

无供给溶洞弹性开采实验

熊伟^{1,2}, 刘玉祥¹, 常宝华¹, 高树生^{1,2}, 张静楠¹

1. 中国科学院渗流流体力学研究所, 河北廊坊 065007
2. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北廊坊 065007

摘要 大型溶洞是塔里木油田缝洞型储层的重要储集空间, 其成因复杂, 结构相对简单, 分布极不规律, 是构成复杂缝洞型油藏的一个基础。目前该类油藏的开采方式主要依靠弹性能量开采。为了研究溶洞弹性开采自喷期阶段的井底压力和产量的变化规律, 本文对其进行了简单的理论分析, 又进行了模拟油和高黏度原油的物理模拟实验, 理论分析结果和模拟实验结果能够很好吻合。结果表明, 井底压力随开采时间呈指数递减趋势, 递减指数与井口产量控制和溶洞内油水体积比、压缩系数有关, 油井产量随开采时间也呈指数递减趋势; 累积产量与累积压降曲线呈直线关系, 其斜率的物理意义是单位生产压差下的累计产液量, 大小只与溶洞内油水体积比和压缩系数有关, 由此可估算溶洞体积范围。

关键词 溶洞; 缝洞型油藏; 弹性开采; 无供给

中图分类号 TE342, TE344

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.02.06

Experimental Study of Elastic Mining in a Cave of No-supply Type

XIONG Wei^{1,2}, LIU Yuxiang¹, CHANG Baohua¹, GAO Shusheng^{1,2}, ZHANG Jingnan¹

1. Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Langfang 065007, Hebei Province, China
2. Langfang Branch, Research Institute of Petroleum Exploitation and Development, Langfang 065007, Hebei Province, China

Abstract The large caves are important storage space in fractured reservoirs in Tarim oilfield. The formation mechanism of the caves is very complex, but their structure is relatively simple. The large caves are the foundations of a complex vuggy reservoir. Currently the main method of exploitation of such reservoirs is based on mining. In order to study the variation of the bottom hole pressure and the production rate under the elastic mining conditions, a simple theoretical analysis and some physical simulation experiments were conducted. The theoretical analysis and experimental simulations give consistent results, which indicates that the bottom hole pressure decreases exponentially. The exponent is related to the well head production control, oil and water volumes in the caves and compressibility. The oil well production also decreases exponentially with time, and the curve of the cumulative production vs. the cumulative drawdown pressure is linear. The slope can be interpreted as the cumulative fluid production per unit of pressure drawdown, which is only related with the oil and water volumes and compressibility, and by which the cave volume range can be estimated.

Keywords cave; fracture-vuggy reservoirs; elastic mining; no supply

0 引言

大型溶洞是塔里木油田缝洞型碳酸盐岩储层的重要储集空间, 其成因复杂, 结构相对简单, 分布极不规律, 是构成复杂缝洞型油藏的一个基础^[1-6]。目前该类油藏的开采方式主要为依靠弹性能量开采, 后期部分油井采用注水补充能量的方法^[7-9]。无供给溶洞弹性开采, 是指没有外来流体和能量的

供给, 仅依靠弹性能量对溶洞进行开采。在塔里木油田缝洞型储层中, 大部分油井都是油水同产, 说明溶洞内油水共存的情况较多, 针对此种情况, 本文以蒸馏水和模拟油及地层水和矿场原油为实验用样, 在油水体积比不同的情况下, 对无供给溶洞开采过程进行模拟, 力求通过简单的物理模拟, 揭示油井在自喷期阶段产量和井底压力的变化特征, 对模拟

收稿日期: 2010-10-19; 修回日期: 2010-12-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2006CB202404); 国家自然科学基金项目(51074176)

作者简介: 熊伟, 高级工程师, 研究方向为油气藏开发与渗流机制, 电子信箱: xiongwei69@petrochina.com.cn

油和矿场原油的实验结果进行对比及相应的理论分析,为溶洞属性(溶洞体积、油水体积等)识别奠定一定的基础。

1 物理模型

塔河油田缝洞型碳酸盐岩油藏储集空间类型复杂,分布极不规则,其中存在部分较大的溶洞,从地震资料及生产数据上分析,一些学者认为这些溶洞的体积可达几十万立方米。本文对无能量供给下,大尺度溶洞在弹性能量下开采过程进行实验模拟。无供给溶洞作为最简单的缝洞单元,是研究复杂缝洞型油藏的基础,其结构如图1所示,油井钻遇溶洞的顶部(图1(a))或周围大裂缝(图1(b)),溶洞内油水共存,且无能量供给,主要依靠流体和岩石的弹性膨胀能量进行开采,设溶洞内原始压力 p_i ,溶洞内油、水体积分别为 V_o 、 V_w ,溶洞总体积为 V ,井底压力为 p_w ,油井产量为 Q ,在忽略岩石压缩系数的条件下,采用实验模拟和理论分析的方法,对该类油藏的弹性开采情况进行分析。

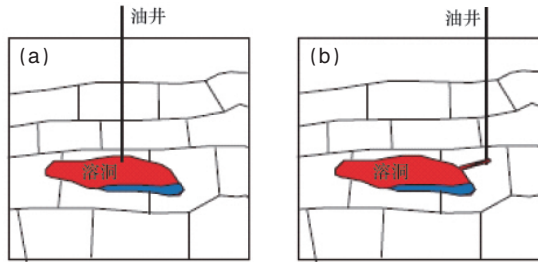


图1 物理模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of physical model

2 理论分析

针对这种简单的缝洞单元结构,主要依靠流体的弹性能量开采,假设流体微可压缩,且压缩系数为常数,忽略岩石压缩系数;油藏温度在开发过程中保持不变,油藏动态仅与压力有关;油井的产量完全由溶洞中流体的弹性膨胀得到^[10]。

根据层流理论, t 时刻油井出口瞬时流量满足以下关系:

$$q(t) = \lambda p(t) \quad (1)$$

其中, $p(t)$ 为溶洞内相对压力, λ 为比例系数。

根据弹性定律,有

$$q(t) = -V_w C_w \frac{\partial p(t)}{\partial t} - V_o C_o \frac{\partial p(t)}{\partial t} \quad (2)$$

其中, C_w 、 C_o 分别为水、油的弹性系数。

由式(1)和式(2),可得

$$\lambda p(t) = -V_w C_w \frac{\partial p(t)}{\partial t} - V_o C_o \frac{\partial p(t)}{\partial t} \quad (3)$$

式(3)积分可得溶洞内相对压力 $p(t)$ 压降公式,代入式(1)可得出出口产量为

$$q(t) = \lambda p_i e^{-\frac{\lambda}{V_w C_w + V_o C_o} t} \quad (4)$$

对式(4)在 $[0, t]$ 时间内求积分,可得生产 t 时刻溶洞内累计压降 $\Delta p(t)$ 与出口累计产量 $Q(t)$ 的关系式为

$$Q(t) = \Delta p(t) (V_w C_w + V_o C_o) \quad (5)$$

由式(5)可知,累积产量与累积压降呈线性关系,其斜率只与溶洞内油水体积和压缩系数有关,其物理意义为单位压差作用下的累积产液量,由此可估算溶洞体积范围。

依据假设,引入产量控制方程,溶洞的产量为

$$q(t) = \frac{r_0^4 \pi}{8 \mu L} (\bar{p}(t) - p_w) \quad (6)$$

其中, r_0 为井径, L 为井深, $\bar{p}(t)$ 为溶洞压力。

代入式(2)可得井底压力变化公式

$$p(t) = p_i e^{-\frac{r_0^4 \pi}{8 \mu L (V_w C_w + V_o C_o)} t} \quad (7)$$

对式(7)在 $[0, t]$ 时间内求积分,则得出口累计产量 $Q(t)$ 为

$$Q(t) = p_i \left[1 - e^{-\frac{r_0^4 \pi}{8 \mu L (V_w C_w + V_o C_o)} t} \right] (V_w C_w + V_o C_o) \quad (8)$$

由式(7)、式(8)可知,对于无供给溶洞在弹性开采条件下,井底压力随开采时间呈指数递减趋势,递减指数与井口产量控制和溶洞内油水体积及压缩系数有关,油井产量随开采时间也呈指数形式递减趋势。

3 室内模拟实验

3.1 实验流程及方法

实验流程如图2所示,实验采用ISCO泵提供原始动力,采用体积为1L的高压容器模拟未充填溶洞,采用具有贯穿裂缝的岩心模拟洞间裂缝,通过电子天平和巡检仪自动记录出口质量和溶洞内压力。实验过程中,在高压容器中加入一定比例的油和水,打开阀门1和阀门2,关闭阀门3,用ISCO驱替泵给高压容器加压,达到预定的压力30MPa后关闭阀门1,打开阀门3,通过阀门3控制生产速度,模拟弹性开采过程。

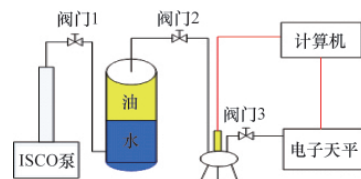


图2 实验流程

Fig. 2 The flow chart of experiment

孤立溶洞模型分别以溶洞内油水比例7:3、3:7进行弹性开采实验,地层原始压力为30MPa,实验选用蒸馏水模拟地层水,测得其压缩系数为 0.000475MPa^{-1} ,选用模拟油模拟地层原油,实验室测得压缩系数为 0.000628MPa^{-1} ,黏度为 $27.6 \text{mPa}\cdot\text{s}$ 。实验还选用塔里木油田某区块的高黏度原油和地层水进行实验,高黏度原油的压缩系数为 0.000611MPa^{-1} ,地层水的压缩系数为 0.000689MPa^{-1} ,与模拟油实验结果对比。

3.2 结果分析

图3为模拟油和蒸馏水体积比为3:7时的,溶洞内压力递减曲线和拟合结果,由拟合结果可知,井底压力随开采时间呈指数递减趋势。图4为油实验累积产量与累积压降关系曲线,可知累积产量与累积压降呈直线关系,且溶洞内油体积越大,直线斜率越大。由公式(5)可知 $Q(t)$ 与 $\Delta p(t)$ 呈正比,

则直线斜率为 $V_w C_w + V_o C_o$, 其中 C_o 和 C_w 为定值, 且 C_o 大于 C_w , 溶洞体积 V 一定, 因此油相体积 V_o 越大, 直线斜率越大, 这与实验结果相吻合。

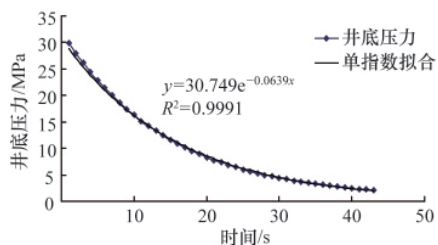


图3 油水体积 3:7 时压力递减拟合曲线
Fig. 3 Pressure declining fitting curves when the volume ratio of oil to water is 3:7

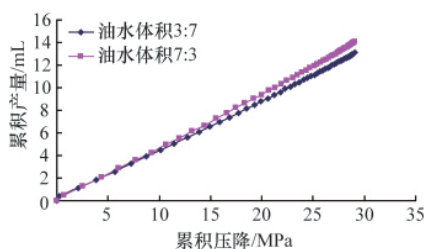


图4 累积产量与累积压降曲线
Fig. 4 Cumulative production vs cumulative pressure drawdown curve (simulated oil)

以矿场原油及地层水为实验对象, 进行不同油水体积下的溶洞进行弹性开采模拟实验, 压力变化以及累积产量与累积压降的关系如图5、图6所示。由图5可知, 压力与时间成指数形式递减, 且溶洞内油相体积越小, 压力递减越快, 递减幅度越大。矿场原油的压缩系数大于地层水的压缩系数, 由公式(7)可知 V_o 越小, 压力递减越快, 递减幅度越大。由图6

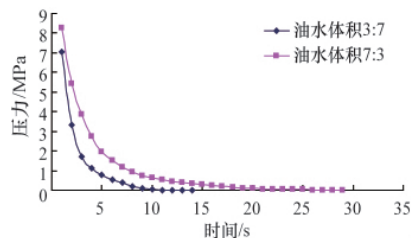


图5 不同油水体积时压力递减曲线
Fig. 5 Pressure declining curves in different volume ratios of oil to water (crude oil in site)

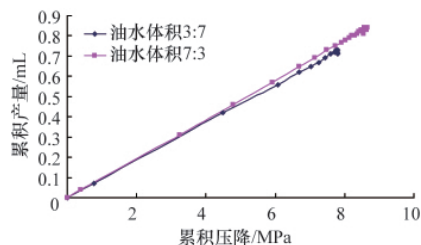


图6 累积产量与累积压降曲线
Fig. 6 Cumulative production vs cumulative pressure drawdown curve (crude oil in site)

可以看出, 累积产量和累积压降成线性关系, 这与理论分析和模拟油实验结果相吻合。

综合模拟油实验和原油实验的结果可知, 无供给溶洞的弹性开采主要是依靠流体本身的弹性能量, 流体的压缩系数越大, 弹性能量越大, 开采的过程中, 压力变化越缓慢, 产出相同的油, 压力降也越小。

4 结论

无供给溶洞弹性开采, 井底压力和油井产量随开采时间呈指数递减趋势, 递减指数与溶洞内油水体积以及流体的压缩系数相关。累积产量与累积压降呈直线关系, 其斜率物理意义为单位压差作用下的累积产液量。在油田现场可以根据油井自喷期的生产资料进行分析, 得出累积产量与累积压降关系曲线斜率, 从而进一步估算溶洞体积大小及油水体积。

参考文献 (References)

- [1] 杨辉廷, 江同文, 颜其彬, 等. 缝洞型碳酸盐岩储层三维地质建模方法初探[J]. 大庆石油地质与开发, 2004, 23(4): 11-16.
Yang Huiting, Jiang Tongwen, Yan Qibin, et al. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2004, 23(4): 11-16.
- [2] 杨宇, 康毅力, 张凤东, 等. 塔河油田缝洞型油藏流动单元的定义和划分[J]. 大庆石油地质与开发, 2007, 26(2): 31-34.
Yang Yu, Kang Yili, Zhang Fengdong, et al. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2007, 26(2): 31-34.
- [3] 张希明, 杨坚, 杨秋来, 等. 塔河缝洞型碳酸盐岩油藏描述及储量评估技术[J]. 石油学报, 2004, 25(1): 13-19.
Zhang Ximing, Yang Jian, Yang Qiulai, et al. *Acta Petrolei Sinica*, 2004, 25(1): 13-19.
- [4] 张希明. 新疆塔河油田下奥陶统碳酸盐岩缝洞型油气藏特征[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(5): 17-22.
Zhang Ximing. *Petroleum Exploration and Development*, 2001, 28(5): 17-22.
- [5] 鲁新便, 蔡忠贤. 缝洞型碳酸盐岩油藏古溶洞系统与油气开发 [J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 22-27.
Lu Xinbian, Cai Zhongxian. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(1): 22-27.
- [6] 修乃岭, 熊伟, 班凡生, 等. 缝洞型油藏裂缝-溶洞中流体运动特征研究[J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2007, 9(2): 14-16.
Xiu Nailing, Xiong Wei, Ban Fansheng, et al. *Journal of Chongqing University of Science and Technology: Natural Sciences Edition*, 2007, 9(2): 14-16.
- [7] 黄孝特. 碳酸盐岩裂缝-溶洞型油气藏开发技术探讨[J]. 石油实验地质, 2002, 24(5): 446-448.
Huang Xiaote. *Petroleum Geology and Experiment*, 2002, 24(5): 446-448.
- [8] 赵文革, 陆正元, 向阳. 四川盆地二叠统碳酸盐岩气藏储渗空间研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2006, 25(5): 9-11.
Zhao Wenge, Lu Zhengyuan, Xiang Yang. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2006, 25(5): 9-11.
- [9] 班凡生, 高树生, 熊伟, 等. 裂缝-孔隙型双重介质油藏流体窜流规律[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2008, 27(5): 677-679.
Ban Fansheng, Gao Shusheng, Xiong Wei, et al. *Journal of Liaoning Technical University: Natural Science Edition*, 2008, 27(5): 677-679.
- [10] 程倩, 熊伟, 高树生, 等. 单洞型油藏弹性开采实验研究[J]. 特种油气藏, 2009, 16(2): 47-49.
Chen Qian, Xiong Wei, Gao Shusheng, et al. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2009, 16(2): 47-49.

(责任编辑 刘志远)