

DOI:10.11720/j.issn.1000-8918.2013.5.21

薄互层砂岩油藏矢量布井方式

孙致学¹, 丁胜军², 张文哲³

(1. 中国石油大学 石油工程学院, 山东 青岛 266580; 2. 中石油新疆油田分公司 百口泉采油厂百重一作业区, 新疆 克拉玛依 834000; 3. 中石油西部钻探工程公司 试油公司, 新疆 克拉玛依 834000)

摘要: 薄互层砂岩油藏具有纵向厚度大、单层控制储量规模小、储层非均质性强等地质特点, 常规面积井网布井方式面临储量控制程度低、层间矛盾突出、采油速度低以及经济可行性差等问题, 导致油藏整体开发效果较差。立足于含油砂体的储层沉积学成因特征, 基于多孔介质渗流理论建立单砂体尺度的矢量井网布井方法, 推导单砂体平面非均质矢量井网井距的设计公式, 并根据井距设计公式构建物理模型开展平板模型水驱油实验, 应用油藏数值模拟方法对油藏尺度矢量井网部署进行应用, 形成薄互层砂岩油藏砂体叠置区域与非叠置区域的层系组合及布井方式的差异化开发技术对策。

关键词: 薄互层; 矢量井网; 物理实验; 油藏数值模拟

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2013)05-0872-04

薄互层砂岩油藏具有纵向厚度大、单层控制储量规模小、储层非均质性强等地质特点, 每个砂体具有独立水动力学系统。由于砂组纵向跨度大, 极为分散, 并且平面上油层变化快, 连续性差, 采用常规五点法开采时往往没有考虑砂体平面展布及物性分布特征, 面临能量不足、产量递减快、开发难度大、经济可行性差等问题, 因此选择合适的布井方式对该类油藏高效开发具有重要意义^[1-2]。笔者研究的目标区块为 NP12 井区某 H 组油藏, 属低丰度、低产、中浅埋深的小型油藏。其具有主力砂体面积小, 油层厚度薄(单油层厚度以 1.0 ~ 3.0 m 的占大多数), 空间跨度大(平均油层跨度为 316.4 m)的特点。为使 H 组油藏小油砂体变为经济可采储量来投入开发, 笔者基于矢量井网研究理论, 综合运用室内试验和数值模拟方法, 系统研究小油砂体有效动用方式, 提出对于非叠合区采用矢量井网理论与方法, 对平面井距参数进行优化, 形成薄互层砂岩油藏砂体叠置区域与非叠置区域的层系组合及布井方式的“差异化”开发技术对策。

1 非均质油藏矢量井网提高波及系数机理

1.1 实验原理

油藏储层的沉积学成因决定了碎屑岩储层渗透率的具有较强的方向性, 即地质矢量性。若井网部

署中忽略了渗透率矢量性, 则水驱开发过程中容易造成注入水快速驱替, 波及不均衡, 影响非均质性油藏的水驱开发效果^[3-4]。对于一个特定的井网系统, 要达到完全均衡的驱替是不可能的。但是井网设计时, 必须最大限度地追求相对较高的均衡驱替。矢量井网是指为减轻储层地质矢量和非均质因素的负面影响, 实现均衡、合理驱替, 提高注入水波及系数, 改善开发效果而发展起来的井网部署理论^[5-6]。

文中以 NP12 井区某 H 组油藏地质特征为主要背景, 考虑主河道砂体基本上沿主河道对称分布的特征, 简化的地质模型如图 1。

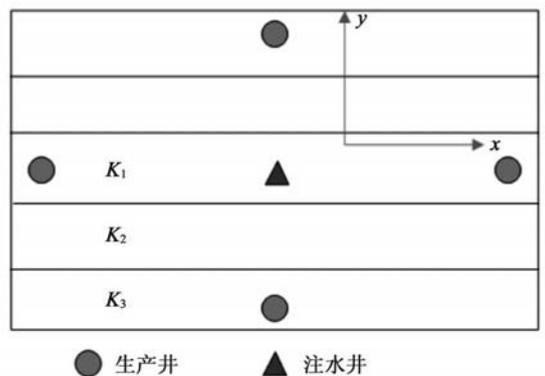


图 1 非均质油藏简化模型

主河道和其他沉积体的渗透率为 K_1 、 K_2 和 K_3 , 注采井的分布形式为:主河道中 2 口生产井,1 口注水井,在主河道两侧对称分布 2 口生产井。由于主河道渗透率较高,注入水主要沿高渗透方向突进,因此,控制渗流的渗透率为主河道的渗透率,表示为 K_x ,而注水井向生产井渗流的沿程阻力为各个渗透带的渗流阻力之和,其渗流能力(即渗透率)采用平均渗透率

$$K_y = \sum K_i h_i / \sum h_i。$$

替代。要使 x 和 y 方向生产井注入水同时突破,那么井距应调整。根据渗流力学,推导如下:令井距为 L ,对任意(x 或 y)方向,当油水界面距离注水井为 x 时,界面上的压力为 p_x ,水井井底压力为 p_1 ,油井井底压力为 p_2 。假设水驱油过程为活塞式驱替, A 为驱替方向上的渗流面积, μ_o 和 μ_w 分别为油、水黏度; Q_o 和 Q_w 分别为驱替方向上油、水体积流量;油水界面两侧的渗透率为 $K_w = K_x K_{\text{rwx}}$, $K_o = K_x K_{\text{roswi}}$,其中 K_{rwx} 和 K_{roswi} 分别为油水前沿处的水相相对渗透率和束缚水条件下的油相相对渗透率^[7]。根据达西定律^[8-9],并稍作变换可得

对水相渗流:

$$p_1 - p_x = \frac{Q_w \mu_w x}{AK_w}, \quad (1)$$

对油相渗流:

$$p_x - p_2 = \frac{Q_o \mu_o (L - x)}{AK_o}。 \quad (2)$$

对于定压差生产 $\Delta p = p_1 - p_2 = \text{定值}$,将式(1)和式(2)两端相加得

$$\Delta p = \frac{Q_w \mu_w x}{AK_w} + \frac{Q_o \mu_o (L - x)}{AK_o}。 \quad (3)$$

根据物质守恒,油水界面渗流速度为

$$v_x = \frac{Q_w}{A_{\text{ew}}} = \frac{Q_o}{A_{\text{eo}}}, \quad (4)$$

$$A_{\text{ew}} = A(1 - S_{\text{wi}} - S_{\text{or}}), A_{\text{eo}} = A(1 - S_{\text{wi}})。 \quad (5)$$

式中: S_{wi} 为束缚水饱和度; S_{or} 为残余油饱和度。将式(4)、式(5)代入式(3)可得

$$v_x = \frac{\Delta p}{\frac{(1 - S_{\text{wi}} - S_{\text{or}})\mu_w x}{K_w} + \frac{(1 - S_{\text{wi}})\mu_o (L - x)}{K_o}}。 \quad (6)$$

由物理学可知,位于 x 处的油水界面的平均孔隙速度为该界面位置在单位时间内的变化量,即

$$u_x = dx/dt。 \quad (7)$$

而渗流速度与平均孔隙速度(即真实运动速度)之间存在以下关系

$$v_x = \phi_x u_x = \phi_x dx/dt。 \quad (8)$$

式中: ϕ_x 为孔隙度。将式(8)代入式(6)得到

$$\phi_x \frac{dx}{dt} = \Delta p \left/ \left[\frac{(1 - S_{\text{wi}} - S_{\text{or}})\mu_w x}{K_w} + \frac{(1 - S_{\text{wi}})\mu_o (L - x)}{K_o} \right] \right.。 \quad (9)$$

对 x 从 0 到 L 积分得到见水时间 T

$$\int_0^T \Delta p dt = \int_0^L \phi_x \left[\frac{(1 - S_{\text{wi}} - S_{\text{or}})\mu_w x}{K_w} + \frac{(1 - S_{\text{wi}})\mu_o (L - x)}{K_o} \right] dx,$$

$$T = \frac{\phi_x \mu_w L^2}{2K_w \Delta p} \left[(1 - S_{\text{wi}} - S_{\text{or}}) + (1 - S_{\text{wi}})M \right]。 \quad (10)$$

式中: $M = (K_w/\mu_w)/(K_o/\mu_o)$ 为流度比。式(10)表明,见水时间除了受渗透率、孔隙度、生产压差和注采井距控制外,还受流度比和驱油效率的影响^[10], x 方向生产井见水时间为

$$T_x = \frac{\phi_x \mu_w L^2}{2K_{\text{wx}} \Delta p} \left[(1 - S_{\text{wi}} - S_{\text{or}}) |_x + (1 - S_{\text{wi}}) |_x M_x \right]。 \quad (11)$$

y 方向生产井见水时间为

$$T_y = \frac{\phi_y \mu_w L^2}{2K_{\text{wy}} \Delta p} \left[(1 - S_{\text{wi}} - S_{\text{or}}) |_y + (1 - S_{\text{wi}}) |_y M_y \right]。 \quad (12)$$

调整方向井距的目的是使 x 和 y 方向生产井见水时间相等,即在相同生产压差下 $T_x = T_y$,经整理得到

$$L_x/L_y = \sqrt{\frac{K_x \phi_x K_{\text{rwx}} [(1 - S_{\text{wi}} - S_{\text{or}}) |_y + (1 - S_{\text{wi}}) |_y M_y]}{K_y \phi_y K_{\text{rwy}} [(1 - S_{\text{wi}} - S_{\text{or}}) |_x + (1 - S_{\text{wi}}) |_x M_x]}} \quad (13)$$

在实际应用中,如果同一油藏中,不同方向上的油水黏度分别都是相等的,其束缚水饱和度、残余油饱和度以及流度比也比较接近,那么式(13)可以简化为

$$L_x/L_y = \sqrt{(K_x \phi_x)/(K_y \phi_y)}。 \quad (14)$$

如果同一油藏中不同方向上的孔隙度近似相同,那么式(14)可以进一步简化为^[11]

$$L_x/L_y = \sqrt{K_x/K_y}。 \quad (15)$$

式(15)即为同一个油藏考虑地质矢量影响条件下矢量井距公式,根据该公式计算的注采井距进行点状注水时,从理论上注入水能同时到达不同的两口生产井,达到均衡驱替、波及体积最大的目标。

1.2 非均质油藏矢量井网驱油机理物理实验

本次实验目的是根据水驱油藏开采物理模拟相似准则,设计 NP 井区某 H 组油藏平板相似比例模型,建立了五点法注采井网油藏物理模拟系统。模

型几何尺寸为 300 mm × 300 mm × 50 mm。模型为平板模型,不同粒径的石英砂混合装填达到所需的渗透率。实验模型的材料选为有机玻璃(聚甲基丙烯酸甲酯,PMMA)。实验装置由实验模型、驱替系统、采出液收集系统、控制及测量系统等部分组成。

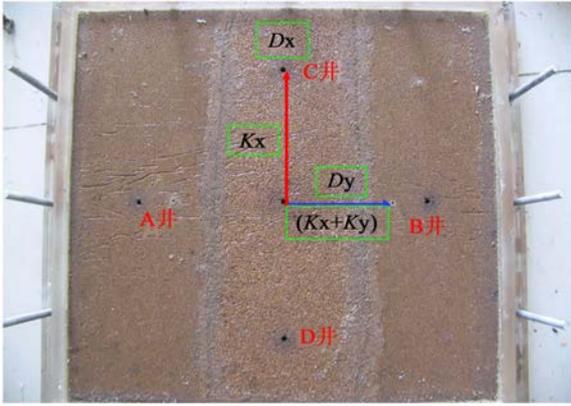


图2 非均质平板物理模型

1.3 实验结果与分析

图3和图4为平面非均质性油藏分别采用常规井网形式和矢量井网形式的注入体积与含水率变化关系曲线。从图中可以看出,采用常规等井距五点井网开采时,不同方向上生产井见水时间差别较大,当A、B井见水时,C、D井含水高达50%;同时,见水后C、D井含水上升较快,非均质水驱波及程度在方向上极度不均衡,导致最终开发效果变差。应用矢量井网理论,根据砂体厚度加权平均,求的 x, y 方向等效渗透率,然后调整高渗透方向即C、D的与注水井的注采井距。实验结果表明,采用矢量井网开发模式延缓了油井见水时间及无水采油期,达到极限含水率的时间相近,不同方向4口生产井的含水率变化趋势相近,具体表现为见水时间相近,含水率上升趋势变缓,体现出平面非均质油藏采用矢量井网

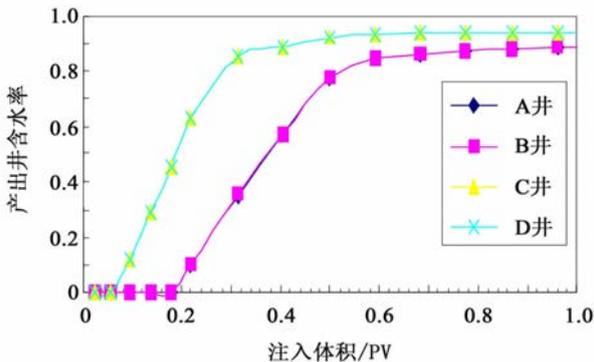


图3 等井距注入体积与含水率关系

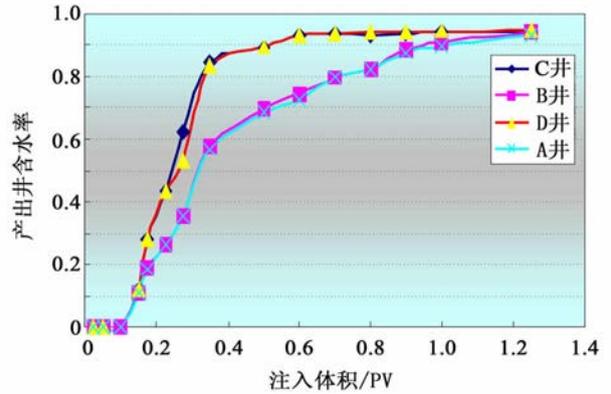


图4 矢量井距注入体积与含水率关系

的开发优势。对于平面非均质性油藏,矢量井网开发能够减轻储层地质矢量和非均质因素的负面影响,增大非均质油藏的波及系数,基本实现均衡、合理驱替,改善水驱开发效果。

2 非均质油藏模拟及井位优化

考虑 NP12 井区某 H 组油藏主河道砂体分布特征,建立油藏数值模拟模型(图5)。该模型北部为砂体非叠置区,注采井的分布形式为主河道中 2 口生产井,1 口注水井,在主河道两侧对称分布 2 口生产井。由于主河道渗透率较高,原井位设计方式将会导致注入水沿高渗透方向突进,因此开展了针对非叠合区的矢量井网理论为指导的不规则布井的方案—沿主河道拉长生产井井距,井距从 200 m 增加到 550 m。对比两种布井方式采收程度曲线可以看出(图6),矢量井网布井方式最终开发效果较好,采出程度较高。

针对砂体叠置区的面积注采井网,同时开采两

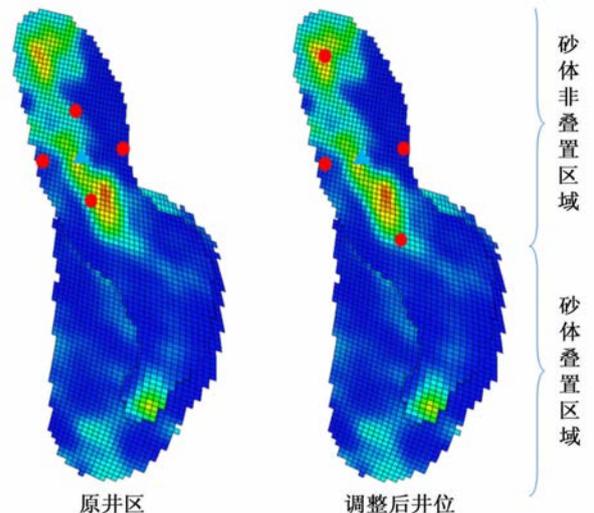


图5 非叠置区域布井方式示意

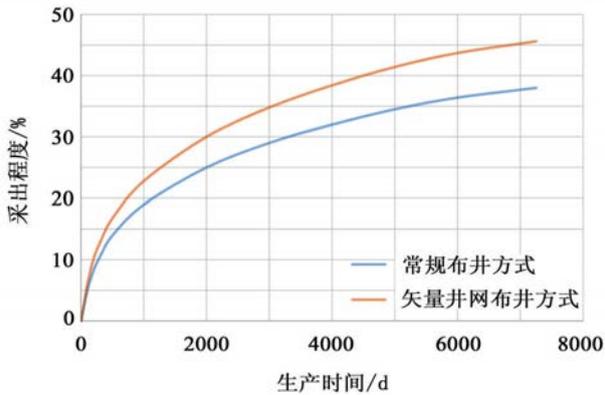


图6 常规布井方式与矢量井网布井方式采出程度对比

个小层,分别设计了八种不同井网形式,其中五点法(2)、七点法(2)、反七点法(2)均为在常规井网形式的基础上,使得生产井井排方向沿西南—东北方向,如图7所示。

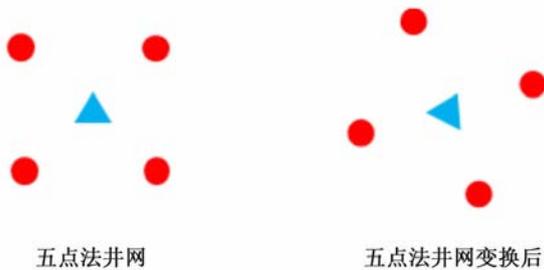


图7 井网形式变换示意(以五点法为例)

图8为不同井网形式采收率数值模拟,研究结果表明:由于NP井区储层沉积特征,沿物源向南逐步演变为河口砂坝沉积,储层条件逐渐变差,五点法(2)、反七点法(2)主要生产井井排方向均为西南—

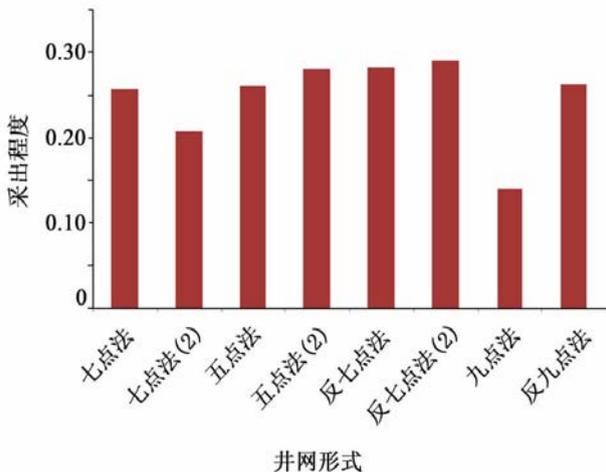


图8 不同井网形式最终采收率对比

东北方向,相同条件下该方向上的油井初期产能要比西北—东南方向的生产井高,因此开发效果较好。

综合考虑开采成本及调整方式,由于目前本区叠置区采用反九点进行开发,可以考虑开发中后期应该通过老井转注、加密钻井等措施逐步变化井网形式。

3 结论

(1) 考虑渗透率矢量性,推导了矢量井网井距计算公式,该方程能够计算点状注水时的使得不同方向注水井同时见水的注采井距。

(2) 物理实验研究表明,对于平面非均质性油藏,矢量井网开发可以减轻储层地质矢量和非均质因素的负面影响,改善水驱开发效果。

(3) 数值模拟研究表明,对于单砂体非叠合油藏,通过矢量井网理论优化点状注水井位,可以改善开发效果,进一步提高油田开发的经济效益。其非叠置区域最优注采井距为550 m,叠置区在当前反九点井网形式下可考虑后期转注及加密调整为生产井井排方向沿西南—东北方向的反七点井网。

参考文献:

- [1] 王志杰,青强,李春芹. 薄互层特低渗透油藏大型压裂弹性开发研究[J]. 石油与天然气学报,2006,28(1):115-117.
- [2] 陈冬,魏修成,季玉新. 卡拉沙依薄互层岩性识别技术[J]. 物探与化探,2010,34(3):320-323.
- [3] Rose W. Permeability anisotropy in low permeability formations [J]. SPE 10810,1980:195-201.
- [4] Gatens J M, Lee W J. The effects of permeability anisotropy on the evaluation and design of hydraulic fracture treatments and well performance [J]. SPE 21501,1991:211-222.
- [5] 刘德华,李士伦,吴军. 矢量化井网的概念及布井方法初探 [J]. 江汉石油学院学报,2004,26(4):110-111.
- [6] Larry W L. The origins of anisotropy [J]. Journal of Petroleum technology,1988,40(4):395-396.
- [7] 周永沂. 渗透率各向异性油藏的开发对策研究 [J]. 西南石油学报,2005,27(6):.
- [8] 葛家理. 油气层渗流力学 [M]. 北京:石油工业出版社,1982.
- [9] Dake L P. Fundamentals of reservoir engineering [M]. Elsevier Scientific Publishing Company,1978:107-108.
- [10] 李传亮. 双重各向异性介质的发现及其渗透率数学模型的建立 [J]. 中国海上油气:地质,1997(11):4.
- [11] 李传亮,李炼民. 各向异性地层的井距设计研究 [J]. 新疆石油地质,2003,24(6):559-561.

THE INFLUENCE OF ECOGEOCHEMICAL ENVIRONMENT ON THE QUALITY OF GREEN TEA IN RIZHAO CITY

WANG Cun-long¹, CAI Qing¹, ZHANG Zu-lu², ZHENG Wei-jun¹, LIU Guang-bo³, YU Chao¹

(1. Shandong Institute of Geological Survey, Jinan 250013, China; 2. College of Population, Resources and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250014, China; 3. Shandong Institute of Surveying and Mapping of Geology, Jinan 250014, China)

Abstract: Based on a systematic analysis of geological and geochemical environment of Rizhao tea-producing area, the authors hold that terrain, geomorphology, soil physical and chemical properties and elements content have important effects on tea quality. The correlation between total soil elements quantity and tea quality is not obvious, but the abundance and deficiency of effective elements have great impact on the tea quality. When the content of the available N, SiO₂ is relatively high, the content of free amino acids, caffeine and total ash in the tea will be higher, and the tea quality will be also higher. When the pH value of the soil and the effective content of Ca, Mg are comparatively high, the content of free amino acids, caffeine and total ash, and flavonoids in the tea will decrease, and the quality of the tea will also decrease. The correlation between water extracts and most effective elements is relatively obvious. The results obtained by the authors provide the basis for programming of Rizhao green tea producing area and south-to-north tea transfer.

Key words: geochemistry; ecological environment; Rizhao green tea; quality influence

作者简介: 王存龙(1962 -),男,研究员,主要从事地球化学勘查及生态地球调查与评价工作。E-mail: WCL598@163.com。

上接 875 页

A STUDY OF VECTOR WELL PATTERN OF THIN INTERBEDDED SANDTONE OIL RESERVOIR

SUN Zhi-xue¹, DING Sheng-jun², ZHANG Wen-zhe³

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China; 2. Baikouquan Oil Production Plant, Xinjiang Oil Field Company, PetroChina, Karamay 834000, China; 3. Well Test Department, Western Drilling Engineering Company, Karamay 834000, China)

Abstract: Thin interbedded sandstone reservoir has such characteristics as great thickness, small monolayer control reserves and strong heterogeneity. If the conventional areal well pattern is used, the reservoir will have a poor overall development effect characterized by low reserves control degree, serious contradiction between layers, low recovery rate and poor economic feasibility. According to the sedimentologic features of the oil-bearing sand body, the method of vector well pattern placement in single sand body scale is established based on porous media seepage theory, and a well spacing design formula of vector well pattern for single sand body with areal heterogeneity is provided. On the basis of physical model developed by the provided well spacing design formula, the water/oil displacement experiment on planar models is launched. With the application of reservoir scale vector well pattern placement by reservoir numerical simulation, a specific development strategy of series of strata assemblage and well placement for superimposed area and non superimposed area of interbedded sandstone reservoir is established.

Key words: thin interbed oil reservoir; vector well pattern; physics experiment; oil reservoir digital simulation

作者简介: 孙致学(1979 -),男,毕业于中国石油大学(华东),主要从事油藏描述和油藏工程研究工作。