

文章编号: 0253-2697(2008)03-0395-04

大庆油田复合驱油技术适应性评价方法研究

王正茂 廖广志

(中国石油天然气股份有限公司勘探与生产分公司 北京 100011)

摘要: 对聚合物驱油项目与三元复合驱油项目投资构成进行了对比,借鉴聚合物驱油项目聚合物用量的概念,对三元复合驱化学剂用量定义了“聚合物当量”概念。针对大庆油田具有三元复合驱潜力的储量,分析了在不同的油藏条件下复合驱项目对注采井距、聚合物当量和油价等的要求。考虑到项目投资对采收率指标的影响,测评了油价,按照收支平衡原则,将总投资折算为需要的增油量下限值,进而确定出需要提高的采收率下限,建立了复合驱油技术的油藏适应性经济评价模型。该模型可用于评价复合驱项目方案。

关键词: 复合驱技术; 聚合物当量; 油藏适应性; 技术经济评价; 采收率

中图分类号: TE357 431

文献标识码: A

Evaluation method for adaptability of alkali-surfactant-polymer flooding technology in Daqing Oilfield

WANG Zhengmao LIAO Guangzhi

(PetroChina Exploration and Production Company, Beijing 100011, China)

Abstract: The investment of alkali-surfactant-polymer (ASP) flooding project was analyzed and compared with the polymer flooding project. According to the concept of polymer amount used in the polymer flooding project, a new concept of polymer equivalent was defined for the agent amount of ASP flooding. For the reservoirs are potentially recovered by ASP flooding, the requirements of ASP flooding projects for injection-producer distance, polymer equivalent and oil price in different reservoir conditions are analyzed. When the aggregate investment was reduced to the needed increasing oil production under the standard oil price, the lower limit of enhanced oil recovery could be obtained. The comprehensive evaluation model for the reservoir adaptability of ASP flooding technology was economically established. This model is simple and credible for evaluating the development plan of ASP flooding project.

Key words: ASP flooding technology; polymer equivalent; reservoir adaptability; technical and economic evaluation; oil recovery

大庆油田已开展的化学驱现场试验和数值模拟结果表明^[1-4],对于同一类储层,三元复合驱提高的采收率约为聚合物驱所能提高采收率的2倍;同时,聚合物驱后再采用三元复合驱所能提高的采收率几乎与直接采用三元复合驱所能提高的采收率值相当。因此三元复合驱将成为大庆油田2006—2010年(“十一五”)期间三次采油的主导开发技术。近年来,随着大庆油田三元复合驱矿场试验的深入开展^[5-6],三元复合驱技术也有了新的发展,提高了三元复合驱控制程度。但是,注入方案的化学剂用量呈现出逐渐增大的趋势,在一定程度上增加了三元复合驱投资成本。为了确保复合驱项目的经济性,笔者针对不同的三元复合驱注入方案,建立了统一的油藏适应性经济评价模型,为复合驱技术在不同油藏类型中的使用建立了一套科学评价方法。

1 评价模型的建立

1.1 基本假设

(1) 所选择的复合驱区块为一个标准正方形五点

法中心井组。则有

$$V_{\phi} = 2d^2h\phi \quad (1)$$

式中: V_{ϕ} 为孔隙体积, m^3 ; d 为注采井距, m ; h 为有效厚度, m ; ϕ 为孔隙度。

(2) 将除化学剂费用之外的项目投资(包括钻井、地面等投资)折算为单井费用,将其定义为单井平均投资,用 C_{dg} 表示。

1.2 数学模型

1.2.1 化学剂方案的用量

三元复合驱中三元体系配方的化学剂主要包括碱(A)、表面活性剂(S)和聚合物(P)。其中,聚合物方案用量用聚合物溶液段塞体积(R_P)和聚合物溶液质量浓度(D_P)的乘积来表示^[7],即

$$Q_P = D_P R_P \quad (2)$$

三元复合驱注入方案中,碱和表面活性剂的方案用量分别表示为

$$Q_A = D_A R_A \quad (3)$$

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(G1999022512)部分成果。

作者简介: 王正茂,男,1973年1月生,2004年获西南石油大学油气田开发工程博士学位,现为中国石油勘探与生产公司油藏管理处高级工程师,主要从事重大开发试验和三次采油管理工作。E-mail: wangzhengmao@petrochina.com.cn

$$Q_s = D_s R_s \quad (4)$$

式中: Q 为化学剂用量, $PV \cdot \text{mg/L}$; D 为化学剂溶液质量浓度, mg/L ; R 为注入化学剂溶液的段塞体积, PV 。

1.2.2 三元体系聚合物当量

在一个标准正方形五点法中心井组区域, 按方案设计要求实际注入的聚合物用量 M_P 为

$$M_P = Q_P V_\varphi \quad (5)$$

同理, 碱和表面活性剂的实际用量也可表示为

$$M_A = Q_A V_\varphi \quad (6)$$

$$M_S = Q_S V_\varphi \quad (7)$$

将碱和表面活性剂的实际用量按等价原则折算成聚合物实际用量为

$$M'_A = Q_A V_\varphi C_A / C_P \quad (8)$$

$$M'_S = Q_S V_\varphi C_S / C_P \quad (9)$$

式中: M' 为化学剂的等价聚合物实际用量, t ; C 为化学剂的价格, 元/t 。

化学剂实际用量按等价原则折合成聚合物实际用量为

$$M_{ASP} = V_\varphi (Q_P + Q_A C_A / C_P + Q_S C_S / C_P) \quad (10)$$

$$\text{令 } Q_{EP} = Q_P + Q_A C_A / C_P + Q_S C_S / C_P \quad (11)$$

用聚合物当量表示的三元复合驱化学剂实际用量表达式为

$$M_{ASP} = V_\varphi Q_{EP} \quad (12)$$

式中: Q_{EP} 为与三元复合驱化学剂等价的聚合物当量, $PV \cdot \text{mg/L}$ 。

1.2.3 总投资

复合驱项目总投资包括化学剂投资及钻井和地面建设投资等。其中, 化学剂投资为

$$I_{ASP} = M_{ASP} C_P \quad (13)$$

由基本假设可知, 除化学剂费用以外的单井平均投资为 C_{dg} 。故总投资为

$$I_T = I_{ASP} + n C_{dg} \quad (14)$$

考虑每口油井只采出本井组 $1/4$ 区域的油, 因此在计算投资时, 每口油井按 $1/4$ 计算, 加上本井组的一口注水井, 故式(14)中 n 取 2。

1.2.4 增油量下限的计算

由于受到油价波动的影响, 在总投资确定的情况下, 按照收支持平的极限情况考虑, 不同油价下总投资所需要的增油量下限可由下式确定:

$$\Delta Q_{o, \min} = I_T / C_o \quad (15)$$

式中: C_o 为原油的价格, 元/t 。

1.2.5 采收率下限的计算

根据计算出的增油量下限和一个标准正方形五点法中心井组区域的原始地质储量, 可以计算出需要提

高的采收率下限值, 其表达式为

$$\Delta \eta_{\min} = \Delta Q_{o, \min} / N_o \quad (16)$$

式中: N_o 为原始地质储量, t 。

对式(16)化简得

$$\Delta \eta_{\min} = K_1 \frac{Q_{EP}}{C_o} + K_2 \frac{1}{d^2 h \phi C_o} \quad (17)$$

其中 $K_1 = \frac{B_{oi} C_P}{10^4 S_{oi} \rho_o}$ $K_2 = \frac{100 B_{oi} C_{dg}}{S_{oi} \rho_o}$

式中: S_{oi} 为原始平均含油饱和度; ρ_o 为地面原油密度, g/cm^3 ; B_{oi} 为原始平均原油体积系数。

式(17)为在项目总投资控制下(包括钻井、地面建设及化学剂投资等)所需要提高的采收率下限值 $\Delta \eta_{\min}$ 的表达式。

2 储层分类

在现有技术经济条件下, 将大庆油田适合复合驱的储层分为两大类^[8]。由于仅考虑聚合物当量、注采井距及油价变化对需要提高的采收率下限值的影响, 因而取定下列参数: B_{oi} 为 1.12; S_{oi} 为 70%; ρ_o 为 0.86 g/cm^3 ; C_{dg} 为 $200 \times 10^4 \text{ 元/口}$; C_P 为 20000 元/t 。

2.1 I 类储层

I 类储层的孔隙度为 28%; 渗透率为 $900 \times 10^{-3} \text{ Dm}^2$; 有效厚度为 15 m。当油价 $C_o = 2500 \text{ 元/t}$, 注采井距分别为 125 m、175 m 和 250 m 的情况下, I 类储层复合驱聚合物当量与提高采收率下限值的关系曲线见图 1。

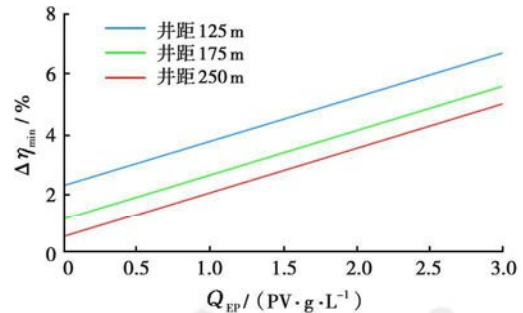


图 1 I 类储层不同井距下复合驱聚合物当量与提高采收率下限值的关系

Fig. 1 Variation of the lower limit of enhanced oil recovery with the polymer equivalence of ASP flooding under different wellhead space for type I reservoir

从图 1 可以看出, 随着复合驱聚合物当量增加, 需要提高的采收率下限值也增大; 在同一聚合物当量情况下, 注采井距越小, 需要提高的采收率下限值也越大。对于 I 类储层复合驱, 在油价为 2500 元/t、注采井距为 125 m 和聚合物当量为 $2.5 PV \cdot g/L$ 条件下, 采收率只要提高 6% 以上就具有经济效益。因此, 在 I 类储层中开展复合驱经济效益明显。

当油价 C_o 为 2500 元/t, 聚合物当量在 0.5~ 3.0 $PV \cdot g/L$ 情况下, I 类储层复合驱不同注采井距与提高采收率下限值的关系见表 1。

表 1 I 类储层不同聚合物当量下井距与提高采收率下限值的关系

Table 1 Variation of the lower limit of enhanced oil recovery with the wellhead spacing under different polymer equivalence for type I reservoir

聚合物当量/ ($PV \cdot g \cdot L^{-1}$)	需要提高的采收率下限值/%								
	75 m	100 m	125 m	150 m	175 m	200 m	225 m	250 m	
0.5	7.04	4.29	3.01	2.32	1.90	1.63	1.44	1.31	
1.0	7.79	5.03	3.76	3.06	2.64	2.37	2.19	2.05	
1.5	8.53	5.77	4.50	3.81	3.39	3.12	2.93	2.80	
2.0	9.27	6.52	5.24	4.55	4.13	3.86	3.68	3.54	
2.5	10.02	7.26	5.99	5.29	4.88	4.61	4.42	4.29	
3.0	10.76	8.01	6.73	6.04	5.62	5.35	5.16	5.03	

从表 1 可以看出, 随着注采井距的增加, 需要提高的采收率下限值减小; 在同一注采井距情况下, 聚合物当量越大, 化学剂成本也增加, 需要提高的采收率下限值也增大, 可能使投资效益降低。

当注采井距为 125 m 及聚合物当量为 1.5~ 3.0 $PV \cdot g/L$ 的情况下, I 类储层不同聚合物当量下油价与提高采收率下限值的关系曲线见图 2。

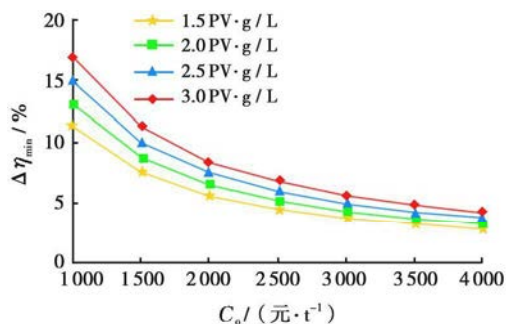


图 2 I 类储层不同聚合物当量下油价与提高采收率下限值的关系

Fig. 2 Variation of the lower limit of enhanced oil recovery with oil price under different polymer equivalence for type I reservoir

从图 2 可以看出, 对于 I 类储层复合驱, 若油价为 2500 元/t, 注采井距为 125 m, 即使采用 3.0 $PV \cdot g/L$ 的聚合物当量, 采收率提高 7% 即可保证该项目的经济效益。而根据已经开展的复合驱矿场试验来看, I 类储层复合驱实际可提高采收率 22%。因此在目前高油价形势下, 大庆油田 I 类储层中开展复合驱将具有很好的经济效益。

2.2 II 类储层

II 类储层孔隙度为 25%, 渗透率为 $300 \times 10^{-3} \mu m^2$, 有效厚度为 10 m。当油价 C_o 为 2500 元/t 及注采井距分别在 125 m、175 m、200 m 和 250 m 的情况

下, II 类储层复合驱聚合物当量与提高采收率下限值的关系曲线见图 3。

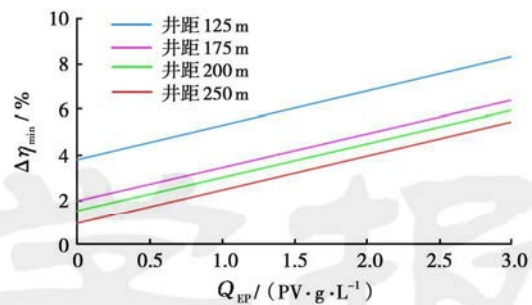


图 3 II 类储层不同井距下聚合物当量与提高采收率下限值的关系

Fig. 3 Variation of the lower limit of enhanced oil recovery with the polymer equivalence under different wellhead spacing for type II reservoir

从图 3 可以看出, 对于 II 类储层, 当油价 C_o 为 2500 元/t、注采井距为 125 m 及聚合物当量设计为 3.0 $PV \cdot g/L$ 的条件下, 采收率只要提高 8.3% 以上就具有经济效益。根据复合驱矿场试验, 这个采收率目标值是能够实现的。因此在目前油价下, 在大庆 II 类储层中开展复合驱经济上也是可行的。

当油价 C_o 为 2500 元/t 及聚合物当量为 0.5~ 3.0 $PV \cdot g/L$ 情况下, II 类储层复合驱不同注采井距与提高采收率下限值的关系见表 2。

表 2 II 类储层不同聚合物当量下井距与提高采收率下限值的关系

Table 2 Variation of the lower limit of enhanced oil recovery with the wellhead spacing under different polymer equivalence for type II reservoir

聚合物当量/ ($PV \cdot g \cdot L^{-1}$)	需要提高的采收率下限值/%								
	75 m	100 m	125 m	150 m	175 m	200 m	225 m	250 m	
0.5	11.33	6.70	4.55	3.39	2.69	2.23	1.92	1.70	
1.0	12.07	7.44	5.30	4.13	3.43	2.98	2.66	2.44	
1.5	12.81	8.18	6.04	4.88	4.18	3.72	3.41	3.18	
2.0	13.56	8.93	6.79	5.62	4.92	4.46	4.15	3.93	
2.5	14.30	9.67	7.53	6.37	5.66	5.21	4.90	4.67	
3.0	15.05	10.42	8.27	7.11	6.41	5.95	5.64	5.42	

由表 2 可知, 即使 II 类储层注采井距为 75 m, 聚合物当量达到 2.5 $PV \cdot g/L$, 采收率只要提高 15% 就具有经济效益。因此为了提高大庆 II 类储层复合驱控制程度, 改善复合驱开发效果, 大庆 II 类储层复合驱仍有进一步缩小注采井距的潜力。

在注采井距、聚合物当量及油价都相同的情况下, II 类储层复合驱需要提高的采收率下限值高于 I 类储层, 这主要是由于在相同井网条件下, II 类储层的单井

控制储量低于 I 类储层。

当注采井距为 125 m 及聚合物当量为 1.5~3.0 PV·g/L 情况下, II 类储层复合驱不同油价与提高采收率下限值的关系曲线见图 4。

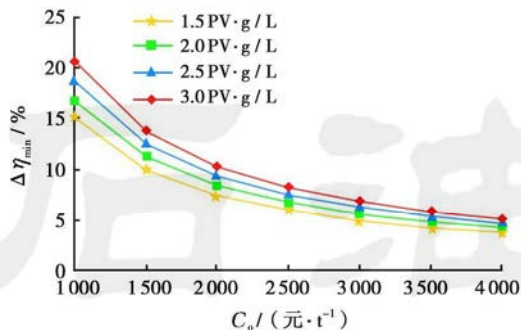


图 4 II 类储层不同聚合物当量下油价与提高采收率下限的关系

Fig. 4 Variation of the lower limit of enhanced oil recovery with the oil price under different polymer equivalence for type II reservoir

从图 4 可以看出, 对于 II 类储层复合驱, 油价越高, 需要提高的采收率下限值越低。若 II 类储层复合驱实际采收率按最大可提高 18% 计算^[6], 则在目前油价下, 大庆 II 类储层实施复合驱具有经济可行性。

3 实例分析

以某油田复合驱工业化试验项目为例, 试验目的层的孔隙度为 25%, 渗透率为 $400 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 有效厚度为 7.2 m, 原始含油饱和度为 65%, 原油体积系数为 1.12, 原油密度为 0.86 g/cm^3 , 注采井距为 250 m, 聚合物、碱和表面活性剂分别按照 20 000 元/t、2 500 元/t 和 15 000 元/t 的价格计算, 除化学剂费用外的单井平均投资为 480 万元。

注入方案采用 4 段塞组合形式, 共注入化学剂段塞 0.5875 PV。其中: 注入质量浓度为 1.5 g/L 的前置聚合物段塞为 0.0375 PV, 注入三元主段塞 (1.0% NaOH + 0.2% S + 1.8 g/L P) 为 0.35 PV, 注入三元副段塞 (1.0% NaOH + 0.1% S + 1.6 g/L P) 为 0.1 PV, 注入质量浓度为 1.0 g/L 的后续聚合物段塞为 0.1 PV。

根据式 (11) 可算出该注入方案化学剂的等价聚合物当量为 2.03375 PV·g/L, 预计提高采收率 22%。

将试验区储层参数代入式 (17) 得

$$\Delta\eta_{\min} = \frac{4Q_{EP}}{C_o} + \frac{8548.6}{C_o}$$

设计方案中注入聚合物当量为 2.03375 PV·g/L。当油价为 2 500 元/t 时, 该项目需要提高的采收率下限值仅为 6.7%。因此若该项目最终能实现方案设计提高采收率 22% 的目标, 将具有很好的经济性。

4 结 论

(1) 在目前技术条件及 2 500 元/t 的测评油价下, 三元复合驱技术可以在大庆油田 I、II 类储层中得到有效应用。

(2) 在储层类型一定的情况下, 复合驱项目投资需要提高的采收率与注采井距、化学剂用量和油价等密切相关。

(3) 当油价小于 2 500 元/t 时, 油价波动对复合驱项目投资的影响较大; 而当油价高于 2 500 元/t 时, 油价波动对复合驱项目投资的影响相对较小。

参 考 文 献

- 王启民, 冀宝发, 隋军, 等. 大庆油田三次采油技术的实践与认识 [J]. 大庆石油地质与开发, 2001, 20(2): 4-8.
Wang Qimin, Ji Baofa, Sui Jun, et al. Practice and knowledge of tertiary recovery technique in Daqing Oilfield [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2001, 20(2): 4-8.
- 卢祥国, 王凤兰, 包亚臣. 聚合物驱后三元复合驱油效果评价 [J]. 油田化学, 2000, 17(2): 159-163.
Lu Xiangguo, Wang Fenglan, Bao Yachen. The effectiveness of ASP flooding in polymer flooding reservoirs of Daqing Oilfield [J]. Oilfield Chemistry, 2000, 17(2): 159-163.
- 程杰成, 王德民, 李群, 等. 大庆油田三元复合驱矿场试验动态特征 [J]. 石油学报, 2002, 23(6): 37-40.
Cheng Jiecheng, Wang Demin, Li Qun, et al. Field test performance of alkaline surfactant polymer flooding in Daqing Oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(6): 37-40.
- 程杰成, 廖广志, 杨振宇, 等. 大庆油田三元复合驱矿场试验综述 [J]. 大庆石油地质与开发, 2001, 20(2): 46-49.
Cheng Jiecheng, Liao Guangzhi, Yang Zhenyu, et al. Pilot test of ASP Flooding in Daqing Oilfield [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2001, 20(2): 46-49.
- 李华斌, 赵长久, 孟繁儒. 大庆油田三元复合驱合理井网井距研究 [J]. 西南石油学院学报, 2000, 22(3): 46-49.
Li Huabin, Zhao Changjiu, Meng Fanru. Optimization of well pattern and space for Daqing ASP flooding [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2000, 22(3): 46-49.
- 李士奎, 朱焱, 赵永胜, 等. 大庆油田三元复合驱试验效果评价研究 [J]. 石油学报, 2005, 26(3): 56-59.
Li Shikui, Zhu Yan, Zhao Yongsheng, et al. Evaluation of pilot results of alkaline surfactant polymer flooding in Daqing Oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(3): 56-59.
- 王友启, 张以根, 姜颜波, 等. 影响聚合物驱矿场实施效果的几个问题 [J]. 油田化学, 1999, 16(3): 244-246.
Wang Youqi, Zhang Yigen, Jiang Yanbo, et al. Some problems influencing on field results of polymer flooding [J]. Oilfield Chemistry, 1999, 16(3): 244-246.
- 徐正顺, 王冬梅, 陈福明, 等. 大庆油田聚合物驱潜力评价 [J]. 大庆石油地质与开发, 2001, 20(2): 50-52.
Xu Zhengshun, Wang Dongmei, Chen Fuming, et al. Evaluation on the potentiality of polymer flooding [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2001, 20(2): 50-52.

(收稿日期 2007-07-10 改回日期 2007-09-17 编辑 孟伟铭)