

特低渗透油藏水驱油注水界限的确定

苏玉亮^{1,2}, 吴春新³, 高 丽², 吴晓东¹

(1. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249; 2. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东东营 257061; 3. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300452)

摘 要:为确定特低渗透油藏在不同注水条件下的注水界限,在建立考虑微可压缩流体非稳态流动的一维水驱油相似准则模型的基础上,确定了与现场模型相对应的试验模型参数。根据室内试验结果,利用相似准则模型求出了现场不同注水条件下的注水参数之间的关系。结果表明:在注入量确定的条件下,特低渗透油藏注水开发渗透率界限随着井距的增大而增大,两者呈线性关系;在井距一定的条件下,特低渗透油藏注水开发渗透率界限随着注入量的增大而增大,两者也呈线性关系。这为特低渗透油田确定合理的井距和注入量提供了理论依据。

关键词:低渗透油气藏 水驱 注水 相似准则 数学模型

中图分类号:TE357.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2012)02-0082-05

Determination of Waterflooding Limits for Driving an Ultra-Low Permeability Reservoir

Su Yuliang^{1,2}, Wu Chunxin³, Gao Li², Wu Xiaodong¹

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249, China; 2. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Dongying, Shandong, 257061, China; 3. Tianjin Company, CNOOC, Tianjin, 300452, China)

Abstract: To determine injection limits under different water injection conditions in an ultra-low permeability reservoir, based on the similarity theory model of one-dimensional waterflooding in consideration of the transient-state flow of a slightly compressible fluid, experimental parameters corresponding to field model were determined. According to laboratory results, similarity theory model was used to determine the relations between injection parameters under different water injection conditions. The results showed that: the waterflooding permeability boundary of ultra-low permeability reservoir increased linearly with the increase of well spacing under the conditions of given injection rate, and the waterflooding permeability boundary of ultra-low permeable reservoir increased linearly with the increase of injection rate under given well spacing.

Key words: low permeability reservoir; water drive; water flooding; similarity criterion; mathematic model

随着油气田勘探开发的深入,新增储量中特低渗透油藏占的比例越来越大,特低渗透油藏的合理高效开发显得日益重要^[1-2]。特低渗透油藏的显著特点就是自然能量不充足,而注水是向地层补充能量的有效方法,但是在实际生产过程中存在着注入难等问题,因此注入能力的设计是特低渗透油藏开发设计的重要内容,国内外对特低渗透油藏注水界限的研究很少。为此,笔者选取胜利油田有代表性的区块作为研究对象,利用室内试验与相似准则相结合的手段^[3-5],研究特低渗透油藏的注入能力,在注入能力研究的基

础上确定不同注水条件下的注水界限,提出合理的开

收稿日期:2011-01-17; **改回日期:**2012-02-20。

作者简介:苏玉亮(1970—),男,山东广饶人,1992年毕业于石油大学(华东)采油工程专业,1995年获石油大学(华东)油气田开发工程专业硕士学位,2005年获西安交通大学动力工程及工程热物理专业博士学位,教授,博士生导师,主要从事低渗透油藏驱替机理及开采、注气提高采收率、深水油气田开发等方面的研究。

联系电话:(0532)86983115, suyuliang@upc.edu.cn。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目“温室气体提高石油采收率的资源化利用及地下埋存”(编号:2006CB705804)和泰山学者建设工程专项项目(编号:TS20070704)资助。

发方式,为特低渗透油藏的有效动用奠定基础。

1 一维相似准则模型的建立

1.1 基本假设

- 1) 一维等温驱替;
- 2) 地层是均质和等厚的;
- 3) 地层固体介质和流体微可压缩;
- 4) 油和水的黏度分别保持不变;
- 5) 束缚水饱和度和残余油饱和度在全流场是均匀的;
- 6) 忽略重力。

1.2 基本方程^[6]

油水相的连续性方程为:

$$\frac{\partial(\rho_o v_o)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_o \phi S_o)}{\partial t} + q_o = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho_w v_w)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_w \phi S_w)}{\partial t} + q_w = 0 \quad (2)$$

对于一维模型源汇项 q_w 和 q_o 分别为:

$$q_o = \frac{q_p}{A}(1 - f_w(x_B))\delta(x - x_B) \quad (3)$$

$$q_w = \frac{q_p}{A}\delta(x) + \frac{q_l}{A}f_w(x_B)\delta(x - x_B) \quad (4)$$

油水相的运动方程为:

$$v_o = -\frac{K_o}{\mu_o} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (5)$$

$$v_w = -\frac{K_w}{\mu_w} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (6)$$

油水相和固相的状态方程分别为:

$$\rho_o = \rho_{o1}[1 + C_o(p - p_1)] \quad (7)$$

$$\rho_w = \rho_{w1}[1 + C_w(p - p_1)] \quad (8)$$

$$\phi = \phi_1[1 + C_\phi(p - p_1)] \quad (9)$$

其他方程为:

$$S_o + S_w = 1 \quad (10)$$

1.3 方程的推导

令

$$\Delta p = p - p_1 \quad (11)$$

为使方程无因次化,引入相似自变量 x_D 和 t_D ,相似因变量 p_D , S_{wD} 和 S_{oD} ,相似参量 M , K_{oD} , K_{wD} 和 $C_{\phi D}$ 。

$$x_D = \frac{x}{L} \quad (12)$$

$$t_D = \frac{qt}{\phi AL(1 - S_{wi} - S_{or})} \quad (13)$$

$$p_D = \frac{\Delta p AK_{wro}}{q\mu_w L} \quad (14)$$

$$S_{wD} = \frac{S_w - S_{wi}}{1 - S_{wi} - S_{or}} \quad (15)$$

$$S_{oD} = 1 - S_{wD} \quad (16)$$

$$M = \frac{\mu_w}{\mu_o} \frac{K_{owi}}{K_{wor}} \quad (17)$$

$$K_{oD} = \frac{K_o}{K_{owi}} \quad (18)$$

$$K_{wD} = \frac{K_w}{K_{wor}} \quad (19)$$

$$C_{jD} = \frac{C_j q \mu_w}{AK_{wor}} \quad (j = o, w, \phi) \quad (20)$$

将油相和水相方程式的各项均乘以 $\frac{\mu_w}{K_{wor}} \frac{K_{wor}}{q\mu_w} AL$,

令:

$$A_1 = (1 + C_{oD} p_D) M \frac{\partial}{\partial x_D} \left[K_{oD} \frac{\partial p_D}{\partial x_D} \right] + MK_{oD} C_{oD} \left[\frac{\partial p_D}{\partial x_D} \right]^2 \quad (21)$$

$$B_1 = (1 + C_{\phi D} p_D + C_{oD} p_D) \frac{\partial S_{oD}}{\partial t_D} - (C_{oD} + C_{\phi D})(1 - S_{wD}) \frac{\partial p_D}{\partial t_D} \quad (22)$$

$$C_1 = (1 + C_{oD} p_D) \frac{q_p}{A} (1 - f_{wB}) L \delta(x_D - 1) \quad (23)$$

则:

$$A_1 + B_1 - C_1 = 0 \quad (24)$$

令:

$$A_2 = (1 + C_{wD} p_D) \frac{\partial}{\partial x_D} \left[K_{wD} \frac{\partial p_D}{\partial x_D} \right] + K_{wD} C_{wD} \left[\frac{\partial p_D}{\partial x_D} \right]^2 \quad (25)$$

$$B_2 = (1 + C_{\phi D} p_D + C_{wD} p_D) \frac{\partial S_{wD}}{\partial t_D} - (C_{wD} + C_{\phi D}) S_{wD} \frac{\partial p_D}{\partial t_D} \quad (26)$$

$$C_2 = (1 + C_{wD} p_D) \frac{q_l}{A} L \delta(x_D) - (1 + C_{wD} p_D) \frac{q_p}{A} f_{wB} L \delta(x_D - 1) \quad (27)$$

则

$$A_2 + B_2 - C_2 = 0 \quad (28)$$

上述方程式和定解条件构成完整的方程组。

1.4 相似准则的表述

若 2 个驱替系统之间的无因次参量折算流度比

M 和无因次压缩系数相等,无因次边界条件和初始条件相同,则对应的无因次时间与空间上的压力和饱和度相同。

2 水驱油试验

2.1 试验参数确定

1) 取现场岩心以保证试验模型和现场模型的无因次相对渗透率曲线相同;

2) 在保证试验模型和现场模型的无因次折算流度比 M 相等的基础上,确定试验用油水的黏度;

3) 通过保证试验模型和现场模型的边界条件和初始条件一致,确定试验模型的流量;

4) 检验其他无因次参数是否相同,对于微可压缩情形, C_{JD} 可以不予考虑。

2.2 试验设备与条件

试验设备主要有:中型恒温箱,温控范围室温~350℃,精度 ± 0.1 ℃;压力传感器,量程0~30/60 MPa,准确度0.5级;温度传感器,量程0~200℃,精度0.1℃;高压中间容器,耐压40~50 MPa;数据采集系统;BY-3型回压阀;调压阀,出口控制范围0~20 MPa,控制精度 ± 0.1 MPa;岩心夹持器;高压恒压恒速平流泵,排量0.001~30.000 mL/min,最大压力65 MPa。

试验模型数据与现场模型数据见表1。

表1 试验模型与现场模型参数

Table 1 Parameters of the experimental model and field model

参数	试验模型	现场模型
注入量/(mL·min ⁻¹)	0.01	20 833
长度/m	岩心长	120
截面积/cm ²	4.9	
厚度/m		10
宽度/m		100
水黏度/(mPa·s)	1.0	1.5
原油黏度/(mPa·s)	4	6
压差/MPa	最大注水压差	

试验用岩心采用特低渗透油藏岩心(岩心基础数据见表2)。试验流体采用矿化度为7 000 mg/L的模拟地层水和产出原油与煤油配制的模拟油,模拟油在70℃下的黏度为4 mPa·s。试验在70℃下恒温进行。

表2 岩心基础数据

Table 2 The basic data of cores

渗透率/ mD	岩心体积/ mL	岩心直径/ cm	孔隙度, %	孔隙体积/ mL	饱和油量/ mL
2.232	23.4	2.5	12.1	2.84	2.2
3.170	26.3	2.5	12.7	3.35	2.8
6.904	21.7	2.5	13.6	2.95	2.3
9.700	19.3	2.5	14.9	2.88	2.3

2.3 试验步骤

- 1) 测岩心渗透率;
- 2) 测岩心孔隙度;
- 3) 饱和高压水;
- 4) 升温至地层温度;
- 5) 高温高压饱和模拟油造束缚水;
- 6) 系统优化数小时;
- 7) 以一定速率注入模拟地层水驱替模拟油。

设定注入速度,进行驱替试验。驱替过程中每隔一定时间计量前后端压力,当压力大于一定数值时,表明该种情况注不进水,对不同渗透率级别岩心进行多次试验。

2.4 试验结果

图1为不同渗透率岩心水驱油试验的注入端和产出端压差随着注入量的变化曲线。

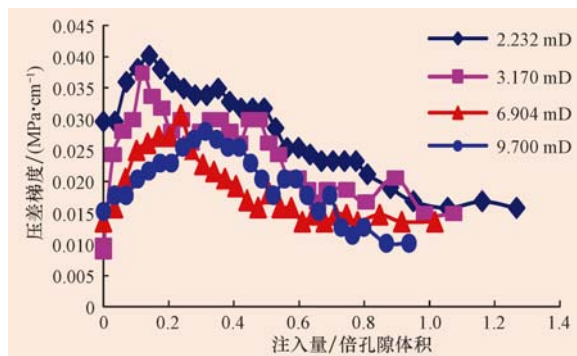


图1 不同渗透率岩心水驱油压差梯度曲线

Fig. 1 The differential pressure gradient curve of water-drive oil in different permeability cores

从图1可以看出:随着注入量的增加,注采压差梯度先上升,在达到一个极值之后开始下降,最终趋于稳定;随着渗透率的增大,注采压差梯度变小。这是因为特低渗透油藏存在启动压力,注入量大于采出量时,注采压差梯度开始阶段逐渐上升,当水突破后,由于水的流动能力大于原油,注采压差梯度减小。

3 注入界限的确定

试验模型的参数是根据现场数据利用相似准则确定的。根据相似准则, 试验模型和现场的无因次压力 $p_D = \frac{\Delta p A K_{wro}}{q \mu_w L}$ 相同。把试验所得压差利用相似准则换算到具体油田中, 求得 120 m 井距下不同注入量与注采压差的关系和 30 m³/d 注入量下不同井距与注采压差的关系, 结果见图 2 和图 3。

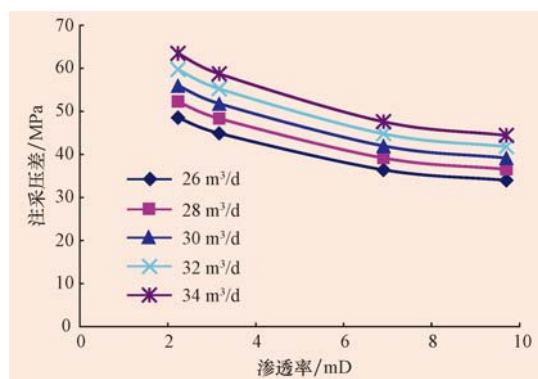


图 2 不同注入量下渗透率与注采压差之间的关系曲线

Fig. 2 Relationship curves between inject-production differential pressure and permeability with different injection rate

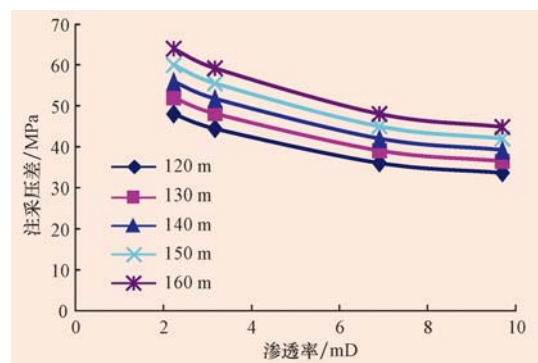


图 3 不同井距下渗透率与注采压差之间的关系曲线

Fig. 3 Relationship curves between inject-production differential pressure and permeability with different well spacing

假设油藏埋深 3 000 m, 根据迪基法可以确定该地层的破裂压力为 61.29 MPa。假设生产井井底流压为 15.00 MPa, 通过计算求得最大注入压差为 46.29 MPa。在图 2 和图 3 中的纵坐标轴的 46.29 MPa 处做一条平行于横坐标轴的直线, 与曲线的交点即为渗透率界限。图 4 为 120 m 井距下不同注入量的渗透率界限。图 5 为 30 m³/d 注入量下不同井

距的渗透率界限。

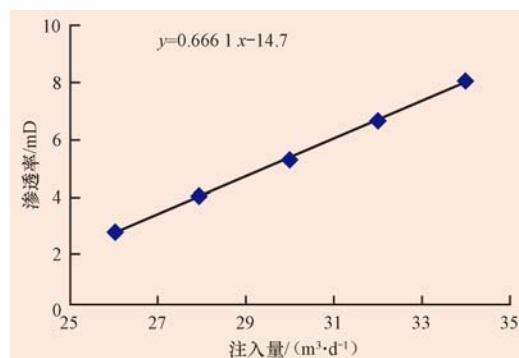


图 4 120 m 井距下注入量与渗透率之间的关系曲线

Fig. 4 Relationship curves between permeability and injection rate at the well spacing of 120m

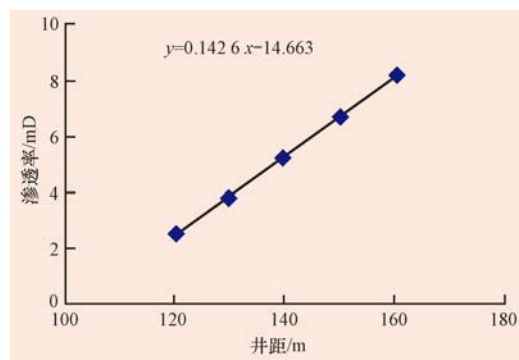


图 5 30 m³/d 注入量下井距与渗透率之间的关系曲线

Fig. 5 Relationship curves between permeability and well spacing at the injection rate of 30 m³/d

由图 4 和图 5 可看出, 渗透率与井距和注入量之间呈线性关系。对图 4 中的曲线进行线性回归, 可得 120 m 井距下渗透率与注入量的关系为:

$$y = 0.6661x - 14.7 \quad (29)$$

对图 5 中的曲线进行线性回归, 可得 30 m³/d 注入量下渗透率与井距的关系为:

$$y = 0.1426x - 14.663 \quad (30)$$

4 结 论

1) 利用方程分析法推导出二维水驱油相似准则, 确定试验参数, 把试验结果折算到现场, 确定注水开发界限。

2) 在注水开发过程中, 注入压力先上升, 达到一个最大值后下降, 最后趋于平稳。

3) 注水开发过程中, 在不同注入方式情况下存在注水渗透率界限, 低于这个界限的油藏应进行压裂或者采取其他开采方式开采, 以解决特低渗透油藏不能有效动用的问题。

符号说明

f_w 为生产井的含水率; h 为地层厚度, m; q_i 为注水井流量, m^3/d ; q_p 为生产井流量, m^3/d ; δ 为 Dirac δ 函数; K_o , K_w 分别为油相和水相的渗透率, D; v_o , v_w 为油水的渗流速度, cm/s ; C_o , C_w 和 C_ϕ 分别为油、水、孔隙的压缩系数, MPa^{-1} ; ρ_o 和 ρ_w 分别为油和水的密度, kg/cm^3 ; ϕ 为介质的孔隙度; ρ_{oi} 和 ρ_{wi} 为某状态下油和水的密度, kg/cm^3 ; ϕ_i 为某状态下介质的孔隙度; S_o 和 S_w 为含油饱和度和含水饱和度; S_{wi} 和 S_{or} 为束缚水饱和度和残余油饱和度; K_{owi} 和 K_{wor} 束缚水下油相渗透率和残余油下水相渗透率。

参考文献

References

- [1] 张蕾. 低渗透油田开采现状[J]. 中外科技情报, 2006, 13(1): 4-11.
Zhang Lei. Current situation for low permeability oilfield[J]. Foreign Science and Technology Information, 2006, 13(1): 4-11.

- [2] 李道品. 低渗透油田开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999: 25-30.
Li Daopin. Low permeability oilfield development[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999: 25-30.
- [3] 孔祥言, 陈峰磊, 裴柏林. 水驱油物理模拟理论和相似准则[J]. 石油勘探与开发, 1997, 24(6): 56-60.
Kong Xiangyan, Chen Fenglei, Pei Bolin. Similar theory, similar rule and data conversion software for water drive modeling[J]. Petroleum Exploration and Development, 1997, 24(6): 56-60.
- [4] 李莉, 庞彦明, 雷友忠, 等. 特低渗透油藏合理注气能力和开发效果分析[J]. 天然气工业, 2006, 26(9): 118-121.
Li Li, Pang Yanming, Lei Youzhong, et al. The appropriate capacity and development effect of gas injection in extremely low-permeability reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(9): 118-121.
- [5] Kimberly K D, Farouq Ali S M, Puttagunat V R. New scaling criteria and their relative merits for steam recovery experiments[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 1998, 27(4): 86-91.
- [6] 张建国, 雷光伦, 张艳玉. 油气层渗流力学[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2006: 20-26.
Zhang Jianguo, Lei Guanglun, Zhang Yanyu. Hydrocarbon reservoir percolation mechanics[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2006: 20-26.

煤层气水平井地质导向技术

在煤层气水平井钻进过程中, 利用水平井地质导向技术能够根据各种地质资料、随钻测井及测量数据实时监测井眼轨迹。

Schlumberger 公司生产的 Pathfinder 地质导向装置增强了钻遇复杂地层的导向能力。该装置分为上下 2 个短节, 下短节靠近钻头, 其内部装有测量井斜角和伽马射线的传感器, 所测得的数据通过电磁波从下短节的传感器传至上短节。上短节接收到数据再传递给 MWD/LWD, 进而由 MWD/LWD 传至地面。

伽马射线传感器和三轴加速度计(测量井斜角)可以连续测量, 上下两短节之间的数据传输是双向的。在钻井过程中, 根据井斜角等数据可以确定井眼轨迹和钻头位置。近钻头传感器实时测得的岩石力学参数, 可为大斜度井和水平井的着陆控制、套管程序设计及井眼轨迹优化提供依据。在煤层气水平井钻井过程中, 根据近钻头井斜角可以确定适宜的增斜率或降斜率, 以降低井眼的狗腿严重度, 使井眼轨迹尽可能平滑。

自然伽马射线探测器安装在近钻头位置, 其极限测量深度为 0.15 m。煤层的自然伽马放射量比较低, 与周围页岩地层有明显的区别。在钻井过程中可以根据伽马射线值判断岩性变化, 如果伽马射线值变化明显, 就说明传感器已处于地层的边界。

近钻头传感器已在北美的圣胡安、澳柯玛和粉河等盆地广泛应用。对于煤层气水平井, 综合应用随钻测斜、自然伽马射线测井和超前预测软件可以取得理想的导向效果。

[李昌盛 供稿]