

文章编号: 1000-582X(2012)11-144-05

## 低渗油藏压裂水平井生产动态物理模拟

沈 瑞<sup>1,2a,2b</sup>, 高树生<sup>1</sup>, 熊 伟<sup>1</sup>, 胡志明<sup>1</sup>

(1. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院 渗流流体力学研究所, 河北 廊坊 065007;

2. 中国科学院 a. 研究生院; b. 物理学院, 北京 100190)

**摘 要:** 针对长庆油田某区块采用的纺锤形和哑铃形 2 种裂缝分布形式的压裂水平井, 制作三维比例物理模型, 进行了压裂水平井弹性开采及水驱物理模拟研究。结果表明, 2 种模型在弹性开采条件下, 产油量与时间呈指数函数关系变化, 哑铃形压裂水平井的产量较高, 产量递减速度较快; 利用压裂水平井产能公式和封闭油藏弹性驱动物质平衡方程, 推导出产量的指数表达式, 分析了弹性开采条件下产量及其递减速度的影响因素。在水驱条件下, 纺锤形压裂水平井见水时间较晚, 含水率上升速度较慢。在水驱实验初期, 弹性驱动占据主导地位, 哑铃形压裂水平井的产量较高, 当累积注水量大于 0.2 PV 后, 纺锤形裂缝分布模型的采出程度开始逐渐大于哑铃形裂缝分布模型。当含水率达到 98% 时, 纺锤形和哑铃形裂缝分布模型的采出程度分别为 33.67% 和 27.48%。

**关键词:** 低渗透油藏; 裂缝; 水平井; 三维物理模拟; 弹性开采; 水驱

**中图分类号:** TE348; TE312

**文献标志码:** A

## Physical simulation of production performance of fractured horizontal wells in low permeability reservoir

SHEN Rui<sup>1, 2a, 2b</sup>, GAO Shusheng<sup>1</sup>, XIONG Wei<sup>1</sup>, HU Zhiming<sup>1</sup>

(1. Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Research Institute of Petroleum Exploration and Development-Langfang, Langfang, Hebei 065007, China;

2a. Physics Institute; 2b. Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** For the fractured horizontal wells with spindle and dumbbell-shaped distribution of fracture in the Changqing oil-field, 3-D scaled physical models are utilized to simulate their production performance in elastic drive and waterflooding. The experimental results indicate that the oil production and the experimental time of two models are closely exponential function. The oil production of the horizontal well with dumbbell-shaped fracture is higher, but its decline rate is faster. The productivity formula and material balance equation of closed reservoir with elastic drive are utilized to derive the exponential form of oil production. Influence factors of oil production and its decline rate are analyzed in elastic drive. In waterflooding, the water breakthrough time of the horizontal well with spindle fracture is later than the one with dumbbell-shaped fracture. And the rate of water cut increasing of the model with spindle fracture is slower. In the initial stage of waterflooding experiment, elastic drive is still the leading position, so the oil production of the model with dumbbell-shaped fracture is higher. When the cumulative water injected

收稿日期: 2012-05-03

基金项目: 国家科技重大专项(2008ZX05013-003)

作者简介: 沈瑞(1982-), 男, 中国科学院渗流流体力学研究所博士, 主要从事渗流理论和油藏数值模拟方面研究。  
(E-mail) shenrui523@126.com。

exceeds 0.2 PV, the recovery percent of the model with spindle fracture is higher than the one of the model with dumbbell-shaped fracture. When the percent water cut reaches 98%, the recovery percent of the model with spindle fracture is 33.67%, while the one of the model with dumbbell-shaped fracture is 27.48%.

**Key words:** low permeability reservoirs; fracture; horizontal wells; 3-D physical model; elastic drive; waterflooding

对于低渗透油藏,仅采用常规水平井开发难以达到预期的开发效果,因此,通常对水平井进行水力压裂以增加产量。目前,关于压裂水平井物理模拟方面主要以电模拟为手段<sup>[1-3]</sup>,但是该方法只能模拟单相流体渗流的情况,而关于水驱条件下低渗透油藏压裂水平井生产动态物理模拟方面的研究较少。笔者在借鉴前人压裂水平井产能与电模拟方面研究成果的基础上<sup>[4-7]</sup>,针对长庆油田实际应用的“纺锤形”压裂水平井及“哑铃形”压裂水平井特点,设计了相应物理模型和实验方案,研究了 2 种压裂水平井在弹性开采及水驱条件下的开发动态规律,研究结果对于长庆油田纺锤形和哑铃形 2 种压裂水平井合理应用具有一定指导意义。

## 1 物理模型及实验

### 1.1 物理模型

实验模型为取自四川的天然砂岩露头,其水测渗透率为  $0.15 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,孔隙度为 11.5%,文献 [8]中对比了该类天然露头与长庆油田 I 类低渗砂岩储层的孔喉特征参数,二者的中值压力、喉道均值、以及分选系数等均较为接近,从数据上说明了所选用的低渗天然露头与长庆油田 I 类低渗储层在孔喉特征方面的相似之处,同时也说明了该天然露头模型可以有效的模拟长庆油田 I 类低渗透储层的渗流特征。

由于长庆油田实际应用的压裂水平井两侧裂缝关于水平井近似对称,因此物理模型只需模拟压裂水平井及其单侧 3 条裂缝即可。模型本体尺寸为  $30 \text{ cm} \times 11 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ ,人工裂缝为无限导流能力裂缝,模型外部由树脂进行封装,模型平面上分布有 3 排共 14 个测压点,通过压力传感器与计算机实现对模型内压力分布的监测,模型的最高承受压力为 1 MPa。如图 1 所示,左侧图为纺锤形压裂水平井模型,右图为哑铃形压裂水平井模型。实验在室温下进行,水的黏度为  $1.0 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ,模拟油的密度和黏度分别为  $0.79 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  和  $2.08 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。

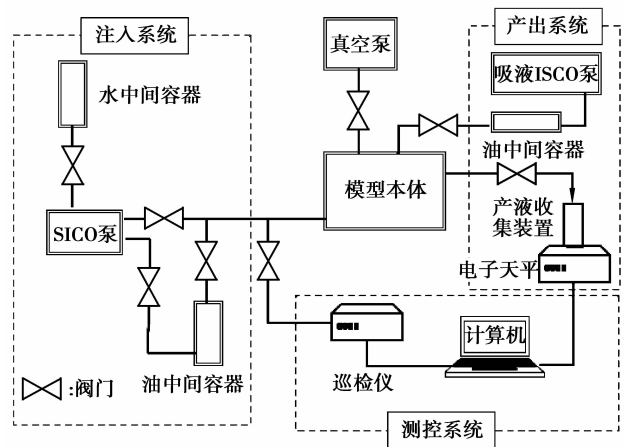


图 1 实验流程图

### 1.2 低渗油藏压裂水平井开发物理模拟系统

低渗油藏压裂水平井开发物理模拟系统由注入系统、模型本体、产出系统及测控系统构成,如图 2 所示。

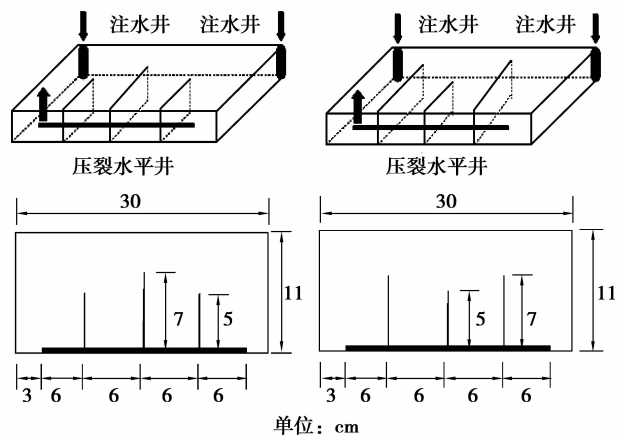


图 2 模型示意图及模型尺寸

实验流程图中的注入系统包括双缸 ISCO 泵、中间容器及管阀部件,其作用是为模型本体注入模拟油,保证模型具有一定初始压力,以及在水驱实验中,向模型持续注水。模型本体所模拟的原型为三维地层,包括油层,上下盖层以及四周封闭边界。产出系统主要运用精密电子天平完成产出液体的计量。测控系统由 16 通道巡检仪、压力传感器以及计

算机组成,其作用是对压力及流量信号进行采集和处理,可以自动记录模型出口的产液量、不同时期模型入口和模型不同位置的压力变化规律<sup>[9-10]</sup>。

## 2 压裂水平井弹性开采实验

### 2.1 实验步骤简述

首先将模型抽真空,饱和模拟油,当模型饱和好后,关闭压裂水平井,用 ISCO 泵注入一定量的模拟油,当模型压力分布均匀后,使得模型具有初始压力 0.18 MPa<sup>[11-14]</sup>。

弹性定井底压力开采实验时,只开启压裂水平井,并在一定时间间隔记录压裂水平井的出油量与出水量。

### 2.2 结果分析与讨论

#### 2.2.1 产量对比

图 3 展示了 2 种压裂水平井弹性定井底压力开发实验的产量变化规律。生产初期,哑铃形压裂水平井的产量比纺锤形压裂水平井高,但哑铃形压裂水平井产量递减速度较快,所以生产一段时间后,哑铃形压裂水平井的产量便低于纺锤形压裂水平井。

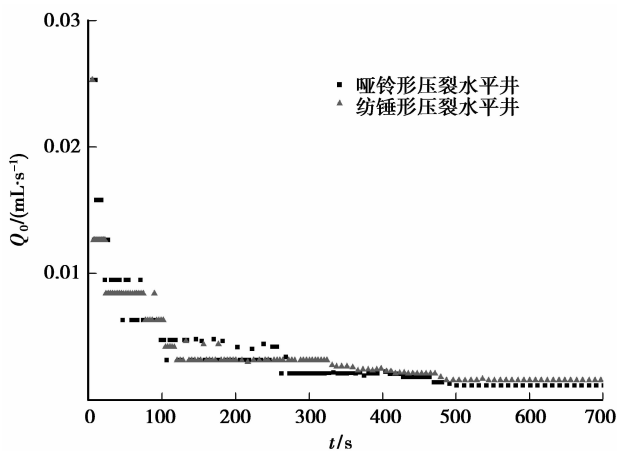


图 3 产量与时间变化关系

将图 3 所示的实验数据采用式(1)形式的指数函数形式进行拟合,所得的参数列于表 1。式(1)中  $y-y_0$  代表产油量,  $A$  的物理意义是初始产油量,  $D$  的物理意义是产量递减速度。

$$y - y_0 = A \cdot e^{-Dt} \quad (1)$$

表 1 拟合曲线的系数

模型类型	$y_0 /$ ( $g \cdot s^{-1}$ )	$A /$ ( $g \cdot s^{-1}$ )	$D /$ ( $s^{-1}$ )	$R^2$
纺锤形压裂水平井	0.002 68	0.054 01	0.216 58	0.85
哑铃形压裂水平井	0.004 67	0.073 69	0.254 01	0.94

为了进一步说明 2 种压裂水平井弹性开采产量产生差异的原因,利用压裂水平井产能公式和物质平衡方程,经过一定的简化处理,推导出产能公式的指数表达形式,以分析影响产能及其递减速度的主要影响因素。

#### 2.2.2 压裂水平井产能影响因素分析

以范子菲压裂水平井产能公式为例<sup>[15]</sup>,考虑到该公式稳态产能公式,以及为了便于推导,将式中的边界压力替换为平均地层压力  $\bar{p}$ 。

$$q_o = \frac{6\pi Kh(\bar{p} - p_{wf})}{\mu_o B_o} \left( H_1 + \frac{Kh}{K_{fc}} \ln \frac{h_f}{2r_w} \right)^{-1}, \quad (2)$$

式中:  $H_1 = \left| \operatorname{arccch} \left[ \frac{\operatorname{ch} \frac{\pi b}{2na}}{\sin \frac{\pi L_f}{2a}} \right] \right|$ ,  $q_o$  为产油量,  $m^3/d$ ;

$K$  为基质渗透率,  $10^{-3} \mu m^2$ ;  $h$  为油藏厚度,  $m$ ;  $p_i$  为原始压力,  $MPa$ ;  $\bar{p}$  为平均压力,  $MPa$ ;  $p_{wf}$  为井底流压,  $MPa$ ;  $\mu_o$  为油的粘度,  $mPa \cdot s$ ;  $B_o$  油的体积系数,无量纲;  $a$  平行于水平井方向的油藏长度,  $m$ ;  $b$  垂直于水平井方向的油藏宽度,  $m$ ;  $c$  裂缝宽度,  $m$ ;  $K_f$  裂缝渗透率,  $10^{-3} \mu m^2$ ;  $h_f$  裂缝高度,  $m$ ;  $r_w$  井筒半径,  $m$ 。

根据封闭边界油藏弹性开采的物质平衡方程<sup>[16]</sup>,其累积产量以及产量分别为:

$$N_p = \frac{NB_{oi}C_o(p_i - \bar{p})}{B_o}, \quad (3)$$

$$q_o = \frac{dN_p}{dt} = -\frac{NB_{oi}C_o}{B_o} \frac{d\bar{p}}{dt}. \quad (4)$$

式中:  $N_p$  累积产油量,  $m^3$ ;  $N$  地质储量,  $m^3$ ;  $B_{oi}$  原始地层条件下的油体积系数,无量纲;  $C_o$  油的压缩系数,  $1/MPa$ 。

令式(2)与式(4)右端相等,整理并对两端积分可得:

$$\bar{p} - p_{wf} = (p_i - p_{wf}) \exp \left[ -\frac{6\pi Kh}{\mu_o NB_{oi}C_o \left( H_1 + \frac{Kh}{K_{fc}} \ln \frac{h_f}{2r_w} \right)} t \right]. \quad (5)$$

式(5)代入式(1):

$$q_o = \frac{6\pi Kh(p_i - p_{wf})}{\mu_o B_o \left( H_1 + \frac{Kh}{K_{fc}} \ln \frac{h_f}{2r_w} \right)} \exp \left[ -\frac{6\pi Kh}{\mu_o NB_{oi}C_o \left( H_1 + \frac{Kh}{K_{fc}} \ln \frac{h_f}{2r_w} \right)} t \right] \sim A \cdot e^{-Dt}. \quad (6)$$

从式(6)中可以看出,2种裂缝分布模式在实验条件相同的情况下,只有  $H_1$  与地质储量  $N$  不

同,而  $H_1$  与裂缝长度呈反比,因此,反映初始产量的参数  $A$  与裂缝长度呈正比;假设 2 种模型地质储量  $N$  也相等的话,那么反映递减速度的参数  $D$  与裂缝长度呈正比。即由于哑铃形压裂水平井的裂缝总长度较长,所以其初始产量较高,递减速度较快。

### 3 压裂水平井模型水驱实验

#### 3.1 实验步骤简述

首先用 ISCO 泵向模型注入模拟油,压力分布均匀后,使得模型具有 0.18 MPa 的初始压力,然后关闭盛放模拟油的中间容器,用 ISCO 泵通过 2 口直井向模型注水,进行水驱实验,在一定时间间隔记录压裂水平井的出油量与出水量。

#### 3.2 结果分析与讨论

图 4 展示了 2 种模型含水率随时间的变化曲线,对于纺锤形压裂水平井模型,当注入 0.20 PV 时,生产井开始见水,含水率先迅速上升,当注入孔隙体积为 0.25~0.35 PV 之间时,含水率保持 25% 左右,当注入孔隙体积大于 0.35 PV 后,含水率继续快速上升。纺锤形模型的含水率第一个上升阶段是由于外侧两短裂缝见水,一部分水被生产井采出,另一部分水沿外侧裂缝顶部向内侧裂缝推进,使得裂缝之间的含油区域被波及,生产井的含水率上升趋于平缓,当中间长裂缝见水后,含水率又迅速上升。

对于哑铃形压裂水平井模型,当注入孔隙体积为 0.17 PV 时,生产井开始见水,含水率先迅速上升到 70% 左右,然后含水上升速度趋于平缓。哑铃形两端裂缝较长、与注水井距离较近,因此导致生产井见水较早,见水后裂缝形成低阻通道,含水上升率较快,影响了注入水向中间裂缝的波及。

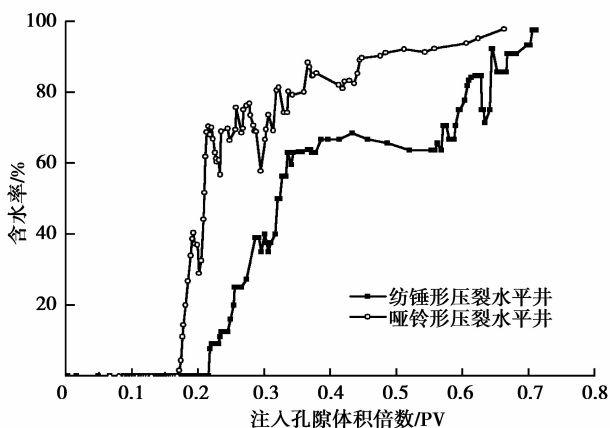


图 4 含水率与注入孔隙体积倍数关系

如图 5 所示,当注入孔隙体积小于 0.2 PV 时,哑铃形模型的阶段采出程度较高,当注入孔隙体积大于 0.2 PV 后,纺锤形模型的阶段采出程度较高。原因是在开发初期,弹性驱动占据主导地位,哑铃形压裂水平井模型的裂缝总长度较长,因此初期产量较高(第 2.2.2 节中压裂水平井产能影响因素分析),阶段采出程度也较高,但当注入水波及到外侧长裂缝后,含水率迅速上升,影响了波及效率,后期阶段采出程度逐渐低于纺锤形压裂水平井模型。

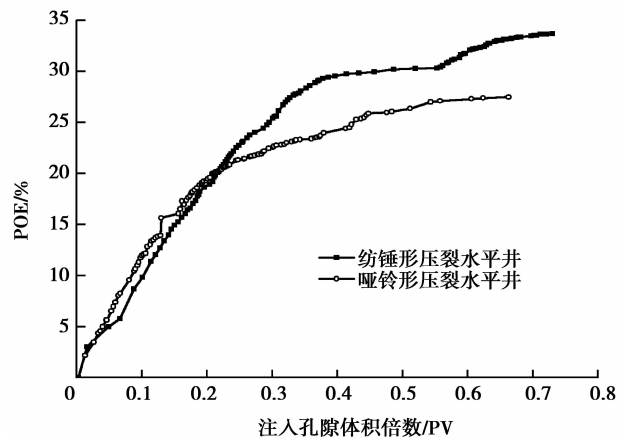


图 5 采出程度与注入孔隙体积倍数关系

当含水率达到 98% 时,纺锤形模型的采出程度为 33.86%,而哑铃形模型的采出程度为 27.48%,由此可见,纺锤形模型的水驱油效率更高。

## 4 结 语

针对长庆低渗油藏目前实际应用的纺锤形和哑铃形压裂水平井,首次采用低渗天然露头建立了压裂水平井开发物理模拟大模型,并进行了低渗油藏压裂水平井弹性开采与水驱开发的物理模拟实验研究。

根据弹性定井底压力开发实验结果,与纺锤形压裂水平井相比,哑铃形压裂水平井的初始产量高,产量递减速度较快,通过产能公式分析说明了产生该现象的原因,即裂缝长度是影响初始产量和递减速度的主要因素,裂缝长度与初始产量及递减速度均成正比。

根据水驱开发实验结果,哑铃形压裂水平井见水较早,含水上升速度较快,当注入孔隙体积大于 0.2 PV 后,其阶段采出程度逐渐低于纺锤形压裂水平井,最终采出程度比纺锤形压裂水平井低 6.4 个百分点左右。

综合分析可以认为:对于水驱开发的低渗透油藏,纺锤形压裂水平井开发效果较好;而对于弹性驱动占主导地位的低渗透油藏,哑铃形压裂水平井开发效果较好。

#### 参考文献:

- [1] 吴晓东,隋先富,安永生,等. 压裂水平井电模拟实验研究[J]. 石油学报, 2009, 30(5):740-743.  
WU Xiaodong, SUI Xianfu, AN Yongsheng, et al. Electrolytic simulation experiment of fractured horizontal well[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(5): 740-743.
- [2] 张凤喜,吴晓东,隋先富,等. 基于电模拟实验的低渗透油藏压裂水平井产能研究[J]. 特种油气藏, 2009, 16(2):90-93.  
ZHANG Fengxi, WU Xiaodong, SUI Xianfu, et al. Study on fractured horizontal well productivity for low-permeability reservoirs based on electric analogy[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2009, 16(2):90-93.
- [3] 高海红,曲占庆,赵梅. 压裂水平井产能影响因素的实验研究[J]. 西南石油大学学报, 2008, 30(4):73-76.  
GAO Haihong, QU Zhanqing, ZHAO Mei. Experimental study on the factors affecting the productivity of fractured horizontal well[J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2008, 30(4):73-76.
- [4] Hegre T M, Larsen L. Productivity of multifractured horizontal wells[C]// European Petroleum Conference, Oct 25-27, 1994, London, United Kingdom. [S. l.]: Society of Petroleum Engineers Inc, 1994:393-404.
- [5] Li H J, Jia Z Q, Wei Z S. A new method to predict performance of fractured horizontal wells [C] // International Conference on Horizontal Well Technology, Nov 18-20, 1996, Calgary, Alberta, Canada. [S. l.]: Society of Petroleum Engineers Inc, 1996:179-185.
- [6] Branimir C, Bayemgas A C N. Effective wellbore parameters and the productivity of a multi-fractured horizontal well[C]// SPE Production and Operations Symposium, April 4-8, 2009, Oklahoma City, Oklahoma, USA. [S. l.]: Society of Petroleum Engineers Inc, 2009:1-13.
- [7] Gilbert J V, Barree R D. Production analysis of multiply fractured horizontal wells[C]// SPE Rocky Mountain Petroleum Technology Conference, 14-16 April 2009, Denver, Colorado, USA. [S. l.]: Society of Petroleum Engineers Inc, 2009:1-11.
- [8] 沈瑞,胡志明,熊伟,等. 低渗透砂岩油藏水平井开发物理模拟研究[J]. 石油天然气学报, 2009, 31(5): 112-115.  
SHEN Rui, HU Zhiming, XIONG Wei, et al. Physical simulation research of horizontal well development in low permeability sandstone reservoirs[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31(5):112-115.
- [9] Hadia N, Chaudhari L, Sushhanta K M, et al. Experimental investigation of use of horizontal wells in waterflooding [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2007, 56(4):303-310.
- [10] Al-Hashim H S. Performance of horizontal injection-horizontal production wells in a five spot pattern: experimental approach [J]. Petroleum Science and Technology, 2009, 27(9):933-942.
- [11] Bai Y H, Li J C, Zhou J F, et al. Sensitivity analysis of dimensionless parameters for physical simulation of water-flooding reservoir[J]. Science in China ser. E, 2005, 48(4):441-453.
- [12] Bai Y H, Zhou J F, Li Q P. Designing of partial similarity models and evaluation method in polymer flooding experiment [J]. Transport in Porous Media, 2008, 75(12):401-412.
- [13] Zhou J F, Li J C. An optimization approach to the similarity criteria of flows and its application [J]. Progress in Natural Science, 2006, 16(3):241-247.
- [14] Shen P P. Flow and transport of oil and water in porous media[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 115-116.
- [15] 范子菲,方宏长. 裂缝性油藏水平井稳态解产能公式研究[J]. 石油勘探与开发, 1996, 23(3):52-57.  
FAN Zifei, FANG Hongchang. A steady solution formula of horizontal well productivity in a fractured reservoir[J]. Petroleum Exploration and Development, 1996, 23(3):52-57.
- [16] 陈元千,李璠. 现代油藏工程[M]. 北京:石油工业出版社, 2004:91-92.

(编辑 郑洁)