

文章编号: 0253-2697(2007)03-0080-05

中国陆上油田聚合物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: 根据我国陆上具有聚合物驱油潜力的油田特点,分析了在不同的油藏条件下聚合物驱油参数对注采井距、聚合物用量和油价的要求。考虑到钻井、地面建设及化学剂的投资对采收率指标的影响,根据标准测油价,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,建立起聚合物驱油技术的油藏适应性经济评价模型。根据采收率指标和每吨聚合物增油量指标,对聚合物用量进行了综合优化,为聚合物驱油方案评价提供了一种简易可靠的方法。

关键词: 陆上油田;聚合物驱油技术;技术经济评价模型;采收率指标;聚合物用量

中图分类号: TE357.431

文献标识码: A

Evaluation method for adaptability of polymer flooding technology in the onshore oilfield of China

Wang Zhengmao Liao Guangzhi

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

Abstract: Considering the ability of oil reservoir with polymer flooding project in China, the effects of oil-displacement parameters on the distance between water injecting well and production well, polymer dosage, oil price and aggregate investments of drilling, surface construction and chemical agent in different reservoir were analyzed. On the basis of the balance principle, the aggregate investment can be reduced to the needed increasing oil production under the standard oil price. Then, the limit of needed enhanced oil recovery can be obtained. A technical and economic evaluation model was established on the reservoir adaptability of polymer flooding technology. The polymer dosage was also optimized by the indexes of recovery factor and oil production per ton polymer was raised. This method is simple and credible for evaluating the development plan of polymer flooding project.

Key words: onshore oilfield; polymer flooding technology; technical and economic evaluation model; recovery factor index; polymer dosage

近年来,大庆油田聚合物驱开采对象由一类储层逐渐转向二类储层,聚合物驱油技术有了新的发展^[1-2]。通过优化井网、缩小井距、层系调整以及优化射孔等多种方式,努力减少层间、平面和层内非均质性,提高聚合物驱控制程度;注入方案的聚合物用量也呈现出逐渐增大的趋势。但是,从经济效益考虑,井距不能无限制地缩小,聚合物用量也不能无限制地增大。因此,对于不同的油藏条件、注采井距、聚合物用量和油价等因素,按照收支平衡原则,聚合物驱项目总投资决定其必须提高的采收率下限值。笔者针对不同的聚驱注入方案,建立了统一的油藏适应性技术经济综合评价模型,为聚合物驱油技术在不同类型油藏中的使用提供一套科学方法。

1 评价模型的建立

1.1 基本假设

为了分析评价模型对井距、储层品质等的要求,假设所选择的注聚合物驱区块为一个标准的正方形五点法中心井组区域,该中心井组区域孔隙体积的计算表达式为

$$V_p = 2d^2 h \phi$$

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

对于一个聚驱项目,除了聚合物投资外,通常还须进行加密钻井及缩小注采井距,以及进行地面建设和改造。虽然,聚合物投资是随着聚合物用量的增加而

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

作者简介: 王正茂,男,1973年1月生,2006年于中国石油勘探开发研究院博士后流动站出站,现为中国石油勘探与生产分公司油藏管理处高级工程师,主要从事三次采油管理工作。E-mail: wangzhengmao@petrochina.com.cn

增加,但是钻井和地面建设费用是一次性投资,在不同聚合物用量下,可以看作是不变的费用。因此,可从项目总投资中减去化学剂费用后再折算为单井费用,定义为平均单井投资,用 C_{dg} 表示。

1.2 评价模型参数

1.2.1 聚合物的方案用量

聚合物的方案用量一般用聚合物溶液段塞体积和聚合物溶液浓度的乘积来表示^[3],即

$$Q_p = D_p R_p \quad (1)$$

式中 D_p 为聚合物溶液浓度,mg/L; R_p 为注入聚合物溶液的段塞体积,PV。

1.2.2 聚合物的实际用量

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为

$$M_p = Q_p V_p \quad (2)$$

1.2.3 总投资

聚合物驱项目总投资包括聚合物投资及钻井和地面建设投资等,其中,聚合物投资为

$$C_{pT} = M_p C_p \quad (3)$$

式中 C_p 为聚合物的价格,元/t。

由基本假设可知,总投资为

$$C_T = C_{pT} + n C_{dg} \quad (4)$$

式中 n 为一个标准正方形五点法中心井组的井数, $n=5$ 。

1.2.4 折算下限增油量

由于受到油价波动的影响,在总投资确定的情况下,按照收支平衡的极限情况,不同油价所需要的下限增油量可由下式确定:

$$\Delta Q_{o,min} = C_T / C_o \quad (5)$$

式中 C_o 为原油的价格,元/t。

1.2.5 需要提高的采收率下限

根据计算出的下限增油量和一个标准正方形五点法中心井组区域的原始地质储量,可以计算出在项目总投资控制下(包括钻井、地面建设及聚合物投资等)需要提高的采收率下限值。其表达式为

$$\Delta \eta_{min} = \Delta Q_{o,min} / N_o \quad (6)$$

式中 N_o 为原始地质储量,t。

对式(6)化简得

$$\Delta \eta_{min} = K_1 \frac{Q_p}{C_o} + K_2 \frac{1}{d^2 h \phi C_o} \quad (7)$$

其中

$$K_1 = \frac{B_{oi} C_p}{10^4 S_{oi} \rho_o}$$

$$K_2 = \frac{250 B_{oi} C_{dg}}{S_{oi} \rho_o}$$

式中 S_{oi} 为原始平均含油饱和度; ρ_o 为地面原油密

度,g/cm³; B_{oi} 为原始平均原油体积系数。

当油价一定时,可以得到聚合物的方案用量 Q_p 与聚合物投资(不包括钻井、地面建设投资等)所需要提高的采收率下限值 $\Delta \eta_{p,min}$ 的关系式为

$$\Delta \eta_{p,min} = \Delta \eta_{min} - K_2 \frac{1}{d^2 h \phi C_o} = K_1 \frac{Q_p}{C_o} \quad (8)$$

2 储层分类

根据我国油藏的储层物性和流体性质,可将储层分为3类^[4]。

为了排除其他因素的影响,仅考虑注采井距、聚合物用量及油价变化对需要提高的采收率下限值的影响,根据我国储层特征及流体性质,选取具有代表性的相关数据($B_{oi}=1.12$ 、 $S_{oi}=70\%$ 、 $\rho=0.86$ g/cm³、 $C_{dg}=200$ 万元/口、 $C_p=2$ 万元/t),分别对各类储层聚驱的技术经济适应性进行评价。

2.1 一类储层($\phi=25\%$, $K=0.9 \mu m^2$, $h=15$ m)

当油价 $C_o=1500$ 元/t,注采井距分别为 125 m、175 m 和 250 m 的情况下,一类储层聚合物用量与提高采收率下限值的关系曲线见图 1。

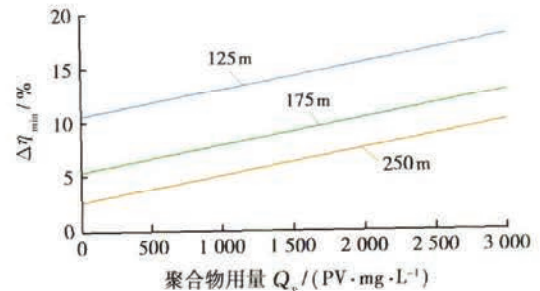


图1 不同井距下聚合物用量与提高采收率下限值的关系

Fig.1 Variation of the limit of needed enhanced oil recovery with the polymer dosage under different well spacing

从图1可以看出,随着聚合物用量的增加,需要提高的采收率下限值增大;在同一聚合物用量情况下,注采井距越小,需要提高的采收率下限值越大。对于一类储层,在 250 m 注采井距条件下,聚合物用量为 1000 PV·mg/L,只要提高采收率 5% 以上就具有经济效益。因此,在一类储层中开展聚合物驱是可行的。

当油价 $C_o=1500$ 元/t,聚合物用量为 500~2000 PV·mg/L 的情况下,一类储层注采井距与提高采收率下限值的关系曲线见表 1。

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越小;在同一注采井距的情况下,聚合物用量越大,虽然实际提高的采收率增加了,但是由于

聚合物成本的增加,需要提高的采收率下限值也增大,可能使投资效益降低。因此,在技术可行的前提下,由于投资成本的控制,聚合物用量有最优值。

表 1 不同聚合物用量下井距与提高采收率下限值的关系
Table 1 Variation of the limit of needed enhanced oil recovery with the well spacing and polymer dosage

聚合物用量/ (PV·mg·L ⁻¹)	采收率最小增值/%							
	75 m	100 m	125 m	150 m	175 m	200 m	225 m	250 m
500	30.64	17.78	11.82	8.59	6.64	5.37	4.51	3.89
1000	31.88	19.02	13.06	9.83	7.88	6.61	5.75	5.13
1500	33.12	20.26	14.30	11.07	9.12	7.85	6.99	6.37
2000	34.36	21.50	15.54	12.31	10.36	9.09	8.23	7.61

当注采井距为 125 m, 聚合物用量分别为 500 PV·mg/L、1 000 PV·mg/L 和 1 500 PV·mg/L 的情况下, 一类储层油价与提高采收率下限值的关系曲线见图 2。

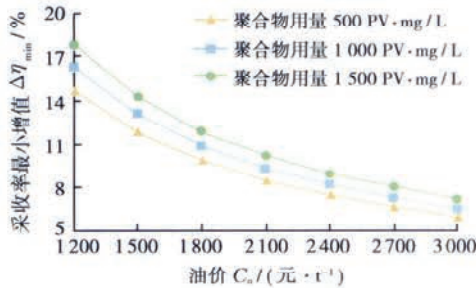


图 2 聚合物用量和油价与提高采收率下限的关系

Fig. 2 Variation of the limit of needed enhanced oil recovery with oil price under different polymer dosage

从图 2 可以看出,对于一类储层的聚合物驱,按实际采收率最大增值 15% 计算^[5],若油价 C_o 为 1500 元/t 时,最小的注采井距为 125 m, 聚合物最大用量为 1500 PV·mg/L。若进一步缩小井距或增大聚合物用量,则油价更高。

2.2 二类储层 ($\phi=20\%$, $K=0.3 \mu\text{m}^2$, $h=10 \text{ m}$)

当油价 C_o 为 1500 元/t 时,注采井距分别为 125 m、175 m、200 m 和 250 m 时,二类储层聚合物用量与提高采收率下限值的关系曲线见图 3。

从图 3 可以看出,对于二类储层,在 200 m 注采井距条件下,聚合物用量为 600 PV·mg/L,采收率只要提高 9% 以上就具有经济效益。因此,在二类储层中开展聚合物驱也具有可行性,只是利润少于一类储层。

当油价 C_o 为 1500 元/t, 聚合物用量为 500 ~ 2000 PV·mg/L 时,二类储层注采井距与提高采收率下限值的关系见表 2。

将表 2 与表 1 对比发现,在注采井距、聚合物用量、油价都相同的情况下,二类储层聚合物驱需要提高

的采收率下限值高于一类储层。这是因为在相同井网条件下,二类储层的单井控制储量低于一类储层。

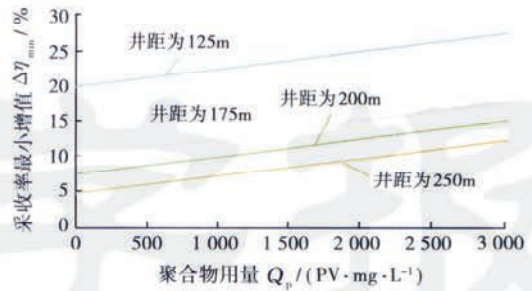


图 3 井距和聚合物用量与提高采收率下限值的关系

Fig. 3 Variation of the limit of needed enhanced oil recovery with polymer dosage under different well spacing

表 2 聚合物用量和井距与提高采收率下限值的关系

Table 2 Variation of the limit of needed enhanced oil recovery with the well spacing and polymer dosage

聚合物用量/ (PV·mg·L ⁻¹)	采收率最小增值/%							
	75 m	100 m	125 m	150 m	175 m	200 m	225 m	250 m
500	56.36	32.25	21.08	15.02	11.36	8.99	7.36	6.20
1000	57.60	33.49	22.32	16.26	12.60	10.23	8.60	7.44
1500	58.84	34.73	23.56	17.50	13.84	11.47	9.84	8.68
2000	60.08	35.97	24.80	18.74	15.08	12.71	11.08	9.92

当注采井距为 175 m, 聚合物用量分别为 500 PV·mg/L、1000 PV·mg/L 和 1500 PV·mg/L 的情况下, 二类储层油价与提高采收率下限值的关系曲线见图 4。

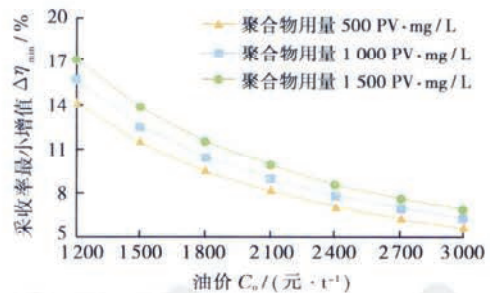


图 4 聚合物用量和油价与提高采收率下限的关系

Fig. 4 Variation of the limit of needed enhanced oil recovery with oil price under different polymer dosage

从图 4 可以看出,对于二类储层聚合物驱,按实际采收率最大增值 12% 计算^[6],油价 C_o 为 1500 元/t 时,最小的注采井距为 175 m, 最大的聚合物用量为 1000 PV·mg/L。若进一步缩小井距或增大聚合物用量,则油价更高。

2.3 三类储层 ($\phi=18\%$, $K=0.01 \mu\text{m}^2$, $h=7 \text{ m}$)

当油价 C_o 为 1500 元/t 时,注采井距分别为 125 m、175 m、200 m 和 250 m 时,三类储层聚合物用量与

提高采收率下限值的关系曲线见图5。从图5可以看出,三类储层在200 m井距下,即使聚合物用量降到500 PV·mg/L,采收率至少也需要提高13%以上才具有经济效益。因此,在油价为1500元/t和目前的技术条件下,在三类储层中开展聚合物驱不具有可行性。

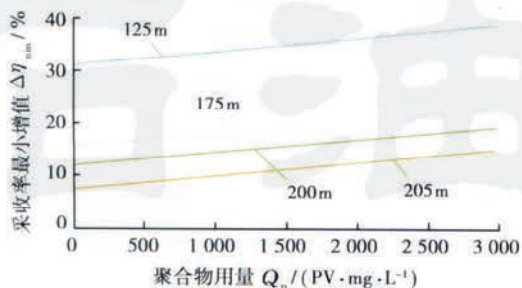


图5 不同井距下聚合物用量与提高采收率下限值的关系
Fig. 5 Variation of the limit of needed enhanced oil recovery with polymer dosage under different well spacing

当油价 C_o 为1500元/t时,聚合物用量为500~2000 PV·mg/L时,三类储层注采井距与提高采收率下限值的关系曲线见表3。

表3 不同聚合物用量下井距与提高采收率下限值的关系
Table 3 Variation of the limit of needed enhanced oil recovery with well spacing and polymer dosage

聚合物用量/ (PV·mg·L ⁻¹)	采收率最小增值/%							
	75 m	100 m	125 m	150 m	175 m	200 m	225 m	250 m
500	88.74	50.46	32.74	23.11	17.31	13.54	10.96	9.11
1000	89.98	51.70	33.98	24.35	18.55	14.78	12.20	10.35
1500	91.22	52.94	35.22	25.59	19.79	16.02	13.44	11.59
2000	92.46	54.18	36.46	26.83	21.03	17.26	14.68	12.83

与一类、二类储层相比,由于三类储层在同等井网条件下的单井控制储量最小,在相同注采井距、聚合物用量及油价下所需要提高的采收率下限值也最大。当注采井距为250 m,聚合物用量分别为500 PV·mg/L、1000 PV·mg/L和1500 PV·mg/L的情况下,三类储层油价与提高采收率下限值的关系曲线见图6。

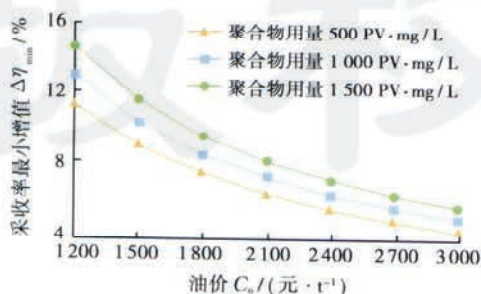


图6 聚合物用量和油价与提高采收率下限值的关系
Fig. 6 Variation of the limit of needed enhanced oil recovery with oil price under different polymer dosage

从图6可以看出,对于三类储层聚合物驱,按实际采收率最大提高8%计算,若 C_o 为1500元/t时,最小的注采井距为250 m,最大的聚合物用量为500 PV·mg/L。而采用250 m的注采井距对三类储层聚驱而言,井距偏大。要缩小注采井距,提高聚合物驱控制程度,又会导致投资增大。因此,必须进一步降低单井投资,聚合物驱技术在三类储层中才可能得到有效应用。

2.4 聚合物用量对采收率的影响

若仅考虑聚合物用量对采收率的影响,并将取定的相关参数代入 K_1 表达式,则式(8)可变为

$$\Delta\gamma_{p,\min} = 3.72Q_p/C_o \quad (9)$$

式(9)表明,聚合物投资所需要提高的采收率下限值 $\Delta\gamma_{p,\min}$ 仅与聚合物用量 Q_p 和油价 C_o 有关。扣除贴水等因素,油价可按1800元/t测算。如果聚合物用量按1000 PV·mg/L考虑^[7],需提高的采收率下限值为2%。若考虑到加密钻井、井网层系调整、地面配制注入系统及采出液处理系统等的投资,在同样的油价和聚合物用量情况下,聚合物驱需要提高的采收率一般应为5%~7%。

3 聚合物用量的优化

根据数值模拟计算,在一定的油层条件和聚合物增粘效果下,聚合物用量越大,提高采收率的幅度越高。但当聚合物用量达到一定值以后,提高采收率的幅度就逐渐变小^[8],而每吨聚合物增油量却有一个最佳区间。随着聚合物用量的增加,每吨聚合物增油量也增加。但当聚合物用量超过一定值后,每吨聚合物增油量则随着聚合物用量的增加而减少(图7)。因此,聚合物的最佳用量原则是保证采收率增值幅度较高及每吨聚合物增油量较大。

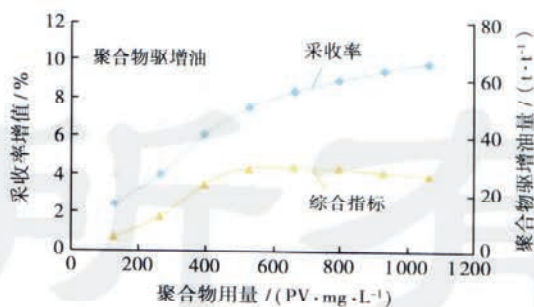


图7 聚合物用量优化结果
Fig. 7 The optimum polymer dosage

根据上述原则建立目标函数

$$F(\Delta\gamma, \Delta Q_{opt}) = \Delta\gamma \Delta Q_{opt} = \frac{\Delta\gamma^2}{Q_p} \frac{S_{oi} \rho_o}{B_{oi}} \quad (10)$$

对式(10)中 Q_p 求导,并注意 $\Delta\gamma = \Delta\gamma(Q_p)$,化简得

$$2 \frac{d\Delta\eta}{dQ_p} Q_p - \Delta\eta = 0 \quad (11)$$

求解后可得

$$\Delta\eta = m_1 \ln Q_p + m_2 \quad (12)$$

将式(12)代入式(11)得在采收率增值幅度和每吨聚合物增油量均较大的原则下所需要的最佳聚合物用量为

$$Q_{\text{obj}} = \exp\left(\frac{2m_1 - m_2}{m_1}\right) \quad (13)$$

4 实例分析

某油田聚合物驱试验区目的层孔隙度为 18.2%，渗透率为 $0.189 \mu\text{m}^2$ ，有效厚度为 15.3 m，原始含油饱和度为 75%，原油体积系数为 1.18，原油密度为 0.86 g/cm^3 ，聚合物费用除外的平均单井投资为 200 万元。

聚合物驱注入方案设计采用 0.5 PV 的段塞尺寸，段塞质量浓度为 1200 mg/L ，聚合物用量为 $600 \text{ PV} \cdot \text{mg/L}$ ，预计提高采收率 8.04%。

数值模拟研究表明，该项目 $\Delta\eta$ 与 Q_p 的关系式为

$$\Delta\eta = 3.7663 \ln Q_p - 16.312 \quad (14)$$

由式(13)可得最佳聚合物用量为 $562 \text{ PV} \cdot \text{mg/L}$ ，考虑到现场注入过程中聚合物有损失，选择 $600 \text{ PV} \cdot \text{mg/L}$ 的聚合物用量是合适的。

对该方案评价时可将聚合物用量和相关数据代入式(7)，可求得该项目在投资控制下需要提高的采收率下限值为 6.9%。而方案设计提高的采收率为 8.04%，因此，该项目具有经济效益。

5 结论

(1) 在现有技术经济条件下，在一类、二类储层中开展聚合物驱是可行的，而在三类储层中的应用难度还非常大。在钻井投资的控制下，随着技术进步和油价上涨，聚合物驱技术能在较浅的三类储层中率先得到应用。

(2) 在储层类型一定的情况下，聚合物驱需要提高的采收率与注采井距、聚合物用量和油价密切相关。根据目前国内聚合物驱项目的实际情况，若聚合物用量按 $1000 \text{ PV} \cdot \text{mg/L}$ 考虑，则仅聚合物投资需要提高的采收率为 2%。若进一步考虑聚合物驱所需要的加密钻井、井网层系调整、地面配制注入系统及采出液处理系统等项目投资，则聚合物驱方案设计提高的采收率应为 5%~7%。

(3) 通过采收率指标和每吨聚合物增油量指标对聚合物用量进行综合优化，并用优化后的聚合物用量反算出聚合物驱需要提高的采收率下限值，借此可以检验方案设计的采收率指标是否合理。

参考文献

- [1] 计秉玉. 对大庆油田进一步开展三次采油技术研究工作的几点意见[J]. 大庆石油地质与开发, 2003, 22(6): 60-62.
Ji Bingyu. Suggestions on further study on EOR in Daqing Oilfield [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2003, 22(6): 60-62.
- [2] 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): 1-8.
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): 1-8.
- [3] 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.
- [4] 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. Potential evaluation of polymer flooding in Daqing Oilfield [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2001, 20(2): 50-52.
- [5] 王德民, 程杰成, 吴军政, 等. 聚合物驱油技术在大庆油田的应用[J]. 石油学报, 2005, 26(1): 74-78.
Wang Demin, Cheng Jiecheng, Wu Junzheng, et al. Application of polymer flooding technology in Daqing Oilfield [J]. Acta Petroli Sinica, 2005, 26(1): 74-78.
- [6] 廖广志, 牛金刚, 邵振波, 等. 大庆油田工业化聚合物驱效果及主要做法[J]. 大庆石油地质与开发, 2004, 23(1): 48-51.
Liao Guangzhi, Niu Jingang, Shao Zhenbo, et al. Application and experience of industrialized polymer flooding in Daqing Oilfield [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2004, 23(1): 48-51.
- [7] 孔柏岭, 宋振宇. 耐高温抗盐的低浓度交联聚合物体系研究[J]. 石油学报, 2000, 21(4): 70-74.
Kong Boling, Song Zhenyu. Study on the low concentration polymer cross-linking system at high temperature and salinity conditions [J]. Acta Petroli Sinica, 2000, 21(4): 70-74.
- [8] 刘丁增, 王启民, 李伯虎. 大庆多层砂岩油田开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996: 248-258.
Liu Dingzeng, Wang Qimin, Li Bohu. The development of multi-layer sandstone oilfield in Daqing [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996: 248-258.

(收稿日期 2006-05-25 改回日期 2006-08-06 编辑 孟伟铭)