

水驱气藏动态储量计算新方法

胡俊坤¹, 李晓平¹, 宋代诗雨²

(1. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610500;

2. 中国石油集团工程设计有限责任公司西南分公司, 四川 成都 610500)

摘要:在对气藏动态储量计算方法研究的基础之上, 结合水驱气藏的渗流特征, 建立了确定水驱气藏动态储量的新方法。新方法针对水驱气藏, 首先建立了气藏含水率与相对渗透率的关系式; 其次, 利用气水相对渗透率曲线确定了气、水相对渗透率比值与含水饱和度的关系式; 在此基础上, 推导出水驱气藏采出程度与含水率的关系式; 再者, 利用水驱气藏采出程度与含水率的关系式建立起水驱气藏累积产水量与累积产气量的关系式, 该关系式被定义为水驱气藏的水驱特征关系式。根据水驱特征关系式, 结合水驱气藏的生产动态资料, 即可作出水驱气藏的水驱特征曲线, 利用水驱特征曲线所获得的参数可确定水驱气藏的动态储量; 最后通过实例计算验证了新方法计算结果的准确性与实用性。

关键词:水驱气藏; 动态储量; 水驱特征曲线; 水驱特征直线段

中图分类号: TE341

文献标志码: A

文章编号: 1672-1926(2013)03-0628-05

引用格式: Hu Junkun, Li Xiaoping, Song Daishiyu. A new method for dynamic reserves evaluation of water-drive gas reservoir[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(3): 628-632. [胡俊坤, 李晓平, 宋代诗雨. 水驱气藏动态储量计算新方法[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(3): 628-632.]

0 引言

动态储量计算是气藏开发中的一项重要基础性工作^[1]。国内外许多学者^[2-6]提出了计算气藏动态储量的方法。常用的气藏动态储量计算方法可分为3类。第1类是物质平衡法^[7], 对于水驱气藏, 利用水驱气藏的物质平衡方程确定动态储量, 首先要确定水侵量(计算过程繁琐), 计算模型主要有Schilthuis 稳态模型^[8]、Van Everdingen & Hurst 非稳态模型^[9]和 Fetkovich 拟稳态模型^[10]。第2类是试井分析法^[11], 主要包括弹性二相法与压力恢复试井法, 该方法主要用于纯气藏动态储量的确定, 同时该方法受试井测试的限制。第3类是产量不稳定分析法^[12-13], 该方法对于受地层水影响较大的水驱气藏, 其计算结果存在较大偏差。根据水驱气藏动态储量确定的现状, 本文建立了确定水驱气藏动态储量的新方法。新方法根据理论推导获得的水驱特征

关系式, 结合水驱气藏的生产动态资料, 做出水驱气藏的水驱特征曲线, 利用水驱特征曲线所获得的参数计算水驱气藏的动态储量。

1 水驱气藏水驱特征曲线研究

水驱油藏的水驱特征曲线理论已经较为成熟, 国内外有很多学者^[14-16]进行了研究。童宪章^[17]将油田的累积产水量和累积产油量绘制到半对数坐标系中所形成的直线关系命名为甲型水驱曲线。采用与水驱油藏类似的方法, 研究水驱气藏水驱特征曲线理论。对于水驱气藏, 在气藏气井出水之后, 考虑到气相渗透率受地层水的影响而降低, 气相渗流速度随之变小, 可不考虑气相的高速非达西渗流; 而对于气体的低速非达西渗流研究, 通常集中于低渗透气藏, 对于常规水驱气藏, 可不考虑气相的低速非达西渗流。因此, 对于常规水驱气藏假定气水两相渗流满足达西定律, 同时在不考虑重力和毛细管力影

响的条件下,设 f_{wg} 为水相体积流量占气水两相体积流量的百分比,并令 $\mu_R = \mu_g / \mu_w$, 则:

$$f_{wg} = \frac{Q_w}{Q_w + Q_g} = \left[1 + \frac{\mu_w}{\mu_g} \left(\frac{K_{rg}}{K_{rw}} \right)_{S_w} \right]^{-1} = \left[1 + \frac{1}{\mu_R} \left(\frac{K_{rg}}{K_{rw}} \right)_{S_w} \right]^{-1} \quad (1)$$

式(1)中: f_{wg} 为水驱气藏含水率,%; Q_w 为日产水量, m^3/d ; Q_g 为日产气量, $\times 10^4 m^3/d$; μ_w 为地层水黏度, $mPa \cdot s$; μ_g 为天然气黏度, $mPa \cdot s$; K_{rg} 为气相相对渗透率; K_{rw} 为水相相对渗透率; S_w 为含水饱和度; μ_R 为天然气与地层水的黏度比。

整理式(1),可得:

$$\left(\frac{K_{rg}}{K_{rw}} \right)_{S_w} = \mu_R \frac{1 - f_{wg}}{f_{wg}} \quad (2)$$

同时结合实验室测试就可得到典型气、水两相相对渗透率曲线,如图1所示。

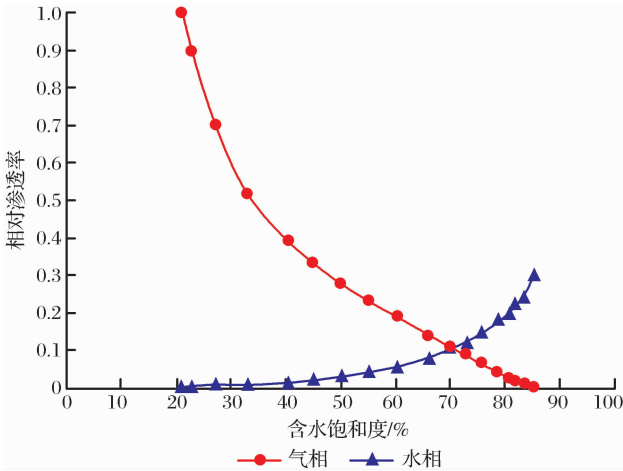


图1 气、水两相相对渗透率曲线

根据陈元千^[18]提供的油、水两相相对渗透率关系式,以及考虑到气、水两相相对渗透率曲线与油、水两相相对渗透率曲线具有相似的特征,引申出气、水两相相对渗透率比值 K_{rg}/K_{rw} 与含水饱和度 S_w 的关系为:

$$\frac{K_{rg}}{K_{rw}} = a e^{-bS_w} \quad (b > 0) \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)得:

$$e^{-bS_w} = \frac{\mu_R}{a} \frac{1 - f_{wg}}{f_{wg}} \quad (4)$$

根据水驱气藏的物质平衡原理,气藏含水饱和度 S_w 可表示为:

$$S_w = S_{wi} + R(1 - S_{wi}) \quad (5)$$

式(5)中: S_{wi} 为初始含水饱和度,%; R 为气藏的采出程度。

再将式(5)代入式(4),然后对式(4)两边取对数

可得:

$$\alpha R + \beta = \ln \frac{1 - f_{wg}}{f_{wg}} \quad (6)$$

其中: $\alpha = -b(1 - S_{wi})$, $\beta = -bS_{wi} - \ln \frac{\mu_R}{a}$ 。式(6)即为水驱气藏采出程度与含水率的关系式。

由 $\frac{dG_p}{dt} = Q_g$, $\frac{dW_p}{dt} = Q_w$ 可得:

$$\frac{1 - f_{wg}}{f_{wg}} = \frac{Q_g}{Q_w} = \frac{dG_p/dt}{dW_p/dt} = \frac{dG_p}{dW_p} \quad (7)$$

式(7)中: G_p 为气藏的累积产气量, $\times 10^4 m^3$; W_p 为气藏的累积产水量, m^3 。

将式(7)代入式(6)可得:

$$\alpha R + \beta = \ln \frac{dG_p}{dW_p} \quad (8)$$

对式(8)求定积分(G_p 取从无水累积产气量 G_{p0} 积分到目前累积产气量 G_p ; 相应的 W_p 取从 0 积分到目前累积产水量 W_p), 然后两边取对数可得:

$$\ln \left(-\frac{G}{\alpha} \right) - \beta - \frac{\alpha}{G} G_p = \ln(W_p + C) \quad (9)$$

式(9)中: G 为气藏的动态储量, $\times 10^4 m^3$; $C = -\frac{G}{\alpha} \exp \left(-\beta - \frac{\alpha}{G} G_{p0} \right)$, 其物理意义是无水采气期所对应的虚拟累积产水量。

随着气藏的持续开采,累积产水量的不断增加,常数 C 的影响逐渐减小。当 W_p 值远大于 C 值时,可以忽略 C 的影响。当 C 值取 0 时,同时令 $A' = -\beta + \ln \left(-\frac{G}{\alpha} \right)$, $B' = -\frac{\alpha}{G}$ 可得:

$$\ln W_p = A' + B' G_p \quad (10)$$

式(10)也可表示如下:

$$\log W_p = A + B G_p \quad (11)$$

式(10)、式(11)即为水驱气藏的甲型水驱特征曲线方程。若以 W_p 为纵坐标,以 G_p 为横坐标,则在半对数图上二者具有线性关系。

2 水驱气藏动态储量确定

根据水驱气藏的水驱特征曲线研究可知,随着开采时间的增长,气藏地层压力不断降低,水侵量不断增加,在水驱气藏生产一定时间之后,气藏累积产水量与累积产气量之间在半对数坐标中将呈现出一定的线性关系,利用水驱特征曲线的直线段斜率即可对水驱气藏的动态储量进行评价。李传亮^[19]通过多年研究认为,油藏含水上升规律的理论,也适用于气藏产水规律的研究。利用水驱气藏水驱特征曲线确定动态储量主要包括水驱特征曲线直线段的合

理选取与动态储量确定方法研究。

2.1 直线段的合理选取

考虑到水驱特征曲线直线段的选取往往带有很大的主观性,从而导致动态储量的预测结果产生较大的偏差。因此,水驱特征曲线直线段的合理选取是预测水驱气藏动态储量的关键点。

水驱气藏水驱特征曲线直线段出现的时间,主要受气藏水体活跃程度与气藏采气速度的影响,气藏水体越活跃,采气速度越高,则水驱特征曲线直线段出现的时间越早。对于水驱气藏而言,通常当含水率达到某一数值时,水驱特征曲线才会出现具有代表性的直线段。不少学者对水驱特征曲线直线段出现的条件进行了研究。陈元千^[20]利用丙型水驱曲线的极值拐点推出,当含水率 $f_{wg} > 50\%$ 以后,丙型水驱曲线将会出现直线段。而且丙型水驱曲线的直线段所对应的乙型水驱曲线也是直线段^[21]。因此,可根据甲型水驱曲线与乙型水驱曲线的关系确定甲型水驱曲线直线段出现的条件。

由甲型水驱曲线的表达式(11)两边对时间求导可得:

$$WGR = \frac{Q_w}{Q_g} = 2.303BW_p \quad (12)$$

式(12)中:WGR 为生产水气比, $m^3/10^4 m^3$ 。

对式(12)两边取对数,并联立式(11)可得:

$$\text{Log}WGR = A_1 + BG_p \quad (13)$$

其中: $A_1 = A + \text{Log}2.303B$ 。式(13)即为水驱气藏

的乙型水驱曲线表达式。由此可知甲型水驱曲线与乙型水驱曲线在半对数坐标中具有相同的斜率,同时如果确定了乙型水驱曲线直线段出现的条件,即可以确定相应甲型水驱曲线直线段出现的条件。

综合上述研究可知,对于水驱气藏而言,通常当 $f_{wg} > 50\%$ 时,甲型水驱特征曲线将会出现具有代表性的直线段。

2.2 动态储量的确定方法

从水驱气藏的水驱特征曲线研究可知,甲型水驱曲线直线段的斜率 B 与水驱气藏的动态储量相关;陈元千^[22]根据水驱油藏水驱特征曲线的研究,同时结合 135 个水驱油藏的实例,建立了甲型水驱曲线直线段斜率 B 与水驱油藏动态储量的相关经验公式。考虑到水驱油藏与水驱气藏水驱特征曲线的相似性,此经验公式同样可适用于水驱气藏,其形式为:

$$G = 7.5422B^{-0.969} \quad (14)$$

3 实例计算

四川盆地某水驱气藏及气藏典型产水井的生产动态资料如表 1 所示。根据水驱气藏水驱特征曲线的研究,结合水驱气藏气井生产的动态数据,可作出气藏气井的甲型水驱特征曲线图,同时根据甲型水驱曲线直线段的合理选取方法,选取具有代表性的直线段,分别如图 2、图 3 所示。

表 1 某水驱气藏气井生产动态资料

参数	初期日产气 /($\times 10^4 m^3/d$)	初期日产水 /(m^3/d)	目前日产气 /($\times 10^4 m^3/d$)	目前日产水 /(m^3/d)	累积产气量 /($\times 10^8 m^3$)	累积产水量 /($\times 10^4 m^3$)
水驱气藏	118.35	12.59	250.81	129.78	18.28	8.52
典型产水井	47.10	8.26	44.65	84.93	2.22	3.51

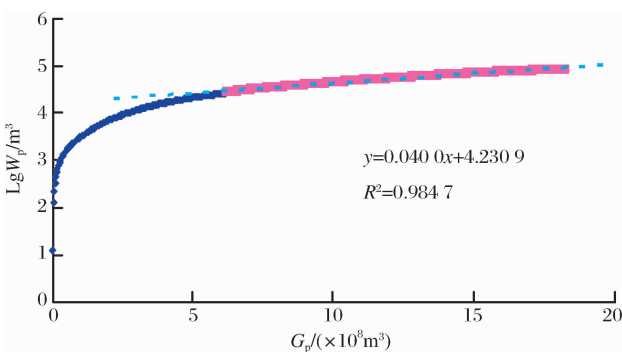


图 2 某水驱气藏甲型水驱曲线

由图 2 可得,该水驱气藏甲型水驱曲线具有代表性的直线段方程式为:

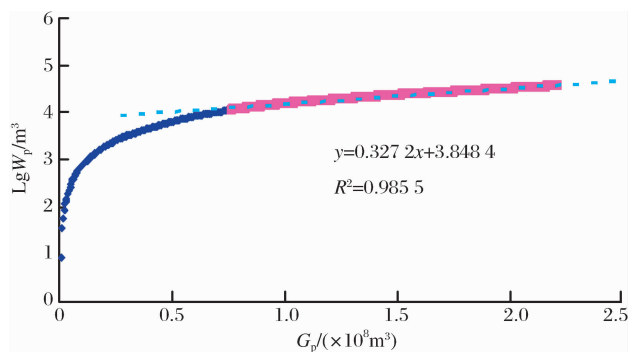


图 3 某水驱气藏典型产水井甲型水驱曲线

$$\text{Log}W_p = 4.2309 + 0.04G_p \quad (15)$$

由图 3 可得,该水驱气藏典型产水气井甲型水

驱曲线具有代表性的直线段方程式为:

$$\text{Log}W_p = 3.8484 + 0.3272G_p \quad (16)$$

根据水驱气藏及典型产水井甲型水驱曲线所得

具有代表性直线段的斜率,结合式(14)即可确定该水驱气藏及典型产水井的动态储量。新方法计算的动态储量如表2所示。

表2 新方法计算动态储量评价

参数	直线段斜率	参数 B	新方法所得 $G/(\times 10^8 \text{m}^3)$	其他方法所得 $G/(\times 10^8 \text{m}^3)$	相对误差/%
水驱气藏	0.040 0	4.000×10^{-6}	128.26	131.68	2.59
典型产水井	0.327 2	3.272×10^{-5}	16.74	17.23	2.87

从表2可以看出,新方法计算水驱气藏及典型产水井所得动态储量与其他众多方法(物质平衡法、产量不稳定分析法、弹性二相法及数值模拟法)所得动态储量的相对误差分别为2.59%和2.87%。从而表明新方法计算结果是可靠的。

4 结论

(1)通过对水驱气藏水驱特征曲线的研究,提出了利用水驱特征曲线确定水驱气藏动态储量的具体方法与步骤。

(2)利用新方法确定水驱气藏动态储量的过程中,通常当 $f_{wg} > 50\%$ 时,水驱特征曲线将会出现具有代表性的直线段。

(3)新方法仅需应用气藏气井的生产动态资料,所需资料易获取,计算过程简便,并通过实例计算表明,新方法计算结果可靠。

(4)考虑到新方法为根据水驱气藏与水驱油藏水驱特征曲线的相似性所得半经验公式法,对于特殊类型水驱气藏(裂缝型水驱气藏、双重介质水驱气藏等)该方法可能存在一定的局限性。

参考文献(References):

- [1] Li Chuanliang. Fundamentals of Reservoir Engineering[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005: 124-131. [李传亮. 油藏工程原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2005: 124-131.]
- [2] Yu Yuanzhou, Yang Lirong, Shi Changlin, et al. Dynamic reserves calculation for condensated gas reservoir with oil rim: Taking example of Banzhong north high point condensated gas reservoir with oil rim[J]. Natural Gas Geoscience, 2003, 14(4): 311-314. [余元洲, 杨丽容, 史长林, 等. 带油环凝析气藏动态储量计算——以板中北高点带油环凝析气藏为例[J]. 天然气地球科学, 2003, 14(4): 311-314.]
- [3] Cheng Shiqing, Li Juhua, Li Xiangfang, et al. Estimation of gas well dynamic reserves by integration of material balance equation with binomial productivity equation[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2005, 26(2): 181-182. [程时清, 李菊花, 李相方, 等. 用物质平衡—二项式产能方程计算气井动态储量[J]. 新疆石油地质, 2005, 26(2): 181-182.]

- [4] Li Yanli. Calculation methods of shale gas reserves[J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20(3): 466-470. [李艳丽. 页岩气储量计算方法探讨[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(3): 466-470.]
- [5] Wang Nutao, Huang Bingguang, Zhang Chongjun, et al. A novel method of calculating water-flooded gas in place and water influx of water drive gas reservoirs[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2000, 22(4): 26-32. [王怒涛, 黄炳光, 张崇军, 等. 水驱气藏动态储量及水侵量计算新方法[J]. 西南石油学院学报, 2000, 22(4): 26-32.]
- [6] Liu Weihua, Huang Jianquan, Hu Xuetao, et al. New method of reserves calculation for gas reservoir in carbonate rock[J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(5): 599-601. [刘卫华, 黄健全, 胡雪涛, 等. 碳酸盐岩气藏储量计算新方法[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(5): 599-601.]
- [7] Li Xin, Li Shilun, Liu Jianyi, et al. Estimating gas reserves in a reservoir by use of transient material balance method[J]. Natural Gas Industry, 2002, 22(4): 71-73. [李欣, 李士伦, 刘建议, 等. 应用瞬态物质平衡法计算气藏储量[J]. 天然气工业, 2002, 22(4): 71-73.]
- [8] Schilthuis R J. Active oil and reservoir energy[J]. AIME Petroleum Transaction, 1936, 118: 33-52.
- [9] Van Everdingen A F, Hurst W. The application of the laplace transformation to flow problems in reservoirs[J]. AIME Petroleum Transaction, 1949, 186: 305-324.
- [10] Fetkovich M J. A simplified approach to water influx calculations-finite aquifer systems[J]. Journal of Petroleum Technology, 1971, 23(7): 814-828.
- [11] Feng Youliang. Revised elastic two-phase method[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2003, 22(1): 15-16. [冯友良. 修正的弹性二相法[J]. 大庆石油地质与开发, 2003, 22(1): 15-16.]
- [12] Marhaendrajana T, Blasingame T A. Decline curve analysis using type curves-evaluation of well performance behavior in a multiwell reservoir system[C]// SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans, Louisiana: SPE, 2001.
- [13] Li Yong, Li Baozhu, Hu Yongle, et al. Application of modern production decline analysis in the performance analysis of gas condensate reservoirs[J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20(2): 304-308. [李勇, 李保柱, 胡永乐, 等. 现代产量递减分析在凝析气田动态分析中的应用[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(2): 304-308.]

- [14] Gao Wenjun, Peng Zhangshui, Li Zhengke. A derivation method and percolation theory of water drive characteristic curves[J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(5): 56-60. [高文君, 彭长水, 李正科. 推导水驱特征曲线的渗流理论基础和通用方法[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(5): 56-60.]
- [15] Gao Wenjun, Xu Jun. Theoretical study on common water drive characteristic curves[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(3): 89-92. [高文君, 徐君. 常用水驱特征曲线理论研究[J]. 石油学报, 2007, 28(3): 89-92.]
- [16] Wang Qinghua, Wang Xinhai, Liu Shixiang. Application of conventional water drive characteristic curves in Bamianhe Oilfield[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2005, 27(6): 760-761. [王庆华, 王新海, 刘世祥. 常用水驱特征曲线在八面河油田中的应用[J]. 石油天然气学报, 2005, 27(6): 760-761.]
- [17] Tong Xianzhang. Discussion on statistical regularities of natural water drive reservoir and artificial water flooding reservoir[J]. Petroleum Exploration and Development, 1978, 5(6): 250-254. [童宪章. 天然水驱和人工注水油藏的统计规律探讨[J]. 石油勘探与开发, 1978, 5(6): 250-254.]
- [18] Chen Yuanqian. Practical Petroleum Reservoir Engineering Methods[M]. Beijing: Petroleum University Press, 1998: 332-333. [陈元千. 实用油气藏工程方法[M]. 北京: 石油大学出版社, 1998: 332-333.]
- [19] Li Chuanliang. Fundamentals of Reservoir Engineering[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005: 291-322. [李传亮. 油藏工程原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2005: 291-322.]
- [20] Chen Yuanqian, Du Xia. A comparison between the different forms of displacement characteristic curves and the criterion for the appearance of straight line section[J]. Petroleum Exploration and Development, 1986, 13(6): 55-63. [陈元千, 杜霞. 水驱曲线关系式的对比及直线段出现时间的判断[J]. 石油勘探与开发, 1986, 13(6): 55-63.]
- [21] Wang Junkui. Theoretical discussion on type A and type C water flooding feature curves[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2008, 27(3): 48-52. [王俊魁. 对甲型与丙型水驱特征曲线的理论探讨[J]. 大庆石油地质与开发, 2008, 27(3): 48-52.]
- [22] Chen Yuanqian. Application of water drive curve to gasfield development[J]. Natural Gas Industry, 1989, 9(6): 26-29. [陈元千. 水驱曲线在气田开发上的应用[J]. 天然气工业, 1989, 9(6): 26-29.]

A New Method for Dynamic Reserves Evaluation of Water-drive Gas Reservoir

HU Jun-kun¹, LI Xiao-ping¹, SONG Dai-shiyu²

(1. State Key Laboratory of Oil Gas Geology and Exploration Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. Southwest Branch of China Petroleum Group Engineering Design Limited Liability Company, Chengdu 610500, China)

Abstract: Based on the research of calculation method for dynamic reserves of gas reservoir, combined with the seepage characteristic of water-drive gas reservoir, this paper establish a new method for calculating dynamic reserves in water-drive gas reservoir. For water-drive gas reservoir, the relationship between the relative permeability and the water content of gas reservoir is established firstly. Secondly use gas-water relative permeability curve to determine the relationship between water saturation and gas-water relative permeability ratio. On the basis of it, the relationship between water content and degree of reserves recovery of water-drive gas reservoir is established, according to which the relationship between cumulative water production and cumulative gas production can be determined. The latter relationship is defined as water-drive characteristic relationship for a water-drive gas reservoir. According to the water-drive characteristic relationship, combined with production performance data, the water-drive characteristic curve can be established. The dynamic reserves of water-drive gas reservoir can be determined by using water-drive characteristic curve parameter. Finally, the case study verifies that the new method is accurate and practical.

Key words: Water-drive gas reservoir; Dynamic reserves; Water-drive characteristic curve; Water-drive characteristic curve linear portion