

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2013.09.005

# 特低渗透砂岩平板大模型井网适应性评价

肖前华<sup>1</sup>, 杨正明<sup>1,2</sup>, 徐 轩<sup>2</sup>, 田文博<sup>1</sup>, 张亚蒲<sup>2</sup>

(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:**一维柱塞岩心和二维填砂模型很难模拟油藏储层的井网渗流, 因此提出天然砂岩露头大模型制作方法以及定义两个参数用以评价特低渗透砂岩平板大模型井网适应性。利用天然砂岩露头制作平板大模型, 模拟了不同井网在较均质储层中的生产状况。提出了有效压力波及系数和产能指数的概念。实验测定了各井网模型在不同注采压差下的平面压力梯度场, 并在此基础上结合平行小岩样的非线性渗流曲线将模型渗流区域划分为不可流动区域、非线性渗流区域和拟线性渗流区域。研究表明, 在较均质特低渗透储层渗流中, 正方形反九点井网的适应性优于菱形反九点井网, 优于矩形井网, 随着注采压差的提高各井网模型的产能指数逐渐升高, 不可流动区域逐渐减少, 拟线性渗流区域逐渐增大, 正方形反九点井网的非线性渗流区域呈下降趋势, 菱形反九点井网和矩形井网的非线性渗流区域出现波动, 表现为先上升后下降的趋势。

**关键词:**低渗透油藏; 天然砂岩露头; 平板大模型; 井网适应性; 压力梯度; 有效压力波及系数; 产能指数

中图分类号: TE324

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2013)09-028-07

## Experimental study on adaptability of well pattern using sandstone plate model with ultra-low permeability

XIAO Qianhua<sup>1</sup>, YANG Zhengming<sup>1,2</sup>, XU Xuan<sup>2</sup>, TIAN Wenbo<sup>1</sup>, ZHANG Yapu<sup>2</sup>

(1. Research Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Langfang, Hebei 065007, China; 2. Langfang Branch, Petro China Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Langfang, Hebei 065007, China)

**Abstract:** Because the porous flow state is difficult to be simulated by one-dimensional cores and two-dimensional sand filled models, this paper proposes a method of making large-scale natural outcrop flat model and defines two parameters to evaluate adaptability of different well pattern on the ultra-low permeability sandstone flat model. With natural sandstone plate model, production of different well patterns in homogeneous oil reservoirs is simulated. A concept of pressure sweep efficiency and deliverability index for researches on adaptability of well patterns are put forward. Through experiments, plane pressure gradient field of different well patterns under different drawdown pressures are measured, and then seepage areas of the models are divided into immobilized seepage area, nonlinear seepage area, and quasi-linear seepage area, with the help of small core nonlinear seepage curve. Experiments show that adaptability of inverted nine-spot equilateral well pattern is better than those of inverted nine-spot rhombus well pattern and rectangular well pattern. With the

收稿日期: 2013-04-01

基金项目: 国家油气重大专项(2011ZX05013-006)

作者简介: 肖前华(1987-), 男, 中国科学院博士研究生, 主要从事油田开发、非常规油藏储层评价、微纳流动机理研究, (E-mail) xqh159@gmail.com。

increase of drawdown pressure, deliverability index of all well patterns increases, immobilized seepage area reduces, and quasi-linear seepage area expands. At the same time, nonlinear seepage area of inverted nine-spot equilateral well pattern reduces, while those of inverted nine-spot rhombus well pattern and rectangular well pattern fluctuate as expanding first and then reducing.

**Key words:** low permeability reservoirs; natural sandstone outcrops; large-scale plate model; adaptability of well pattern; pressure gradient; pressure sweep efficiency; deliverability index

中国投入开发的特低渗透油田已有一定比重<sup>[1-2]</sup>,井网的选择、部署和调整是开发方案的重要内容,确定合理的井网部署是低渗透油田开发成败与否的关键<sup>[3]</sup>。20世纪40年代,Muskat<sup>[4]</sup>对简单井网类型渗流机理进行了研究;50年代,提出“稀井网大压差”生产,但实践证明不能成功实施;60年代,谢尔卡乔夫提出油田最终采收率和井网密度的经验公式;80年代,童宪章以获得最大产量为目标研究不同井网形式适应性,得到了获得最大产量的井网类型<sup>[5]</sup>;2008年,李炼民等<sup>[6]</sup>提出:井网不适应性因素是造成低渗透油田注水开发矛盾的最主要原因,适合低渗透油藏开发的最优井网型式是矩形五点井网系统。这些研究大多基于理论研究和开发经验,针对的是常规油藏,而且未进行室内试验的合理验证。90年代以后有不少研究者采用数值模拟研究特低渗透油藏井网适应性<sup>[7-11]</sup>。但是常规数值模拟软件处理特低渗透油藏问题时有其较大的局限性。因为流体在特低渗透多孔介质中的流动过程中,流动规律表现为存在最小启动压力梯度的非线性渗流,不满足达西渗流规律<sup>[12-13]</sup>。常规商用数值模拟软件(如eclipse,CMG,VIP等)均以达西渗流模型为基础,对特低渗透油藏适用性差。因此,如果能用大模型实验对低渗透油藏井网适应性进行直接研究,将有助于低渗透油藏开采。自20世纪50年代以来,包括著名学者Roger Butler在内的众多学者开展了人造填砂大型物理模型室内试验研究<sup>[14-24]</sup>,但是他们的研究主要围绕蒸汽驱、热采和聚合物驱提高采收率、三维油藏渗流规律以及某些井网开采条件下残余油分布特点而展开,未进行井网适应性方面的研究,而且填砂模型难以获得特低渗透率,很难再现实际油藏油、水运动规律。

在前人研究基础上,本团队开创性地研究了天然砂岩露头平板模型。通过天然砂岩露头平板大模型研究了均质型储层井网适应性,提出了有效压力波及系数和产能指数。实验测定了正方形反九点井网、菱形反九点井网和矩形井网平板模型单相渗流曲线,测量了各模型平面压力梯度场,并在此基础上评价了3种不同井网针对均质型储层的适应性。

## 1 材料和方法

### 1.1 实验材料

实验采用自行研制的低压大模型实验装置。如图1所示。实验装置由砂岩平板模型、注入系统、微流量测量系统、压力测量系统4部分组成。

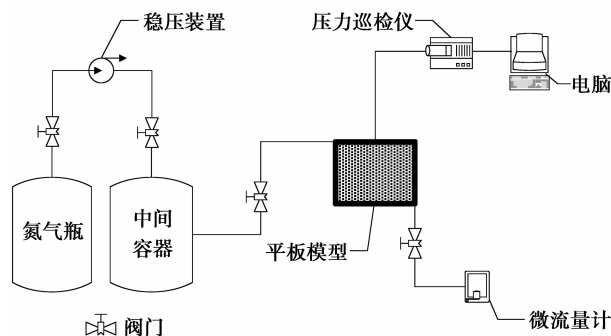


图1 实验装置示意图

注入系统由高压气瓶(压力源)、稳压装置和中间容器组成,可在不同压力下向平板模型注入流体。压力测量系统是通过布置在平板模型上的不同点的压差传感器来测量压力,同时巡检仪将压差传感器测量到的压力数据转换成可视化数据并传送给电脑采集软件。微流量测量系统由微流量测量仪组成,流过长度可精确到0.01 mm,流过时间可精确到0.001 s,流动微通道直径达到1.38 mm。通过微流量仪可准确获取采出井流量。

### 1.2 模型选取及制备

#### 1.2.1 砂岩露头物性特征

选取长庆油田某特低渗透储层露头岩心作为实验对象。

通过恒速压汞研究发现,当天然砂岩露头的孔隙度和渗透率与特低渗透储层岩心的孔隙度和渗透率比较接近时,二者喉道半径分布特征非常接近<sup>[25-26]</sup>。另外,天然砂岩露头与实际储层岩心粘土矿物含量接近,通过单相渗流实验还发现天然砂岩露头与实际储层渗流特征相似<sup>[27]</sup>。因此,利用天然砂岩露头岩心模拟实际储层,能较真实地反映其

真实渗流特征,对指导油气开采有着较强的针对性。

### 1.2.2 模型制作

实验采用天然砂岩露头制作平板模型模拟鄂尔多斯盆地长庆油田储层。鄂尔多斯盆地长庆油田某储层渗透率在  $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  左右,早期普遍采用正方形反九点井网和菱形反九点井网,后来增加了矩形井网,低渗透采油井均有一定规模压裂<sup>[28-29]</sup>。因此,模型设计满足以下要求:

1)模型平均渗透率为  $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  左右,以  $x$  和  $y$  方向渗透率接近一致的平板模型来模拟均质型储层。

2)模型边界无流体流出或者流入,为减小边界影响,模型边界为井网单元中的流线。

3)物理模型通过对称原则能代表整个井网单元。

4)为提高采收率,低渗透油藏采出井均会有一定程度的压裂。不考虑压裂规模的情况下,所有采

出井压裂 30%。

5)通过对称原则,物理模型能代表整个井网单元。

6)模拟 3 种井网,分别为:正方形反九点井网、菱形反九点井网和矩形井网。为了增加可对比性,各模型井网密度一样。

为满足模型设计要求,实验模拟时取正方形反九点井网的 1/4 单元,菱形反九点井网的两个 1/4 单元,矩形井网模拟整个单元,如图 2 所示。由流体力学可知,图中实线为流线,同时也是平板模型的边界,实线包围的区域即为物理模拟实验研究区域,实线框即为物理模型几何形状。实际菱形反九点井网长宽比约为 50:27,矩形井网长宽比约为 50:23,为满足井网尺寸与实际油藏井网尺寸相似,以上 3 块平板模型尺寸(长、宽、高)分别设计为:250 mm×250 mm×30 mm、500 mm×250 mm×30 mm、500 mm×250 mm×30 mm,通过计算知井网密度均为 62 500 mm<sup>2</sup>/井。

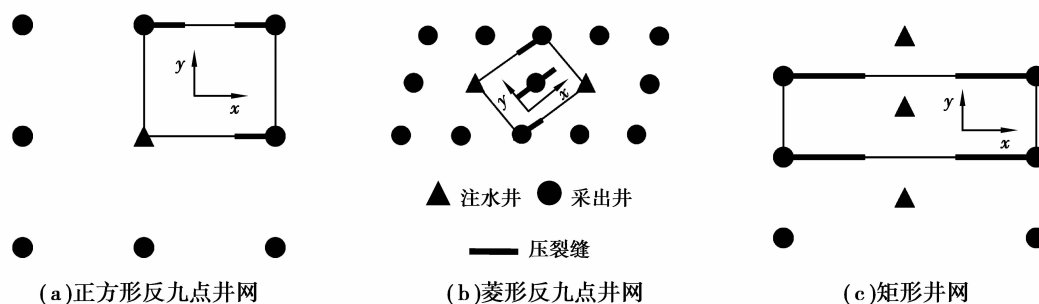


图 2 模型设计示意图

将砂岩露头切割成符合尺寸要求的平板。正方形反九点井网模型编号为 M1,菱形反九点井网模型编号为 M2,矩形井网模型编号为 M3。由于采油井采取 30%的压裂规模,结合图 2 知,M1 为一注三采,3 口采出井处均设计 38 mm( $250 \text{ mm} \times 30\% / 2$ )的缝长;M2 为两注三采,2 口角井设计 75 mm( $500 \text{ mm} \times 30\% / 2$ )的缝长,主向井设计 150 mm 的缝长;M3 为一注四采,4 口采出井均设计 75 mm( $500 \text{ mm} \times 30\% / 2$ )的缝长。在模型表面钻深孔模拟注入井和采出井,钻浅孔用来布置测压探头。在模型表面沿注入井和采出井周围均匀布置高精度压差传感器用来采集各点压力数据,在 3 块平板模型上布置的压差传感器数量分别为:13、20 和 20,采用特殊材料将压差传感器固定密封在平板上。最后进行模型的整体浇铸密封。浇铸采用耐压耐高温的特殊材料,以保证模型能够在 0~1.0 MPa 注采压差

和 0~100 ℃温度下进行实验。按照以上方法制作的模型,较之传统的疏松填砂模型能更好模拟实际储层渗流状况。

### 1.3 实验方法与步骤

按以下方法对 3 个不同井网模型进行渗流实验。

1)物理模型抽真空,饱和  $100.0 \times 10^3 \text{ mg/L}$  的矿化水。

2)平板模型非线性及压力梯度场测量实验:在低压、低流速的情况下,模拟特低渗透油藏定压生产情况,生产井定压注入,待各点压力值曲线趋于稳定后,测量流量,并且提取出各点从调整注入压力到压力稳定整个过程的压力值,然后升高注入压力,测量下一组压力数据和流量。

3)数据处理:绘制平板模型压力梯度场图,分析产能特征。

## 2 实验结果分析与讨论

### 2.1 平行岩样单相渗流曲线

采用文献[30]所述方法测得平行小岩样单相渗流的启动压力梯度为 0.048 MPa/m。绘制平行小岩样水测渗透率与压力梯度关系曲线,图 3 给出了模型 M1 的平行小岩样水测渗透率与压力梯度关系曲线。由于平板模型取自同一块露头岩心,其渗流特征比较接近。因此,图 3 也可反映模型 M2 和模型 M3 的平行小岩样的渗流特征。从图 3 可知,特低渗透砂岩露头存在非线性渗流,压力梯度小于 0.16 MPa/m 时,岩心渗透率随压力梯度增加而逐渐增大,为非线性渗流段;压力梯度高于 0.16 MPa/m 以后,渗透率趋于稳定,为拟线性渗流段。

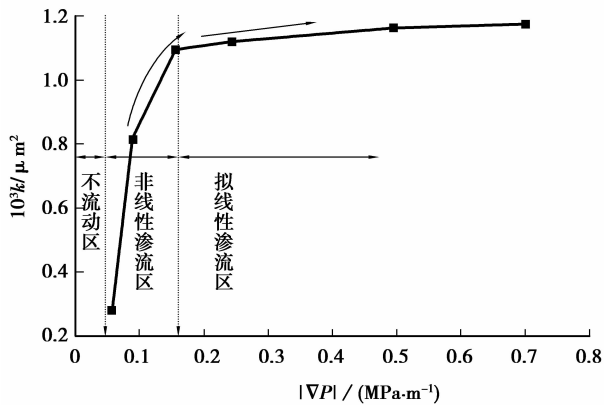


图 3 模型 M1 平行岩样水测渗透率与压力梯度关系曲线

### 2.2 各井网压力梯度测量及渗流区域划分

压力变化是油藏流体流动的动态反应,结合非线性渗流理论,可以将单位井网中的渗流区域划分为不流动区、非线性渗流区和拟线性渗流区<sup>[30-31]</sup>。

通过实验获取平板模型各测点压力,绘制出模型平面压力梯度场,同时结合平行小岩样的单相渗流曲线对不同井网模型划分渗流区域,从理论上刻画出注入流体波及范围和模型内流体流动情况。定义有效压力波及系数为:模型内参与流动的区域面积占整个模型面积的百分比,可表示为

$$P_e = \frac{S - S_n}{S} \times 100\%, \quad (1)$$

式中: $S$  为模型面积,  $\text{cm}^2$ ;  $S_n$  为模型中不流动区域面积,  $\text{cm}^2$ 。

图 4~6 给出了不同井网不同压差下的梯度场。从图中知,随着注采压差的提高,整个模型的压力梯度明显增大,注采井周围的压力梯度明显偏大,正方形反九点单元井网中部为压力梯度低值区,属于难动用区,菱形井网和矩形井网的靠边界中部区域为难动用区。结合小岩样单相渗流曲线将平板模型划分为不同的渗流区域:压力梯度小于 0.048 MPa/m 的区域不发生流动,为不流动区;压力梯度介于 0.048 MPa/m 和 0.16 MPa/m 之间的区域为非线性渗流区;压力梯度大于 0.16 MPa/m 的区域为拟线性渗流区。

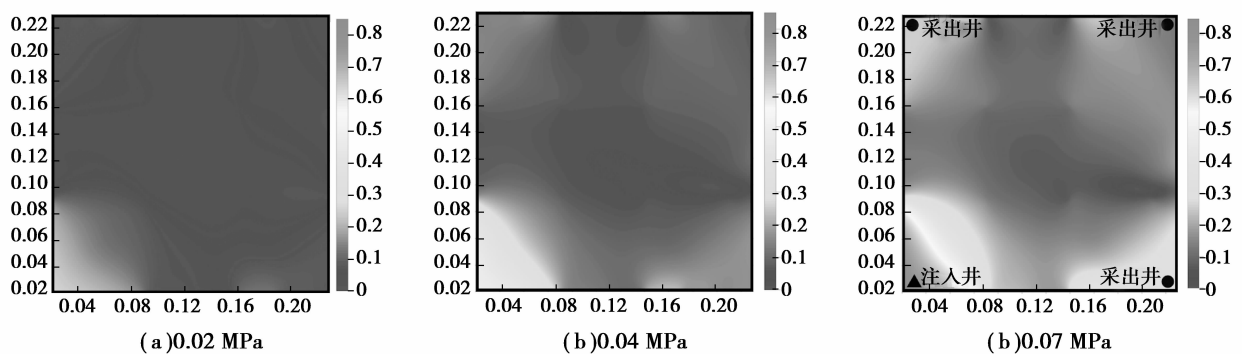


图 4 不同注采压差下正方形反九点井网压力梯度场图

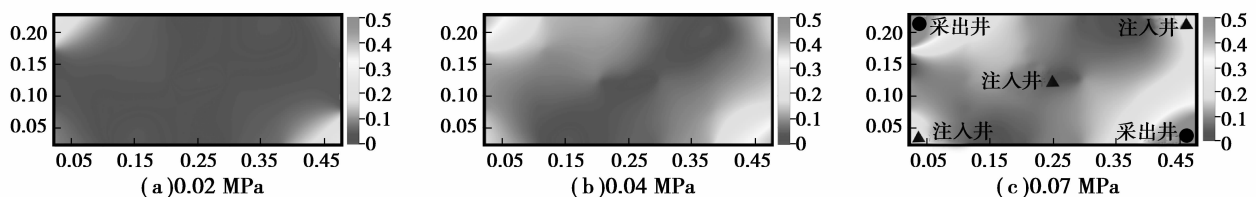


图 5 不同压差下菱形反九点井网压力梯度场图



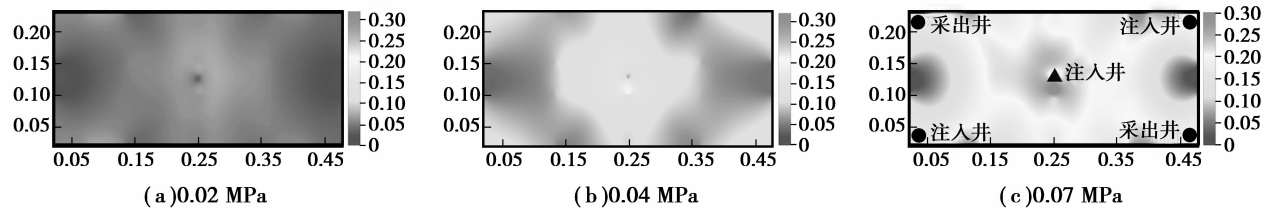


图 6 不同压差下矩形井网压力梯度场图

表 1 不同井网渗流区域划分

井网	模型 压差/MPa	不流动区/ %	非线性区/ %	拟线性区/ %
正方形	0.02	21	73	6
反九点	0.04	9	64	27
井网	0.07	3	19	83
菱形	0.02	33	65	2
反九点	0.04	15	71	14
井网	0.07	8	34	58
矩形	0.02	47	53	0
反九点	0.04	23	68	9
井网	0.07	14	41	45

由表 1 可知,低渗透储层渗流呈现明显的非线性特征,随着注采压差的升高,3 种井网的不可流动区域呈现下降趋势,拟线性渗流区域呈现上升趋势,正方形反九点井网的非线性渗流区域呈现下降趋势,但是菱形反九点井网和矩形井网的非线性渗流区域却呈现先升高后下降的趋势,目前还不清楚导致此现象的原因,尚需进一步研究。在相同注采压差下,正方形反九点井网、菱形反九点井网和矩形井网的不可流动区域呈现依次增大的趋势。因此,从渗流区域角度分析知,3 种井网中,正方形反九点井网的适应性优于菱形反九点井网,矩形井网的适应性最差。另外,根据上文提出的有效压力波及系数可计算出不同注采压差下的有效压力波及系数,统计结果如图 7 所示。

图 7 给出了不同注采压差下 3 种井网的有效压力波及系数之间的关系,随着注采压差的增大,3 种井网的有效压力波及系数逐渐增大,表明注采压差的升高有助于储层的动用。另外,相同注采压差下,正方形反九点井网的有效压力波及系数明显高于另外两种井网,矩形井网的最低。因此,从有效压力波及系数角度分析知,3 种井网中,正方形反九点井网适应性最好,矩形井网适应性最差。

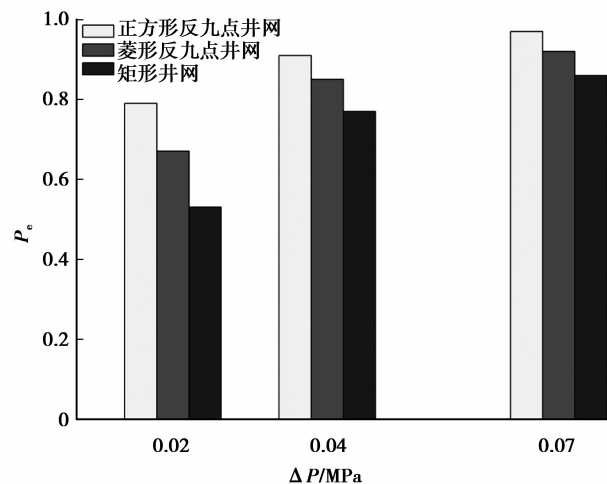


图 7 各井网有效压力波及系数

有效压力波及系数为无量纲参数,反映不同注采压差对储层流体驱动效应的大小,与井网形式、注采压差等密切相关。结合不同井网形式下的产能特征能较准确评价井网的适应性。

### 2.3 各井网产能特征

实验模拟油藏定压条件下生产,测定不同压差下采出井的流量。每次调整压差后,必须等待各测点压力和采出井流量稳定后才能记录数据。在特低渗透砂岩中,低压低流速情况下,采出井流量非常小,甚至小于  $0.01 \times 10^{-3}$  mL/s,使用常规方法测量误差较大,因此采用高精度微流量计,测量精度高,读数精确。

由于实际特低渗透油藏某点渗透率随压力梯度变化而变化<sup>[32-33]</sup>,上文通过平行岩样已得到证实,因此渗流阻力也将是变量,并且不同储层、不同压裂规模下的渗流阻力的计算没有比较理想的算法,此时无法直接计算不同井网的理论产量,也就无法直接评价室内实验中不同压差下的驱动效果以及不同井网的适应性。为表征不同井网的产能特征,提出产能指数的概念。产能指数为拟线性渗流时实验测得流量与其对应的注采压差的比值,其表达式为

$$J^* = \frac{Q_{\text{拟线性}}}{\Delta P}, \quad (2)$$

式中:  $J^*$  为产能指数,  $\text{mL}/(\text{s} \cdot \text{MPa})$ ;  $Q_{\text{拟线性}}$  为拟线性状态下测得的采出井产量,  $\text{mL}/\text{s}$ ;  $\Delta P$  为注采压差,  $\text{MPa}$ 。产能指数为反映油层特性、完井条件及泄油面积等与产量关系密切的综合指标。其物理意义为拟线性渗流状态下, 单位注采压差可获得的流量, 表征了油井生产能力的大小。对于不同的井网形式, 可通过比较产能指数大小来评价适应性。

按式(2)计算得出的各井网产能特征如图8所示。

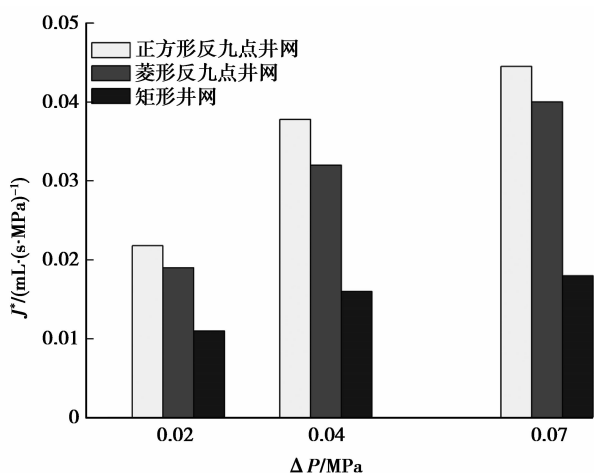


图8 各井网产能特征

从产能特征来看, 随着注采压差的升高, 3种井网的产能都呈现上升趋势。正方形反九点井网和菱形反九点井网随注采压差的升高, 产能升高得比较快, 矩形井网的产能随着注采压差升高而缓慢升高。因此, 对于正方形反九点井网和菱形反九点井网, 可通过升高注采压差来加大储层流体动用, 优化井网产能特征, 矩形井网却不宜如此。在相同注采压差下, 正方形反九点井网的产能特征最优, 菱形反九点井网其次, 矩形井网最差。因此, 从产能特征角度分析得到同样的井网适应性结论。

### 3 结 语

1) 利用天然砂岩露头平板模型研究了不同井网针对均质型储层的适应性。通过流体力学理论分析不同井网的流动机制, 使制作出的模型能最大程度反映整个井网单元, 同时采取采出井压裂, 制作不同井网模型, 最大程度模拟现场。

2) 通过分析压力梯度场和渗流曲线, 特低渗透储层存在不可流动区域、非线性渗流区域和拟线性渗流区域, 呈现明显的非线性特征。通过升高注采

压差可减小不可流动区域, 从而加大对储层流体的动用。提出了有效压力波及系数和产能指数来准确评价井网适应性。

3) 有效压力波及系数和产能指数受井网形式和注采压差的影响。随着注采压差升高, 3种井网模型的有效压力波及系数增大, 产能特征有明显变好趋势。注采压差相同时, 有效压力波及系数的大小依次为正方形反九点井网、菱形反九点井网、矩形井网。同时, 正方形反九点井网的产能特征最优, 而矩形井网的最差。因此, 在较均质型储层开发中正方形反九点井网适应性最佳。

### 参考文献:

- [1] 胡文瑞. 攻克低渗透: 中国低渗透油气的现状与未来[J]. 中国石油企业, 2009(6): 54-58.  
HU Wenrui. The present and future of low permeability oil and gas in China [J]. China Petroleum Enterprise, 2009(6): 54-58.
- [2] 王道富. 鄂尔多斯盆地特低渗透油田开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007.
- [3] 李松泉, 唐曾熊. 低渗透油田开发的合理井网[J]. 石油学报, 1998, 19(3): 52-55.  
LI Songquan, TANG Zengxiang. The reasonable well pattern for developing low permeability oil fields [J]. Acta Petrolei Sinica, 1998, 19(3): 52-55.
- [4] Muskat M. The flow of homogeneous fluids through porous media [M]. Michigan: Ann Arbor, Edwards, 1946.
- [5] Tong X. Orpretive study of the characteristics and susceptibility of pattern-type water-injection well networks from the viewpoint of balanced waterfloods [C]//[S. I.]; SPE, 1983: 10567.
- [6] 李炼民, 赵坤山. 低渗透油藏合理井网型式与油砂体适应性研究[J]. 内蒙古石油化工, 2008(2): 91-93.  
LI Lianmin, ZHAO Kunshan. Research on adaptability of well pattern type and oil sand body of low permeability reservoir [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2008(2): 91-93.
- [7] 张学文, 方宏长, 齐梅. 低渗透油田开发注采井网系统设计探讨[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(3): 57-59.  
ZHANG Xuewen, FANG Hongchang, QI Mei. A design of optimal well pattern for the development of low permeability reservoir [J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(3): 57-59.
- [8] 贾元元. 低渗透油藏注水开发井网适应性研究[D]. 山东: 中国石油大学硕士学位论文, 2010.
- [9] 欧阳明华, 谢丛姣. 低渗透油藏井网适应性研究: 以张天渠油田长2油藏为例[J]. 海洋石油, 2004, 24(2):

- 64-68.
- OUYANG Minghua, XIE Congjiao. Adaptability research of well pattern in low permeability reservoir: taken Chang-2 reservoir in the Zhangtianqu oilfield as example [J]. *Offshore Oil*, 2004, 24(2): 64-68.
- [10] 李忠兴, 韩洪宝, 程林松. 低渗透各向异性地层合理井排距比研究[J]. *西南石油学院学报*, 2004, 26(1): 35-38.
- LI Zhongxing, HAN Hongbao, CHENG Linsong. Study of the reasonable ration of space between wells and rows in low permeability reservoirs [J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 2004, 26(1): 35-38.
- [11] 侯建锋. 安塞特低渗透油藏合理开发井网系统研究[J]. *石油勘探与开发*, 2000, 27(1): 95-98.
- HOU Jianfeng. Reasonable well pattern study for ultra-low permeability reservoirs in Ansai oil field Changqing oil complex [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2000, 27(1): 95-98.
- [12] 李道品. 低渗透砂岩油田开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
- [13] 于荣泽. 特低渗透油藏非线性渗流数值模拟研究及应用[D]. 河北: 中国科学院研究生院渗流流体力学研究所博士学位论文, 2011.
- [14] Geertsma J, Croes G A, Schwarz N. Theory of dimensionally scaled models of petroleum reservoirs[J]. *Petroleum Transactions*, 1956, 207: 118-127.
- [15] Gaucher D H, Lindley D C. Waterflood performance in a stratified, five-spot reservoir: a scaled model study[J]. *Petroleum Transactions*, 1960, 219: 208-215.
- [16] Craig F F, Sanderlin J L, Moore D W, et al. A laboratory study of gravity segregation in frontal drives[J]. *Petroleum Transactions*, 1957, 210: 275-282.
- [17] Rapoport L A. Scaling laws for use in design and operation of water-oil flow models [J]. *Petroleum Transactions*, 1955, 204: 143-150.
- [18] Butler R M. Rise of interfering steam chambers [J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 1987, 26(3): 70-75.
- [19] Saskoil S S, Butler R M. The production of conventional heavy oil reservoirs with bottom water using steam-assisted gravity drainage [J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 1990, 29(2): 78-86.
- [20] 周惠忠, 王利群. 二维油藏物理模拟装置[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 1994, 34(3): 74-82.
- ZHOU Huizhong, WANG Liqun. A 2-dimension modeling system for oilreservoir [J]. *Journal of Tsinghua University: Natural Science Edition*, 1994, 34(3): 74-82.
- [21] 王家禄, 沈平平, 李振泉, 等. 交联聚合物封堵平面非均质油藏物理模拟[J]. *石油学报*, 2002, 23(3): 60-64.
- WANG Jialu, SHEN Pingping, LI Zhenquan, et al. Experimental investigation of crosslink polymer plugging in horizontal heterogeneous reservoir [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2002, 23(3): 60-64.
- [22] 沈平平, 王家禄, 田玉玲, 等. 三维油藏物理模拟的饱和度测量技术研究[J]. *石油勘探与开发*, 2004, 31(Sup): 71-75.
- SHEN Pingping, WANG Jialu, TIAN Yuling, et al. Saturation measurement technique for 3D reservoir physical modeling [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2004, 31(Sup): 71-75.
- [23] 王家禄, 沈平平, 陈永忠, 等. 三元复合驱提高原油采收率的三维物理模拟研究[J]. *石油学报*, 2005, 26(5): 61-66.
- WANG Jialu, SHEN Pingping, CHEN Yongzhong, et al. 3-D physical modeling of enhanced oil recovery by alkali-surfactant-polymer flooding [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2005, 26(5): 61-66.
- [24] 李宜强. 聚合物驱大平面模型物理模拟实验研究[D]. 河北: 中国科学院研究生院渗流流体力学研究所博士学位论文, 2006.
- [25] 徐轩, 刘学伟, 杨正明, 等. 特低渗透砂岩大型露头模型单相渗流特征实验 [J]. *石油学报*, 2012, 33(3): 453-458.
- XU Xuan, LIU Xuwei, YANG Zhengming, et al. An experimental study on single-phase seepage characteristics with a large-scale model made of ultra-low permeability sandstone outcrops [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(3): 453-458.
- [26] 薛成国, 何青, 杨正明, 等. 低渗透平板模型非线性渗流物理模拟实验研究 [J]. *西南石油大学学报*, 2011, 33(6): 101-104.
- XUE Chengguo, HE Qing, YANG Zhengming, et al. Experimental study of the nonlinear seepage with the two-dimensional physical model [J]. *Journal of Southwest Petroleum University*, 2011, 33(6): 101-104.
- [27] 薛成国. 特低渗透储层大型物理模拟实验研究[D]. 河北: 中国科学院研究生院渗流流体力学研究所博士学位论文, 2011.
- [28] 李彩云, 李忠兴, 周荣安, 等. 安塞油田长 6 特低渗储层特征 [J]. *西安石油学院学报: 自然科学版*, 2001, 16(6): 30-32.
- LI Caiyun, LI Zhongxing, ZHOU Rongan, et al. Characteristics of Chang-6 extra-low permeability reservoir in Ansai oil field [J]. *Journal of Xi'an Petroleum Institute: Natural Science Edition*, 2001, 16(6): 30-32.

- Technology, 1978, 30(2): 203-204.
- [20] Sitorus J, Sofyan A, Abdulfatah M Y. Developing a fractional flow curve from historic production to predict performance of new horizontal wells, Bekasap Field, Indonesia [C] // Proceedings of the SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition, September 11-13, 2006, Adelaide, Australia. [S.l.]: SPE, 2006: 101144.
- [21] Lo K K, Warner H R, Johnson J B. A study of the post-breakthrough characteristics of waterfloods [C] // Proceedings of SPE California Regional Meeting, April 4-6, 1990, Ventura, California. [S.l.]: SPE, 1990: 20064.
- [22] Ershaghi I, Abdassah D. A prediction technique for immiscible processes using field performance data [J]. Journal of Petroleum Technology, 1984, 36 (4): 664-670.
- [23] 蒋明, 宋富霞, 吴行才. 含水率与时间关系数学模型的建立及应用[J]. 石油勘探与开发, 1999, 26(1): 65-67. JIANG Ming, SONG Fuxia, WU Xingcai. Building and application of a mathematical model for water cut and time relationship [J]. Petroleum Exploration and Development, 1999, 26(1): 65-67.
- [24] 许寒冰, 李相方, 石德佩, 等. 注采井网生产井含水率解析计算方法[J]. 石油学报, 2010, 31(3): 471-474. XU Hanbing, LI Xiangfang, SHI Depei, et al. An analytical method for calculating water cut of producers in injection-production pattern [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(3): 471-474.
- [25] Li H, Zhu D, Lake L W, et al. A new method to interpret two-phase profiles from temperature and flow meter logs [C] // Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, October 3-6, 1999, Houston, Texas. [S.l.]: SPE, 1999: 56793.
- [26] John F, Scott F H, Brent D C, et al. An improved simulation for interpreting temperature logs in water injection wells [J]. SPE Journal, 1982, 22(5): 709-718.
- [27] 姚恒申, 向开理, 李治平. 油藏含水饱和度的泊松过程分析方法[J]. 系统工程理论与实践, 1999 (3): 137-142. YAO Hengshen, XIANG Kaili, LI Zhiping. Analytical forecasting for water saturation of reservoirs [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 1999 (3): 137-142.

(编辑 张 苹)

(上接第 34 页)

- [29] 李怒军, 吴志宇, 张金亮, 等. 安塞油田王窑区长 6 油层储层地质[J]. 西安石油学院学报: 自然科学版, 1998, 13(4): 34-39. LI Shujun, WU Zhiyu, ZHANG Jinliang, et al. Reservoir geology of Chang-6 oil-bearing formation in Wangyao Tract, Ansai oil field [J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute: Natural Science Edition, 1998, 13(4): 34-39.
- [30] 吕成远, 王建, 孙志刚. 低渗透砂岩油藏渗流启动压力梯度实验研究[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(2): 86-89. Lü Chengyuan, WANG Jian, SUN Zhigang. An experimental study on starting pressure gradient of fluids flow in low permeability sandstone porous media [J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(2): 86-89.
- [31] 杨正明, 于荣泽, 苏致新, 等. 特低渗透油藏非线性渗流数值模拟[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(1): 94-98. YANG Zhengming, YU Rongze, SHU Zhixin, et al. Numerical simulation of the nonlinear flow in ultra-low permeability reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(1): 94-98.
- [32] 熊伟, 雷群, 刘先贵, 等. 低渗透油藏拟启动压力梯度[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(2): 731-734. XIONG Wei, LEI Qun, LIU Xiangui, et al. Pseudo threshold pressure gradient to flow for low permeability reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(2): 232-236.
- [33] 时宇, 杨正明, 黄延章. 低渗透储层非线性渗流模型研究[J]. 石油学报, 2009, 30(5): 731-734. SHI Yu, YANG Zhengming, HUANG Yanzhang. Study on non-linear seepage flow model for low-permeability reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(5): 731-734.

(编辑 张 苹)