

## 单缝洞系统弹性开采的试验研究

程倩 熊伟 高树生 薛惠

(中国科学院 渗流流体力学研究所,河北 廊坊 065007)

**摘要:**单缝洞系统是缝洞型碳酸盐岩油藏最简单的缝洞组合模型,由空腔未充填溶洞和高导裂缝构成,其中溶洞是主要的储集空间,裂缝是主要的流动通道。试验研究表明:溶洞的压力、产量呈明显指数关系变化。基于物质平衡理论和水动力学理论建立了压力、产量的指数递减模型,由此可计算裂缝的平均导流能力;采用该递减模型计算溶洞体积,相对误差约为3.27%,模型具有有效性和合理性。

**关键词:**碳酸盐岩油气藏;单缝洞系统;导流能力;溶洞体积

**中图分类号:**TE342    **文献标识码:**A    **文章编号:**1001-0890(2009)03-0088-03

塔河油田为典型的古岩溶缝洞型油藏,储层中溶洞发育,形状不规则、大小各异,其直径从几毫米到几十米不等,是主要的储集空间,原油储量十分可观。同时部分储层裂缝欠发育,存在很多只有单一有效裂缝与之连通的溶洞,其中溶洞是主要的储集空间,裂缝作为主要的流动通道。缝洞型碳酸盐岩储层发育受控因素多,埋藏深,非均质性极强,描述难度大,流动区域边界复杂,具有网络状油藏的特征<sup>[1-7]</sup>。单缝洞系统是各种缝洞组合单元模型的理论基础。迄今为止,缝洞型油藏溶洞体积的计算虽已取得阶段性进展<sup>[8]</sup>,但仍然还没有成熟的计算模型。为了更好地认识该类油藏的开采动态特征,笔者提出了单缝洞系统模型,模拟单井钻遇洞边缝网的现场实际情况,进行弹性开采试验研究。为此,建立了单缝洞系统的指数递减模型并计算了溶洞储量,误差约为3.27%,并由此导出洞边缝网平均导流能力的计算模型,为缝洞型油藏数值模拟技术的研究提供了理论依据。

## 1 物理模型

缝洞型油藏中缝洞组合模型繁多,单缝洞系统是最基本的、简单的缝洞单元,是各种缝洞组合模型的基础。单缝洞系统由高导裂缝和大尺度溶洞组成高储高渗单元,是最简单的缝洞组合模式。系统内部包括空腔未充填溶洞和高导裂缝,其中溶洞是主要的储集空间,缝网中的主裂缝是主要的流动通道。图1为单缝洞系统模型,假定油井通过长为L、高为

h、宽为w的主裂缝与原始体积为N的未充填溶洞相连,原始压力为 $p_i$ ,t时刻溶洞的压力为 $p(t)$ ,油井产量为 $q(t)$ ,油井定压生产,井底流压为 $p_{wf}$ ,综合压缩系数为 $C_i$ ,忽略溶洞、裂缝的可压缩性。基岩孔隙度小,渗透率低,为无效储层<sup>[9]</sup>。故此,近似认为系统外边界封闭,在求解中主要研究溶洞中的压力降落情况以及产量变化规律。

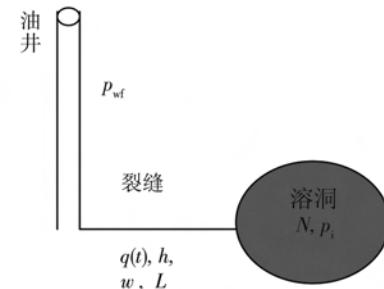


图1 单缝洞系统示意

## 2 数学模型

在建立方程前,先做如下假设:1)流体单相微可压缩,且压缩系数为常数;2)综合压缩系数以流体压缩系数为主;3)流体在任一压力下均能在瞬间达到

收稿日期:2008-12-04;改回日期:2009-03-11

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目“碳酸盐岩缝洞型油藏开发基础研究”(编号:2006CB202404)资助

作者简介:程倩(1982—),女,湖北鄂州人,2006年毕业于长江大学石油工程专业,在读硕士研究生。

联系电话:(010)69213449

平衡;4)系统温度保持不变;5)系统外边界封闭;6)流体的弹性膨胀是主要的驱动方式。

根据未饱和封闭性系统弹性驱动的物质平衡方程式<sup>[10]</sup>,累计产液量为:

$$N_p = \frac{VB_{oi}C_t(p_i - p(t))}{B_o} \quad (1)$$

式中,V 为原始溶洞体积, mL;  $N_p$  为累积产量, mL;  $B_o$  为  $p$  压力下的原油体积系数;  $B_{oi}$  为原始压力下的原油体积系数;  $C_t$  为综合压缩系数, MPa<sup>-1</sup>;  $p_i$  为原始地层压力, MPa;  $p(t)$  为  $t$  时刻溶洞内的压力, MPa。

溶洞的产量为:

$$q(t) = \frac{dN_p}{dt} \quad (2)$$

式中,  $q(t)$  为油井产量, mL/s;  $t$  为时间, s。

根据裂缝流动方程有<sup>[11]</sup>:

$$q(t) = \frac{h\omega K_f}{\mu L} (p(t) - p_{wf}) \quad (3)$$

式中,  $\mu$  为流体黏度, MPa·s;  $\omega$  为缝宽, cm;  $K_f$  为裂缝渗透率,  $\mu\text{m}^2$ ;  $h$  为缝高, mm;  $L$  为裂缝长, cm。

根据假设 6) 有:

$$q(t) = \frac{h\omega K_f}{\mu L} (p(t) - p_{wf}) = -\frac{VB_{oi}C_t}{B_o} \frac{dp(t)}{dt} \quad (4)$$

其中, 初始条件为:  $t=0, p(t) = p_i$ 。

对式(4)积分并代入初始条件得溶洞的压力降为:

$$p(t) - p_{wf} = (p_i - p_{wf}) e^{-\frac{h\omega K_f}{\mu L} \frac{B_o}{VB_{oi}C_t} t} \quad (5)$$

将式(5)代入式(3), 得溶洞产量的变化规律:

$$q(t) = \frac{h\omega K_f}{\mu L} (p_i - p_{wf}) e^{-\frac{h\omega K_f}{\mu L} \frac{B_o}{VB_{oi}C_t} t} \quad (6)$$

由式(6)可知, 外边界封闭的单缝洞系统溶洞的压力、产量随时间均呈指数关系递减。

### 3 试验研究

#### 3.1 试验方法

体积为 1 000 mL 的容器模拟空腔未充填溶洞, 不同渗透率的岩心模拟导流缝网, ISCO 泵向溶洞补给能量至  $p_i=30$  MPa, 溶洞内流体弹性膨胀是主要的驱动方式, 不考虑溶洞本身的压缩性<sup>[12-13]</sup>, 试验流体为蒸馏水, 室内温度为常温, 出口端定压开采, 计算机记录  $t$  时刻溶洞的压力  $p(t)$ , 累计产量由电子天平测量。

#### 3.2 试验结果分析

试验研究表明: 单缝洞系统降压开采时, 溶洞的

压力呈指数关系递减, 按上述递减模型进行拟合, 如图 2 所示; 半对数坐标下溶洞压力与时间呈线性关系曲线, 如图 3 所示; 不难看出, 洞边缝网的平均导流能力与直线斜率相关, 即缝网平均导流能力越低, 系统压力降落越缓慢, 反之则越迅速。

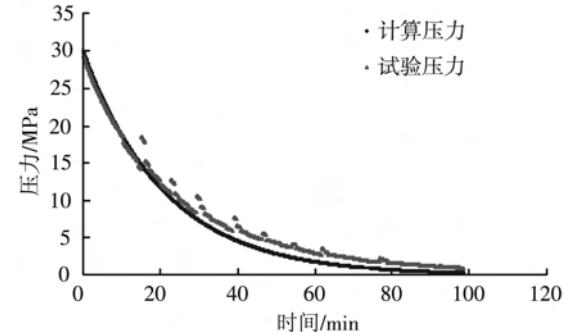


图 2 溶洞压力递减规律及曲线拟合

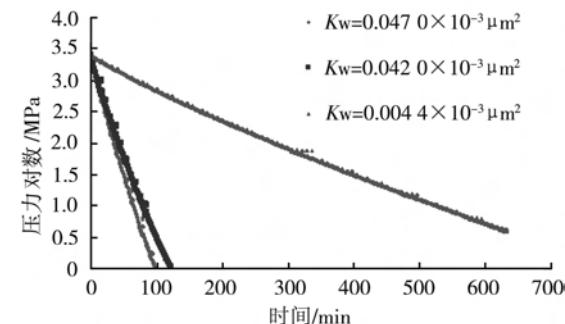


图 3 半对数坐标下溶洞压力与时间关系曲线

### 4 模型应用

#### 4.1 溶洞体积计算

由式(1)可知:

$$V = \frac{N_p B_o}{B_{oi} C_t (p_i - p(t))} \quad (7)$$

式中,  $\frac{N_p}{(p_i - p(t))}$  为常数, 由线性回归可得。

由式(7)变换得:

$$V = \frac{\frac{N_p}{(p_i - p(t))}}{\frac{B_{oi}}{C_t}} = \frac{\frac{N_p}{(p_i - p(t))}}{\frac{B_{oi}}{C_t} e^{C_t(p_i - p_t)}} = \frac{\frac{N_p}{(p_i - p(t))}}{C_t \exp[C_t(p_i - p_t) - \frac{h\omega K_f}{\mu L} \frac{B_o}{VB_{oi}C_t} t]} \quad (8)$$

由于  $1 - e^{-\frac{h\omega K_f}{\mu L} \frac{B_o}{VB_{oi}C_t} t} \rightarrow 1$ , 故溶洞的体积为:

$$V = \frac{N_p}{(p_i - p(t)) C_t e^{C_t(p_i - p_{wf})}} \quad (9)$$

代入试验数据得  $\frac{N_p}{(p_i - p(t))} = 0.5026 \text{ mL/MPa}$  (累计产量与累计压降的关系曲线见图4), 则溶洞体积为 1043.02 mL, 原始压力为 30 MPa 时溶洞原始体积为 1010 mL, 相对误差约为 3.27%。

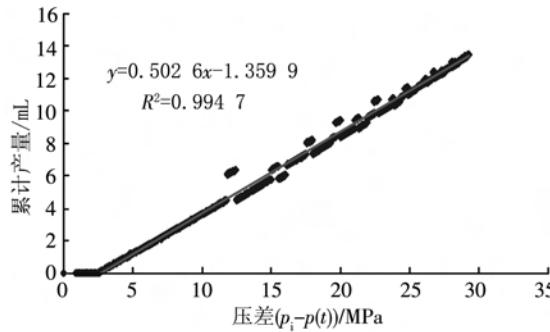


图 4 累计产量与累计压降关系曲线

#### 4.2 裂缝平均导流能力计算

对式(5)两边取对数得:

$$\ln(p(t) - p_{wf}) = -\frac{h\omega K_f}{\mu L} \frac{B_o}{VB_{oi}C_t} t + \ln(p_i - p_{wf}) \quad (10)$$

若由测井获得裂缝的高度  $h$ , 且已知液体的黏度  $\mu$ , 则油井定压生产时, 结合试井资料绘制地层压力与时间关系曲线、累计产量与累计压降关系曲线等, 即可导出裂缝的平均导流能力计算模型:

$$\frac{wK_f}{L_f} = m \frac{\mu}{h} \frac{B_o}{VB_{oi}C_t} \quad (11)$$

式中,  $m$  为半对数坐标下压力与时间关系曲线斜率。

据此, 基于单缝洞系统溶洞的压力指数递减模型, 结合油井动态可计算溶洞体积和裂缝平均导流能力。这对于缝洞型碳酸盐岩油藏认识溶洞参数、储量计算均有一定的理论意义。

## 5 结 论

- 建立了封闭单缝洞系统的递减模型。
- 缝网平均导流能力越低, 系统压力降落越缓慢, 反之则越迅速。
- 基于递减模型计算的溶洞储量约为 1043.02 mL, 相对误差约为 3.27%, 基本合理。
- 该递减模型可用于计算裂缝平均导流能力。

## 参 考 文 献

- 周兴熙. 再论网络状油藏与轮南潜山勘探对策[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29 (4): 4-7.
- 鲁新便. 岩溶缝洞型碳酸盐岩储集层的非均质性[J]. 新疆石油地质, 2003, 24 (4): 360-362.
- 谭承军, 吕景英, 李国蓉. 塔河油田碳酸盐岩油藏产能特征与储集层类型的相关性[J]. 油气地质与采收率, 2001, 8 (3): 43-45.
- 修乃岭, 熊伟, 高树生, 等. 缝洞型碳酸盐岩油藏水动力学模拟研究[J]. 特种油气藏, 2007, 14 (5): 49-51.
- 涂兴万, 陈朝晖. 塔河碳酸盐岩缝洞型油藏水动力学模拟新方法[J]. 西南石油学院学报, 2006, 28 (5): 53-56.
- 李翔. 复合酸压技术在塔河油田碳酸盐岩油藏中的应用[J]. 石油钻探技术, 2008, 36 (2): 72-73.
- 荣元帅, 黄咏梅, 刘学利, 等. 塔河油田缝洞型油藏单井注水替油技术研究[J]. 石油钻探技术, 2008, 36 (4): 57-60.
- 刘学利, 焦方正, 翟晓先, 等. 塔河油田奥陶系缝洞型油藏储量计算方法[J]. 特种油气藏, 2005, 12 (6): 22-24, 36.
- 韩革华, 漆立新, 李宗杰, 等. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩缝洞型储层预测技术[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27 (6): 860-870, 878.
- 秦同洛, 李量, 陈元千. 实用油藏工程方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989.
- 柏松章, 唐飞. 裂缝性潜山基岩油藏开发模式[M]. 北京: 石油工业出版社, 1981.
- 孙玉平, 修乃岭, 熊伟, 等. 缝洞型碳酸盐岩油藏流动数学模型初探[J]. 石油钻探技术, 2008, 36 (1): 65-68.
- 李传亮, 张学磊. 溶洞介质的压缩系数计算公式[J]. 特种油气藏, 2006, 13 (6): 32-33, 38.

[审稿 刘慧卿]

## Experimental Study of Elastic Producing Single Cavity/Fracture System

Cheng Qian Xiong Wei Gao Shusheng Xue Hui

(Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Science, Langfang, Hebei, 065007, China)

**Abstract:** Single cavity/fracture system is the simplest model for cavity-fractured reservoir. The cavity is the primary storage space and the fracture is the flow channel. Lab tests indicate that pressure and production rate is exponential in elastic production experiment for closed single cavity-fractured system. The decline models of pressure and production for cave are developed based on material balance and hydraulic theory. The average flow conductivity of fracture can be calculated. The volume of cavity can be calculated and the relative error about 3.27%, which indicate this model is reasonable.

**Key words:** carbonate reservoir; single-fracture-cave system; flow conductivity; vugular volume