第 27 卷 第 2 期
2006 年 3 月

石 油 学 报
ACTA PETROLEI SINICA

Vol. 27 No. 2
Mar. 2006

文章编号: 0253-2697(2006)02-0077-03

低渗透油藏水驱采收率计算新方法

牛彦良[1,2] 李 莉[2] 韩德金[2] 周锡生[2]

(1. 中国石油大学石油天然气工程学院 北京 102249; 2. 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院 黑龙江大庆 163712)

摘要: 分析了影响井网系数、驱油效率和波及系数的因素,结合非达西渗流理论,对低渗透油藏水驱采收率计算方法进行了研究。结果表明,对于低渗透储层,由于启动压力梯度的存在,不能全部有效动用井网控制储量,在井网系数中引入了有效驱动程度。水驱油效率是驱替压力梯度的函数,随井网密度的增大而增大;平面波及系数是注水方式、裂缝走向夹角及裂缝相对长度的函数。用该方法计算的水驱采收率与低渗透油藏动态比较吻合。该方法适合于测算低渗透油藏水驱采收率。

关键词: 低渗透油藏;井网系数;驱油效率;波及系数;油气采收率;非达西渗流理论

中图分类号: TE313.7 **文献标识码**: A

A new method for calculating recovery factor of water drive in low-permeability reservoir

Niu Yanliang[1,2] Li Li[2] Han Dejin[2] Zhou Xisheng[2]

(1. *Faculty of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing* 102249, *China*;
2. *Exploration and Development Research Institute, Daqing Oilfield Company Limited, Daqing* 163712, *China*)

Abstract: The factors affecting coefficient of well pattern, oil-water displacement efficiency and sweep efficiency were analyzed. The methods for calculating recovery factor of water drive in low-permeability reservoirs were investigated with the theory of non-Darcy fluid flow. Because there is a kickoff pressure gradient in low-permeability reservoirs, reserves controlled by well-pattern can not be fully efficiently developed. The degree of efficient flooding is introduced into the coefficient of well pattern. The oil-water displacement efficiency is the function of displacement pressure gradient and furthermore increases with the rise of well spacing density. Lateral sweep efficiency is the function of injection-and-production system, angles between direction of injection and fractures, and the relative length of fractures. The recovery factor of water drive calculated by this method coincides with the data of reservoir performance. This method is reliable for the calculation of water drive recovery factor of low-permeability reservoirs.

Key words: low-permeability reservoir; well-pattern coefficient; oil displacement efficiency; sweep coefficient; oil-gas recovery factor; non-Darcy fluid flow theory

1 问题的提出

传统的水驱采收率为波及系数与驱油效率的乘积,其计算表达式为

$$R = E_v E_D \quad (1)$$

式中 R 为水驱采收率, %; E_v 为波及系数, %; E_D 为驱油效率, %。

波及系数主要与储层渗透率变异系数和注水方式有关;驱油效率是通过室内水驱油实验获得,它主要与岩石物理性质有关,这两个参数与井网密度没有直接关系。式(1)主要适合计算中、高渗透且砂体大面积分布油藏的水驱采收率,而对于低渗透且储层砂体分布零散的油藏适应性差。

近年来国内针对低渗透油藏提出了一些计算水驱采收率的经验公式,但这些公式大多是应用标定的采收率值与地质或井网参数回归而得到的,在一定程度上存在不合理性[1]。为此,根据影响低渗透储层水驱采收率的主要因素[2],应用低渗透储层非达西渗流原理和有效驱动体系理论[3],提出了新的低渗透油藏水驱采收率计算方法。

2 新计算方法原理

2.1 水驱采收率计算式

从理论上讲,水驱采收率是指注水开发结束时被注入水驱出的石油地质储量与原始石油地质储量的比值。按此定义计算水驱采收率应满足 3 个条件: ①油

基金项目:国家"九五"重点攻关项目(95-109)部分成果。

作者简介:牛彦良,男,1962 年 9 月生,1984 年毕业于长春地质学院,现为大庆油田勘探开发研究院副院长,高级工程师,中国石油大学(北京)石油天然气工程学院在读博士研究生,主要从事油田开发工作。E-mail:niuyanliang@petrochina.com.cn

砂体能被井网控制,即油砂体被井钻遇;②原油有可能被注入水驱替到油井,即原油所在砂体处在注采井间上;③能建立起有效的驱动体系,即原油能在油藏合理注采压差下被驱动。上述 3 个条件实质上是取决于注水开发的井网,为此,在传统的水驱采收率公式(1)中增加了井网系数。即

$$R = E_p E_v E_D \tag{2}$$

式中 E_p 为井网系数,%。

2.2 参数的确定

2.2.1 井网系数

油层是由具有一定形状和大小的砂体组成的,同一沉积类型砂体的走向或规模服从一定的概率分布,但从整体上讲都是不规则的。砂体的这种不规则性与相对规则的井网必然存在不同程度的不适应性。特别是对于低渗透油藏,由于存在启动压力梯度,即使井网能够控制住的砂体,也可能因为未能建立有效驱动体系而不能被有效动用。低渗透油藏的井网系数主要与井控砂体程度、水驱控制程度和有效驱动程度有关。即

$$E_p = E_w E_s E_e \tag{3}$$

式中 E_w 为井控砂体程度,%;E_s 为水驱控制程度,%;E_e 为有效驱动程度,%。

(1) 井控砂体程度 井控砂体程度是指井网控制的砂体体积与油层砂体总体积之比。一般通过密井网抽稀统计不同井网对砂体的控制,从而得到井控砂体程度与井网密度的关系。如朝阳沟油田朝 55 井网加密试验区的井网被加密后,连同抽稀加密边井、300 m ×300 m、600 m ×600 m、1 200 m ×1 200 m 共 5 种井网,得到井控砂体程度与井网密度的关系曲线(图 1)。

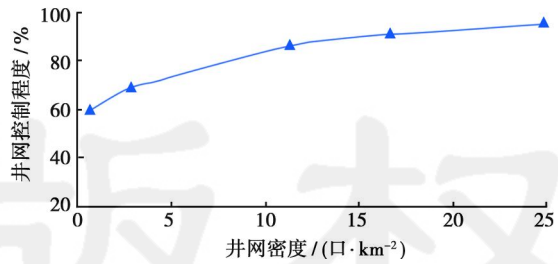

图 1 朝阳沟油田井控砂体程度与井网密度关系曲线

Fig. 1 Relative curve of sandbody-controlled degree with well spacing density in Chaoyanggou Oilfield

其表达式为

$$E_w = \alpha \exp(-\beta s) \tag{4}$$

式中 α 和 β 为与砂体规模有关的参数,可由油藏不同井网条件下求得;s 为井网密度,口/km²。

(2) 水驱控制程度 水驱控制程度与采注井数比值、砂体规模以及井网密度有关[4]。其表达式为

$$E_s = 1 - \sqrt{\varepsilon} \exp(-0.1 c_o s / \Psi) \tag{5}$$

式中 ε 为采注井数比值,无因次;c_o 为油砂体面积,m²;Ψ 为井网系统单井控制面积与井距平方之间的换算系数,四点法为 0.866,五点法和反九点法为 1。

(3) 有效驱动程度 有效驱动程度为储层有效驱动的石油地质储量与总石油地质储量的比值。一般计算水驱控制程度时认为注采井连通就能被水驱,而实际上对于低渗透油层,由于渗透率低,在一定井网条件下不能建立起有效的驱动体系,即使连通也不能被有效驱动。矿场上可以通过统计岩心资料求得有效驱动程度。

样品累积数与空气渗透率的关系见图 2。其表达式为

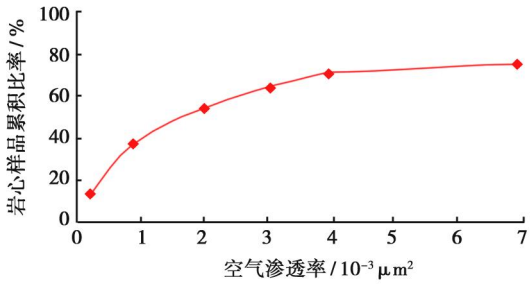

图 2 朝阳沟油田岩心样品累计数与空气渗透率关系曲线

Fig. 2 Relative curve of cumulative percentage of core samples with absolute permeability in Chaoyanggou Oilfield

$$\eta_g = m(K - K_0)^d \tag{6}$$

式中 η_g 为样品累积数,%;K 和 K_0 分别为有效厚度物性下限以上和物性下限空气的渗透率,$10^{-3}\mu m^2$;m 和 d 为相关系数。

一般来说,岩心取样间隔相对均匀,其岩心样品累计数可以近似表示从有效厚度物性下限到任意渗透率之间的累积有效厚度与总有效厚度的比值。即有效厚度累积数与渗透率的关系可近似表示为

$$\eta_h = m(K - K_0)^d \tag{7}$$

式中 η_h 为有效厚度累积数,%。

由于低渗透油藏存在启动压力梯度,其启动压力梯度与储层渗透率成正比[4],根据矿场实际资料,启动压力梯度与储层空气渗透率的关系式为[5]

$$\lambda = -a \ln K + b \tag{8}$$

式中 λ 为启动压力梯度,MPa/m;a 和 b 为与储层性质有关的常数。

由于启动压力梯度的存在,在驱替压差下,对于特定的油藏中的不同渗透率的油层,其有效驱动距离不同,其表达式为

$$r = (p_h - p_f)/\lambda \quad (9)$$

式中　r 为有效驱动距离,m;p_h 和 p_f 分别为注水井井底流压和油层任意处压力,MPa。

对于任意油层,当有效驱动距离小于或等于注采井距时,其油层不能被有效驱动。

设平均井距为

$$L = 1/s \quad (10)$$

则由式(8)、式(9)和式(10)可以获得特定油藏有效驱动渗透率的下限为

$$K = \exp[b - s(p_h - p_f)]/a \quad (11)$$

从而得出特定油藏在合理工作制度下有效动用程度与井网密度的表达式为

$$E_e = 1 - m\ \exp[b - s(p_h - p_f)]/a - K_0^{\ d} \quad (12)$$

2.2.2　波及系数

在注水开发中,只有注入水经过的油层才可能有油被驱替出来。由于储层平面和纵向的非均质性以及重力、毛管力作用,即使在井网有效驱动范围内,其注水波及体积也小于总有效驱动的体积。波及系数的表达式为

$$E_V = c\,E_A \quad (13)$$

式中　c 为纵向波及系数,%;E_A 为平面波及系数,%。

纵向波及系数(垂向波及系数)主要受油水流度比 M,水油比 F_{wo} 和渗透率变异系数 V 的影响,可通过如下表达式求得❶:

$$c = a_1 c^{a_2}(1 - y)^{a_3} \quad (14)$$

其中

$$y = \frac{(F_{wo} + 0.4)(18.948 - 2.499V)}{(M + 1.137 - 0.809\,4V)\,10^{f(V)}}$$

$$f(V) = -0.689\,1 + 0.973\,5V + 1.645\,3V^2$$

式中　$a_1 = 3.334\,088\,568$;$a_2 = 0.773\,734\,189$;$a_3 = -1.225\,859\,406$;F_{wo} 为水油比,无因次;V 为渗透率变异系数;M 为流度比,无因次。适应条件是 $0 \leq M \leq 10$,$0.3 \leq V \leq 0.8$。

平面波及系数有两种情况:

(1) 对于均质且砂体大面积分布的油层,平面波及系数主要与注水方式、性质及储层渗流特征有关[1],反九点井网系统平面波及系数为 $E_A = 0.525E$;五点井网系统为 $E_A = 0.718E$;四点井网系统为 $E_A = 0.743E$。其中

$$E = \left(\frac{1 + \mu_R}{2\mu_R}\right)^{0.5}$$

$$\mu_R = \frac{[K_w(S_w) + K_o(S_w)]\mu_o}{\mu_w K_o(S_w)}$$

式中　K_o、K_w 分别表示含水饱和度为 S_w 时油和水相相对渗透率,无因次;μ_o 和 μ_w 分别为地层条件下油、水粘度,mPa·s。

(2) 对于储层存在具有方向性裂缝的油藏,裂缝对注水开发效果有影响[6-7]。依据文献[8]提供的实验结果,经数学回归处理求得其表达式。

当注采方向与裂缝方向平行时为

$$E_{A1} = 0.145\,4L_f^{\ 2} - 0.940\,99L_f + 0.739\,57 \quad (15)$$

当注采方向与裂缝方向垂直时为

$$E_{A2} = -0.185\,8L_f^{\ 2} + 0.360\,2L_f + 0.701 \quad (16)$$

式中　L_f 为裂缝相对长度。

2.2.3　驱油效率

实验表明,驱油效率主要与储层渗透率有关[3]。同时,实验资料表明,当驱替压力梯度增大时,驱油效率逐步增大,对文献[3]实验数据进行了数学处理和理论推导,驱油效率与井网密度的关系式为

$$E_D = 176(1 - 0.8/K^{0.133})/[0.46 + 0.52\ln K]$$
$$[0.176 \times 10^{-3}\ln(\Delta p)s^{0.5})^{0.413\,6} + 1.222] \quad (17)$$

式中　Δp 为注采压差,MPa。

3　计算实例

应用上述方法对朝阳沟油田朝 55 井网加密试验区加密前后采收率进行了计算。结果表明,由于原井网密度公式中没有考虑有效驱动程度,原井网采收率计算值偏高,加密后采收率计算值偏低。用本方法计算加密前有效驱动程度为 79.4%,采收率为 14.5%,加密后有效驱动程度为 95.1%,采收率为 24.7%。分别提高了 15.7%和 10.2%,比用井网密度法计算的加密后采收率提高了 2.7%(表 1)。因此,本方法计算的

表 1　朝阳沟油田朝 55 井网加密试验区采收率计算结果

Table 1　Calculated results of recovery factor in Chao55 infilled pilot block of Chaoyanggou Oilfield

参　数	加密前	加密后
砂体控制程度/%	86.1	95.2
水驱控制程度/%	68.8	80.1
有效驱动程度/%	79.4	95.1
井网系数/%	47.0	72.6
波及系数/%	87.1	92.8
驱油效率/%	35.4	36.7
采收率(本方法)/%	14.5	24.7
采收率(井网密度法)/%	16.7	24.2

(下转第 84 页)

❶法斯黑 M R. 新的计算纵向波及系数和面积波及系数关系式. 曲建山,译. 石油勘探开发情报,1992,(1):111-112.

参 考 文 献

[1] Olenick S. Cyclic CO_2 injection for heavy-oil recovery in halfmoon field: Laboratory evaluation and pilot performance [R]. SPE 24645, 1992: 4-7.

[2] Sayegh S G. Maini laboratory evaluation of the CO_2 huff-n-puff process for heavy oil reservoirs[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 1984, 23(2): 29-36.

[3] 沈德煌, 张义堂, 张霞, 等. 稠油油藏蒸汽吞吐后转注 CO_2 吞吐开采研究[J]. 石油学报, 2005, 26(1): 83-86.

[4] 刘炳官, 朱平, 雍志强, 等. 江苏油田 CO_2 混相驱现场试验研究[J]. 石油学报, 2002, 23(4): 56-60.

[5] Welker J R, Dunlop D D. Physical properties of carbonate oils[J]. JPT, 1963, 15(8): 873-875.

[6] Simon R, Graue D. Generalized correlations for predicting solubility, swelling and behavior of CO_2-crude oil systems[J]. JPT, 1965, 17(1): 102-106.

[7] Chung T H, Jones R A. Measurements and correlations of the physical properties of CO_2/heavy-crude-oil mixtures [R]. SPE 15080, 1988: 822-828.

[8] Hong K C, Ault J W. Effect of noncondensable gas injection on oil recovery by steam flooding[J]. JPT, 1984, 36(13): 2160-2170.

[9] 唐纳森 E C. 提高石油采收率[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992: 111-112.

(收稿日期 2005-07-21 改回日期 2005-08-29 编辑 孟伟铭)

(上接第 79 页)

水驱采收率更加符合低渗透油藏的实际情况。

4 结 论

(1) 井网系数与井控砂体程度、水驱控制程度和有效驱动程度有关。井网密度越大, 井控砂体程度、水驱控制程度和有效驱动程度越大, 井网系数也就越大。

(2) 水驱波及系数不仅与水油比、渗透率变异系数和流度比有关, 还与井网及裂缝组合有关。当注采方向与裂缝方向平行时, 波及系数较小; 与裂缝垂直时, 波及系数较大; 水驱方向数越多, 波及系数越大。

(3) 低渗透油藏驱油效率除与储层渗透率有关, 还与驱动压力梯度有关。储层渗透率越高, 驱油效率越大, 驱动压力梯度越大, 驱油效率越高。

(4) 低渗透油藏启动压力梯度的存在使有效驱动的油藏砂体规模变小, 常规水驱采收率计算方法难以适应其油藏地质特点, 必然造成计算上的误差。而新方法计算的采收率更加符合低渗透油藏的实际。

参 考 文 献

[1] 王俊魁, 万军, 高树棠. 油气藏工程方法研究与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998: 193-198, 145-149.

[2] 宋付权, 刘慈群. 低渗透油藏水驱采收率影响因素分析[J]. 大庆石油地质与开发, 2000, 19(2): 30-32

[3] 黄延章. 低渗透油层渗流机理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998: 83-86, 135-136.

[4] 齐与峰. 砂岩油田注水开发合理井网研究中的几个理论问题[J]. 石油学报, 1990, 11(4): 51-60.

[5] 李莉, 韩德金, 周锡生. 大庆外围低渗透油田开发技术研究[J]. 大庆石油勘探与开发, 2004, 23(5): 86-90.

[6] 孙庆和, 何玺, 李长禄. 特低渗透储层微裂缝特征及对注水开发效果的影响[J]. 石油学报, 2000, 21(4), 53-57.

[7] 丁云宏, 陈作, 曾斌, 等. 渗透率各向异性的低渗透油藏开发井网研究[J]. 石油学报, 2002, 23(2): 64-67.

[8] 王俊魁, 孟宪君, 鲁建中. 裂缝性油藏水驱油机理与注水开发方法[J]. 大庆石油勘探与开发, 1997, 16(1): 35-38.

(收稿日期 2005-04-15 改回日期 2005-07-19 编辑 孟伟铭)

版权所有