}}\nabla D)\right]+$$
$$\alpha\lambda_{\text{g}}(P_{\text{gm}}-P_{\text{gf}})+\alpha q_{\text{gf}}=\frac{\alpha\partial(\phi_{\text{f}}S_{\text{gf}}\rho_{\text{gf}})}{\partial t}\tag{5}$$

裂缝中水相连续性方程:

$$\nabla\left[\frac{\alpha\rho_{\text{wf}}K_{\text{r}\text{wf}}K_{\text{f}}}{\mu_{\text{wf}}}(\nabla P_{\text{wf}}-\gamma_{\text{wf}}\nabla D)\right]+$$
$$\alpha\lambda_{\text{w}}(P_{\text{gm}}-P_{\text{gf}})+\alpha q_{\text{wf}}=\frac{\alpha\partial(\phi_{\text{f}}S_{\text{wf}}\rho_{\text{wf}})}{\partial t}\tag{6}$$

式中: ρ 为密度, g/cm^3 ; K_{r} 为相对渗透率, 小数; μ 为粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; P 为压力, 10^{-1} MPa ; q 为产量, cm^3/s ; S 为饱和度, 小数; γ 为重度, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-2}$; K 为绝对渗透率, $10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$; ϕ 为孔隙度, 小数; G 为启动压力梯度, $10^{-1}\text{ MPa}/\text{cm}$; λ 为窜流系数, 无量纲; D 为某一基准面算起的深度, 向下为正, cm ; t 为时间, s ; α 为维数因子, cm ; 下标 g, w 分别代表气相和水相; 下标 m 和 f 分别代表基质和裂缝。

2.3 内外边界处理

考虑两种外边界:定压边界和封闭边界两种情况。对于内边界的处理,考虑了定产量生产,直至井底流压下降到某一定值,接着定流压生产,直至不能产气为止。

2.4 数学模型求解

利用全隐式有限差分方法进行求解,得到了基质和裂缝中的气、水压力和饱和度变化关系式,利用 VB6.0 编写了数值模拟计算程序,用于实际火山岩气藏气井数值模拟研究。

3 单井数值模拟研究

3.1 单井基本参数

选取 XS 气田 X9 区块 A 井作为实例应用对象。该井是一口中产井,储层物性较差。储层长度 1 000 m,宽度 1 000 m,有效厚度 20 m,深度 3 600 m,气藏温度 142℃,裂缝间距 20 m,气藏初始地层压力 40 MPa,裂缝平均孔隙度 1%,基质平均孔隙度 10%,基质初始含气饱和度 54.65%,基质绝对渗透率 $0.1\times10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$,裂缝初始含气饱和度 85%,裂缝绝对渗透率 $10\times10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$,水的压缩

系数 $6.375\times10^{-4}\text{ MPa}^{-1}$ 。

3.2 相渗及毛管力曲线

1) 气水相渗曲线

利用 A 井全直径火山岩岩样的气、水相渗实验数据的处理结果,得到了基质中气、水相渗曲线(图 2)。对于裂缝中气水相对渗透率,由于缺乏实验数据,模型中采用两条斜交叉直线。

2) 气水毛管压力曲线

A 井的毛管压力资料主要是通过压汞法获得。得到了 X9 区块火山岩储层的气水毛管压力曲线(图 3)。由于裂缝中渗透高、导流能力高,含水率低,毛管压力可忽略不计。

3.3 数值模拟结果分析

利用开发得到的数值模拟器,对不同条件下火山岩气藏渗流规律进行了数值模拟研究,通过比较分析,得到了相应的结论。

设定生产气量 $3\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$,模拟到 3 年时间以及整个模拟过程中的压力对比、产气量对比、采收率对比情况。

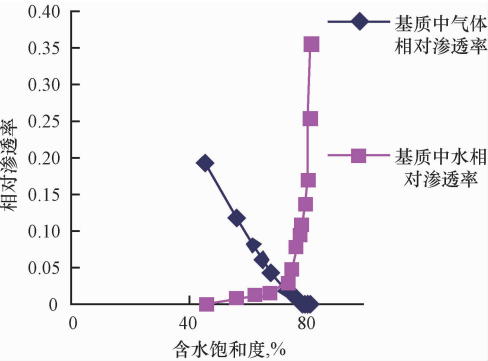


图 2 基质中气、水相对渗透率曲线

Fig. 2 Gas-water relative permeability curve in matrix

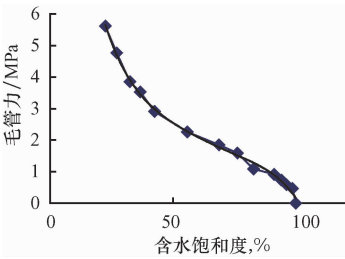


图 3 基质中毛管力曲线

Fig. 3 Capillary pressure curve in matrix

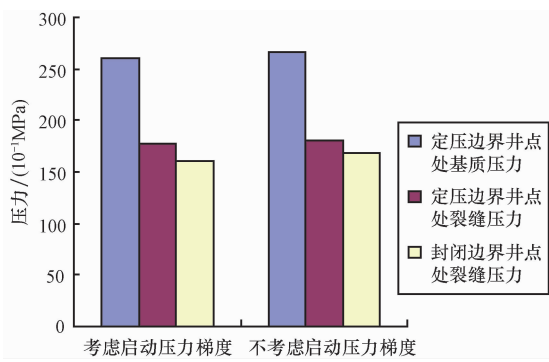


图4 生产3年时井点处气相压力对比
Fig. 4 Gas pressure comparison at well points after 3 years of production

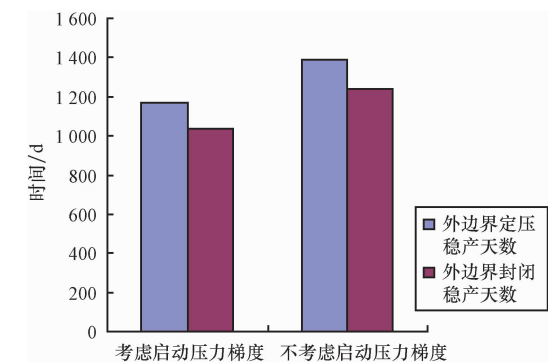


图5 产量 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 时稳产时间对比
Fig. 5 Production plateau time comparison at a production rate of $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$

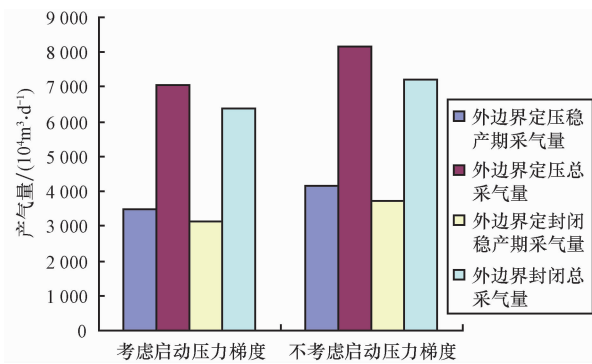


图6 产量 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 时采气量对比
Fig. 6 Gas production comparison at a production rate of $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$

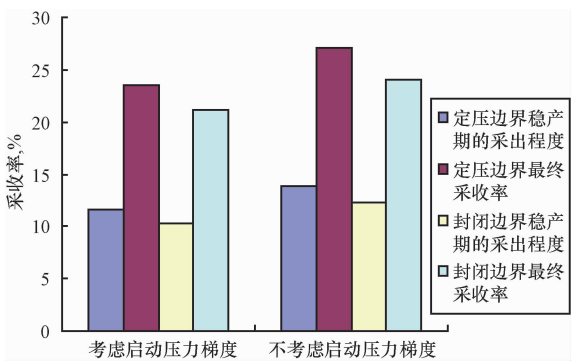


图7 产量 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 时采收率对比
Fig. 7 Recovery efficiency comparison at a production rate of $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$

从上图能够看出：

1) 不同影响因素条件下,定压边界时稳产期累计产气量高于封闭边界时稳产期累计产气量;定压边界时稳产期采出程度高于封闭边界时稳产期采出程度;定压边界时总累计产气量高于封闭边界时总累计产气量;定压边界时最终采收率高于封闭边界时最终采收率。

2) 定压边界条件下,稳产天数高于封闭边界条件下稳产天数,考虑启动压力梯度条件,二者相差128.85 d;不考虑启动压力梯度条件下,二者相差153.49 d。

3) 相同外边界条件下,稳产期采气量、稳产期采出程度、总累计产气量以及最终采收率与压力变化具有相同规律,考虑启动压力梯度时的相关生产开发指标低于不考虑启动压力梯度时的值。

4 结论

1) 在气、水两相条件下,启动压力梯度对气体渗流造成的影响是有前提条件的,必须渗透率低于某个特定值,束缚水饱和度高于某个特定值,这两个特殊值可以通过实验研究来确定。本文研究区域岩心实验分析表明,该区束缚水饱和度下限值为40%左右。

2) 考虑启动压力梯度影响得到的生产开发指标比不考虑时得到的结果低,例如稳产时间、稳产期采气量、累计可采气量、最终采收率等关键参数。

3) 从采气量和采收率这两个关键参数来看,启动压力梯度对生产开发效果的影响是不可忽略的,在实际生产开发研究中要加以重视。

(下转 259 页)