

海上裂缝性低渗透油藏矩形井网合理井距研究 ——以渤海 B 油田为例

凌浩川, 周海燕, 孙 强, 杨 磊, 潘 杰

(中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院, 天津 300459)

摘要: 为了确定海上裂缝性低渗透油藏采用矩形五点法井网的合理井距, 尽量平衡海上少井高产与建立有效注采之间的矛盾, 根据谢卡尔乔夫公式提出了利用海上平均单井累产油最大化来确定油井井距的方法。方法计算结果表明: 随着井距的增加, 井组累产油呈现先增加后减少的趋势, 即存在一个最佳的井距使得井组累产油最高, 且这个最佳井距随着渗透率的增加而增大。该方法与考虑启动压力梯度的极限井距相结合可以综合判断海上裂缝性油藏采用矩形五点法井网开发的可行性, 指导海上裂缝性低渗透油藏合理井距的设计。

关键词: 海上油田; 低渗透油藏; 累产油; 天然裂缝; 合理井距;

中图分类号: TE312 **文献标志码:** A

Study on reasonable well spacing of rectangular well pattern in offshore natural fractured low permeability reservoirs: taking Bohai B Oilfield as an example

LING Haochuan, ZHOU Haiyan, Sun Qiang, YANG Lei, PAN Jie

(Bohai Oilfield Research Institute, CNOOC Ltd., Tianjin 300459, China)

Abstract: In order to determine the reasonable well spacing of rectangular five-point well pattern in offshore natural fractured low-permeability reservoirs, and to balance the contradiction between high production rate with few wells in offshore oilfields and the establishment of effective injection and production as far as possible, based on Chekarchev formula, a method for determining oil well spacing is proposed by using the maximization of total oil production of the average single offshore wells. The results of the method show that with the increase of the well spacing, the total oil production of the well group increases first and then decreases, that is, there is an optimum well spacing which makes the total oil production of the well group the highest, and the optimum well spacing increases with the increasing of the permeability. Combined with the limit well spacing considering the starting pressure gradient, this method can be used to synthetically judge the feasibility of using the rectangular five-point well pattern in offshore natural fractured reservoirs, guiding the design of reasonable well spacing in offshore natural fractured low permeability reservoirs.

Key words: offshore oilfield; low permeability reservoirs; total oil production; natural fracture; reasonable well spacing

陆上裂缝性低渗透油藏在投产初期大多采用正方形反九点或者菱形反九点井网开发^[1-3]。在开发过程中表现为与裂缝走向一致的生产井含水上升快, 甚至暴性水淹, 而与裂缝走向垂直的生产井见效差, 地层压力和产液能力低。侯建锋^[4]详细论证了裂缝性低渗透油藏的合理开发井网系统, 认为矩形五点法井网能够有效延缓生产井的水淹, 且可实施大规模压裂从而改善低渗透储层的供液以及吸水能力。从矿场实践看, 不管是在长庆油田还是在克拉玛依油田, 采用矩形五点法井网确实能有效延

缓生产井的水淹, 改善裂缝性低渗透油藏的开发效果^[4-7]。

渤海B油田是目前海上最大的低渗透油藏, 油田沙三段最大地质油藏特点是砂泥薄互层且天然

收稿日期: 2020-01-08; 改回日期: 2020-03-20。

第一作者简介: 凌浩川(1987—), 硕士, 工程师, 现从事油藏工程和数值模拟方面研究。E-mail: xuanmuzixu@163.com。

基金项目: “十三五”国家科技重大专项“渤海油田加密调整及提高采收率油藏工程技术示范”(2016ZX05058001)。

裂缝发育。油田共有生产井 16 口,有一半的生产井均采用衰竭开发,采油速度仅为 0.31%。

为了有效动用渤海 B 油田沙三段储量,提高该区域采油速度,借鉴陆上裂缝性低渗透油田的开发经验,计划采用矩形五点法井网来动用渤海 B 油田沙三段储量。但是海上低渗透油田较高的开发成本和建产成本要求油田平均单井累产油达到 $(8\sim 12)\times 10^4 \text{ m}^3$,几乎是陆上油田的 10 倍^[8-9]。较高的单井累产油要求海上油田采用少井高产的开发策略,而少井高产的开发策略会导致开发井距过大,低渗透油藏难以建立有效注采^[10-13]。为了确定海上裂缝性低渗透油藏采用矩形五点法井网的合理井距,尽量平衡海上少井高产和建立有效注采之间的矛盾,提出利用海上平均单井累产油最大化来确定油井井距的方法。该方法与考虑启动压力梯度的极限井距相结合,可以综合判断海上裂缝性油藏采用矩形五点法井网开发的可行性,指导海上裂缝性低渗透油藏井距的设计。

1 矩形五点法井网累产油理论公式

采用矩形五点法井网(如图 1 所示),井组的地质储量为

$$N = \frac{Ah\phi S_o}{B_o} = \frac{2L^2 h \phi S_o}{n B_o} \quad (1)$$

根据井网密度的定义得到井组的井网密度

$$S = \frac{2}{A} = \frac{n}{L^2} \quad (2)$$

式中: N 为地质储量, 10^4 m^3 ; A 为含油面积, m^2 ; h 为储层有效厚度, m ; L 为井距, m ; ϕ 为孔隙度; S_o 为含油饱和度; B_o 为体积系数; n 为井排距之比; S 为井网密度, $1/\text{km}^2$ 。

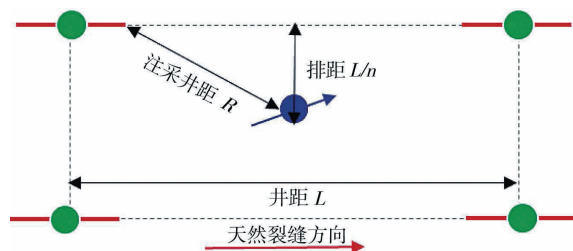


图1 裂缝性油藏五点法矩形井网示意

根据谢卡尔乔夫公式得到采收率计算公式^[10]

$$E_R = \frac{N_p}{N} = E_d e^{-a/s} \quad (3)$$

北京石油勘探开发科学研究院根据国内 144 个开发单元和油田的资料,统计得到如下计算井网指数的经验公式^[11]:

$$a = 18.14 \left(\frac{k}{\mu_o} \right)^{-0.4218} \quad (4)$$

式中: E_R 为采收率; N_p 为累产油, 10^4 m^3 ; N 为地质储量, 10^4 m^3 ; E_d 为驱油效率; a 为井网指数; μ_o 为地层原油黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; k 为渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

联立式(1)、(2)、(3)得到矩形五点法井组累产油理论公式

$$N_p = \frac{2E_d h \phi S_o}{B_o} \frac{L^2}{n} e^{-a \frac{L}{n}} \quad (5)$$

从式(5)可知,矩形五点法井组累产油理论公式综合考虑了储层物性、有效厚度以及井距对井组累产油的影响。

2 矩形五点法井网的累产油影响因素分析

根据渤海 B 油田的基本参数(见表 1),绘制了不同渗透率下累产油随井距变化的理论图版,如图 2 所示。由图 2 可以看出:随着井距的增加,累产油呈先增加后减少的趋势变化。采用矩形五点法井网开发存在一个最佳井距使得井组的累产油最大,且储层渗透率越大,最佳井距越大。对于渗透率只有 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层,其最佳井距在 400~450 m。

表1 渤海 B 油田沙三段基本参数

含油饱和度 / %	体积系数	孔隙度 / %	原油黏度 / (mPa·s)	驱油效率 / %
61.9	1.26	13	0.8	48

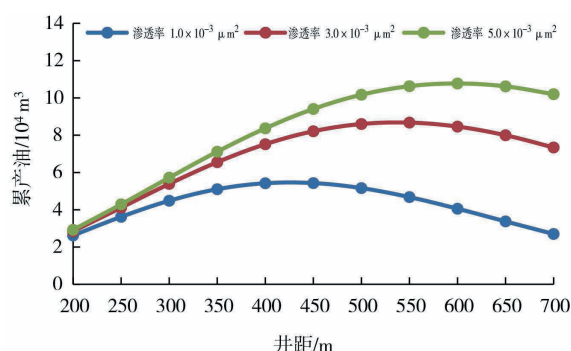


图2 不同渗透率和井距下的累产油($h=40 \text{ m}$, $n=3$)

对式(5)关于 $\frac{L^2}{n}$ 求导可以得知:当 $\frac{L^2}{n} = \frac{1}{a}$ 时, N_p

有最大值 $N_{pm} = \frac{2E_d h \phi S_o}{a e B_o}$; 此时

$$h = \frac{e B_o N_{pm} a}{2 E_d \phi S_o} = \frac{9.07 e B_o N_{pm}}{E_d \phi S_o} \left(\frac{k}{\mu_o} \right)^{-0.4218} \quad (6)$$

根据式(6)可以绘制井组达到最大累产油时的储层有效厚度和渗透率之间的关系,如图 3 所示。由图 3 可以看出:相同最大累产油条件下,随着储层物性变好,所需油藏的储层有效厚度变小。利用

该图版可以确定不同储层物性下,采用矩形五点法井网开发的储层有效厚度的下限值。以渤海 B 油田沙三段为例,其平均渗透率为 $2\times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$,若矩形五点法井组累产油达到 $8\times 10^4\text{ m}^3$,由图 3 可知储层有效厚度的下限值为 44 m。

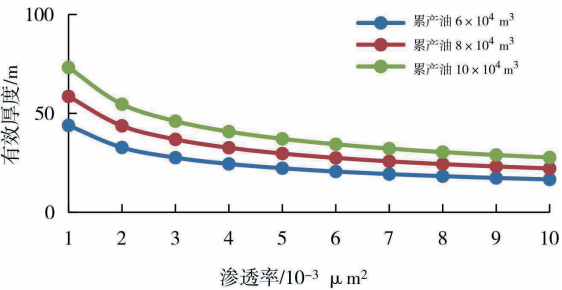


图3 最大累产油下的储层渗透率和有效厚度曲线($n=3$)

3 矩形五点法井网的有效注采分析

根据岩心实验结果,渤海 B 油田的启动压力梯度和流度之间存在如下关系^[8]:

$$\lambda=0.079\left(\frac{k}{\mu_o}\right)^{-0.97}\tag{7}$$

根据渗流理论,注采井之间的主流线中点处的压力梯度为^[12]

$$\lambda=\frac{\Delta p}{\ln R/r_w}\frac{2}{R}\tag{8}$$

渤海 B 油田最大的注采压差为 $\Delta p=30\text{ MPa}$,为了使低渗透油藏能够克服启动压力梯度,建立有效注采,联立式(7)、(8)可以求得渤海 B 油田不同物性下的最大注采井距(见表 2)。

表 2 渤海 B 油田不同物性下的最大注采井距和最佳油井井距

渗透率 / $10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$	最大注采井距 / m	油井井距 ($n=2$)/m	油井井距 ($n=3$)/m	油井井距 ($n=4$)/m
1	131	348	426	492
2	238	403	493	570
3	337	439	537	621
4	432	466	571	659
5	525	489	599	691

为了使海上裂缝性低渗透油藏能够实现矩形五点法井组累产油的最大化,利用 $\frac{L^2}{n}=\frac{1}{a}$ 可以求得不同物性下矩形五点法井网最佳的油井井距。对于裂缝性油藏,矩形五点法井排距之比 n 一般都大于 2($n=3$ 为正方形五点法)。由表 2 可知:相同物性下,采用矩形五点法井网开发,最佳油井井距大于最大注采井距,因此,需要采用人工压裂才能使注采井

间建立起有效注采。假设仅采用油井压裂方式(如图 1 所示),可以等效认为注水井与裂缝末端的距离为注采井距。根据几何关系可知:当注采井距大于或等于矩形五点法井网的排距时,则采用该井网可实现低渗透油藏的有效动用;当注采井距小于矩形五点法井网的排距时,则采用该井网不能实现低渗透油藏的有效动用。

4 实例应用

渤海 B 油田沙三段属于裂缝性低渗透油藏,渗透率为 $(1\sim 10)\times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$,岩心渗透率以 $1.0\times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$ 为主,占 55%。由表 2 可知:渗透率为 $1.0\times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$ 时,采用井距为 348,426,492 m 的矩形五点法井网,其对应的排距分别为 174,142,123 m。与渗透率为 $1.0\times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$ 时的最大注采井距 131 m 比较可知,只有井排距之比为 4 的矩形五点法井网才能使沙三段裂缝性低渗透油藏建立有效的动用。

利用式(3)和式(5)计算得到渤海 B 油田沙三段矩形五点法井网采收率和累产油曲线随井距变化的曲线(见图 4)。由图 4 可知:随着井距的增加,井组采收率逐渐降低;海上低渗透油藏要让油田先动用起来,必须要达到海上最低平均单井累产油的要求。因此,一次井网井距的选择,不可避免地要略微牺牲油田的采收率,以保证平均单井累产油的最大化。

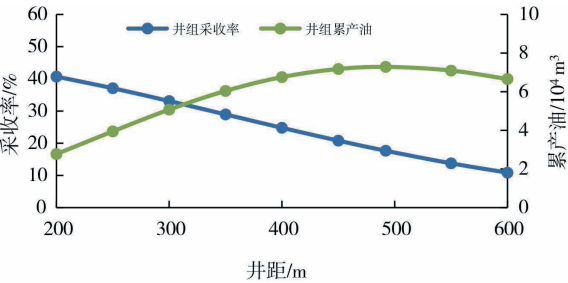


图4 渤海B油田沙三段矩形五点法井组累产油和采收率曲线($h=40\text{ m},n=4$)

5 结论和认识

- (1)根据谢卡尔乔夫公式推导了矩形五点法井网的井组累产油计算公式。公式计算结果表明:采用矩形井网开发存在一个最佳的井距使得井组的累产油最大,且储层渗透率越大,最佳井距越大。
- (2)结合启动压力梯度与流度的岩心实验规律,得到了渤海 B 油田的最大注采井距,与井组累产油最大化来确定最佳的井距相结合,可以判断矩形井网的可行性;当注采井距大于或等于矩形井网的排

距时,采用该井网可实现海上裂缝性低渗透油藏的有效动用。

(3)实例应用表明:要让海上低渗透油藏油田先动用起来,必须要达到海上最低平均单井累产油要求,因此,一次井网井距的选择,不可避免地要略微牺牲油田的采收率,以保证平均单井累产油的最大化。

参考文献:

- [1] 周锡生,徐启.低渗透油藏井网合理加密方式研究[J].大庆石油地质与开发,2000,19(5): 20-23.
- [2] 张威,梅冬,李敏,等.裂缝性低渗透油藏注采系统调整技术研究[J].大庆石油地质与开发,2006,25(6):43-46.
- [3] 刘晓娟,闫健,王瑞河.低渗透裂缝性见水油藏开发方式调整对比研究[J].西安石油大学学报(自然科学版):2009,24(6):29-32.
- [4] 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):2-10.
- [5] 庞宏伟,邓江洪.特低渗透裂缝型油藏矩形井网开发的实践[J].西安石油学院学报(自然科学版):2002,17(5):36-39.
- [6] 闫存章,李秀生,常毓文,等.低渗透油藏小井距开发试验研究[J].石油勘探与开发,2005,32(1):2-10.
- [7] 杨思玉,宋新民.特低渗透油藏井网型式数值模拟研究[J].石油勘探与开发,2001,28(6):2-10.
- [8] 徐文江.海上低渗透油田有效开发模式与理论研究[D].西南石油大学,2016.
- [9] 徐文江,谭先红,余焱冰,等.海上低渗透油田开发基本矛盾和主控因素研究[J].石油科技论坛,2013,32(5):12-16.
- [10] 邵运堂,李留仁,赵艳艳,等.低渗油藏合理井网密度的确定[J].西安石油大学学报(自然科学版):2005,20(5):41-44.
- [11] 敖科.低渗透油藏合理井网密度研究[D].西南石油大学,2006.
- [12] 王熙华.利用启动压力梯度计算低渗油藏最大注采井距[J].断块油气田,2003,10(6):75-76.
- [13] 杨鹏,徐莎,骆瑛,等.江苏油田特低渗透油藏三角形井网有效动用系数评价[J].复杂油气藏,2011,4(2):52-55.

(编辑 谢 葵)

《水平井差异化治理提高采收率技术》国际先进

6月3日,江苏油田科研成果《水平井差异化治理提高采收率技术》在扬州顺利通过中石化科技部组织的专家鉴定,整体达到国际先进水平。

《水平井差异化治理提高采收率技术》成果以江苏油田水平井为主要研究对象,将其划分为局部水淹、全井段水淹和低液低效3种类型;利用物理模拟、油藏工程方法、数值模拟等技术手段,开展了水平井水淹规律及水淹程度的定量化表征研究;根据每一种类型水平井在开发过程中的特点,开展了差异化治理技术研究,并在现场得到推广应用,取得了较好的治理效果。

该成果获得3项创新:一是基于物理模拟、油藏工程方法和数模手段,实现了水平井水淹程度的定量化表征;二是针对局部水淹水平井,研发了水平井测试找水工艺,配套了基于井筒状况的修井及堵水技术;三是针对水淹水平井“阁楼油”,探索研究了CO₂吞吐挖潜的可行性及选井规范。

研究成果已在江苏油田14个油田进行推广应用,针对不同类型水平井,开展了注采水驱优化、人工气顶和注CO₂吞吐的现场实践,取得了较好的治理效果,实现增油10.61×10⁴t,提高采收率2.2%。

(油科)