

考虑非达西效应的底水气藏见水时间预测方法

黄全华 陆云 付云辉 刘彤 陈冲

(西南石油大学,成都 610500)

摘要 底水锥进是底水气藏在开发过程中遇到的一个重要问题,准确地预测底水锥进的时间对实际生产具有重要意义。对于底水气藏的高产气井,井底周围的表皮效应和气体高速非达西流动对气井的产能和见水时间都有很大影响。基于多孔介质中流体质点的渗流规律,综合考虑了气体非达西效应、表皮系数、打开程度以及日产气量等因素对见水时间的影响,推导出了底水气藏高产气井的见水时间预测公式。通过实例计算,并与其他方法比较,表明考虑了表皮效应和气体非达西效应的气井见水时间公式与朱圣举公式计算结果相近,相对误差为 20.3%,该公式具有较好的实用性。

关键词 底水气藏 高产气井 非达西效应 表皮效应 见水时间

中图分类号 TE33; **文献标志码** A

对于底水油气藏的底水锥进问题,很多的学者都对此进行了研究^[1-4]。在底水气藏见水时间的推导过程中,以往的学者忽略了井底周围表皮效应和气体非达西流动效应对气井产量和见水时间的影响。而实际情况下,由于钻井以及增产措施极易“污染”地层,从而使得井底附近的渗透率改变,即表皮效应;且高产井气体的流速很快,气体的流动为高速非达西流,因此对于高产气井的见水时间预测,表皮效应和气体非达西效应是不可忽略的影响因素。笔者基于两相渗流理论,建立渗流模型,考虑了表皮效应和气体非达西效应等影响因素,推导了底水气藏高产气井水锥突破时间的计算公式。

1 模型的建立及公式推导

如图1所示,气井部分打开气藏,气藏的打开厚度为 h_p 。射开层段气体的流动为平面径向流,未射开层段的气体的流动为半球形流。在生产的过程中,底水向井底锥进。假设水驱气过程为活塞驱替,忽略毛细管力和重力的影响。

根据两相渗流规律,考虑气体非达西流动效应,忽略了水相重力的影响,则气水运动方程^[5-7]分别为:

$$\frac{dp_g}{dr} = \frac{\mu_g v_g}{k_g} + \beta \rho_g v_g^2 \quad (1)$$

$$\frac{dp_w}{dr} = \frac{\mu_w v_w}{k_w} \quad (2)$$

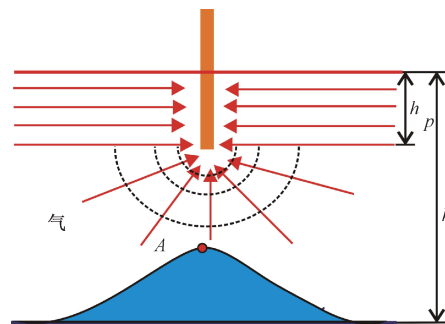


图1 底水气藏水锥过程示意图

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

由渗流特点可知,在水锥顶点A处,气相、水相的压力梯度相等。因此有

$$\left(\frac{dp_g}{dr} \right)_{r=r_A} = \left(\frac{dp_w}{dr} \right)_{r=r_A} \quad (3)$$

将公式(1)和公式(2)中的单位统一,并将式(1)和式(2)代入式(3),可得水相渗流速度

$$v_w = \frac{v_g}{M_{gw}} + 1.157 \times 10^{-17} \beta \rho_g v_g^2 \frac{k_w}{\mu_w} \quad (4)$$

式(4)中 $M_{gw} = \frac{k_{gwi}/\mu_g}{k_{wgr}/\mu_w}$; $\beta = 7.644 \times 10^{10}/K^{1.5}$, β 为速度系数,描述紊流的影响参数, m^{-1} ; v_g 为气体的渗流速度, m/d ; v_w 为水的渗流速度, m/d ; ρ_g 为地层条件下的气体密度, g/cm^3 ; μ_g 为气体的黏度, $mPa \cdot s$; μ_w 为水的黏度, $mPa \cdot s$; K_{gwi} 为 S_{wi} 下的气相渗透率, mD ; K_{wgr} 为 S_{gr} 下的水相渗透率, mD 。

在多孔介质中,考虑孔隙度,原始束缚水饱和度和残余气饱和度的影响,水相在 dt 时间内向井底移动的距离为:

2016年1月9日收到

国家科技重大专项

(2011ZX05030-005-06)资助

第一作者简介:黄全华(1969—),男,副教授,博士。研究方向:油气藏工程。E-mail:swpuhqh@126.com。

$$dr = v_w dt / [\varphi(1 - S_{wi} - S_{gr})] \quad (5)$$

将式(5)变形得:

$$dt = [\varphi(1 - S_{wi} - S_{gr}) / v_w] dr \quad (6)$$

对公式(6)进行积分得:

$$t_{bt} = \int_0^h \frac{\varphi(1 - S_{wi} - S_{gr})}{v_w(r_A)} dr \quad (7)$$

将式(4)代入式(7)有:

$$t_{bt} = \varphi M_{gw} (1 - S_{wi} - S_{gr}) \times \int_0^{h-h_p} \frac{1}{v_g(r_A) + 1.15 \times 10^{-17} \beta \rho_g v_g^2(r_A)} \frac{k_g}{\mu_g} dr \quad (8)$$

式(8)中 φ 为孔隙度, 小数; S_{wi} 为束缚水饱和度, 小数; S_{gr} 为残余气饱和度, 小数。 h 为气层的厚度, m; h_p 为气层打开厚度, m。

对于气层射孔层段, 气体为平面径向流, 产气量为 q_1 , 根据李士伦编著的天然气工程^[8], 得到考虑地层表皮效应和气体非达西流动的气井产量方程:

$$p_e^2 - p_{wf}^2 = \frac{1.291 \times 10^{-3} T \mu_g Z q_1}{k_g h_p} \left(\ln \frac{r_e}{r_w} + S + D_1 q_1 \right) \quad (9)$$

式(9)中 $D_1 = 2.191 \times 10^{-18} \frac{\beta \gamma_g k_g}{\mu_g h_p r_w}$; p_e 为供给边缘压力, MPa; p_{wf} 为井底流压, MPa; h_p 为射开层段的厚度, m; Z 为偏差因子, 无因次; r_e 为供给半径, m; r_w 为井底半径, m; q_1 为射开层段的流量, m³/d; S 为表皮系数, 无因次。

对于气层的未射开部分, 气体的流动为半球形流, 产气量为 q_2 。经过查阅文献[9,10], 得到了考虑地层表皮效应和气体非达西流动的气井产量方程, 由于地层具有各向异性, 因此不能简单地将水平或垂直渗透率看作气体作半球形流时的渗透率, 这里对公式中的渗透率作了改进, 用有效渗透率代替水平渗透率, 得到半球形流的产量方程:

$$p_e^2 - p_{wf}^2 = \frac{1.291 \times 10^{-3} Z \mu_g T q_2}{k_s} \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_e} + S + D_2 q_2 \right) \quad (10)$$

式(10)中 $D_2 = 7.302 \times 10^{-19} \frac{k_g \beta \gamma_g}{\mu_g} \left(\frac{1}{r_w^3} - \frac{1}{r_e^3} \right)$; 有效渗透率 $k_s = \sqrt{k_h k_v}$; q_2 为未射开层段的流量, m³/d;

联立式(9)和式(10)得:

$$\frac{q_1}{k_g h_p} \left(\ln \frac{r_e}{r_w} + S + D_1 q_1 \right) = \frac{q_2}{k_s} \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_e} + S + D_2 q_2 \right) \quad (11)$$

设气井的总产气量为 q , 单位为 m³/d, 则有:

$$q_1 + q_2 = q \quad (12)$$

联立式(11)、式(12)消除 q_1 , 得到关于 q_2 的一元二次方程:

$$\left(\frac{D_2}{k_s} - \frac{D_1}{k_g h_p} \right) q_2^2 + \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_e} + S + \ln \frac{r_e}{r_w} + S + 2qD_1 \right) q_2 - \left[\left(\ln \frac{r_e}{r_w} + S \right) q + D_1 q^2 \right] = 0 \quad (13)$$

$$\text{令 } A = \frac{D_2}{k_s} - \frac{D_1}{k_g h_p}, B = \frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_e} + S + \ln \frac{r_e}{r_w} + S + 2qD_1, C = - \left[\left(\ln \frac{r_e}{r_w} + S \right) q + D_1 q^2 \right] \frac{1}{k_g h_p}$$

则式(13)变为:

$$A q_2^2 + B q_2 + C = 0 \quad (14)$$

则未射开气层的产气量 q_2 为:

$$q_2 = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (15)$$

对于气层未射开部分, 气体作半球形流动, 则气体的运移速度:

$$v_g(r_a) = \frac{q_2 B_g}{2\pi \varphi r^2} \quad (16)$$

式(16)中 B_g 为天然气的体积系数, 小数。

将式(16)代入式(8)得:

$$t_{bt} = \varphi M_{gw} (1 - S_{wi} - S_{gr}) \times \int_0^{h-h_p} \frac{1}{\frac{q_2 B_g}{2\pi \varphi r^2} + 1.157 \times 10^{-17} \frac{k_g \beta \rho_g q_2^2 B_g^2}{4\mu_g \pi^2 \varphi^2 r^4}} dr \quad (17)$$

$$\text{令 } A_1 = \frac{q_2 B_g}{2\pi \varphi}, B_1 = 1.157 \times 10^{-17} \frac{k_g \beta \rho_g q_2^2 B_g^2}{4\mu_g \pi^2 \varphi^2}, \text{ 公式}$$

(17)变为:

$$t_{bt} = \varphi M_{gw} (1 - S_{wi} - S_{gr}) \int_0^h \frac{1}{\frac{A_1}{r^2} + \frac{B_1}{r^4}} dr \quad (18)$$

对公式(18)进行积分得到底水气藏的见水时间 t_{bt} :

$$t_{bt} = \frac{\varphi M_{gw} (1 - S_{wi} - S_{gr})}{3A_1} \times \left[(h - h_p)^3 - \frac{3B_1(h - h_p)}{A_1} + 3 \left(\frac{B_1}{A_1} \right)^{\frac{3}{2}} \arctan \left(\frac{h - h_p}{\sqrt{\frac{B_1}{A_1}}} \right) \right] \quad (19)$$

王会强推导的不考虑非达西效应见水时间公式^[11]

$$t_{bt} = \frac{2\pi \varphi M_{gw} (1 - S_{wi} - S_{gr}) (1 + c) (h - h_p)^3}{3q B_g} \quad (20)$$

式(20)中 c 为径向流产气量与半球形流的产气量的比值。

李传亮推导的无隔板见水时间公式^[12]

$$t_{bt} = \frac{\pi \phi h (1 + \mu_R) (1 - S_{wi} - S_{gr}) (h - h_p)^2}{\alpha q_g B_g \left(\ln \frac{r_e}{r_w} + S \right)} \quad (21)$$

式(21)中 a 为垂向渗透率与水平渗透率的比值, μ_R 为水气黏度比, S 为气井表皮系数。

在朱圣举无隔板底水气藏见水时间修正公式^[13]的基础上考虑束缚水饱和度和残余气饱和度,以及表皮系数的影响,见水时间公式变为:

$$t_{bt} = \frac{2\pi \phi h (1 - S_{wi} - S_{gr}) (h - h_p)^3 \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{h - h_p} \right)}{3\alpha q_g B_g \left(\ln \frac{r_e}{r_w} + S \right)} \quad (22)$$

2 实例分析

某底水气藏的一口井,气层的厚度为 $h = 20$ m,气井打开厚度为 $h_p = 5$ m,气体的黏度 $\mu_g = 0.023$ 6 mPa·s,水的黏度 $\mu_w = 0.65$ mPa·s,水平渗透率 $K_h = 25$ mD,垂直渗透率 $K_v = 7$ mD,气井的半径 $r_w = 0.1$ m,气体的密度 $\rho_g = 0.062$ 6 g/cm³,气体的体积系数 $B_g = 0.005$ 62,表皮系数 $S = 6.7$,孔隙度 $\Phi = 0.15$,束缚水饱和度 $S_{wi} = 0.35$,残余气饱和度 $S_{gr} = 0.2$,气水流度比 $M_{gw} = 68.8$ 。气井以 8×10^4 m³/d 的日产气量生产。

表1 不同见水时间公式计算结果对比

Table 1 Results of the different water breakthrough time formula

见水时间计算方法	见水时间计算结果/d	本文公式与常用公式的相对误差/%
本文公式	109.3	0
王会强公式	1 581.5	93.09
李传亮公式	14.2	87
朱圣举公式	87.1	20.3

由表1可以看出,利用本文公式计算的见水时间与朱圣举公式计算结果相近,相对误差较小,说明利用本文公式计算底水气藏见水时间具有较高的实用性和准确性。而用王会强公式和李传亮公式计算结果相对误差大,是因为王会强公式在计算径向流产量 q_1 和球形流产量 q_2 时未考虑高速非达西效应和气井表皮系数的影响,使得其公式中的 c 值偏差很大,其在计算气体流速时也未考虑非达西效应的影响,导致计算的见水时间偏大。计算气井见水时间时,产量一般取半球形流产量,而李传亮公式中的

产气量取的是气井总产气量,这使得计算结果偏小。

3 结 论

(1)根据底水气藏气水两相渗流规律,建立底水锥进渗流模型,将气藏射开层段气体流动看作为平面径向流,未射开层段气体流动看作半球形流。考虑了井底附近表皮污染及气体高速非达西效应对产气量和气体流速的影响,推导了底水气藏见水时间公式。

(2)通过实例计算与对比,考虑了表皮系数和非达西效应的见水时间公式与朱圣举公式结果相近,相对误差较小,说明公式的准确性较高。

参 考 文 献

- 张庆辉,李相方,张磊,等.考虑启动压力梯度的低渗底水气藏见水时间预测.石油钻探技术,2012;40(5):96—99
Zhang Qinghui, Li Xiangfang, Zhang Lei, et al. Prediction of water breakthrough time in low permeability gas reservoirs with bottom water in consideration of threshold pressure. Petroleum Drilling Techniques, 2012;40(5): 96—99
- 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.成都:西南石油大学石油工程学院,2006
Yang Lijuan. Water coning dynamics in low permeability gas reservoirs with bottom water and reasonable production plan. Chengdu: Southwest Petroleum University, College of petroleum Engineering, 2006
- 徐耀东.底水气藏气井见水时间预测方法.内蒙古石油化工,2012;(2):149—151
Xu Yaodong. Prediction of water coning time for gas well in bottom-water gas reservoir. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2012; (2): 149—151
- 谢林峰,李相方.底水气藏水锥高度与形状计算新方法.天然气工业,2004;24(4):54—56
Xie Linfeng, Li Xiangfang. New calculating method of highness and shape of water cone for gas pool driven by bottom water. Natural Gas Industry, 2004;24(4):54—56
- 杨芙蓉,樊平天,贺静,等.边水气藏高产气井见水时间预测方法.科学技术与工程,2013;(29):8745—8747
Yang Furong, Fan pingtian, He Jing, et al. An approach to predict water breakthrough time in high gas rate wells of gas reservoirs with edge water. Science Technology and Engineering, 2013; (29): 8745—8747
- 李涛,袁舟,陈伟,等.气藏水平井边水突破时间预测.断块油气田,2014;21(3):341—343
Li Tao, Yuan Zhou, Chen Wei, et al. Prediction on water breakthrough time of horizontal well in gas reservoir with edge water. Fault-Block Oil & Gas Field, 2014;21(3):341—343
- 王会强,李晓平,吴锋,等.边水气藏气井见水时间预测方法.特种油气藏,2008;15(4):73—74
Wang Huiqiang, Li Xiaoping, Wu Feng, et al. Prediction of water breakthrough time in gas reservoir with edge water. Special Oil and Gas Reservoirs, 2008;15(4):73—74
- 李士伦.天然气工程.北京:石油工业出版社,2010:89—90

- Li Shilun. Natural gas engineering. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010;89—90
- 9 陈元千,孙 兵,姜凤光,等.半球形流气井产量公式的推导与应用.油气井测试,2009;18(3):1—4
- Chen Yuanqian, Sun Bing, Jiang Fengguang. Derivation and application of semi-spherical flow production formula of gas well. Well Testing, 2009;18(3):1—4
- 10 张庆辉,李相方,袁海菊,等.考虑非达西的半球面流气井产能公式推导.油气藏评价与开发,2011;1(05):24—28
- Zhang Qinghui, Li Xiangfang, Yuan Haiju, *et al.* Deliverability equation derivation of semi-spherical flow gas wells considering non-Darcy flow. Reservoir Evaluation and Development, 2011;1(05):24—28
- 11 王会强,李晓平,杨 琪,等.底水气藏见水时间预测方法.新疆石油地质,2007;28(1):92—93
- Wang Huiqiang, Li Xiaoping, Yang qi, *et al.* A prediction of water breakthrough time in gas reservoirs with bottom water. Xinjiang Petroleum Geology, 2007;28(1):92—93
- 12 李传亮.油藏工程原理.北京:石油工业出版社,2011;364—365
- Li Chuanliang. Fundamentals of reservoir engineering. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011;364—365
- 13 朱圣举.预测无隔板底水油藏油井见水时间的修正式.新疆石油地质,1999;20(1):56—57
- Zhu Shengju. A modified formula for predicting water breakthrough time of oil well in a bottom water reservoir with no barrier. Xinjiang Petroleum Geology, 1999;20(1):56—57

An Approach to Predict Water Breakthrough Time of Gas Reservoirs with Bottom Water in Consideration of Non-Darcy Flow

HUANG Quan-hua, LU Yun, FU Yun-hui, LIU Tong, CHEN Chong

(Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, P. R. China)

[**Abstract**] Water coning is an important issue in the development process of gas reservoirs with bottom water. Accurately predicting time of bottom water coning is of great significance to the actual production. For high production of gas reservoir with bottom water, skin effect surrounding downhole and non-Darcy flow have a significant impact on gas well productivity and bottom water coning time. Based on the theory of percolation flow through in porous media, and considering influence of the factors such as the gas non-Darcy effects, skin factor, affect the degree of opening and daily gas production for water coning time of gas reservoirs with bottom water, water coning time of gas reservoirs with bottom water was deduced. Compared to results of other methods, example shows that water breakthrough time calculation which takes into account the skin effect and gas wells non-Darcy effects is close to the calculation of zhu shengju's method, and the method in this paper is more realistic.

[**Key words**] gas reservoirs with bottom water high productivity well non-Darcy effect skin effect water breakthrough time