

水体倍数计算的拟稳态法

韩国锋¹ 陈方方² 刘曰武¹ 朱永峰² 马小平²

(中国科学院力学研究所¹ 北京 100190;

中国石油天然气股份有限公司塔里木油田分公司² 库尔勒 841000)

摘要 底水的体积对底水油藏的开发起着十分重要的作用,底水的大小用底水的水体倍数表征。目前常用的水体倍数求解方法有容积法、物质平衡法、非稳态水侵法、数值模拟法。不同方法有其适用的条件和特点。在假设储层达到拟稳态的条件下,推导了一种新的水体倍数计算方法;该方法结合地质储量、多次测试及物质平衡法等不同情况而分为三种子方法。新方法可以获得水体倍数和地质储量。利用推导的拟稳态方法对实际数据进行了计算,计算结果与其他方法的计算结果十分接近,表明新方法的可行性。

关键词 底水 水体倍数 拟稳态

中图分类号 TE375; 文献标志码 A

对于底水油藏,底水在其开发过程中起着十分重要的作用。底水存在有益与有害两方面的作用。一方面,底水锥进会造成油井过早产水,降低产能,停止自喷,影响采收率。另一方面,随着生产的进行,地层压力降低,压力降低波及水体,底水的体积膨胀,驱动油气运动,减慢地层压力降低,提高采收率。因此底水问题一直受到油气藏工程师的关注。对于底水问题,研究者以前主要关注其临界产量^[1-2]、见水时间^[3-4]、含水率上升^[5-6]等问题。对于这些问题研究比较充分,成果不少。近年来,学者们开始关注水体大小问题^[7-10]。底水对油气的驱动和对含水率的影响都与其大小相关,因此求取底水体积大小对油气藏开发是很有必要的。底水水体的大小常用水体倍数表征,它是底水与地下油气的体积之比。目前求解水体倍数的方法有容积法、物质平衡法、非稳态水侵法、数值模拟法。每种方法都有其适用条件,在不同的情况下需要选择不同的方法进行求解。

综述了目前常用的水体倍数求解方法,评价了其适用性。在假设油藏封闭、储层流动达到拟稳态的条件下,推导了一种新的水体倍数求解方法——拟稳态法。根据不同的具体条件,新方法分为三种子方法。最后利用新方法和物质平衡法对某油田的实际数据进行了计算分析,两种方法的结果比较接近。

2014年9月17日收到

第一作者简介:韩国锋(1983—),男,湖北人,助理研究员,博士。研究方向:渗流力学与油气藏工程。E-mail: hgf_xg@126.com。

1 目前水体倍数的求解方法

目前文献中关于水体体积的计算方法有4种,容积法、物质平衡法、非稳态水侵法和数值模拟法。这些方法主要应用于边水问题的计算,对底水问题的计算还应用较少。其中非稳态水侵法适用于均质油藏,对于非均质性特别强的缝洞型碳酸盐岩油藏不太适用。容积法、物质平衡法和数值模拟法对非均质油藏也适用。

容积法是指根据油藏地质资料,确定圈闭中储存的油气和水的地下体积,然后根据两者的体积计算其水体倍数。该方法需要确定构造圈闭面积、储层的平均有效厚度、孔隙度和油藏的含油面积、油层的平均有效厚度、束缚水饱和度等静态地质参数。容积法不需要油藏生产的动态资料,在投入生产以前就可以进行计算。但必须在地质勘探时获得较准确的资料。

物质平衡方法求解水体倍数的思路是利用其它方法求得的地质储量、水侵方程、生产资料,通过油气藏的物质平衡方程求得压力降落波及的水体体积。随着油藏压力不断降低,波及的天然水域体积不断增大。当油藏压力降低波及整个天然水域之后,参与流动的天然水域体积为整个水域的体积,计算的波及水体体积为整个天然水体的体积。通过其他方法求得原始地质储量,计算波及水体体积与地质储量的比值即为水体倍数。当水体体积较小、生产时间较长,压力降落波及的水体体积可以认为是天然水域的体积。

非稳态水侵法计算水体倍数的原理是利用非稳态法和物质平衡法同时计算水侵体积,当两者计算

的水侵体积相等时可以得到水体的大小,从而计算得到水体倍数。非稳态法计算水侵体积时需要假设水体的半径,其计算的水侵量与物质平衡法计算的水侵量相等时得到水体的半径。油藏开采造成的地层压力降低必然连续不断地向天然水域传递,并引起天然水域内地层岩石和水的弹性膨胀。当地层压力的传递尚未波及到天然水域的外边界之前,这是一个非稳定渗流的过程。对于边水, Van Everdingen 和 Hurst^[11] 导出了其非稳定水侵量的计算方法;对于半球形流动的底水系统, Chatas^[12] 导出了类似形式的计算方法。该方法与物质平衡方法相比,计算更准确,但需要更多的已知参数。

油藏数值模拟法求取水体倍数的方法是利用地震勘探、测井、录井等方式获得的静态地层资料建立油藏地质模型,把一部分生产动态数据作为计算的边界条件,不断调整地层参数和水体大小,计算拟合其他生产参数,当拟合结果较好时,可以获得地质储量和水体大小,从而求得水体倍数。该方法必须建立相对准确的油藏地质模型和获得可靠的生产动态数据。在计算过程中,通过不断调整油藏地质参数和水体,较好地拟合油藏地质储量、产量、含水率、压力等指标。数值模拟方法拟合水体需要的参数较多,过程较复杂。

2 新方法的推导

不是无限大水体时,把油层和水体当作一个整体,整个油藏为一个封闭的系统。当地层的流动达到拟稳定状态时,地层中各处的压力降落相等,随时间不变,压力降落与井底压力降落一致,即有

$$q_o B_o + q_w B_w = - (V_{wd} C_{tw} + V_{wi} C_{tw} + V_o C_{to}) \frac{dp_{wf}}{dt} \tag{1}$$

式(1)中:地层水体的综合压缩系数 $C_{tw} = C_f + C_w$, 地层油的综合压缩系数 $C_{to} = C_f + C_o$, V_{wd} 为底水的当前体积, V_{wi} 为油层束缚水的当前体积, V_o 为地层的当前体积。

通过井底流压-时间曲线,就能确定 $V_{tm} = V_{wd} C_{tw} + V_{wi} C_{tw} + V_o C_{to}$ 的值。有三种方式可求出水体的体积。

2.1 已知原油的原始地质储量的水体倍数计算方法

当原始地质储量已经求出时,目前地下储存的原油体积

$$V_o = (N - N_p) B_o \tag{2}$$

束缚水体积

$$V_{wd} = \frac{S_{wi} N B_{oi} (1 + C_w \Delta p)}{1 - S_{wi}} \tag{3}$$

因此可求得目前水体体积

$$V_{wd} = \frac{V_{tm} - V_{wi} C_{tw} - V_o C_{to}}{C_{tw}} \tag{4}$$

原始底水体积

$$V_w = B_{wi} W_p + \frac{B_{wi} V_{wd}}{B_w} \tag{5}$$

水体倍数

$$n = \frac{V_w}{N B_{oi}} \tag{6}$$

2.2 多次拟稳态测试的水体倍数计算方法

当进行了多次拟稳态测试时,可以列出多组前面给出的方程组(2)~式(5),这样就可以不需要知道地质储量而求出水体大小,同时还能求出地质储量。假设进行了两次拟稳态测试,用下标 1、2 分别表示两次相应的测试参数,结合前面的分析,对两次测试结果都有

$$V_{tm1} = V_{wd1} C_{tw} + \frac{S_{wi} N B_{oi} (1 + C_w \Delta p_1)}{1 - S_{wi}} C_{tw} + (N - N_{p1}) B_{oi} C_{to} \tag{7}$$

$$V_{tm2} = V_{wd2} C_{tw} + \frac{S_{wi} N B_{oi} (1 + C_w \Delta p_2)}{1 - S_{wi}} C_{tw} + (N - N_{p2}) B_{oi} C_{to} \tag{8}$$

另外有两次底水体积关系

$$V_w = B_{wi} W_{p1} + \frac{B_{wi} V_{wd1}}{B_{w1}} = B_{wi} W_{p2} + \frac{B_{wi} V_{wd2}}{B_{w2}} \tag{9}$$

由此可求得底水体积和地质储量:

$$N = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_4}{\alpha_5 + \alpha_3} \tag{10}$$

$$V_w = \frac{\alpha_6 + \alpha_7 N - (N - N_{p1}) C_{to} B_{wi} B_{oi}}{C_{tw} B_{w1}} \tag{11}$$

式中:

$$\begin{cases} \alpha_1 = B_{w2} V_{tm1} - B_{w1} V_{tm2} \\ \alpha_2 = B_{w1} B_{w2} C_{tw} (W_{p1} - W_{p2}) \\ \alpha_3 = \frac{S_{wi} B_{oi} C_{tw}}{1 - S_{wi}} (B_{w2} - B_{w1} + B_{w2} C_w \Delta p_1 - B_{w1} C_w \Delta p_2) \\ \alpha_4 = C_{to} (B_{o2} B_{w1} N_{p2} - B_{o1} B_{w2} N_{p1}) \\ \alpha_5 = C_{to} (B_{o1} B_{w2} - B_{o2} B_{w1}) \\ \alpha_6 = B_{wi} V_{tm1} + C_{tw} B_{wi} B_{w1} W_{p1} \\ \alpha_7 = - \frac{B_{wi} S_{wi} B_{oi} C_{tw}}{1 - S_{wi}} (1 + C_w \Delta p_1) \end{cases} \tag{12}$$

2.3 联物质平衡法的水体倍数计算方法

未饱和的天然弹性水驱油藏的物质平衡方程为:

$$N = \frac{N_p B_o - (W_e - W_p B_w)}{B_{oi} C_t^* \Delta p} \quad (13)$$

水侵量:

$$W_e = V_{pw} (C_w + C_f) \Delta p \quad (14)$$

式(14)中:

$$C_t^* = C_o + \frac{C_w S_{wi} + C_f}{1 - S_{wi}}; C_o = \frac{B_o - B_{oi}}{B_{oi} \Delta p} \quad (15)$$

由此可以得到水体体积

$$V_{pw} = \frac{N_p B_o + W_p B_w - N B_{oi} C_t^* \Delta p}{(C_w + C_f) \Delta p} \quad (16)$$

当达到拟稳定状态时,显然压力降落波及整个水体,因此前面的物质平衡法求得的水体体积即是当前的底水体积。因此有

$$V_{pw} = \frac{N_p B_o + W_p B_w - N B_{oi} C_t^* \Delta p}{(C_w + C_f) \Delta p} = V_{wd} \quad (17)$$

又因为

$$V_{wi} = \frac{S_{wi} N B_{oi} (1 + C_w \Delta p)}{1 - S_{wi}}; V_o = (N - N_p) B_o \quad (18)$$

$$V_{tm} = V_{wd} C_{tw} + V_{wi} C_{tw} + V_o C_{to} \quad (19)$$

把式(17)和式(18)代入式(19)整理后可以得到式(20)

$$C_{tw} \frac{S_{wi} N B_{oi} (1 + C_w \Delta p)}{1 - S_{wi}} + (N - N_p) B_o C_{to} + \frac{N_p B_o + W_p B_w - N B_{oi} C_t^* \Delta p}{\Delta p} = V_{tm} \quad (20)$$

整理该公式可以得到地质储量为

$$N = \frac{N_p B_o C_{to} \Delta p + V_{tm} \Delta p - N_p B_o - W_p B_w}{B_o C_{to} \Delta p - B_{oi} C_t^* \Delta p + \frac{C_{tw} S_{wi} B_{oi} \Delta p (1 + C_w \Delta p)}{1 - S_{wi}}} \quad (21)$$

求得地质储量后,计算水体倍数的方法与第一种子方法相同,本处就不再赘述了。使用该方法 and 第二种子方法时需要注意,由于分母的数值很小,分子的数值一般较大,当分子数据误差较大时,容易造成较大的误差,因此使用本方法时需要较准确的产量数据。

3 计算实例

以新疆某油田某油井为例,利用新推导的水体倍数计算方法计算其水体倍数。该井为缝洞型碳酸盐岩油藏,裂缝、孔洞发育,储层强非均质。从开井生产到进行压力恢复测试相隔近2年,生产时间较长,油藏流动应该达到了拟稳定状态。从图1该井的油压历史曲线可以看出,到测试时间以前,油压已经基本上按直线降落,这也证明了

油藏流动基本达到拟稳定状态,因此可以利用新推导的方法进行计算。考虑到测试次数较少,本文用第一种和第三种子方法进行计算。由于缺乏井底压力监测数据,考虑到测试前一段时间内产量变化不大,其油压的变化基本能够反映其井底压力的变化,因此利用油压数据进行计算。由于油压数据精度较低,在流动达到拟稳定,产量变化不大的时间范围内进行拟合。平均产油 36.96 m³/d,不产水,油的体积系数为 1.25,油压时间拟合如图2所示,由此求得 V_{tm} = 21 992 m³/MPa。其他的计算见表1。拟稳态法计算的地质储量为 117 × 10⁴ m³,其他方法给出的地质储量为 123 × 10⁴ m³,结果比较接近。子方法1和3计算的水体倍数分别为 27.3和27.4,用物质平衡法计算的水体倍数为 25.9,结果也很接近。

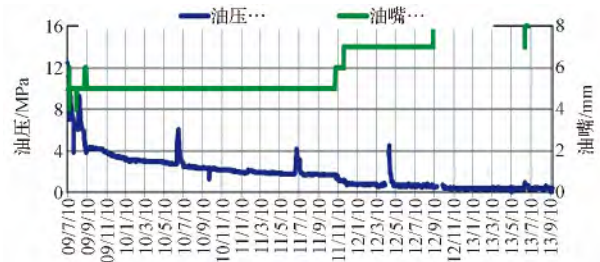


图1 油压历史曲线

Fig. 1 Historical plot of oil pressure

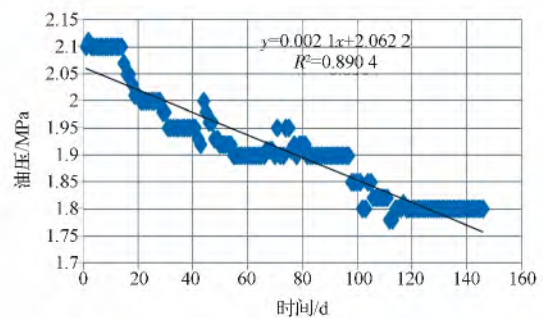


图2 油压-时间拟合曲线

Fig. 2 Fitted curve of oil pressure and time

计算结果表明,新推导的方法是可行的,在没有井底流压监测数据的时候,可以利用井口油压代替井底压力进行计算。

4 结论

底水的水体倍数对底水油藏的开发有很重要的意义,目前计算水体倍数的方法有容积法、物质平衡法、非稳态水侵法、数值模拟法等。本文在假设油藏流动达到拟稳定状态的情况下,把底水和油层当作一个整体,推导了计算底水水体倍数的

表 1 水体倍数计算
Table 1 Computation of water volumetric multiple

原始地层 压力	原始地层油 体积系数	地层油压缩 系数	p 压力下 地层油体积 系数	原始地层 水体积 系数	p 压力下 地层水体积 系数	地层水 压缩系数	地层岩石 压缩系数	束缚水 饱和度	地面累积 原油产量
P_i/MPa	B_{oi}	C_o/MPa^{-1}	B_o	B_{wi}	B_w	C_w/MPa^{-1}	C_i/MPa^{-1}	S_{wi}	N_p/m^3
64.48	1.146 8	8.25×10^{-4}	1.25	1.048	1.048	0.000 451	1.10×10^{-4}	0.10	47 914.71
地面累积 产水量	当前平均 地层压力	生产压差	V_{im}	水体体积	新方法计算 地质储量	已知地质 储量		水体倍数	
W_p/m^3	P/MPa	$\Delta p/\text{MPa}$	$I/(\text{m}^3 \cdot \text{MPa}^{-1})$	$V_w/10^4 \text{m}^3$	$N/10^4 \text{m}^3$	$N/10^4 \text{m}^3$	子方法 1	子方法 3	物质平衡法
17.29	61.75	2.73	21 991.52	3 671.68	116.87	123.24	27.30	27.40	25.89

新方法,并用该方法对实际井例进行了计算,得到了以下结论:

(1) 新方法根据已知原始地质储量、多次拟稳态测试、与物质平衡方法结合等情况分为三种子方法;

(2) 三个子方法中,第二种和第三种不需要知道原始地质储量,可以利用这两种方法计算原始地质储量;

(3) 计算实例表明新推导的拟稳态法计算的结果与其他方法计算的结果比较接近,具有可行性。

参 考 文 献

- Schols R S. An empirical formula for the critical oil production rate. *Erdoel Erdgas Z*, 1972; 88(1): 6—11
- 宋兆杰,李相方,李治平,等. 考虑非达西渗流的底水锥进临界产量计算模型. *石油学报*, 2012; 33(1): 106—111
Song Zhaojie, Li Xiangfang, Li Zhiping, et al. A model for calculating critical production rates of water coning with consideration of non-Darcy flow. *Acta Petrolei Sinica*, 2012; 33(1): 106—111
- Sobocinski D P, Cornelius A J. A correlation for predicting water coning time. *JPT*, 1965; 17(5): 594—600
- 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
- Kuo M C T, Des Brisay C L. A simplified method for water coning predictions. 58th Annu Technical Conf Society of Petroleum Engineers, San Francisco, California, SPE12067, 1983
- 张辉,彭小东,刘鑫,等. 底水油藏含水上升规律研究——以 Y2 油藏西北区为例. *科学技术与工程* 2012; 12(35): 9470—9474 9479
Zhang Hui, Peng Xiaodong, Liu Xin, et al. The study on the bottom water reservoir water cut rising characteristics—take the northwest block of Y2 reservoir as an example. *Science Technology and Engineering*, 2012; 12(35): 9470—9474 9479
- 吴克柳,李相方,范杰,等. 异常高压凝析气藏水侵量及水体大小计算方法. *中国矿业大学学报* 2013; 42(1): 105—111
Wu Keliu, Li Xiangfang, Fan Jie, et al. An approach to calculate water influx and aquifer region of abnormally high pressure condensate gas reservoir. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2013; 42(1): 105—111
- 李爱芬,李彦超,王倩. 奥陶系缝洞型油藏原生水体体积计算新方法. *石油天然气学报(江汉石油学院学报)* 2008; 30(6): 301—303
Li Aifen, Li Yanchao, Wang Qian, et al. New method for calculating original water volume in Ordovician fracture-cavity reservoirs. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2008; 30(6): 301—303
- 伍睿,黄兴龙,秦旭升,等. 裂缝性底底水油藏水体体积的计算. *石油天然气学报* 2012; 34(9): 273—275
Wu Rui, Huang Xinglong, Qin Xusheng. Water volume computation of fractured reservoir with edge and bottom water. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2012; 34(9): 273—275
- 马时刚,曹文江,石国新,等. 确定特殊的薄层底水油藏水体规模的方法. *新疆石油地质* 2005; 26(6): 698—700
Ma Shigang, Cao Wenjiang, Shi Guoxin, et al. A method for calculation of aquifer size in thin-layered bottom water sandstone reservoir. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2005; 12(6): 698—700
- Van Everdingen A F, Hurst W. The application of the Laplace Transformation to flow problems in reservoirs. *Trans AME*, 1949; 186: 305—324
- Chatas A T. Unsteady spherical flow in petroleum reservoirs. *SPEJ*, 1966; 6(2): 102—114

(下转第 131 页)

- adaptive codebook model. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2013; 25(1): 67—73
- 13 郭志涛,刘玉菲,刘恩海,等. 基于区域特征分析的层级有序码书目标检测算法. *计算机应用研究*, 2013; 30(6): 1903—1906
Guo Zh T, Liu Y F, Liu E H, *et al.*. Detection algorithm based on regional characteristics analysis layer codebook. *Application Research of Computers*, 2013; 30(6): 1903—1906
- 14 Guo J M, Hsia C H, Liu Y F, *et al.* Fast background subtraction based on a multilayer codebook model for moving object detection. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2013; 23(10): 1809—1821
- 15 薛茹,宋焕生,付洋. 基于块编码和交替更新的目标检测算法. *微电子学与计算机*, 2013; 30(6): 148—151
Xue R, Song H Sh, Fu Y. A target detection algorithm based on block encoding and alternate update. *Microelectronics & Computer*, 2013; 30(6): 148—151

Adaptive Codebook Detection Algorithm Based on Regional Information

ZHANG Hong-ying, LI Zhi-zhong*

(Aeronautical Automation College, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, P. R. China)

[Abstract] Moving object detection is one of the key techniques for automatic video analysis, especially in the domain of video surveillance. To solve the problem of low ability in adaptive dynamic background and low accuracy of detection under complex environment, a novel adaptive codebook target detection algorithm based on regional information analysis was proposed. Firstly, it utilizes adding two learning rates in order to update adaptively the background model in the presence of background motion. Secondly, it combines the observable codebook with neighboring codebooks to obtain more accurate moving targets. Lastly, it models and updates the foreground and background respectively, and converts them to eliminate false detection caused by the partial change of background. The results of experiment show that the improved algorithm has higher recognition rate and better robustness even in complex environment conditions with illumination variation and random noise. It basically meets the demands of moving object detection in dynamic scenes in terms of precision, speed, noise resistance, light adaptability and so on.

[Key words] object detection codebook adaptive regional information

(上接第 99 页)

Pseudo-steady Method for Water Volumetric Multiple Computation

HAN Guo-feng¹, CHEN Fang-fang², LIU Yue-wu¹, ZHU Yong-feng², MA Xiao-ping²

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences¹, Beijing 100190, P. R. China;

PetroChina Company Limited, Tarim Oilfield Company², Kuerle 841000, P. R. China)

[Abstract] The water volume of bottom water has an important role in the reservoir exploitation. The quantity of bottom water is represented by the water volumetric multiple of bottom water. By far, there are four methods of the computation method of water volumetric multiple, which are volumetric method, material balance method, unsteady water invasion method and numerical simulation method. Every method has its working condition and characteristic. In this research, a new computation method of water volumetric multiple is gained on the assumption of pseudo-steady state. The new method has three sub-methods by combining oil in place, multiple test and material balance method respectively. The new method can get water volumetric multiple and oil in place. Using the new method, a water volumetric multiple and oil in place have been computed with actual data. The results are closed to these of other methods, which imply the feasibility of the new method.

[Key words] bottom water water volumetric multiple pseudo-steady