文章编号: 0253-2697(2006)04-0085-04

# 水平井与垂直井联合井网波及系数研究

### 武兵厂 姚 军 吕爱民

(中国石油大学石油工程学院 山东东营 257061)

摘要:利用数值模拟方法对五点法、七点法、九点法注水方式不同见水时刻水平井与垂直井联合井网的波及系数进行的研究结果 表明,油水流度比、水平井穿透比及水平井与水平方向的夹角对 3 种联合井网波及系数的影响较大。在对各种影响因素分析对比 的基础上,得出了各影响因素与波及系数的关系曲线,并对数值模拟结果进行了回归,得到了联合井网的波及系数与各影响因素之 间的定量关系。

关键词: 注水开发;波及系数;水平井;垂直井;联合井网;数值模拟 中图分类号: TE319 **文献标识码**: A

### Research on sweep efficiency in horizontal-vertical combined well pattern

Wu Bingchang Yao Jun L ÜAimin

(College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

Abstract: The sweep efficiency of horizontal-vertical combined well patterns at water-breakthrough time with five-spot, seven-spot and nine-spot water-injection methods was simulated numerically. The result shows that mobility ratio of oil to water, penetrating ratio of horizontal well and included angle between horizontal well and horizontal axis have great influences on sweep efficiency of three combined well patterns. On the basis of analysis and contrast of the influencing factors, the curves of influencing factors related to sweep efficiency were drawn. The simulation results were regressed, and the quantitative relations between sweep efficiency and its influencing factors were gained.

Key words: waterflood development; sweep efficiency; horizontal well; vertical well; combined pattern; numerical simulation

近年来,水平井开采技术在世界各油田中得到了 越来越广泛的应用,对水平井开采技术的研究也有了 很大的进展<sup>[1-3]</sup>。目前垂直井面积井网的波及系数研 究已经比较成熟,影响垂直井面积井网波及系数的主 要因素是原油粘度<sup>[4-8]</sup>。郎兆新等人对五点法和七点 法水平井与垂直井的联合井网的开发指标进行了理论 研究<sup>[9-10]</sup>,同时也对井网的波及系数进行了分析。笔 者利用数值模拟方法,对五点法水平井与直井联合井 网的波及系数进行了研究,分析了波及系数的影响因

### 素及其之间的关系。

# 1 地质模型的建立

模拟研究中采用 60 ×60 ×1 的单层网格模型,中 心水平井为注水井,周围垂直井为生产井。2 口垂直 井的井距(2*a*)为 600 m,地层厚度为 5 m。不同井网的 示意图见图 1。

模型中地层和流体参数取值:渗透率为 0.3 µm<sup>2</sup>; 原始地层压力为18 MPa;地层深度为2 000 m;孔隙度



### 图 1 水平井与垂直井联合井网示意图



基金项目 :国家高技术研究发展计划(863)项目(2004AA616170)部分成果。 作者简介 :武兵厂 ,男 ,1975 年 3 月生 ,2005 年获中国石油大学(华东)硕士学位 ,现为法国 PCM 泵业(北京)公司技术主管 ,主要从事螺杆泵的应用研 究及水平井油藏工程研究工作。E-mail :bwu @pcmpompes.com 为 0.2;岩石体积系数为 5.1 ×10<sup>-4</sup> MPa<sup>-1</sup>;地层水压 缩系数为 3.5 ×10<sup>-4</sup> MPa<sup>-1</sup>;原油密度为 0.85 ×10<sup>-3</sup> kg/m<sup>3</sup>;地层水的密度为 1000 kg/m<sup>3</sup>。

# 2 模拟方案的设计

水平井波及系数 *E*<sub>A</sub> 的影响因素有油水流度比 *M*、水平井穿透比 (= /*L*)和水平井与水平方向的夹 角 。模型中这 3 个因素的水平数如表 1 所示。

表1 波及系数影响因素

	Table 1	Influencing fac	ctor of sweep eff	ficiency
	流度比	水平井穿透比		- 
囚 系	М	五点法	七点、九点法	※用 / ( )
各因素 水平数	1	0	0	0
	5	0. 25	0. 2	22.5 (五点、九点法)
	10	0.50	0.4	45
	20	0.75	0. 6	90(七点法)
	30	1.00	0.8	_

油水流度比 M 的定义为

$$M = \frac{K_{\rm rw}(\underline{S}_{\rm w})/\mu_{\rm w}}{K_{\rm ro}(\underline{S}_{\rm wi})/\mu_{\rm s}}$$

式中  $\overline{S_w}$  为油、水前缘中水的平均含水饱和度;  $\mu_o$  为 地层原油粘度, mPa ·s;  $S_w$ ; 为束缚水饱和度;  $\mu_w$  为地层 水粘度, mPa ·s;  $K_{rw}(\overline{S_w})$  为油水前缘中含水饱和度时 的水相相对渗透率;  $K_{ro}(\overline{S_{wi}})$  为束缚水饱和度时油相 的相对渗透率。

## 3 数值模拟结果及分析

图 2 ~ 图 5 给出了五点法及七点法水平井与直井





Fig. 2 The relative curves of sweep efficiency with mobility ratio for five-spot well pattern



图 3 五点法波及系数与穿透比的关系曲线

Fig. 3 The relative curves of sweep efficiency with penetrating ratio for five-spot well pattern



Fig. 4 The relative curves of sweep efficiency with mobility ratio for seven spot well pattern

联合井网夹角 为 0 ° 45 和 90 °的水平井见水时刻井 网的波及系数 *E*<sub>A</sub> 与油水流度比 *M* 和穿透比 的关系 曲线。从中可见,九点法水平井与直井联合井网的关 系曲线与五点法基本相似。



#### 图 5 七点法波及系数与穿透比的关系曲线

Fig. 5 The relative curves of sweep efficiency with penetrating ratio for seven-spot well pattern

从图中可以看出:

3 种不同的水平井与直井联合井网见水时刻的波 及系数 *E*<sup>A</sup> 与油水流度比 *M* 呈幂函数关系。图 2 中的 各条曲线的回归式如下:

> $= 0, E_{A} = 0.7521 M^{0.0649}, R^{2} = 0.9845$ = 0.25,  $E_{A} = 0.7164 M^{0.0646}, R^{2} = 0.9913$ = 0.50,  $E_{A} = 0.6444 M^{0.0577}, R^{2} = 0.9934$ = 0.75,  $E_{A} = 0.5801 M^{0.066}, R^{2} = 0.9985$ = 1.0,  $E_{A} = 0.5329 M^{0.0984}, R^{2} = 0.9826$

式中 R<sup>2</sup> 为复相相关系数。

3 种不同联合井网见水时刻的波及系数都随油水 流度比的增大而减小。这主要是因为随着油水流度比 的增加,水的指进现象更加明显,使得见水时刻的波及 面积减小。

3 种不同联合井网见水时刻的波及系数 Ea 与水

平井穿透比 呈直线关系。图 4 中的各条曲线的回归 式如下:

$M = 0.2$ , $E_{\rm A} = -0.262 + 0.8598$ , $R^2 = 0.9931$
$M = 0.5$ , $E_{\rm A} = -0.2352 + 0.7882$ , $R^2 = 0.9932$
$M = 1.0$ , $E_A = -0.2128 + 0.7532$ , $R^2 = 0.9927$
$M = 5.0$ , $E_A = -0.1868 + 0.6628$ , $R^2 = 0.9932$
$M = 10$ , $E_{\rm A} = -0.1988 + 0.6476$ , $R^2 = 0.998$
$M = 20$ , $E_{\rm A} = -0.2136 + 0.635$ , $R^2 = 0.9915$
$M = 30$ , $E_{\rm A} = -0.2292 + 0.6292$ , $R^2 = 0.9905$
$M = 50$ , $E_{\rm A} = -0.2124 + 0.599$ , $R^2 = 0.9933$

波及系数随水平井穿透比的增加而呈直线递减。 这主要是因为随着水平井穿透比的增加,注水井与水 平井之间的主流线方向发生了变化,使得见水时间变 小,从而使得见水时的波及系数变小。

在流度比 *M*、穿透比 和夹角 相同的条件下,五 点法联合井网见水时刻的波及系数大于七点法和九点 法的波及系数。这主要是由于七点法和九点法井网中 水平井与最近边井的距离要小于五点法井网中的距离 的缘故。

当油水流度比小于 5 时,3 种联合井网的波及系数随流度比的增大而急剧减小;当油水流度比大于 5 时,波及系数随流度比的增大而缓慢减小。

对于不同的井网,水平井与水平方向的夹角 对 波及系数的影响不同。对于五点法井网,波及系数随 夹角 的增大而减小;对于七点法和九点法井网,波及 系数随夹角 的增大而增大。这主要是由于对不同的 井网,水平井与最近边井的距离随夹角 的增大而有 着不同的变化。对于五点法井网,水平井与最近边井 的距离随夹角 的增大而减小;对于七点法和九点 法井网,水平井与最近边井的距离随夹角 的增大而 增大。

从上面的分析可以看出,油水流度比 *M*、水平井 穿透比 和水平井与水平方向的夹角 对波及系数 *E*<sub>A</sub>均有较大的影响。将波及系数 *E*<sub>A</sub>看作是流度比 *M*、穿透比 和角度 的函数,对模拟结果进行了非线 性回归,得出了 3种井网见水时刻波及系数的经验 公式:

五点法井网( $R^2 = 0.9508$ )为

$$E_{\rm A} = 0.\ 255\ 9\ M^{-0.\ 153\ 4} - 0.\ 471\ 9 + \\0.\ 207\ 9\ (\cos\ )^{19.\ 966\ 7} + 0.\ 207\ 9 \qquad (1)$$
  
七点法井网 ( $R^2 = 0.\ 921\ 5$ )为

$$E_{\rm A} = 0.228 \, 8 \, M^{+0.3138} - 0.4062 +$$

$$0. \ 225 \ 2^{-1. \ 304 \ 8} + 0. \ 26 \tag{2}$$

九点法井网( $R^2 = 0.9667$ )为

$$E_{\rm A} = 1. \ 894 \ 9 M^{-0.2357} - 0. \ 624 \ 7 + 0. \ 114 \sin - 1. \ 244 \ 3 \tag{3}$$

# 4 结 论

(1)油水流度比、水平井的穿透比及水平井与水 平方向的夹角对五点法水平井与直井联合井网的波及 系数有较大的影响。

(2) 五点法水平井与直井联合井网见水时刻的波及系数与油水流度比呈幂函数关系。3 种不同联合井 网见水时刻的波及系数都随油水流度比的增大而减 小。波及系数与穿透比呈直线关系。波及系数随水平 井穿透比的增加而呈直线递减。在相同的条件下,五 点法联合井网见水时刻的波及系数要大于七点法和九 点法的波及系数。

(3) 当油水流度比小于 5 时,3 种联合井网的波及系数随流度比的增大而急剧减小;当油水流度比大于5 时,波及系数随流度比的增大而缓慢减小。

(4) 对于五点法井网,波及系数随夹角 的增大 而减小。对于七点法和九点法井网,波及系数随夹角 的增大而增大。

(上接第 84 页)

由表 1 中可见,该井区井网调整后的采油速度和 水驱采出程度都有了一定程度的提高。通过不规则井 网优化模型得到的该井区的调整方案能够获得较好的 生产效益,可以运用于现场试验。

4.4 现场实施效果评价

2005 年 3 月中原油田根据井网调整优选方案 所提供的井点位置,布置了相应的采油井,获得了较好 的生产效果。截至 2005 年 9 月,该井区采油速度提高 了 0. 66 %,采出程度提高了 1. 46 %。

5 结 论

(1)建立了低渗透复杂断块油藏在复杂地应力条件下不规则并网优化模型,以驱油面积和采出程度为目标函数,充分考虑了任意裂缝方位与井网的匹配关系,为低渗透复杂断块油藏不规则井网的部署提供了依据。

(2)将压裂井的作用边界简化处理为椭圆,用椭圆面去覆盖给定的油藏区域。采用不同数学方法,得到该模型数学问题的不同最优解,通过建立实际油藏模型,以最高采出程度、采油速度为目标优选出最佳井

### 参考文献

- [1] 万仁溥.水平井开采技术[M].北京:石油工业出版社,1995:115 160.
- [2] 姚军,李爱芬,陈月明,等.盒状砂岩油藏中水平井试井分析方法
  [J].石油学报,1997,18(3):105-109.
- [3] 武兵厂,姚军,张继宏,等.水平井与直井联合井网见水时间的确 定方法[J].石油学报,2005,26(4):111-114.
- [4] 阿库利申 .油气田开发预测[M].周成勋,孙志道,译.北京: 石油工业出版社,1993:68-88.
- [5] 法兹雷耶夫 P T.油田面积注水[M].杨寿山,译.北京:石油工业 出版社,1989:51-83.
- [6] 奥尔诺夫 B C. 油田注水开发设计与分析[M]. 申中辉,译. 北京: 石油工业出版社,1982:147-169.
- [7] 秦同洛,陈元千.实用油藏工程方法[M].北京:石油工业出版 社,1989:250-266.
- [8] 姜汉桥,姚军,刘慧卿.油藏工程原理与方法[M].东营:石油大 学出版社,2000:17-30.
- [9] 曲德斌,葛家理,王德民.水平井与直井联合面积分布的开发理 论研究(一)[J].石油勘探与开发,1995,22(1):35-40.
- [10] 曲德斌,葛家理,王德民.水平井与直井联合面积分布的开发理 论研究(二)[J].石油勘探与开发,1995,22(2):47-51.

(收稿日期 2005-07-30 改回日期 2005-11-18 编辑 孟伟铭)

网方案。

(3) 将该模型运用于现场实践,取得了较好的生产效果。

#### 参考文献

- [1] 程世铭,张福仁.东辛复杂断块油藏[M].北京:石油工业出版社, 1997:98-101.
- [2] 李幼琼. 文明寨极复杂断块油藏[M]. 北京:石油工业出版社, 1997:71.
- [3] 李宗信,李幼琼,彭鹏商.复杂断块油田滚动开发技术研究[J].断 块油气藏,1995,2(3):24-28.
- [4] 余守德.复杂断块砂岩油藏开发模式[M].北京:石油工业出版 社,1998:1-2.
- [5] 张义堂,刘慈群.垂直裂缝井椭圆流模型近似解的进一步研究[J].石油学报,1996,17(4):71-77.
- [6] 邓英尔,刘慈群.两相流体椭圆渗流数学模拟与开发计算方法[J].石油学报,1999,20(5):48-53.
- [7] 杨能宇,张士诚,王鸿勋.整体压裂水力裂缝参数对采收率的影响[J].石油学报,1995,16(3):70-76.
- [8] 尹泽明,丁春利.精通Matlab 6[M].北京:清华大学出版社,2002:111-210.

(收稿日期 2005-08-31 改回日期 2005-11-02 编辑 孟伟铭)