

海上油田聚合物驱极限井网密度研究 ——以渤海S油田为例

金 一^{1,2}, 唐恩高^{1,2}, 张 健^{1,2}, 康晓东^{1,2}, 王旭东^{1,2}

(1. 海洋石油高效开发国家重点实验室, 北京 100028; 2. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028)

摘要: 海上油田由于开发成本高, 经济效益直接决定着油田开发后期井网加密和聚合物驱两项技术实施的可行性, 经济极限井网密度的确定是海上油田开发后期的关键。为探究海上油田聚驱极限井网密度, 以渤海S油田为例, 通过数值模拟方法, 确定油田采收率与井网密度、聚合物浓度和注聚年限的关系。利用产量递减和广义翁氏模型, 建立加密聚驱增油量模型, 并结合经济评价方法, 获得了不同油价、注聚年限和聚合物浓度下的聚驱极限井网密度。结果表明: 油价越高, 注聚年限越长, 聚驱极限井网密度越大; 相同注聚年限下, 聚驱极限井网密度随聚合物浓度的增大呈先上升后下降的趋势。总体而言, 油价和注聚年限对聚驱极限井网密度的影响大于聚合物浓度的影响。研究成果为海上油田开发后期加密结合聚驱实现采收率最大化提供了理论支持。

关键词: 聚合物驱; 井网加密; 极限井网密度; 经济评价; 渤海油田

中图分类号: TE357.4 **文献标志码:** A

Study on limit well pattern density of polymer flooding in offshore oilfield: A case study of Oilfield S in Bohai Bay

JIN Yi^{1,2}, TANG Engao^{1,2}, ZHANG Jian^{1,2}, KANG Xiaodong^{1,2}, WANG Xudong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Offshore Oil Exploitation, Beijing 100028, China; 2. CNOOC Research Institute Limited, Beijing 100028, China)

Abstract: Due to the high development costs of offshore oilfields, the feasibility of well pattern infill and polymer flooding in the later stages of oilfield development directly depends on the economic benefits. The later stage of offshore oilfield development, therefore, depends on determining the economic limit well density. Taking the Bohai S Oilfield as an example, the relationship between the oilfield recovery factor and well pattern density, polymer concentration, and polymer injection time was calculated using a numerical simulation method in order to investigate the limit well pattern density of polymer flooding in offshore oilfields. A model of infilling polymer flooding oil increase was developed using production decline and the generalized Weng's model, and then when combined with economic evaluation techniques, the polymer flooding limit well pattern density under various oil prices, polymer injection times, and polymer concentrations was obtained. The results indicate that the polymer flooding limit well pattern density increases with the oil price and polymer injection time. The polymer flooding limit well pattern density increases first and then drops with the increase in polymer concentration during the same polymer injection time. The polymer flooding limit well pattern density is often influenced more by the oil price and polymer injection age than by the polymer concentration. The research results provide theoretical support for maximizing oil recovery by infilling combined with polymer flooding in the later stage of offshore oilfield development.

Key words: polymer flooding; infill drilling; limit well pattern density; economic evaluation; Bohai Oilfield

海上油田开发相较于陆地油田开发受平台寿命限制严重, 在其寿命期内获得最大的经济效益显得尤为重要^[1], 海上油田开发初期常采用稀井网和大井距的开发方式^[2], 随着开发生产的进行, 通常在不同阶段进行加密调整, 以提高油田开发效果, 达到提高采收率的目的。从技术上讲, 理想情况下井网密度越大, 驱替液的控制范围越大, 剩余油的采出程度越高, 但从经济上考虑, 随着井网密度的增

大, 地下可采剩余油不断减少, 加密带来的经济效益逐渐减小, 因此结合经济指标确定极限井网密度是油田开发的关键。

收稿日期: 2021-08-18; 改回日期: 2021-09-26。

第一作者简介: 金一(1992—), 硕士, 助理工程师, 研究方向为化学驱提高采收率。E-mail: jinyi6@enooc.com.cn。

基金项目: 中海石油(中国)有限公司重大项目“渤海油田化学驱提高采收率技术”(CNOOC-KJ135ZDXM36TJ02ZY)。

对于极限井网密度,长期以来诸多学者结合油藏工程以及经济评价方法进行了研究^[3],常规的极限井网密度计算方法为通过采收率与井网密度的关系式建立油田开发收入、支出与井网密度的关系方程,再通过类比油田生产状况或产量递减分析对历年单井产量进行排产^[4-6],利用交会法或迭代法对收入支出相等时的井网密度进行求解^[7-8]。对于采收率与井网密度关系的求解,中石油勘探开发研究院根据国内144个注水开发油田实际生产资料,根据原油流度的不同,得出我国水驱油田采收率与井网密度之间的谢式定量表征关系式^[9-10]。然而,该研究方法对于聚驱开发油田存在两点缺陷:其一,油田开发历程一般包含一次采油、二次采油、三次采油和四次采油的4个阶段^[11],各开发阶段产量存在差异,聚驱采收率与井网密度的关系相较于单纯的水驱开发也有所不同,因此仅通过油田物性参数求解的水驱井网密度公式并不适用于聚驱开发的油田。其二,利用产量递减曲线对油田历年产量进行排产不适合聚驱开发油田,现有的研究缺乏对聚驱产量剖面的定量表征。

鉴于以上问题,笔者应用聚驱油藏数值模拟方法,结合统计学响应面分析法,分析井网密度、聚合物注入年限、聚合物浓度对聚驱最终采收率的影响,在谢尔卡乔夫公式的基础上,对聚驱采收率与井网密度的关系式进行改进,并结合产量递减分析以及广义翁氏模型对加密结合聚驱的增油量进行预测,建立聚驱井网密度经济评价模型,进而对油田聚驱开发极限井网密度进行求解。

1 聚驱采收率与井网密度关系建立

1.1 渤海S油田模型概况

渤海S油田实际地质模型计算使用 Schlumberger Intersect 模拟器。平面上划分了144×222=31 968个网格,纵向上共分为302个模拟层,总网格数为31 968×302=9 654 336。

渤海S油田目前共132口开发井,其中生产井93口,注水井39口,油田井网为排状井网,井距约

175 m,井排间距约350 m,含油面积11.2 km²,目前井网密度约为11.8 口/km²。

1.2 水驱采收率与井网密度关系

目前对采收率与井网密度关系的研究多基于谢尔卡乔夫公式,其关系式为:

$$E_R = E_D e^{-a/s}$$
 (1)

式中, E_R 为最终采收率; E_D 为驱油效率; a 为井网指数, s 为井网密度,口/km²。

为确定油田水驱采收率与井网密度的关系,通过设计不同加密井数的水驱数值模拟方案,利用谢尔卡乔夫公式对该油田水驱采收率与井网密度的关系进行回归求解。数值模拟方案中的加密井数分别为15,20,25,29,32,拟合得出的渤海S油田现阶段开发驱油效率和井网指数分别为0.56和1.92。由此可以得出该油田水驱采收率与井网密度的函数关系,即

$$E_R = 0.56e^{-1.92/s}$$
 (2)

1.3 聚驱采收率与井网密度关系

聚驱的采油量包含两部分,分别为加密后的水驱采油量和聚驱在水驱基础上增加的采油量^[12]。同样,聚驱采收率可拆分为水驱采收率和聚驱在水驱基础上提高的采收率,因此聚驱采收率公式可写为:

$$E = E_R + \Delta E_R$$
 (3)

式中, ΔE_R 为聚驱在水驱基础上提高采收率的幅度。

通过大庆油田天然岩心驱油实验,分析得出聚合物相对分子质量、质量浓度、岩心渗透率和注入量是影响聚驱采收率提高值的主要因素^[13]。本次研究中,聚合物相对分子质量和储层渗透率均不发生改变,因此不考虑两者对聚驱提高采收率的影响。为研究渤海S油田聚驱提高采收率幅度与聚合物参数和井网密度的关系,笔者在上述5种加密井数水驱方案的基础上设计了3种不同聚合物浓度以及3个不同注聚年限的数值模拟方案,聚合物浓度为1 750~2 250 mg/L,注聚年限为5~9 a,数值模拟结果如表1所示。

表1 加密聚驱方案数值模拟结果

序号	加密井数/ 口	井网密度/ (口·km ⁻²)	聚合物浓度/ (mg·L ⁻¹)	注聚年限/ a	注入倍数/ PV	聚合物用量/ (PV·(mg·L ⁻¹))	提高采收率幅度/ %
1	15	13.1	1 750	5	0.45	788	2.9
2	15	13.1	1 750	7	0.61	1 068	3.6

续表 1 加密聚驱方案数值模拟结果

序号	加密井数/ 口	井网密度/ (口·km ²)	聚合物浓度/ (mg·L ⁻¹)	注聚年限/ a	注入倍数/ PV	聚合物用量/ (PV·(mg·L ⁻¹))	提高采收率幅度/ %
3	15	13.1	1 750	9	0.76	1 330	4.3
4	15	13.1	2 000	5	0.44	880	3.2
5	15	13.1	2 250	9	0.69	1 553	4.8
6	20	13.6	1 750	5	0.46	805	3.0
7	20	13.6	1 750	9	0.76	1 330	4.3
8	20	13.6	2 000	5	0.44	880	3.3
9	20	13.6	2 000	7	0.58	1 160	4.0
10	25	14.0	2 000	5	0.48	960	3.4
11	25	14.0	2 000	7	0.63	1 260	4.2
12	25	14.0	2 250	5	0.46	1 035	3.7
13	25	14.0	2 250	7	0.60	1 350	4.5
14	25	14.0	2 250	9	0.75	1 688	5.2
15	29	14.5	2 000	5	0.48	960	3.5
16	29	14.5	2 000	9	0.81	1 620	5.1
17	29	14.5	2 250	5	0.47	1 058	3.7
18	32	14.7	2 000	5	0.50	1 000	3.6
19	32	14.7	2 000	7	0.67	1 340	4.5
20	32	14.7	2 250	7	0.64	1 440	4.8

研究表明,聚合物用量的对数与提高采收率幅度存在线性关系^[14],因此绘制出聚驱提高采收率幅度(ΔE_R)和聚合物用量(x)对数值的关系图(见图 1),通过线性回归得到二者关系式为:

$$\Delta E_R = 0.068 \log(x) - 0.1683 \quad (4)$$

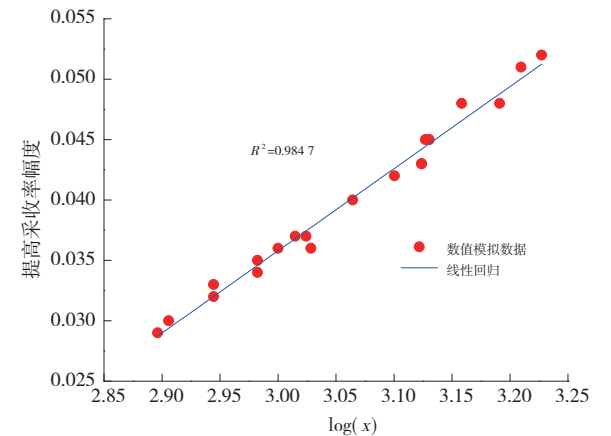


图1 聚驱提高采收率幅度与聚合物用量的关系

由于聚合物用量等于注入速度、注聚年限和聚合物浓度的乘积,在注聚年限和注入浓度保持不变的情况下,井网密度的增大会使油田的注入速度增大,则聚合物用量增大。结合陆地油田经验,对海

上油田注聚井进行动态分析,得出认识:聚合物的注入能力与聚合物浓度呈负相关关系,其注入速度亦随聚合物浓度的增大而减小,因此,井网密度和聚合物浓度是影响聚合物注入速度的主要因素。以聚驱注入速度为目标函数,基于响应面分析法建立经验模型,根据表 1 中的数值模拟数据,通过两因素多项式回归建立响应面,结果如图 2 所示。

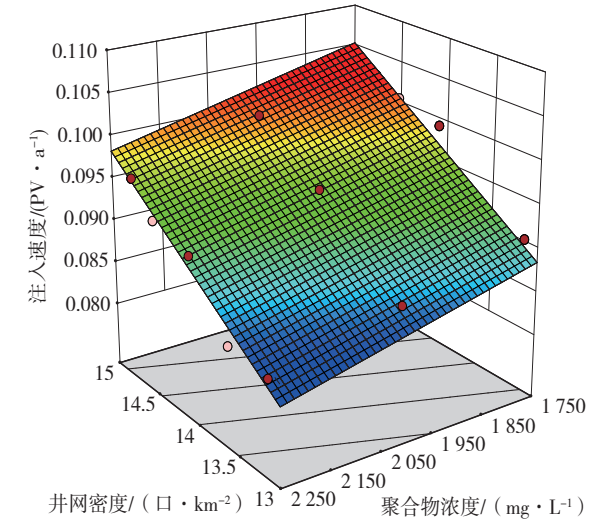


图2 聚驱注入速度与井网密度和聚合物浓度关系响应面

回归得出的聚合物注入速度(v)与井网密度和聚合物浓度(C)的关系表达式为:

$$v = 0.008\,377s - 1.4 \times 10^{-5}C + 0.003\,947 \quad (5)$$

则聚合物的用量可写为:

$$x = (0.008\,377s - 1.4 \times 10^{-5}C + 0.003\,947)yC \quad (6)$$

式中, y 为注聚年限, a_0 。

将式(6)带入式(4),可得到聚驱提高采收率幅度与井网密度、注聚年限和聚合物浓度的关系式,即

$$\Delta E_R = 0.068 \log [(0.008\,377s - 1.4 \times 10^{-5}C + 0.003\,947)yC] - 0.168\,3 \quad (7)$$

将式(7)和式(2)带入式(3),可得到渤海S油田聚驱采收率与井网密度、注聚年限和聚合物浓度的关系式,即

$$E = 0.56e^{-1.92/s} + 0.068 \log [(0.008\,377s - 1.4 \times 10^{-5}C + 0.003\,947)yC] - 0.168\,3 \quad (8)$$

2 加密聚驱增油量预测模型

渤海S油田已进入油田开发中后期,产油量处于递减阶段,本文以指数递减规律分析水驱产油量,指数递减累产油量与生产年限的关系式为:

$$N_p = \frac{q_0}{D_0} (1 - e^{-D_0 T}) \quad (9)$$

式中, N_p 为累计产油量, m^3 ; q_0 为初始产量, m^3 ; D_0 为递减率; T 为生产年限, a_0 。

产油量与生产时间的关系为:

$$q = q_0 e^{-D_0 t} \quad (10)$$

式中, q 为产油量, m^3 ; t 为生产时间, a_0 。

联立式(9)和式(10)可得

$$q = q_0 e^{-D_0 t} = \frac{N_p D_0}{1 - e^{-D_0 t}} e^{-D_0 t} \quad (11)$$

假设油田加密调整后水驱增油部分符合指数递减规律,结合式(2)水驱采收率与井网密度的关系,得出加密水驱增油量($q_{加密}$)随生产时间的变化规律,即

$$q_{加密} = \frac{N(0.56e^{-1.92/s} - 0.56e^{-1.92/s_0})D_0}{(1 - e^{-D_0 t})} e^{-D_0 t} \quad (12)$$

式中, N 为油田地质储量, m^3 ; s_0 为初始井网密度,口/ km^2 。

聚驱开发油田产量的变化大致可分为低产量加速上升、高产量减速上升、稳产、高产量加速递减以及低产量减速递减5个阶段。有学者通过多元回

归方程,结合聚驱驱替特征曲线和经验回归方法得出了聚驱不同阶段的产油量预测公式^[15]。广义翁氏模型是一种不对称分布的产量预测模型,可用于分析聚驱注入量、聚合物浓度、注入速度等因素对聚驱产量的影响^[16-18],其表达式为:

$$q = a_1 t^{b_1} e^{-\left(\frac{1}{c_1}\right)} \quad (13)$$

式中, q 为聚驱时刻的产油量, m^3 ; t 为聚驱见效后的持续时间, a ; a_1, b_1, c_1 为回归参数。

假设聚驱在水驱基础上的增油量符合以上规律,同时为便于确定模型参数,可将表达式简化为:

$$q_{聚} = a_1 t^{b_1} e^{-c_1 t} \quad (14)$$

式中, $q_{聚}$ 为聚驱 t 时刻在水驱基础上的增油量, m^3 。

根据上文数值模拟结果,利用式(14)对数据进行多元回归,以井网密度14.7口/ km^2 ,聚合物浓度2 000 mg/L为例,不同聚合物注入年限的回归结果如图3所示。

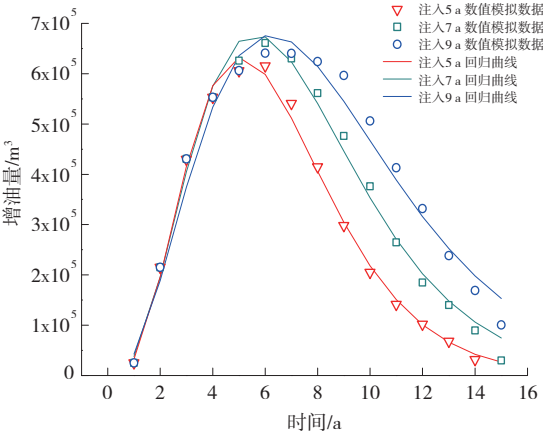


图3 不同段塞大小的聚驱增油量方程拟合结果
(井网密度14.7口/ km^2 ,聚合物浓度2 000 mg/L)

使用相同的方法对不同井网密度和聚合物浓度的数值模拟结果进行曲线拟合,并将拟合得出的模型参数与聚驱累计增油量($Q_{聚}$)和注聚年限建立函数关系。

通过回归发现: a_1 的取值与聚驱累计增油量存在线性关系, b_1, c_1 的取值与注聚年限存在线性关系,回归结果如图4所示,具体关系式如表2所示。

表2 聚驱增油量模型回归参数

相关参数	关系式
$a_1 - Q_{聚}$	$a_1 = 0.016\,07Q_{聚} - 2\,624.85$
$b_1 - y$	$b_1 = -0.204\,4y + 4.637$
$c_1 - y$	$c_1 = -0.074y + 1.085$

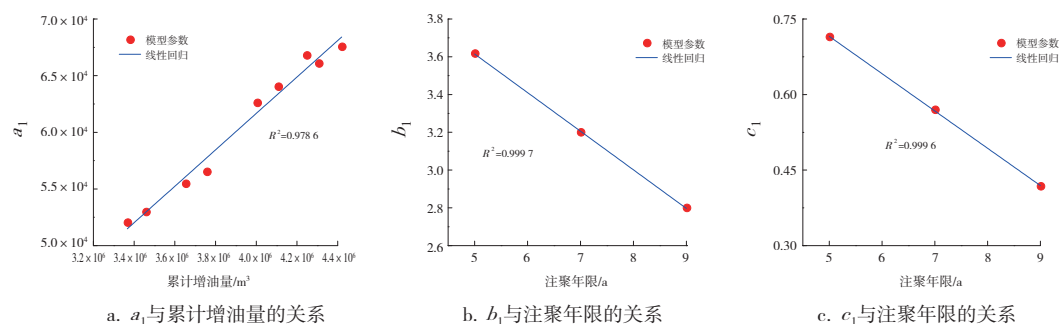


图4 聚驱增油量模型中相关参数回归结果

将表2中的回归参数带入式(14),结合式(7), 整理得出聚驱在加密水驱基础上的增油量方程,即

$$q_{\text{聚}} = \left(1.09 \times 10^{-3} N \log \left[\frac{(0.008 \ 377s - 1.4 \times 10^{-5}C + 0.003 \ 947)yC}{(0.008 \ 377s_0 - 1.4 \times 10^{-5}C + 0.003 \ 947)yC} \right] - 2 \ 624.85 \right) t^{-0.204 \ 4y + 4.637} e^{(0.074y - 1.085)t} \quad (15)$$

结合式(12)和式(15),得出渤海S油田加密聚 驱增油量预测方程,即

$$q = \frac{N(0.56e^{-1.92/s} - 0.56e^{-1.92/s_0})D_0}{1 - e^{-D_0t}} e^{-D_0t} + \left(1.09 \times 10^{-3} N \log \left[\frac{(0.008 \ 377s - 1.4 \times 10^{-5}C + 0.003 \ 947)yC}{(0.008 \ 377s_0 - 1.4 \times 10^{-5}C + 0.003 \ 947)yC} \right] - 2 \ 624.85 \right) t^{-0.204 \ 4y + 4.637} e^{(0.074y - 1.085)t} \quad (16)$$

3 聚驱井网密度经济评价模型

本文采用现金流量法建立聚驱井网密度经济评价模型,结合上文得出的聚驱采收率与井网密度的关系以及加密聚驱增油量预测模型,建立现金流量与井网密度以及注聚参数的关系,进而对油田加密聚驱进行经济评价。当现金净流量等于零时的井网密度即为极限井网密度。

根据净现值的定义,净现值(NPV)等于现金净流量(CI)现值减去现金流出量(CO)现值,即

$$NPV = CI - CO \quad (17)$$

本文中油田现金流入量只考虑原油的销售收入,其表达式为:

$$CI = 6.29\lambda Gq \quad (18)$$

式中, G 为原油价格,美元/桶; q 为历年的增油量, m^3 ; λ 为汇率,元/美元。本文的增油量包含两部分,分别为加密的增油量和聚驱的增油量。

油田开发中的现金流出量由三部分组成,分别为:①建设期的固定资产投资及流动资产投资,即钻完井投资 CO_1 (本文考虑新建平台费用);②运营期内的生产操作费用 CO_2 (包括加密、化学驱及后续水驱生产操作费);③所缴纳的税金,包括资源税、增值税、城建及教育附加费、石油特别收益金、企业

所得税等税目,前两部分的计算公式为:

$$\begin{cases} CO_1 = P_1 A(s - s_0) \\ CO_2 = 6.29\lambda P_2 q_{\text{加密}} + \frac{P_3 r_{\text{聚}}}{0.65} + P_4 \end{cases} \quad (19)$$

式中, P_1 为钻完井费用,元/口; A 为含油面积, km^2 ; s_0 为初始井网密度,口/ km^2 ; P_2 为加密生产操作费,美元/桶; P_3 为聚合物费用,元/t; $r_{\text{聚}}$ 为聚合物用量,t; P_4 为后续水驱生产操作费,元。本文使用的经济参数见表3。

表3 加密聚驱经济评价参数

参数	取值
钻完井费用/(万元·口 ⁻¹)	6 000
加密生产操作费用/(美元·桶 ⁻¹)	6
药剂费/(万元·t ⁻¹)	2
资源税、增值税等/%	8.9
企业所得税/%	25
石油特别收益金/元	阶梯油价征收
汇率/(元·美元 ⁻¹)	6.5
基准收益率/%	12

将式(18)和式(19)带入式(17),并结合海上油田化学驱经济评价方法,最终得到的渤海S油田加密聚驱净利润的净现值为:

$$NPV = \sum_{t=1}^T (1-\beta) \left((1-\alpha) 6.29 \lambda G q - P_1 A(s-s_0) - 6.29 P_2 q_{\text{加密}} - \frac{P_3 r_{\text{聚}}}{0.65} - P_4 - P_5 \right) (1+i)^{-t} \quad (20)$$

式中, P_5 为石油特别收益金, 元; α 为税率, %; 包含资源税、增值税、城建及教育附加费; β 为企业所得税, %; i 为基准收益率, %。

4 不同因素下的聚驱极限井网密度

在聚驱方案优化设计中, 注聚年限和聚合物浓度是重要的优化参数^[19]。油价作为油田实施加密、化学驱等技术措施的重要参考指标, 直接影响着两项技术在油田开发中实施的可行性。本文利用上文建立的聚驱井网密度经济评价模型, 分析油价、注聚年限和聚合物浓度对油田聚驱极限井网密度的影响。

4.1 油价的影响

本文对 40~90 美元/桶油价下的加密聚驱方案进行经济评价, 利用上文得出的聚驱井网密度经济评价模型, 分别求解不同油价下聚驱各井网密度的净现值, 以注聚年限 5 a, 聚合物浓度 2 000 mg/L 为例, 计算结果如图 5 所示。

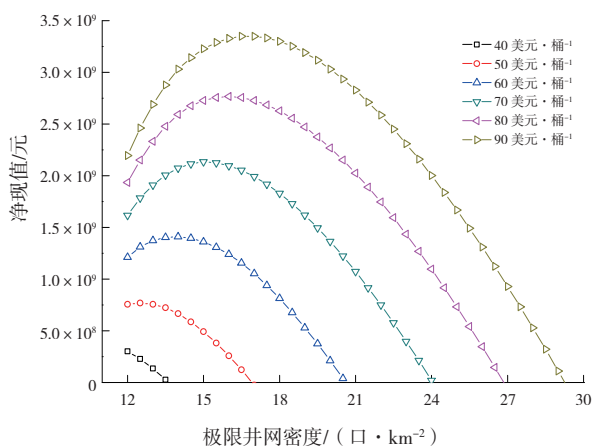


图5 不同油价下渤海S油田聚驱开发净现值与井网密度关系
(注聚5 a, 聚合物浓度2 000 mg/L)

图5中净现值等于0时的井网密度即为极限井网密度。由图可以看出, 随着油价上升, 聚驱极限井网密度增大, 意味着高油价下, 油田聚驱开发有更大的加密空间。

渤海S油田目前的井网密度约为 11.8 口/km²。经计算, 在聚合物浓度 2 000 mg/L, 注聚 5 a 的条件下, 当油价为 33 美元/桶时, 聚驱极限井网密度为 11.8 口/km², 意味着 33 美元/桶为该注聚参数下加密聚驱的临界油价; 当油价为 40 美元/桶时, 聚驱极限井网密度约为 13.5 口/km², 该注聚参数下可新增

加密井约 20 口; 当油价超过 50 美元/桶时, 聚驱开发净现值随着井网密度的增大呈现先上升后下降的趋势, 在净现值最大的井网密度下, 油田聚驱开发可获得最大的经济效益。

4.2 注聚年限和聚合物浓度的影响

本文针对聚合物的注入年限和浓度对渤海S油田聚驱极限井网密度的影响进行了探究, 利用上文建立的聚驱井网密度经济评价模型, 分别对注聚 4~7 a, 聚合物浓度 1 000~3 000 mg/L 的极限井网密度进行计算, 以 50 美元/桶油价为例, 计算结果如图 6 所示。

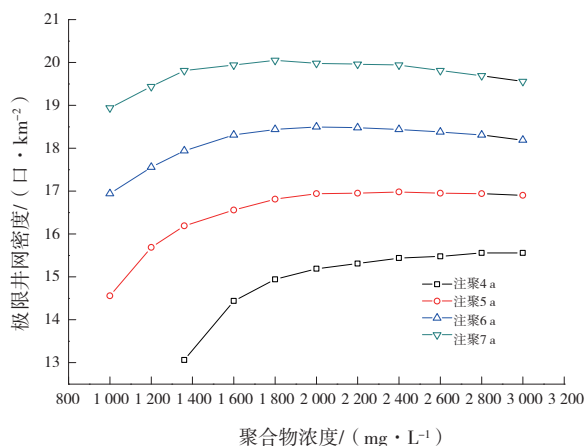


图6 油价50美元/桶时不同注聚年限下渤海S油田极限井网密度与聚合物浓度关系

由图6可以看出, 渤海S油田聚驱极限井网密度随着注聚年限的增大而增大, 说明较长的聚合物段塞虽然伴随着高昂的生产操作费、药剂费等投入, 但聚驱带来的增油量依然可以保证该油田加密调整有高额利润, 使得油田聚驱开发有更大的加密空间。就聚合物浓度而言, 相同的注聚年限下, 聚驱极限井网密度随聚合物浓度的增大呈先增大后减小的趋势, 但当注聚年限较长时, 聚合物浓度对聚驱极限井网密度的影响较小, 当注聚年限较短时, 聚合物浓度对聚驱极限井网密度的影响较大。总体而言, 相比于注聚年限, 聚合物浓度对聚驱极限井网密度的影响较小。

在本文研究的注聚参数范围内, 渤海S油田在 50 美元的油价下, 若注聚 4 a, 聚合物浓度大于 1 360 mg/L 时, 聚驱开发存在加密空间。若注聚 7 a, 当聚合物浓度为 1 800 mg/L 时, 油田聚驱极限井网密度最大, 约为 20 口/km²。

5 结论

(1)建立了考虑注聚参数的聚驱增油量及井网密度经济评价模型,获得了不同油价和不同注聚参数下的聚驱极限井网密度图版。

(2)油价越高,油田聚驱极限井网密度越大。对于渤海S油田,注聚5 a,聚合物浓度2 000 mg/L的条件下,加密聚驱的临界油价为33美元/桶。

(3)相同聚合物浓度下,聚合物注入年限越长,油田经济效益越高,聚驱开发极限井网密度越大。

(4)相同注聚年限下,聚驱极限井网密度随聚合物浓度的增大呈先增大后减小的趋势。当注聚年限较大时,聚合物浓度对聚驱极限井网密度的影响相对较小;当注聚年限较小时,聚驱极限井网密度随浓度的增大变化幅度较大。对于渤海S油田,在注聚4 a、油价50美元/桶的条件下,加密聚驱的临界聚合物浓度为1 360 mg/L。

(5)总体而言,油价和注聚年限对聚驱极限井网密度的影响大于聚合物浓度的影响。

参考文献:

- [1] 耿站立,安桂荣,周文胜,等.海上稠油油田井网密度与采收率关系研究[J].中国海上油气,2012,24(3):35-37.
- [2] 梁淞,贾京坤,杨航.基于单井控制储量与井网密度的老油田经济极限井网密度计算新方法[J].油气地质与采收率,2014,21(4):104-106.
- [3] 钟家峻,洪楚侨,陈平,等.海上断块油田极限井控储量研究[J].特种油气藏,2015,22(4):133-136.
- [4] 毕永斌,赵隆顺,张梅,等.复杂断块合理井距确定新方法[J].特种油气藏,2015,22(4):108-111.
- [5] 杨志军,杜旭林,曹仁义,等.复杂小断块采收率及经济合理井网密度模型[J].断块油气田,2020,27(1):80-84.
- [6] 张芟强,薛国庆,汤明光,等.海上油田极限井网密度评价方法研究[J].天然气与石油,2019,37(4):67-72.
- [7] 刘仁强.水驱油田层系合理井网密度[J].大庆石油地质与开发,2015,34(4):78-81.
- [8] LI C Y, HE J, ZHANG Y, et al. The method and strategy to optimize well density for oilfield development projects in technical service contract framework [C]//Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference. Abu Dhabi:SPE,2020:SPE-203067-MS.
- [9] 耿站立,安桂荣,周文胜,等.水驱砂岩油藏开发调整全过程井网密度与采收率关系[J].中国海上油气,2015,27(6):57-62.
- [10] 黄金山.油田经济极限井网密度计算新方法[J].油气地质与采收率,2013,20(3):53-55,59.
- [11] 孙龙德,江同文,王凤兰,等.关于油田寿命的思考[J].石油学报,2021,42(1):56-63.
- [12] 陈福明,卢金凤,陈鹏.聚合物驱开采指标测算方法研究[J].大庆石油地质与开发,1999,18(2):33-37.
- [13] 孙龙德,伍晓林,周万富,等.大庆油田化学驱提高采收率技术[J].石油勘探与开发,2018,45(4):636-645.
- [14] 王渝明,王加滢,康红庆,等.聚合物驱阶段提高采收率预测模型的建立与应用[J].石油学报,2013,34(3):513-517.
- [15] 张鹏翥.多元线性回归法预测聚合物驱产油量[J].大庆石油地质与开发,2014,33(4):111-114.
- [16] 黄学,刘朝霞,韩冬,等.一种预测聚合物驱开发动态的新模型[J].石油勘探与开发,2009,36(2):228-231.
- [17] 邱海燕,丁显峰,胡晓云,等.用组合模型预测聚合物驱产油量[J].新疆石油地质,2010,31(2):194-196.
- [18] JIN Y, TANG X, FENG C Y, et al. Establishment of a multi-cycle generalized Weng model and its application in forecasts of global oil supply [J]. Petroleum Science, 2017,14(3):616-621.
- [19] ALSOFI A M, BLUNT M J. Polymer flooding design and optimization under economic uncertainty [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2014, 124:46-59.

(编辑 谢葵)