

高含水油田大孔道参数计算新方法

丁乐芳¹,朱维耀¹,王鸣川¹,石成方²,胡水清²,曹晨³

(1.北京科技大学 土木与环境工程学院,北京 100083; 2.中国石油勘探开发研究院,北京 100083;

3.中国石油天然气股份有限公司,北京 100007)

摘要:大孔道的存在导致注入水快速突窜到生产井,使油藏快速水淹,降低了水驱波及效率,从而导致采收率下降。为了加深对大孔道的认识,确定高含水油田大孔道参数,在充分利用油田静态资料和动态资料的基础上,应用渗流理论,推导出产油井中无效水量的数学模型;再根据高速非达西渗流公式和 Carman-Kozeny 公式,定量描述注采井间大孔道的渗透率和孔喉半径。以油田现场常用的反五点井网为例,根据模糊数学理论对井组间产水量进行劈分,计算得到井组间大孔道的渗透率和孔喉半径等参数。以杏六中油田为例,利用新方法定量描述大孔道参数,并以试验井组间无效水量为依据判断大孔道的存在情况,大孔道参数的计算结果证明该方法准确可靠。

关键词:大孔道 无效水量 渗透率 孔喉半径 高含水油田 高速非达西渗流

中图分类号:TE319

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2013)05-0092-04

高含水油田在长期的注水开发过程中,由于储层非均质性、可溶性盐类被溶解、油层中的微裂缝、高渗透带的严重指进及强注强采等不合理的开采方式,使得油藏的非均质程度增强,造成注水开发中后期储层渗透率和喉道半径增大,进而形成大孔道^[1-2]。大孔道的形成加剧了层间矛盾,使纵向波及系数难以提高;因注入水沿大孔道快速突窜到生产井,造成严重的平面矛盾,平面波及系数亦难以提高,大大降低了油藏的采收率^[3-6]。目前,中外通过示踪剂法、水力前缘探测法、电位法等来认识大孔道^[7],但这些方法只能定性或半定量解释大孔道。刘月田等利用流体力学理论建立了计算大孔道体积的方法,却不能计算大孔道的渗透率^[8]。王学忠等利用井间示踪资料计算大孔道渗透率,但计算高渗透层厚度的应用范围较小^[9-10]。为此,笔者将大孔道中流体的流动视为高速非达西渗流,而非大孔道区域的流动仍符合达西渗流;利用生产井产出的无效水量,定量描述大孔道参数,以期有效封堵大孔道和提高油田开发效果提供借鉴。

1 大孔道基本特征

1.1 生产响应特征

油田开发中后期,储层中矿物及胶结物的溶解作用逐渐加强,颗粒溶孔发育,三维连通孔隙增多,

导致储层渗透率差异加大;再加上油水的重力分异作用,致使储层经过注入水的长期冲刷,形成孔隙度大、渗透率高的条带;注入水优先沿此条带向油井突进,形成油水井间相互连通、条带状分布的高渗透强水洗通道,即为大孔道。其孔道半径一般为0.03~5 mm,毛管压力曲线呈粗歪度,压力曲线呈双孔隙介质特征,产油量低、产液量高。

大孔道形成后,注水井的注入动态和生产井的生产动态均会发生明显变化,主要体现在6个方面:①注水井井底流压低,视吸水指数高;②部分油井含水率上升快,采出程度相对较低;③注入水单层突进严重,吸水剖面异常;④地层存水率低,无效水循环严重;⑤注水井井口压降快,压力指数低;⑥水淹程度差异较大,采液指数大幅度增加。

1.2 渗流特征

大孔道中油水的流动状态是研究大孔道油藏的注水开发及提高采收率的理论基础。李秀兰依据大孔道参数,采用达西线性渗流和高速非达西渗流规律对大孔道中的水推速度进行计算,并与实际数据进行对比分析,认为大孔道中流体流动符合高速非达西渗流^[11]。目前,Forchhimer公式^[11]和指数型公式^[12]是描述高速非达西渗流的2个公式,其表达式分别为

$$-\frac{dp}{dx} = \frac{\mu}{K}v + \rho\beta v^2 \quad (1)$$

收稿日期:2013-07-16。

作者简介:丁乐芳,女,在读硕士研究生,从事渗流力学和油气田开发研究。联系电话:15201157366, E-mail:dinglefang@163.com。

基金项目:国家科技重大专项“剩余油分布综合预测与精细注采结构调整技术”(2011ZX05010-002)。

$$v=c\left(\frac{dp}{dx}\right)^n \quad (2)$$

其中

$$c=\frac{K_d}{\mu_d} \quad (3)$$

式中: dp/dx 为压力梯度, MPa/m; p 为压力, MPa; x 为一维坐标, m; μ 为地层流体粘度, mPa·s; K 为渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; v 为渗流速度, m/s; ρ 为地层流体密度, kg/m^3 ; β 为非达西流动系数; c 为与多孔介质及流体有关的常数; n 为渗流指数, 其值为 $0.5 \sim 1$; K_d 为大孔道渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; μ_d 为大孔道中流体的粘度, mPa·s。

2 大孔道参数计算

2.1 一注一采井间大孔道参数

根据渗流理论, 为保证计算过程的合理性, 在大孔道参数定量计算过程中, 做以下基本假设: 油藏为宏观均质油藏; 大孔道形成后, 油水流动在非大孔道区域遵循达西渗流规律, 在大孔道区域遵循高速非达西渗流规律; 大孔道中水的无效循环致使生产井产出无效水量; 大孔道中流体做一维单向流动, 采用流管法计算; 总孔隙体积不变。

在形成大孔道后, 生产井实际产水量与理论产水量(没有大孔道时的产水量)的差值即为生产井产出的无效水量, 即

$$q_{sd}=q_{st}-q_{si} \quad (4)$$

其中

$$q_{si}=\frac{2\pi K_w h(p_e-p_{wf})}{\mu_w \ln \frac{r_e}{r_w}} \quad (5)$$

式中: q_{sd} 为生产井产出的无效水量, m^3/d ; q_{st} 为生产井实际产水量, m^3/d ; q_{si} 为生产井理论产水量, m^3/d ; K_w 为水相有效渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; h 为吸水层段有效厚度, m; p_e 为供给压力, MPa; p_{wf} 为井底流压, MPa; μ_w 为产出水的粘度, mPa·s; r_e 为供给半径, m; r_w 为生产井半径, m。

渗流指数取 0.5, 得出大孔道中的无效水量为

$$q_{sd}=\pi r_d^2 \frac{K_d}{\mu_d} \left(\frac{dp}{dx}\right)^{1/2} \quad (6)$$

式中: r_d 为大孔道平均半径, m。

边界条件为

$$p|_{x=0}=p_e, \quad p|_{x=L}=p_w \quad (7)$$

根据 Carman-Kozeny 公式^[13-15], 大孔道的平均半径为

$$r_d=\sqrt{\frac{8K_d\tau^2}{\phi}} \quad (8)$$

式中: τ 为迂曲度, 其值为 $1.5 \sim 5.5$; ϕ 为孔隙度, %。

将式(6)积分并结合式(8)可得注采井间大孔道的渗透率、半径和体积, 其表达式分别为

$$K_d=\left(\frac{q_{sd}\phi\mu_d}{8\pi}\right)^{1/2} \times \frac{L}{\Delta p} \quad (9)$$

$$r_d=\left(\frac{8q_{sd}\mu_d}{\pi\phi}\right)^{1/4} \times \left(\frac{L}{\Delta p}\right)^{1/2} \times \tau \quad (10)$$

$$V_d=\pi L r_d^2 \quad (11)$$

式中: L 为注采井距, m; Δp 为注采井压差, MPa; V_d 为大孔道体积, 10^4m^3 。

2.2 井组间大孔道参数

在油田开发过程中, 高含水油田开发井网部署一般以面积井网为主。无论哪种井网部署方式, 每口注水井的注水量往往流向周围几口油井, 而油井的产水量也是周围几口注水井共同作用的结果。鉴于复杂地层尤其是非均质厚油层不进行无效水劈分, 计算误差较大, 因此, 井组间的大孔道参数计算须进行产水量劈分。笔者采用 CM 模型对井组间产水量进行劈分^[12, 16-18], 并以反五点法井网为例, 对井组间的大孔道参数进行计算。相应的 CM 模型为

$$Q(s)=\sum_{i=1}^4 \frac{\lambda_i}{\tau_i s+1} I_i(s) \quad (12)$$

式中: $Q(s)$ 为产液量拉普拉斯的变换; λ_i 为中心水井流向各油井的水量占该注水井总注水量的比例; i 为对应注水井的序号, 其值为 $1, 2, 3, 4$; τ_i 为该生产井对其对应的注水井注水量变化的响应敏感程度; s 为拉普拉斯算子; $I_i(s)$ 为注水量的拉普拉斯变换。

时间域井组系统的注水量和产液量关系式为

$$MK=Q \quad (13)$$

$$M=\begin{pmatrix} m_1(t_1) & \cdots & m_4(t_1) \\ \vdots & & \vdots \\ m_1(t_n) & \cdots & m_4(t_n) \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$K=(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4)^T \quad (15)$$

$$Q=[q(t_1), q(t_2), \cdots, q(t_n)]^T \quad (16)$$

其中

$$m_i(t_j)=\frac{1}{\tau_i} \int_{\xi=t_0}^{\xi=t} e^{-\frac{t-\xi}{\tau_i}} I_i(\xi) d\xi \quad (17)$$

$i=1, 2, 3, 4; j=1, 2, \cdots, n$

$$q(t_j) = q(t_e) - q(t_0)e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} - Jq_{wf}'(t_j) \quad (18)$$

式中： M 为井组中注水井实际注入量， m^3 ； K 为中心水井流向各油井的水量占该注水井总注水量的比例； Q 为生产井产液量， m^3 ； $m_i(t_j)$ 为 t_j 时刻第 i 口注水井的注水量， m^3 ； I_i 为第 i 口注水井的注水量， m^3 ； ξ 为时间 t 的积分因子； t_0 为初始时间， s ； t_e 为有效时间， s ； J 为水井对油井采液指数的贡献量； q_{wf}' 为井底压力变化对产液量的影响，在选取时间段较短的情况下，可以认为该项近似为常数。

迂曲度、注水井实际注入量和生产井产液量已知，优化迂曲度，使由式(14)求出的输出和实际产液量的误差最小。从物理意义上说，参数 τ 表征完全受效时间，即生产井对其对应的注水井注水量变化的响应敏感程度。利用模糊数学，对参数 λ 和 τ 建立模糊分布模型，计算权重矩阵，进而计算中心产出井的多余水来自周围4口注水井的比例。

首先，采用 H 次抛物线分布对利用参数 λ 和 τ 建立模糊分布模型，隶属函数分别为

$$A_\lambda(x) = \begin{cases} 1 & x < a \\ \left(\frac{b-x}{b-a}\right)^H & a \leq x < b \\ 0 & x \geq b \end{cases} \quad (19)$$

$$A_\tau(x) = \begin{cases} 0 & x < m \\ \left(\frac{x-n}{n-m}\right)^H & m \leq x < n \\ 1 & x \geq n \end{cases} \quad (20)$$

式中： A_λ 为 λ 隶属函数； A_τ 为 τ 隶属函数。

其次，求出隶属度，建立 n 口井间单个因素的评价矩阵，即

$$R = \begin{bmatrix} RR_\lambda(1), RR_\lambda(2), \dots, RR_\lambda(n) \\ RC_\tau(1), RC_\tau(2), \dots, RC_\tau(n) \end{bmatrix} \quad (21)$$

式中： $R_\lambda(i)$ 为第 i 口井 λ 的评价矩阵； $C_\tau(i)$ 为第 i 口井 τ 的评价矩阵。

综合评判，根据隶属函数求出 λ 和 τ 因素对 n 口井的影响程度矩阵，由决策模型求出权重矩阵。

影响程度矩阵和权重矩阵分别为

$$A = (A_1, A_2, \dots, A_n) \quad (22)$$

$$B = AR = (\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n) \quad (23)$$

式中： A 为影响程度矩阵； B 为权重矩阵。

由式(23)可得生产井中的无效水量来自周围注水井的比例。各注采井间的无效水量为

$$q_{isd} = \eta_i q_{sd} \quad (24)$$

式中： q_{isd} 为各注采井间的无效水量， m^3/d ； η_i 为中心油井中无效水量来自周围各注水井的比

例。

规定如果 $\eta_i \geq 0.5$ ，则注采井间存在大孔道，进而可求出大孔道参数。

由式(6)和式(24)可得

$$q_{isd} = \frac{\pi r_D^2 K_D}{\mu_d} \left(\frac{\Delta p}{L}\right)^2 \eta_i \quad (25)$$

由式(7)和式(25)可得井组间大孔道的渗透率、平均半径和体积表达式分别为

$$K_D = \left(\frac{q_{isd} \phi \mu_d}{8\pi}\right)^{1/2} \times \left(\frac{L}{\Delta p}\right) \quad (26)$$

$$r_D = \left(\frac{8q_{isd} \mu_d}{\pi \phi}\right)^{1/4} \times \left(\frac{L}{\Delta p}\right)^{1/2} \tau \quad (27)$$

$$V_D = \frac{\pi \tau^2 L^2}{\Delta p} \left(\frac{8q_{isd} \mu_d}{\pi \phi}\right)^{1/2} \quad (28)$$

式中： K_D 为井组间大孔道渗透率， $10^{-3} \mu m^2$ ； r_D 为井组间大孔道平均半径， m ； V_D 为井组间大孔道体积， $10^4 m^3$ 。

3 应用实例

杏六中区位于杏树岗构造北部，北起杏五区三排，南至杏六区三排，自1968年投入开发，先后采用大段合采、分层开采和注采井网加密调整等开发方式进行开采。该油田主力层以细砂岩为主，泥质胶结，储层胶结疏松，出砂较为严重，平均有效孔隙度为27%，平均渗透率为 $526 \times 10^{-3} \mu m^2$ ，地层原油粘度为 $13.86 mPa \cdot s$ ，密度为 $0.852 g/cm^3$ 。

该试验井组共有生产井12口，注水井5口(表1)。在试验过程中，生产井见水速度快，含水率上升快，注水开发效果差，初步判断存在大孔道^[19]。将试验井组油水井的生产数据作为试验数据，试验结果与分析表明， I_1 与 P_1 、 I_2 与 P_3 、 I_5 与 P_4 井之间的无

表1 杏六中油田试验井组大孔道参数计算结果

注水井	生产井	无效水量/ ($m^3 \cdot d^{-1}$)	大孔道 存在情况	渗透率/ $10^{-3} \mu m^2$	平均半径/ μm
I_1	P_1	69.674 5	存在	4 384.5	50.354 32
	P_2	5.653 1	不存在		
I_2	P_2	6.418 8	不存在		
	P_3	58.620 4	存在	3 596.8	45.446 16
I_3	P_3	5.530 6	不存在		
	P_4	4.991 2	不存在		
I_4	P_1	5.320 2	不存在		
	P_4	5.212 3	不存在		
I_5	P_1	4.553 6	不存在		
	P_2	6.672 5	不存在		
	P_3	4.344 6	不存在		
	P_4	89.321 6	存在	5 358.4	65.456 58

效水量较大,说明 I_1 与 P_1 , I_2 与 P_3 , I_5 与 P_4 之间存在大孔道,进而根据无效水量的劈分结果,对井组内大孔道的渗透率和平均半径进行计算,可以看出,形成大孔道后,储层渗透率急剧变大,其渗透率皆在 $3\ 500\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 以上,而且储层孔道半径急剧增大,其孔道的平均半径均超过 $45\ \mu\text{m}$ 。

4 结束语

根据渗流规律,结合大孔道形成前后油田实际生产动态资料,建立无效水量数学模型,进而建立了定量描述注采井及井组间大孔道参数计算的新方法;并对杏六中油田使用该方法进行了大孔道识别和定量计算,准确计算出试验井组间的无效水量以及大孔道的参数,验证了该方法的可靠性和实用性。结果表明,新方法定量描述了大孔道参数,为封堵大孔道的工艺措施提供了数据支持,对于中高含水期油田堵水调剖、提高采收率等措施具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 陈亮,吴胜和,刘宇红.胡状集油田胡十二块注水开发过程中储层动态变化研究[J].石油实验地质,1999,21(2):141-145.
- [2] 窦之林,曾流芳,张志海,等.大孔道诊断和描述技术研究[J].石油勘探与开发,2001,28(1):75-77.
- [3] 杨勇.正韵律厚油层优势渗流通道的形成条件与时机[J].油气地质与采收率,2008,15(3):105-107.
- [4] 何长,李平.大孔道的表现特征及调剖对策[J].石油钻采工艺,2000,22(5):63-65.

- [5] 王志章,蔡毅,杨蕾.开发中后期油藏参数变化规律及变化机理[M].北京:石油工业出版社,1999.
- [6] 毛振强,谷建伟,董平志.疏松砂岩油藏大孔道形成机理与预测[J].油气地质与采收率,2011,18(1):77-79.
- [7] 崔庆东.砂岩油藏大孔道的识别方法[J].油气井测试,2009,18(3):29-31.
- [8] 刘月田,孙保利,于永生.大孔道模糊识别与定量计算方法[J].石油钻采工艺,2003,25(5):54-59.
- [9] 王学忠.孤东油田高含水期井间大孔道特征研究[J].中国西部油气地质,2006,2(1):101-105.
- [10] 王学忠.井间大孔道预测方法研究[J].石油勘探与开发,2005,19(1):18-19.
- [11] 李秀兰.优势渗流通道中的高速非达西渗流动态特征分析[J].石油地质与工程,2009,23(6):93-96.
- [12] 葛家理,宁正福,刘月田,等.现代油藏渗流力学原理[M].北京:石油工业出版社,2001:26-29.
- [13] 艾长红.吸水剖面曲线与大孔道定量分析技术的应用[J].油气田地面工程,2003,22(4):50-52.
- [14] 曾流芳,陈柏平,王学忠.疏松砂岩油藏大孔道定量描述初步研究[J].油气地质与采收率,2002,9(4):53-55.
- [15] 秦积舜,李爱芬.油层物理学[M].东营:中国石油大学出版社,2006:131.
- [16] 冯其红,史树杉,王森,等.利用动态资料计算大孔道参数的方法[J].油气地质与采收率,2011,18(1):74-76.
- [17] Yousef A A. Analysis and interpretation of interwell connectivity from production and injection rate fluctuations using a capacitance model [J].SPE 99998,2006.
- [18] 梁保松,曹殿立.模糊数学及其应用[M].北京:科学出版社,2007:73-89.
- [19] 张金庆,孙福街,安桂荣.水驱油田含水上升规律和递减规律研究[J].油气地质与采收率,2011,18(6):82-85.

编辑 王星

欢迎投稿 欢迎订閱