

一个新的低渗透气藏气井产能预测公式

严文德 郭肖 孙雷

(“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室·西南石油大学)

严文德等. 一个新的低渗透气藏气井产能预测公式. 天然气工业, 2006, 26(1): 88-89.

摘要 低渗透气藏普遍具有低孔、低渗、高含水饱和度的特点, 因而往往具有较高的启动压力梯度。目前, 在进行低渗透气井产能预测时, 多采用常规气藏的产能预测公式, 启动压力梯度被忽略, 导致预测结果与生产实际存在较大误差。通过大量文献的调研, 确认低渗透气藏中启动压力梯度确实存在, 并且已逐渐成为产能预测中一个不容忽视的重要影响因素。为此, 文章基于对低渗透气藏渗流机理的分析和研究, 利用 Forchheimer 由实验提出的描述气体渗流的压降二次方程, 同时考虑启动压力梯度的影响, 推导出了适合低渗透气藏的气井产能预测公式, 并对其进行了实例计算分析, 认为低渗透气藏产能预测中必须考虑启动压力梯度的影响, 得到了进行产能预测时一些必要参数的获取方法。

关键词 低渗透油气藏 启动压力 气井产能 产能预测 数学模型

一、引言

低渗透气藏普遍具有低孔、低渗、高含水饱和度的特点, 气、水赖以流动的通道很窄, 在细小的孔隙喉道处易形成水化膜^[1,2]。地层孔隙中的气体从静止到流动必须突破水化膜束缚, 作用于水化膜表面两侧的压力差达到一定大小是气体开始流动的必要条件。气体流动时必须保持一定的压力梯度, 否则孔隙喉道处的水化膜又将形成, 气体停止流动^[3]。这种压力梯度即为气体渗流时的启动压力梯度, 并且渗透率越低启动压力梯度越大^[4]。启动压力梯度的概念最早由 B.A. 弗洛林^[4]提出, 众多学者^[4-7]通过实验验证了低渗透介质中启动压力梯度的存在。

目前, 在进行低渗透气井产能预测时启动压力梯度常被忽略, 这必将造成较大的预测误差, 故笔者基于 Forchheimer^[8], 通过实验提出了描述气体渗流的压降二次方程, 同时考虑启动压力梯度的影响, 推导出了适合低渗透气藏的气井产能预测公式。

二、气井稳态产能预测公式的推导

Forchheimer^[8]通过实验提出了下面的二次方程来描述高速非达西流动:

$$-\frac{dp}{dl} = \frac{\mu}{K}v + \beta_0 v^2 \quad (1)$$

对于平面径向流, 当考虑启动压力的存在时, 上式变为:

$$\frac{dp}{dr} - \lambda_k = \frac{\mu}{K}v + \beta_0 v^2 \quad (2)$$

令 $p'(p, r) = p - \lambda r$, 代入式(2)。在稳定流动情况下, 可以利用地面产量代换 v , 同时考虑 $B_g =$

$$\frac{ZTp_{sc}}{T_{sc}p} \text{, 得:}$$

$$\frac{dp'}{dr} = \frac{\mu}{K} \frac{1}{2\pi rh} \frac{ZTp_{sc}}{T_{sc}p} Q + \beta_0 \left(\frac{1}{2\pi rh} \frac{ZTp_{sc}}{T_{sc}p} Q \right)^2 \quad (3)$$

引入 $m(p') = 2 \int_{p'_o}^{p'} \frac{p'}{\mu} dp'$, 对上式积分并化简整理得到:

$$p'^2 - p'_{wf}{}^2 = \frac{\bar{\mu} Z}{\pi K h} \frac{p_{sc} T}{T_{sc}} Q_{sc} \left(\ln \frac{r}{r_w} + S' \right) \quad (4)$$

式中: $S' = S + S_{sp} + D_{sp} Q_{sc}$

$$S_{sp} = -\frac{\lambda}{p} (r - r_w)$$

$$D_{sp} = \frac{\beta_0}{2\pi h} \frac{ZTp_{sc}}{T_{sc}p} \frac{K}{\mu} \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r} - \frac{\lambda}{p} \ln \frac{r}{r_w} \right)$$

定义: $\Delta p'^2 = p'^2 - p'_{wf}{}^2 = (p - \lambda r)^2 - (p_{wf} - \lambda r_w)^2$

式(4)的形式如同常规气藏的产能预测公式, 但由于考虑了启动压力梯度的影响, 公式中压力平方差项被净压力平方差项所替代, 且表皮项的计算也不同于常规模型。

三、实例计算分析

某低渗透气藏,气藏基本参数为: $p_e = 31.889$ MPa; $r_e = 1167.64$ m; $p_{wf} = 16.548$ MPa; $r_{wf} = 0.1015$ m; $h = 9.144$ m; $K = 1.5 \times 10^{-3}$ μm^2 ; $T = 395.6$ K; $\mu = 0.027$ mPa·s; $Z = 0.89$; $\gamma_g = 0.76$ 。用推导得出的产能预测公式,根据计算结果作图1、2。

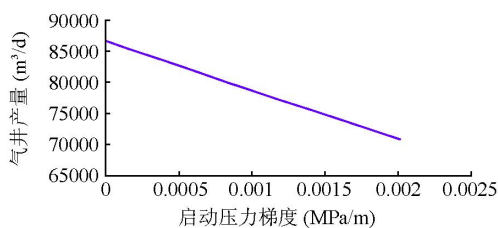


图1 气井产量随启动压力梯度变化关系曲线图

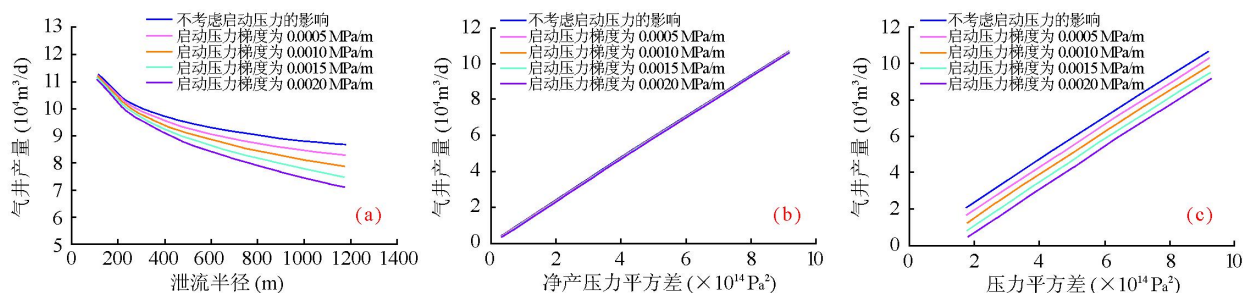


图2 气井产量随泄流半径、净产压力平方差、压力平方差变化关系曲线图

由图1和图2-a可以看出:随气体启动压力梯度增大,气井产能逐渐减小;随泄流半径的增加,气井产量下降,且启动压力梯度越大,产量下降越快。

由图2-b可以看出:无论启动压力梯度为何值,气井产量与净压力平方差之间具有相同的变化趋势,对应相同的井底流压和地层压力,启动压力梯度越大,净产压力平方差越小,故气井产量越小。

从图2-c则可看出:随压力平方差的增加,气井产量增加,且启动压力梯度越大,对应同一压力平方差下气井产量越小,对应相同的压力平方差增量,产量增加幅度越小。

通过绘制如图2-c关系曲线,将其延伸至气井产量为零时,可计算得启动压力梯度值;再绘制图2-b所示的关系曲线,可计算得出视表皮系数值。

四、结 论

(1)基于 Forchheimer 提出的描述气体渗流的压降二次方程,考虑启动压力梯度的影响,推导得出了适合低渗透气藏的气井产能预测公式。

(2)启动压力梯度越大,气井产量越小。

(3)随泄流半径的增加,气井产量下降,且启动压力梯度越大,产量下降越快。

(4)随压力平方差的增加,气井产量增加,且启动压力梯度越大,产量增加越慢。

符 号 说 明

p 为压力, Pa; Z 为偏差因子, 无因次; T 为温度, K; l 为

流动方向长度, m; K 为渗透率, μm^2 ; μ 为粘度, Pa·s; v 为流动速度, m/s; β 为紊流系数, 1/m; ρ 为密度, kg/m^3 ; r 为径向半径, m; λ 为启动压力梯度, Pa/m; B 为体积系数, 无因次; Q 为产量, m^3/s ; S' 为视表皮系数, 无因次; S 为常规表皮系数, 无因次; D 为惯性或紊流系数, s/m^3 ; $\Delta p'^2$ 为净产压力平方差, Pa^2 。

下标: g 为气相; e 为供给边界; w 为井筒; wf 为井底; sc 为地面标准条件; sp 为考虑启动压力情况。

参 考 文 献

- [1] 张琰, 崔迎春. 低渗气藏主要损害机理及保护方法的研究[J]. 地质与勘探, 2000, 35(5): 76-78.
- [2] 冯文光. 凹型压力恢复曲线导数图版及其在致密气藏中的应用[J]. 天然气工业, 1992, 12(3): 29-34.
- [3] 冯曦, 钟予勋, 罗涛. 低渗透致密储层气井试井模型研究[J]. 天然气工业, 1998, 18(1): 56-59.
- [4] 戈尔布诺夫 A T. 异常油田开发[M]. 张树宝, 译. 北京: 石油工业出版社, 1987: 181.
- [5] 刘建军, 刘先贵, 胡雅祉. 低渗透岩石非线性渗流规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 556-561.
- [6] 冯文光. 非达西低速渗流的研究现状与进展[J]. 石油勘探与开发, 1986, 13(4): 76-80.
- [7] 闫庆来, 何球轩. 低渗透油层中单相液体渗流特征的实验研究[J]. 西安石油学院学报, 1990, 5(2): 1-6.
- [8] FORCHHEIMER P H. Wasserbewegung durch boden[J]. Z. Ver. Deutsch. Ing., 1901, 45: 1781-1788.

(收稿日期 2005-09-29 编辑 韩晓渝)