

文章编号: 1001-3873(2007)03-0344-04

缝洞型底水油藏含水率变化规律研究

吕爱民, 姚 军

(中国石油大学 石油工程学院, 山东 东营 257061)

摘要: 针对塔河油田缝洞型油藏非均质性强的特点, 将其储集层抽象成渗透率突变的地质模型, 并应用油气渗流理论推导出了部分打开缝洞型底水油藏的水相分流方程, 同时对分流曲线的影响因素进行了分析。分析表明, 该方程可准确描述不同储集层条件、不同生产压差下的含水率变化规律。该理论的建立为缝洞型底水油藏开发动态分析和预测提供了依据。

关键词: 塔里木盆地; 底水油藏; 分流方程; 含水率

中图分类号: TE331; TE344

文献标识码: A



塔里木盆地塔河油田是我国最大的古生界海相碳酸盐岩油田, 其储集空间以裂缝溶洞为主, 且发育极不规则, 非均质性强, 同时有底水存在。目前适合这种类型油藏的油藏工程方法较为缺乏, 国内外对均质底水油藏的临界产量、见水时间方面的研究较多^[1], 而对其含水变化规律的研究相对较少, 对含水率的预测主要根据水淹厚度来粗略估算^[2,3], 对非均质缝洞型油藏含水率变化的理论研究几乎还是空白, 远远满足不了现场的要求。

1 缝洞型油藏理想地质模型的建立

鉴于缝洞型储集层的缝洞发育极不规则、非均质性强特点, 可将其抽象为渗透率突变的地质模型。渗透率突变地层剖面流动示意图如图1, 俯视图如图2, 假设油井位于地层中心, 打开厚度为 b (cm) (若井钻遇大型溶洞, 则可视为溶洞高度), 油井半径为 R_w (cm), 油藏避水高度为 H (cm)。井底压力为 p_w (10^{-1} MPa), 边缘压力为 p_e (10^{-1} MPa); 近井区域半径为 R_1 (cm), 渗透率为 K_1 (μm^2); 远井区域半径为 R_2 (cm), 渗透率为 K_2 (μm^2)。该模型适用于存在大型缝洞的强烈非均质的油藏, 若油井打在大的溶洞中或缝洞发育区, 则可取 $K_1 \gg K_2$; 若油井偏离溶洞或缝洞发育区, 则可取 $K_1 \ll K_2$; 若储集层缝洞发育相对均匀, 也可取

$K_1=K_2$, 即变为均质模型。

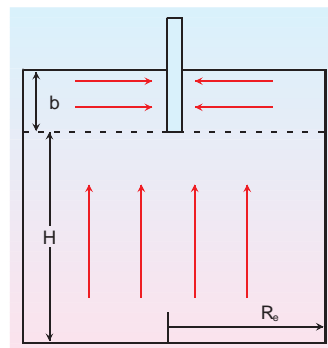


图1 部分打开的底水油藏剖面流动示意

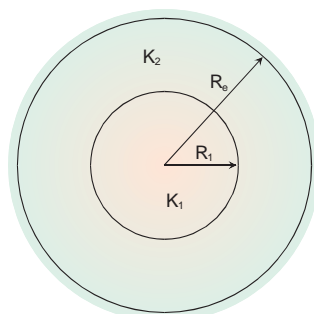


图2 渗透率突变地层俯视

2 油藏的产量及其压力分布

对于图2所示渗透率突变地层的平面径向流, 产量公式^[4]为

$$Q = \frac{2 b \mu (p_e - p_w)}{\left(\frac{1}{K_2} \ln \frac{R_e}{R_1} + \frac{1}{K_1} \ln \frac{R_1}{R_w} \right)} \quad (1)$$

式中 Q ——油井的地下流量, cm^3/s ;

收稿日期: 2006-08-30

修订日期: 2006-10-16

μ ——地下流体粘度, mPa·s.

在 R_w r R_1 范围内垂向渗流不同径向位置的压差为

$$p(r) = p_{ow} - p(r) = p_{ow} - p_w - \frac{p_e - p_w}{K_1 \ln \frac{R_e}{R_1} + \ln \frac{R_1}{R_w}} \ln \frac{r}{R_w}, \quad (2)$$

式中 p_{ow} ——油水界面处的压力 (假定为定压), 10^{-1} MPa.

在 R_1 r R_e 范围内垂向渗流不同径向位置的压差为

$$p(r) = p_{ow} - p(r) = p_{ow} - p_e + \frac{p_e - p_w}{\ln \frac{R_e}{R_1} + \frac{K_2}{K_1} \ln \frac{R_1}{R_w}} \ln \frac{R_e}{r}. \quad (3)$$

3 缝洞型底水油藏的油水运动方程

对于缝洞型油藏而言, 毛细管力的作用很小, 一般可忽略。而对于块状底水油藏, 重力的作用则必须加以考虑。在忽略毛细管力作用而只考虑重力作用时两相渗流的运动方程^[9]可写为

$$v_w = - \frac{KK_{rw}}{\mu} \left(\frac{dp}{dx} - \rho_w \sin \alpha \right); \quad (4)$$

$$v_o = - \frac{KK_{ro}}{\mu} \left(\frac{dp}{dx} - \rho_o \sin \alpha \right), \quad (5)$$

式中 α ——表示正的下倾角;

v_o , v_w ——分别为油相、水相的渗流速度, cm/s;

ρ_o , ρ_w ——分别为油藏条件下油、水的密度, g/cm³;

g ——重力加速度。

对不可压缩、粘度不变和垂直一维的情况, (4)、

(5) 式采用达西单位制为

$$v_w = - \frac{K_v K_{rw}}{\mu} \left(\frac{p}{H} - \frac{\rho_w}{1000} \right); \quad (6)$$

$$v_o = - \frac{K_v K_{ro}}{\mu} \left(\frac{p}{H} - \frac{\rho_o}{1000} \right). \quad (7)$$

4 缝洞型底水油藏水相分流量方程的导出

在图 1 中的下部渗流区域 r 处取与井轴同心的圆环作为渗流微元, 积分可得油相的流量:

$$Q_o = \frac{2 K_{ro} K_{v1}}{\mu} \int_{R_w}^{R_1} \left[\frac{p_{ow} - p_w}{H} - \frac{\rho_o}{1000} - \frac{p_e - p_w}{H \left(\frac{K_1}{K_2} \ln \frac{R_e}{R_1} + \ln \frac{R_1}{R_w} \right)} \ln \frac{r}{R_w} \right] r dr + \frac{2 K_{ro} K_{v2}}{\mu} \int_{R_1}^{R_e} \left[\frac{p_{ow} - p_e}{H} - \frac{\rho_o}{1000} + \frac{p_e - p_w}{H \left(\ln \frac{R_e}{R_1} + \frac{K_2}{K_1} \ln \frac{R_1}{R_w} \right)} \ln \frac{R_e}{r} \right] r dr. \quad (8)$$

$$Q_w = \frac{2 K_{rw} K_{v1}}{\mu} \left\{ \left[\frac{p_{ow} - p_w}{H} - \frac{\rho_w}{1000} - \frac{p_e - p_w}{H \left(\frac{K_1}{K_2} \ln \frac{R_e}{R_1} + \ln \frac{R_1}{R_w} \right)} \ln R_w \right] \frac{R_1^2 - R_w^2}{2} - \frac{p_e - p_w}{H \left(\frac{K_1}{K_2} \ln \frac{R_e}{R_1} + \ln \frac{R_1}{R_w} \right)} \left(\frac{R_1^2 \ln R_1 - R_w^2 \ln R_w}{2} - \frac{R_1^2 - R_w^2}{4} \right) \right\} + \frac{2 K_{ro} K_{v2}}{\mu} \left\{ \left[\frac{p_{ow} - p_e}{H} - \frac{\rho_o}{1000} + \frac{p_e - p_w}{H \left(\ln \frac{R_e}{R_1} + \frac{K_2}{K_1} \ln \frac{R_1}{R_w} \right)} \ln R_e \right] \frac{R_e^2 - R_1^2}{2} - \frac{p_e - p_w}{H \left(\ln \frac{R_e}{R_1} + \frac{K_2}{K_1} \ln \frac{R_1}{R_w} \right)} \left(\frac{R_e^2 \ln R_e - R_1^2 \ln R_1}{2} - \frac{R_e^2 - R_1^2}{4} \right) \right\}. \quad (9)$$

同理可得

$$Q_w = \frac{2 K_{rw} K_{v1}}{\mu} \left\{ \left[\frac{p_{ow} - p_w}{H} - \frac{\rho_w}{1000} - \frac{p_e - p_w}{H \left(\frac{K_1}{K_2} \ln \frac{R_e}{R_1} + \ln \frac{R_1}{R_w} \right)} \ln R_w \right] \frac{R_1^2 - R_w^2}{2} - \frac{p_e - p_w}{H \left(\frac{K_1}{K_2} \ln \frac{R_e}{R_1} + \ln \frac{R_1}{R_w} \right)} \left(\frac{R_1^2 \ln R_1 - R_w^2 \ln R_w}{2} - \frac{R_1^2 - R_w^2}{4} \right) \right\} + \frac{2 K_{ro} K_{v2}}{\mu} \left\{ \left[\frac{p_{ow} - p_e}{H} - \frac{\rho_o}{1000} + \frac{p_e - p_w}{H \left(\ln \frac{R_e}{R_1} + \frac{K_2}{K_1} \ln \frac{R_1}{R_w} \right)} \ln R_e \right] \frac{R_e^2 - R_1^2}{2} - \frac{p_e - p_w}{H \left(\ln \frac{R_e}{R_1} + \frac{K_2}{K_1} \ln \frac{R_1}{R_w} \right)} \left(\frac{R_e^2 \ln R_e - R_1^2 \ln R_1}{2} - \frac{R_e^2 - R_1^2}{4} \right) \right\}. \quad (10)$$

由 (9)、(10) 式可得水相的分流量方程:

$$f_w = \frac{Q_w}{Q_o + Q_w} = \frac{K_{rw} / \mu_w}{K_{rw} / \mu_w + (K_{ro} / \mu)}. \quad (11)$$

H 的单位采用 m; 压力的单位采用 MPa; 记压力系数为 β ; 令 $\beta_1 = K_1 / K_2 = K_{v1} / K_{v2}$; $\beta_2 = R_e / R_1$, 即 $R_1 = R_e / \beta_2$. 记 $p = p_e - p_w$, 因此 $p_{ow} - p_e = \beta_1 H$, $p_{ow} - p_w = \beta_1 H + p$. 忽略高阶小项可得 (11) 式中 β 的表达式如下:

$$\beta = 1 + \frac{(\rho_w - \rho_o) H / 1000}{\left(\frac{\beta_1 - \rho_w}{1000} H + \frac{p}{1 + \beta_2^{-1}} + \frac{p \left(0.5 \beta_2^{-2} - \ln \frac{R_e}{R_w} \right)}{\left(\beta_1 \ln \beta_2 + \ln \frac{R_e}{2 R_w} \right) \left(1 + \beta_2^{-1} \right)} \right)}. \quad (12)$$

5 水相分流量曲线及影响因素分析

5.1 水相分流量曲线

塔河油田 4 区为典型的裂缝性底水油藏, 地层水为高矿化度卤水, 地层压力系数为 1.117 7, 其 S48 井钻遇大型溶洞, 为一口部分打开井, 其相应的地层及流体参数见表 1, 其相渗曲线见图 3.

表 1 塔河油田 4 区 S48 井参数

油层厚度 (m)	钻开厚度 (m)	水平渗透率 K_1 (μm^2)	地层原油粘度 (mPa·s)	地层水粘度 (mPa·s)	地层水密度 (g/cm^3)	地层原油密度 (g/cm^3)	泄油半径 (m)	油井半径 (m)
100	7.0	3.55	21.7	0.64	1.154	0.8604	1000	0.0746

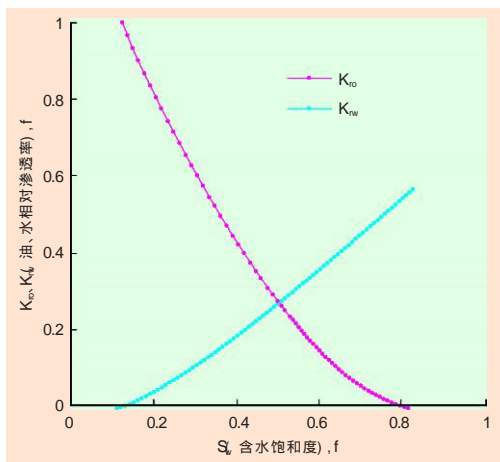


图 3 塔河油田 4 区相对渗透率曲线

由上述 (12) 式可计算得到不同生产压差下的值, 将其代入 (11) 式便可利用相对渗透率曲线计算水的分流量曲线。塔河油田 4 区 S48 井不同生产压差下的分流量曲线见图 4。

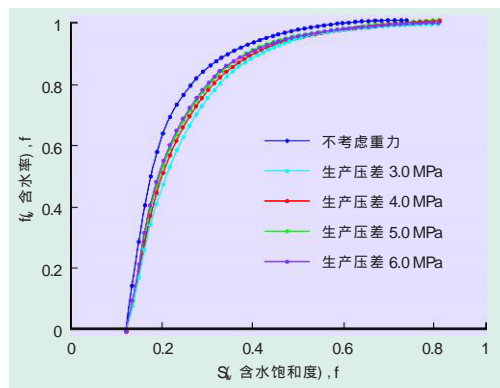


图 4 不同生产压差下渗透率突变模型分流量曲线 ($K_1/K_2=2, R_0/R_1=2$)

由图 4 可见, 考虑重力影响的曲线均较不考虑重力的曲线缓, 表明在开发底水油藏中, 重力有利于减缓含水率上升; 同时不同生产压差下的含水率变化趋势略有差异, 生产压差越小, 含水率变化越缓。对于 S48 井这类钻遇溶洞的情况 (即近井渗透率大, 外围渗透率较差的油藏), 生产压差对含水率的影响不明显。这也是该类井压锥效果较差的原因所在。

5.2 分流量曲线的影响因素分析

为了讨论 (11) 式的适用性, 作出了不同地质模型情况下的水相分流量曲线 参见图 4—图 8, 涉及到的基础参数同表 1, 现对其不同的影响因素分述如下。

(1) 生产压差对不同模型的影响 图 5 为井偏离

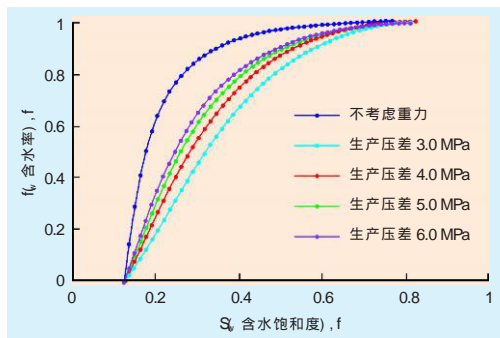


图 5 不同生产压差下渗透率突变模型分流量曲线 ($K_1/K_2=0.5, R_0/R_1=2$)

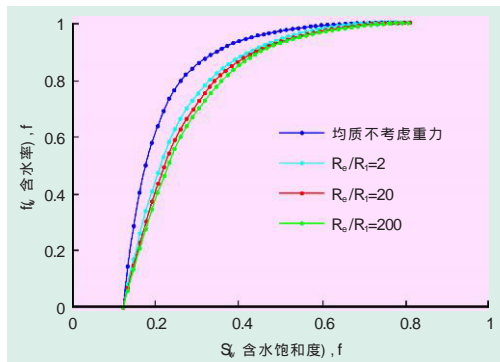


图 6 压差 3MPa 下不同半径比渗透率突变模型分流量曲线 ($K_1/K_2=2$)

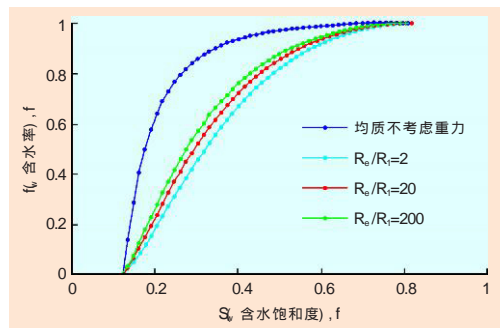


图 7 压差 3MPa 下不同半径比渗透率突变模型分流量曲线 ($K_1/K_2=0.5$)

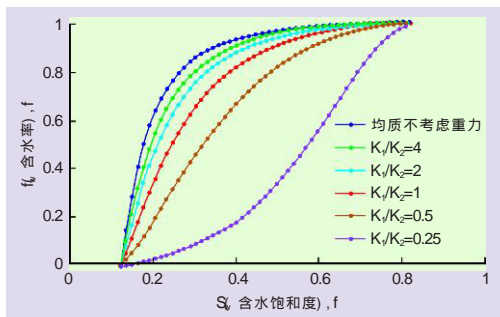


图 8 压差 3MPa 下不同渗透率比突变模型分流量曲线 ($R_0/R_1=2$)
溶洞发育区 (即近井区域渗透率小, 远井区域渗透率大) 时不同压差下的水相分流量曲线。由图 5 可见, 这种情况下生产压差对分流量的影响明显加剧 (与图 4 相比), 生产压差越小, 重力的有利作用发挥越充分, 含水变化越缓, 且在中含水期各曲线的差别最大。该

规律为缩嘴压锥提供了依据, 且压锥时机选在中含水期, 其效果最为明显, 这已为现场的实践所证实。

(2) 缝洞发育规模对不同模型的影响 图 6 和图 7 为相同生产压差 (3MPa) 下不同缝洞发育规模 R_e/R_1 不同) 水相分流量的变化曲线。由图 6 可见, 对于井钻遇缝洞发育区的情况 ($K_1 > K_2$), 缝洞发育区的规模越大 (R_e/R_1 越小), 含水率上升越快, 但其影响并不显著。而对于图 7 所示井偏离缝洞发育区的情况 ($K_1 < K_2$), 缝洞发育区的规模越大 (R_e/R_1 越大), 含水率上升越快, 且其影响要比前者大得多。

(3) 内外渗透率差异对分流量的影响 图 8 为 3MPa、 $R_e/R_1=2$ 条件下, 不同内外渗透率比的水相分流曲线。由图可见, 内外区域渗透率比越小, 含水率变化越缓。由 1) 式可知, 内外渗透率比较小时很难获得较高的初产, 这可较好地解释一些井产量不高, 但生产及含水率较稳定的实际; 而对于内外区域渗透率比较大 ($K_1 > K_2 > 1$) 的地层, 其初期产量往往较高, 含水率上升较快, 且在后期容易出现供液不足, 产量大幅度递减的现象。

6 结论和认识

(1) 油藏的含水率变化规律是由地质因素 (缝洞

是否发育及发育程度) 和开发因素 (井是否钻遇缝洞及生产压差等) 决定的。

(2) 井偏离缝洞发育区时生产压差的影响要比井钻遇缝洞发育区时显著, 可选择中含水期实施压锥。

(3) 近井区域渗透率越小含水率变化越缓, 但难于获得较高的产量。

参考文献:

- [1] 黄炳光, 刘蜀知. 实用油藏工程与动态分析方法 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1998: 190-203.
- [2] 姜汉桥, 姚 军, 姜瑞忠. 油藏工程原理与方法 [M]. 山东东营: 石油大学出版社, 2003: 76-77.
- [3] 桓冠仁, 陈素珍. 灰岩底水油田油水界面及产量预测 [A] // 中国石油学会编. 碳酸盐岩油气田开发 [Q]. 北京: 石油工业出版社, 1988: 61-63.
- [4] 张建国, 雷光伦, 张艳玉. 油气层渗流力学 [M]. 山东东营: 石油大学出版社, 1998: 101-102.
- [5] 陈忠祥, 陈于果. 重力场下裂缝-孔隙地层中的二相驱替 [A] // 中国石油学会编. 碳酸盐岩油气田开发 [Q]. 北京: 石油工业出版社, 1988: 31-33.

The Variation of Water Cut in Fractured-Vuggy Reservoir with Bottom Water

LV Ai-min, YAO Jun

(College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Dongying, Shandong 257061, China)

Abstract: The fractured-vuggy reservoir in Tahe oilfield is characterized by strong heterogeneity. This paper presents a geologic model for reservoirs with varied permeability in Tahe oilfield, including the water fractional flow equation for such a reservoir after partial perforation derived by oil-gas flow theory, and analyzes the impacting factors on the fractional flow curves. The study shows that the derived equation can be used to precisely describe the water cut variations under the different reservoir conditions and the different producing pressure differentials. The proposed theory could be as a guide for production performance analysis and prediction of other fractured-vuggy reservoirs with bottom water.

Key words: Tarim basin; bottom-water reservoir; fractional flow equation; water cut

四川东北部发现中国第二大气田

中国在四川东北地区发现的普光气田已探明储量 $3\ 560.72 \times 10^8 \text{ m}^3$, 为中国第二大气田。这是中国第一次在海相地层里找到大规模气田。

目前全球已发现的油气储量 90% 存在于海相地层里, 而中国有 $450 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的海相地层。从 20 世纪 50 年代开始, 中国科研人员就开始了在海相地层找油的努力。历经半个多世纪, 中石化、中国石油大学等单位终于联合攻下了这一难题。

这一技术的突破, 意味着中国将发现更多的油气资源。