

## 考虑启动压力梯度的低渗底水气藏见水时间预测

张庆辉<sup>1</sup>, 李相方<sup>2</sup>, 张磊<sup>2</sup>, 袁海菊<sup>3</sup>, 赖令斌<sup>4</sup>

(1. 中国石油青海油田分公司勘探开发研究院, 甘肃敦煌 736200; 2. 石油工程教育部重点实验室(中国石油大学(北京)), 北京 102249; 3. 中国石油青海油田分公司供水供电公司, 青海茫崖 816400; 4. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

**摘 要:** 由于存在启动压力梯度, 低渗透底水气藏中的水锥动态不同于常规底水气藏, 因而利用常规预测公式计算气井见水时间, 其计算结果肯定与真实情况有偏差。建立了底水气藏的水锥过程模型: 气井钻开部分气层, 射孔段为平面径向流, 射孔段以下为平面径向流和半球面向心流的组合。依照该模型, 假设储层水平、均质、等厚且具有各向同性, 水以活塞方式驱气, 气、水的密度和黏度均为常数, 气水界面内外的压力梯度相同, 忽略重力和毛管力。在此假设条件下, 推导出了考虑启动压力梯度的低渗透底水气藏气井见水时间预测公式。将该公式与 Sobocinski-Cornelius 方法进行了实例计算对比, 发现该公式计算的见水时间更接近于实测值; 且利用推导出的预测公式计算的见水时间随着启动压力梯度的增加不断缩短, 这符合定产量生产条件下, 启动压力梯度越大则井底压力越小, 底水与井底之间的压差越大, 从而更容易发生底水锥进的实际情况。

**关键词:** 启动压力 压力梯度 低渗透油气藏 底水锥进 见水时间 数学模型

**中图分类号:** TE348 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890(2012)05-0096-04

## Prediction of Water Breakthrough Time in Low Permeability Gas Reservoirs with Bottom Water in Consideration of Threshold Pressure

Zhang Qinghui<sup>1</sup>, Li Xiangfang<sup>2</sup>, Zhang Lei<sup>2</sup>, Yuan Haiju<sup>3</sup>, Lai Lingbin<sup>4</sup>

(1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Qinghai Oilfield Branch, CNPC, Dunhuang, Gansu, 736200, China; 2. MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering, China University of Petroleum(Beijing), Beijing, 102249, China; 3. Water and Electricity Supply Company, Qinghai Oilfield Branch, CNPC, Mangya, Qinghai, 816400, China; 4. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing, 100083, China)

**Abstract:** Because of the threshold pressure, the performance of water coning in low permeability gas reservoir with bottom water is quite different from that of conventional gas reservoir with bottom water. Therefore, there is a big gap between the actual performance and the calculated water breakthrough time based on conventional prediction formula. This paper established a water coning model for gas reservoir with bottom water; the gas layer was opened partly in gas wells, gas flows in radial flow form inside the perforation section, and combined with radial flow and semispherical flow below the perforation section. According to this model, it is assumed that the reservoir has horizontal, homogeneous, isotropic layers with equal thickness, water displaces gas in a way of piston-type, the viscosity and density of water and gas are constant, the pressure gradient at the interface of water and gas is the same, and the gravity and the capillary pressure can be neglected. Based on the assumption, the prediction formula of the water breakthrough time has been derived by considering threshold pressure gradient in low permeability gas reservoir with bottom water. Comparing the result calculated by this formula with that of Sobocinski-Cornelius formula, the formula calculation results more close to the real value, and we conclude that the water breakthrough time is reduced with the increase of threshold pressure gradient.

**Key words:** starting pressure; pressure gradient; low permeability pools; bottom water coning; water breakthrough time; mathematical model

由于低渗透底水气藏存在启动压力梯度, 因而其底水水锥动态不同于常规底水气藏。但是, 至今还未见到考虑启动压力梯度的见水时间预测方面的文献和报道, 若利用常规的气井见水时间预测公式进行计算, 将造成计算结果出现偏差, 不能反映真实的水锥情况。为此, 笔者基于常用底水锥进模型(即

收稿日期: 2012-02-07; 改回日期: 2012-07-21。

作者简介: 张庆辉(1984—), 男, 山东成武人, 2007年毕业于中国石油大学(华东)电气工程及其自动化专业, 2012年获中国石油大学(北京)油气田开发工程专业硕士学位, 助理工程师, 现从事油气田开发方面的研究工作。

联系方式: kankezhang@163.com。

通讯作者: 李相方, lxfang@263.net。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目“低渗透碎屑岩天然气藏有效储层分布与渗流规律”(编号: 2007CB209506)资助。

射孔段为平面径向流,射孔段下部为半球面向心流)<sup>[1-3]</sup>,考虑启动压力梯度的影响,推导了更符合低渗透底水气藏真实情况的气井见水时间预测公式,以期低渗透底水气藏的高效开发提供参考依据。

## 1 模型建立及见水时间公式推导

底水气藏的水锥过程如图1所示。从图1可以看出,气井钻开部分气层,射孔段为平面径向流,射孔段以下为平面径向流和半球面向心流的组合。依照这一模型,作如下假设<sup>[2]</sup>:1)储层水平、均质、等厚且具有各向同性;2)水驱气过程为活塞方式;3)忽略重力和毛管力;4)气、水的密度和黏度均为常数;5)气水界面内外的压力梯度相同。

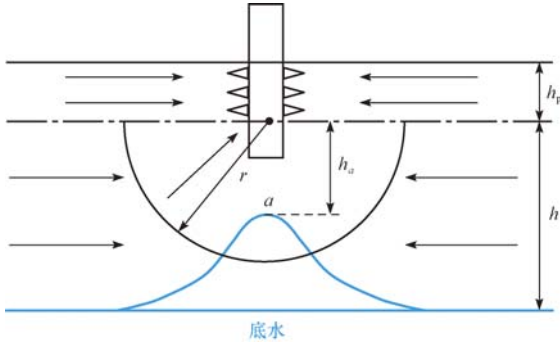


图1 底水气藏水锥过程示意

Fig. 1 The performance of water coning in gas reservoirs with bottom water

考虑启动压力梯度的影响,气、水两相的运动方程分别为:

$$u_g = -\frac{K_g}{\mu_g}(\text{grad } p_{gr} - \lambda_g) \quad (1)$$

$$u_w = -\frac{K_w}{\mu_w}(\text{grad } p_{wr} - \lambda_w) \quad (2)$$

式中: $u_g$ 为气相渗流速度,m/s; $u_w$ 为水相渗流速度,Fm/s; $K_g$ 为气相渗透率,mD; $K_w$ 为水相渗透率,mD; $\mu_g$ 为气相黏度,mPa·s; $\mu_w$ 为水相黏度,mPa·s; $p_{gr}$ 为 $r$ 处的气相压力,MPa; $p_{wr}$ 为 $r$ 处的水相压力,MPa; $\lambda_g$ 为气相启动压力梯度,MPa/m; $\lambda_w$ 为水相启动压力梯度,MPa/m。

气藏开发过程中,底水沿着井轴方向侵入井底的时间最短,该时间即为气井的见水时间。由于水锥气水界面内外压力梯度相等,则水锥顶点 $a$ 处存在以下关系:

$$\text{grad } p_{gr} \big|_{r=h_a} = \text{grad } p_{wr} \big|_{r=h_a} \quad (3)$$

式中, $h_a$ 为水锥顶点到气井井底的距离,m。

式(3)可转化为:

$$\frac{dp_{gr}}{dr} \bigg|_{r=h_a} = \frac{dp_{wr}}{dr} \bigg|_{r=h_a} \quad (4)$$

将式(1)、式(2)和式(4)联立得:

$$\begin{aligned} u_{wa} &= \frac{K_w}{\mu_w} \lambda_w + \frac{K_w/\mu_w}{K_g/\mu_g} u_{ga} - \frac{K_w}{\mu_w} \lambda_g \\ &= M_{wg} u_{ga} + \frac{K_w}{\mu_w} (\lambda_w - \lambda_g) \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $u_{wa}$ 、 $u_{ga}$ 分别为水锥顶点 $a$ 处的水相和气相渗流速度,m/s; $M_{wg}$ 为水、气流量比, $M_{wg} = \frac{K_w/\mu_w}{K_g/\mu_g}$ 。

$a$ 处的水质点在 $dt$ 时间内向井底移动的距离为 $dr$ ,可表示为:

$$dr = \frac{u_{wa}}{\phi} dt \quad (6)$$

式中, $\phi$ 为气层孔隙度。

将式(6)移项、变形,可得:

$$dt = \frac{\phi}{u_{wa}} dr \quad (7)$$

气井投产前,原始气水界面可近似为水平面,即 $t=0$ 时, $h_a = h - h_p$ ,对式(7)两端分别积分,即得见水时间:

$$t_{bt} = \int_0^{h-h_p} \frac{\phi}{u_{wa}} dr \quad (8)$$

式中: $t_{bt}$ 为见水时间,s; $h$ 为气层厚度,m; $h_p$ 为气井射孔深度,m。

将式(5)代入式(8)得:

$$t_{bt} = \int_0^{h-h_p} \frac{\phi}{M_{wg} u_{ga} + \frac{K_w}{\mu_w} (\lambda_w - \lambda_g)} dr \quad (9)$$

考虑启动压力梯度的影响,由文献[4-5]可知气藏水平径向流和半球向心流的产能公式。

水平径向流产能公式为:

$$q = \frac{\pi K h}{\mu} \frac{Z_{sc} T_{sc}}{\bar{Z} p_{sc} T_i} \frac{p_e^2 - p_w^2 - 2 \bar{p} \lambda_g (r_e - r_w)}{\ln \frac{r_e}{r_w}} \quad (10)$$

半球面向心流产能公式为:

$$q = \frac{\pi K}{\mu} \frac{Z_{sc} T_{sc}}{\bar{Z} p_{sc} T_i} \frac{p_e^2 - p_w^2 - 2 \bar{p} \lambda_g (r_e - r_w)}{\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_e}} \quad (11)$$

式中: $q$ 为气井产量,m<sup>3</sup>/d; $K$ 为气层有效渗透率,D; $Z_{sc}$ 为标准状况下气体的压缩因子; $\bar{Z}$ 为地层温度及地层平均压力下的压缩因子; $T_{sc}$ 为标准状况下的温度,K; $T_i$ 为地层温度,K; $p_{sc}$ 为标准状况下的压力,MPa; $p_e$ 为供给压力,MPa; $p_w$ 为井底压力,MPa; $\bar{p}$ 为平均地层压力,MPa; $r_e$ 为排泄半径,m; $r_w$ 为井底半径,m。

由式(10)计算射孔段对应的平面径向流的产

量,可得:

$$q_1 = \frac{\pi K_g h_p}{\mu_g} \frac{Z_{sc} T_{sc}}{\bar{Z} p_{sc} T_f} \frac{p_e^2 - p_w^2 - 2\bar{p}\lambda_g(r_e - r_w)}{\ln \frac{r_e}{r_w}} \quad (12)$$

式中,  $q_1$  为射孔段水平径向流产量,  $\text{m}^3/\text{d}$ 。

射孔段以下,半球形向心流的半径是  $1.5(h - h_p)^{[2]}$ ,如图1所示。射孔段以下的气体渗流可划分为连续的两段,第一段是从边界到  $1.5(h - h_p)$  处的平面径向流,第二段是流向井底的半球面向心流。设射孔段以下部分的总产量为  $q_2$ ,第一段和第二段

的产量分别为  $q_{21}$  和  $q_{22}$ ,可根据式(10)和(11)计算两段的产量。

$$q_{21} = \frac{\pi K_g (h - h_p)}{\mu_g} \frac{Z_{sc} T_{sc}}{\bar{Z} p_{sc} T_f} \frac{p_e^2 - p_r^2 - 2\bar{p}\lambda_g[r_e - 1.5(h - h_p)]}{\ln \frac{r_e}{1.5(h - h_p)}} \quad (13)$$

$$q_{22} = \frac{\pi K_g}{\mu_g} \frac{Z_{sc} T_{sc}}{\bar{Z} p_{sc} T_f} \frac{p_r^2 - p_w^2 - 2\bar{p}\lambda_g[1.5(h - h_p) - r_w]}{\frac{1}{r_w} - \frac{1}{1.5(h - h_p)}} \quad (14)$$

由物质平衡理论知,  $q_{21} = q_{22}$ 。联立式(13)、(14)可得:

$$p_r^2 = \frac{\ln \frac{r_e}{1.5(h - h_p)} \{p_w^2 + 2\bar{p}\lambda_g[1.5(h - h_p) - r_w]\} + (h - h_p) \{p_e^2 - 2\bar{p}\lambda_g[r_e - 1.5(h - h_p)]\} \left[ \frac{1}{r_w} - \frac{1}{1.5(h - h_p)} \right]}{\ln \frac{r_e}{1.5(h - h_p)} + (h - h_p)} \quad (15)$$

式(15)右边所有参数都可知,设:

$$p_r^2 = C_1^2 \quad (16)$$

又由物质平衡理论知:

$$q_2 = q_{22} \quad (17)$$

由式(14)、式(16)和式(17)可得:

$$q_2 = \frac{\pi K_g}{\mu_g} \frac{Z_{sc} T_{sc}}{\bar{Z} p_{sc} T_f} \frac{p_r^2 - p_w^2 - 2\bar{p}\lambda_g[1.5(h - h_p) - r_w]}{\left[ \frac{1}{r_w} - \frac{1}{1.5(h - h_p)} \right]} = \frac{\pi K_g}{\mu_g} \frac{Z_{sc} T_{sc}}{\bar{Z} p_{sc} T_f} \frac{C_1^2 - p_w^2 - 2\bar{p}\lambda_g[1.5(h - h_p) - r_w]}{\left[ \frac{1}{r_w} - \frac{1}{1.5(h - h_p)} \right]} \quad (18)$$

联立式(12)和式(18)可得:

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{h_p \left[ \frac{1}{r_w} - \frac{1}{1.5(h - h_p)} \right] [p_e^2 - p_w^2 - 2\bar{p}\lambda_g(r_e - r_w)]}{\ln \frac{r_e}{r_w} \{C_1^2 - p_w^2 - 2\bar{p}\lambda_g[1.5(h - h_p) - r_w]\}} \quad (19)$$

式(19)右边参数均为已知,所以  $q_1/q_2$  为常数,设:

$$q_1/q_2 = C_2 \quad (20)$$

设气井的总产量为  $q$ ,则  $q = q_1 + q_2$ ,于是式(20)变为:

$$q_2 = \frac{q}{1 + C_2} \quad (21)$$

所以,水锥顶点  $a$  处的气相渗流速度为:

$$v_{ga} = \frac{q_2}{2\pi r^2 \phi} = \frac{q}{2\pi r^2 \phi(1 + C_2)} \quad (22)$$

将式(22)代入式(9),可得气井见水时间为:

$$t_{bt} = \int_0^{h-h_p} \frac{\phi}{\frac{M_{wg} q}{2\pi r^2 \phi(1 + C_2)} + \frac{K_w}{\mu_w} (\lambda_w - \lambda_g)} dr \quad (23)$$

式(23)即为低渗透底水气藏考虑启动压力梯度的气井见水时间公式。该式为比较复杂的积分形式,很难直接求其解析解,但可以通过数值方法求得数值解。

## 2 应用实例

某低渗透底水气藏,气藏厚度  $h = 120 \text{ m}$ ,气体黏度为  $0.0216 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ,水体积系数  $0.00451$ ,地层水黏度  $0.7 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ,气层水平渗透率  $1.5 \text{ mD}$ ,孔隙度  $2.7\%$ ,排泄半径  $421.6 \text{ m}$ ,井底半径  $0.178 \text{ m}$ ,射孔深度  $h_p = 33\%h = 39.6 \text{ m}$ ,残余气饱和度  $S_{gr} = 0.02$ ,原生水饱和度  $S_{wi} = 0.42$ ,在  $S_{gr}$  下的水相相对渗透率为  $0.35$ ,在  $S_{wi}$  下的气体相对渗透率为  $0.58$ ,气水密度差  $0.889 \text{ kg/L}$ ,气井日产气量为  $5 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,供给压力为  $40 \text{ MPa}$ 。某井为该气藏中的一口典型井,该井投产后的实测水气比及  $\text{Cl}^-$  质量浓度曲线如图2所示。

从图2可以看出,该井从投产开始到2011年2月8日,水气比从  $0.10$  上升至  $0.4 \text{ m}^3/10^4 \text{ m}^3$ ,且继续呈上升趋势;产出水中的  $\text{Cl}^-$  质量浓度在2011年2月8日也突然上升,说明该气井产出水由凝析水变为底水,即水锥到达井底。由此,可以计算出该井的见水时间为  $805 \text{ d}$ 。

将该低渗透底水气藏的各相关数据代入式(23)计算见水时间,并将其与常用于预测常规气藏见水

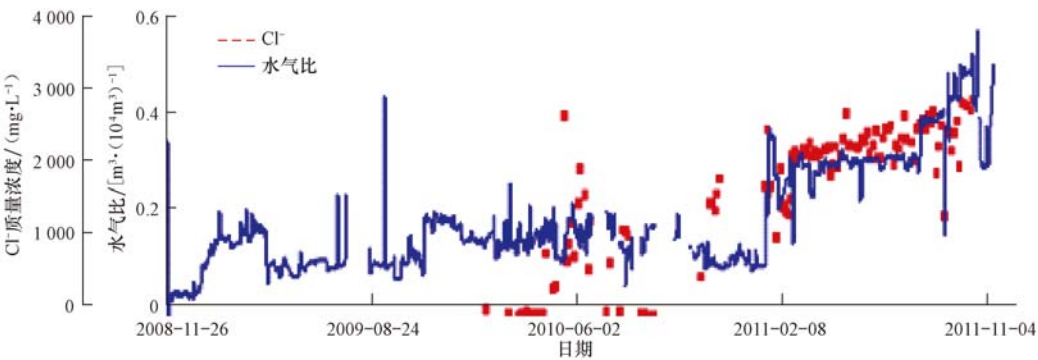


图 2 某气井的水气比及  $\text{Cl}^-$  曲线

Fig. 2 Water/gas ratio and curve of one well

时间的 Sobocinski-Cornelius 方法的计算结果进行对比,结果见表 1。

表 1 式(23)与 Sobocinski-Cornelius 方法计算的见水时间对比

Table 1 Comparison between coning times calculated by Sobocinski-Cornelius method and that by the formula (23)

启动压力梯度/ (MPa·m <sup>-1</sup> )	见水时间/d	
	Sobocinski-Cornelius 方法	式(23)
0	998	916.1
0.002	998	869.4
0.005	998	830.3
0.010	998	760.3
0.020	998	567.5
0.030	998	344.1

由表 1 及图 2 的分析结果可知,利用 Sobocinski-Cornelius 公式<sup>[6]</sup>计算的该井的理论见水时间(998 d),比实际见水时间(805 d)明显偏长,误差达到 23.98%;利用式(23)计算的该井的理论见水时间为 830.3 d,与实际见水时间的误差仅为 3.14%。这说明,考虑启动压力梯度计算的见水时间更符合低渗透底水气藏实际开发情况。

从表 1 还可以看出:当不考虑启动压力梯度时,式(23)的计算结果与 Sobocinski-Cornelius 方法的计算结果相近,表明式(23)也适用于不考虑启动压力梯度的常规气藏见水时间预测;当考虑启动压力梯度后,由于 Sobocinski-Cornelius 公式中没有启动压力梯度项,所以见水时间不变,而式(23)计算的见水时间随着启动压力梯度增大不断缩短。分析表明,这是因为定产量生产时,启动压力梯度越大井底压力就越小,底水与井底之间的压差就越大,就越容易发生底水锥进。

3 结束语

将启动压力梯度因素引入低渗透底水气藏的见

水时间预测中,推导出了考虑启动压力梯度的见水时间预测公式。实例计算发现,在不考虑启动压力梯度时该公式的计算结果与 Sobocinski-Cornelius 方法比较接近,但考虑启动压力梯度影响后,其计算结果很接近实际见水时间,相对误差仅为 3.14%。而且,考虑启动压力梯度时,随着启动压力梯度增大,见水时间不断缩短,这也符合低渗透底水气藏定产量生产条件下的实际情况。

参 考 文 献

References

[1] 蒋平,张贵才,何小娟,等.底水锥进的动态预测方法[J]. 钻采工艺,2007,30(2):71-73.  
Jiang Ping,Zhang Guicai,He Xiaojuan,et al. A dynamic prediction method for bottom water coning[J]. Drilling & Production Technology,2007,30(2):71-73.

[2] 杨丽娟.低渗透底水气藏水锥动态及合理开采对策应用研究[D].成都:西南石油大学石油工程学院,2006.  
Yang Lijuan. Water coning dynamics in low permeability gas reservoir with bottom water and reasonable production plan [D]. Chengdu:Southwest Petroleum University,College of Petroleum Engineering,2006.

[3] 蒋平,张贵才,葛际江,等.底水油藏射孔优化设计[J]. 石油钻探技术,2007,35(4):70-72.  
Jiang Ping,Zhang Guicai,Ge Jijiang,et al. Perforation optimization for bottom water reservoir[J]. Petroleum Drilling Techniques,2007,35(4):70-72.

[4] 汪周华,钟兵,伊向艺,等.低渗气藏考虑非线性渗流特征的稳态产能方程[J]. 天然气工业,2008,28(8):81-83.  
Wang Zhouhua,Zhong Bing,Yi Xiangyi,et al. The steady-state productivity equation considering nonlinear percolation feature in low-permeability gas reservoirs[J]. Natural Gas Industry,2008,28(8):81-83.

[5] 陈元千,孙兵,姜风光,等.半球形流气井产量公式的推导与应用[J]. 油气井测试,2009,18(3):1-4.  
Chen Yuanqian,Sun Bing,Jiang Fengguang,et al. Derivation and application of semi-spherical flow production formula of gas well[J]. Well Testing,2009,18(3):1-4.

[6] Hagoort J. Fundamentals of gas reservoir engineering[M]. Amsterdam:Elsevier Science,1988:225-226.