

文章编号:1673-5005(2006)01-0086-04

聚合物驱后提高采收率技术研究

赵福麟, 王业飞, 戴彩丽, 任 焯, 焦 翠

(中国石油大学 石油工程学院, 山东 东营 257061)

摘要:根据聚合物驱和聚合物驱后存在的问题,提出了聚合物驱后地层残留聚合物的再利用、深部调剖、高效洗油3项提高采收率技术。地层残留聚合物的再利用技术由絮凝技术和固定技术组成,利用地层残留聚合物封堵高渗透层,提高水驱的波及系数;深部调剖技术对残留聚合物再利用后的地层进行补充调剖,进一步提高水驱的波及系数;高效洗油技术既弥补了聚合物驱机理的不足,也弥补了聚合物不可入孔隙体积所损失的那部分波及系数。地层残留聚合物再利用的矿场试验效果证实了该技术对注聚油田的适应性和可行性。

关键词:聚合物驱;提高采收率;深部调剖;驱油;矿场试验

中图分类号:TE 357.46 **文献标识码:**A

Techniques of enhanced oil recovery after polymer flooding

ZHAO Fu-lin, WANG Ye-fei, DAI Cai-li, REN Shang, JIAO Cui

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

Abstract: According to the problems during and after polymer flooding, the techniques of enhanced oil recovery(EOR) after polymer flooding including the reuse technique of residual polymer in formation, the deep profile control technique and the high efficiency oil displacement technique were put forward. The reuse technique of residual polymer in formation includes the flocculating technique and the fixing technique, which uses the residual polymer to shutoff the high permeability formation, and the sweep efficiency of water flooding is enhanced. The deep profile control technique supplies profile control after reuse of residual polymer and further increases the sweep efficiency of water flooding. The high efficiency oil displacement technique supplies the inadequacy of mechanism of polymer flooding and the sweep efficiency lost by the volume of inaccessible pore of polymer. The pilot test results confirm that the techniques of EOR after polymer flooding are adaptable and feasible.

Key words: polymer flooding; enhanced oil recovery; deep profile control; oil displacement; pilot test

聚合物驱是一项较成熟的三次采油技术,该技术可提高采收率8%~15%,但它存在以下问题:(1)聚合物溶液虽有调剖作用,但不能控制高渗透层(特别是特高渗透层);(2)聚合物驱后恢复水驱时存在指进现象,油井产液的含水率上升快;(3)聚合物驱后地层残留着大量聚合物;(4)聚合物在地层中存在不可入孔隙体积(约5%~30%),减小了聚合物驱的波及体积;(5)聚合物驱不存在低油水界面张力所产生的洗油能力。为了解决聚合物及聚合物驱后存在的问题,笔者提出聚合物驱后3项提高采收率技术,即聚合物驱后地层残留聚合物的再利用技术、

深部调剖技术和高效洗油技术,这些技术是具有四次采油性质的技术^[1]。

1 地层残留聚合物的再利用技术

为使地层残留聚合物对后续水驱起调剖作用,研究了地层残留聚合物的絮凝技术和固定技术。

1.1 地层残留聚合物的絮凝技术

絮凝技术是一项向聚合物驱后地层注絮凝剂的技术。絮凝剂为固体颗粒,地层残留聚合物可在其上产生桥接吸附,引起絮凝,形成封堵,从而起到调剖的作用。

收稿日期:2005-08-09

基金项目:中国石油化工股份有限公司2003年先导试验项目

作者简介:赵福麟(1933-),男(汉族),广东广州人,教授,博士生导师,主要从事油田化学研究。

1.1.1 絮凝剂的选择

可用的絮凝剂包括钠土、钙土、粉煤灰、氢氧化钙等固体颗粒。测出了 3% 固体颗粒的沉降体积随时间的变化,结果见表 1。

表 1 3% 固体颗粒的沉降体积随时间的变化

沉降时间 <i>t</i> /min	沉降体积 <i>V</i> /mL			
	钠土	钙土	粉煤灰	氢氧化钙
0	20.0	20.0	20.0	20.0
5	12.5	3.4	0.3	1.6
10	10.2	3.2	0.3	1.5
15	10.1	3.1	0.3	1.5
20	10.1	3.1	0.3	1.5

表 1 说明,钠土为悬浮能力最好的固体颗粒,因此是理想的絮凝剂。若在钠土中加入稳定剂,配成稳定化钠土(YG340-1),其悬浮能力比普通钠土要好(图 1),因此应选稳定化钠土作絮凝剂。

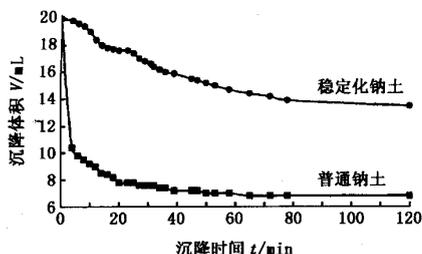


图 1 钠土的沉降体积随时间的变化

1.1.2 絮凝剂配方的优化

为了减少施工时注入工作液的体积,絮凝剂的质量分数应选大一些,但要保证其可泵性达到要求。用油田污水配制不同质量分数的稳定化钠土,测定 30 ℃ 时它们的粘度,结果见表 2。从表 2 可以看到,稳定化钠土的质量分数在 3%~5% 为宜。

表 2 不同质量分数的稳定化钠土的粘度

稳定化钠土 质量分数 <i>w</i> /%	粘度 μ /(mPa·s)	
	孤岛油田污水配制的 μ_{gl}	下二门油田污水配制的 μ_{xm}
1	34.5	20.0
3	56.1	59.1
5	110.8	189.6
7	251.1	435.2
9	505.6	1250.0

注:剪切速率为 170 s⁻¹。

1.1.3 絮凝剂用量的优化

使用图 2 所示的双管模型优化絮凝剂用量。高渗与低渗填砂管的渗透率分别在 3.2 μm² 和 0.8 μm² 附近,渗透率级差约为 4。试验步骤为:①模型饱和水;②模型饱和油;③水驱油至产液含水率达到 98%;④注 0.3 V_p (V_p 为孔隙体积)、质量浓度为 1750 mg·L⁻¹ 的聚合物溶液;⑤水驱约 0.5 V_p 后注

入不同孔隙体积的絮凝剂;⑥转注水至产液含水率达到 98%;⑦计算采收率增值和投入产出比(表 3)。

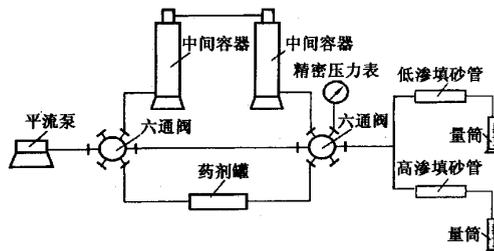


图 2 双管模型的试验流程

表 3 絮凝剂提高采收率增值及投入产出比

注入孔隙体积倍数 <i>n</i>	采收率增值 ΔE_R /%	投入产出比 <i>I</i>
0.05	23.5	1:16.3
0.10	37.2	1:21.3
0.15	42.7	1:24.8
0.20	41.2	1:19.4
0.25	40.1	1:17.9
0.30	26.1	1:9.81

注:油价按 1000 元·t⁻¹,聚合物溶液按 40 元·m⁻³,絮凝剂按 30 元·m⁻³ 计算,其他投入按药剂费用的 1 倍计算。

从表 3 可以看到,虽然絮凝剂注入量增加,采收率增值不断提高,但以注入 0.15 V_p 絮凝剂时投入产出比为最好。

1.1.4 絮凝剂对地层的封堵作用

用残余阻力系数法评价絮凝剂对地层的封堵作用。残余阻力系数是指工作液通过岩心前后的渗透率的比值。考察了不同质量浓度的聚合物与 3% 稳定化钠土对岩心的封堵作用。聚合物质量浓度分别为 0,200,300,400,500 和 600 mg·L⁻¹ 时,残余阻力系数相应为 3.21,22.56,30.25,32.85,36.62 和 39.28。该结果说明,絮凝剂与聚合物作用产生的絮凝体对地层的封堵作用远大于絮凝剂本身的作用;随着聚合物质量浓度的增加,絮凝剂的封堵作用增大,但是絮凝剂在低聚合物质量浓度下,其封堵作用也很大。因此在地层残留聚合物再利用技术中,絮凝技术特别适用于地层残留的低质量浓度的聚合物。

1.2 地层残留聚合物的固定技术

固定技术是一项向聚合物驱后地层注固定剂的技术。固定剂为聚合物交联剂,可将地层残留聚合物交联起来,形成封堵,起调剖作用。

1.2.1 固定剂的选择

在不同的地层温度和配制用水矿化度的条件下,应选择不同的固定剂(表 4)。

表4 固定剂的选择

地层温度 $T_f/^\circ\text{C}$	配制用水矿化度 $\rho_w/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	可选择的固定剂
<80	$<1.5\times 10^4$	醋酸铬、草酸钠、丙酸铬、乳酸铬、柠檬酸铬
80~85	$1.5\times 10^4\sim 3.0\times 10^4$	酚醛树脂、脲醛树脂

1.2.2 固定剂配方的优化

固定剂的优化配方也由岩心试验确定。在进行岩心试验时,首先注入 $0.3V_p$ 聚合物驱用的驱油剂,然后注 $0.5V_p$ 不同质量分数的固定剂溶液,置于地层温度下 24 h,再测岩心的残余阻力系数。选最大残余阻力系数所对应的固定剂溶液的质量分数为固定剂的优化配方。孤岛油田优化的固定剂配方为 1.2% YG107(醋酸铬与乳酸铬的混合物)。

1.2.3 固定剂用量的优化

使用上述絮凝剂用量优化的试验方法对固定剂(YG107)用量进行优化,结果见表5。

表5 固定剂提高采收率增值及投入产出比

注入孔隙体积倍数 n	采收率增值 $\Delta E_R/\%$	投入产出比 I
0.02	20.3	1:10.7
0.05	26.6	1:13.7
0.10	28.0	1:9.9
0.15	30.7	1:8.8
0.20	32.5	1:8.2
0.25	33.4	1:7.0
0.30	36.7	1:6.2

从表5可以看到,虽然固定剂注入量增加,采收率增值不断提高,但以注入 $0.05V_p$ 固定剂时的投入产出比为最好。

2 深部调剖技术

聚合物驱后的深部调剖技术适用于地层残留聚合物再利用后调剖作用仍不足的地层。由于聚合物驱地层条件的特殊性(温度低于 80°C ,地层水矿化度低于 $3\times 10^4\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),所以冻胶型调剖剂是最合适的深部调剖剂。为封堵不同深部的地层,需用不同成冻时间的冻胶调剖剂配方。这些配方由各类冻胶(高价金属离子交联的冻胶和树脂交联的冻胶)的成冻时间等值图选出。

图3是针对孤岛油田西区(地层温度为 70°C ,地层水矿化度为 $9467.4\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),用酚醛树脂交联剂(YG103)交联相对分子质量为 9.5×10^6 、水解度为 18.2%的聚丙烯酰胺(YG100)所得到的酚醛树脂冻胶的成冻时间等值图。由图3可以得到不同成冻时间的酚醛树脂冻胶的配方,见表6。

在各油田条件下,其他冻胶体系(如醋酸铬、丙

酸铬、乳酸铬等冻胶体系)有不同成冻时间的冻胶配方,用于离井眼不同距离地层的调剖。

聚合物驱后深部调剖井的选择、调剖剂用量的计算、调剖充分程度的判别和调剖效果的监测等均可借助注水井调剖使用的相应技术^[2]。

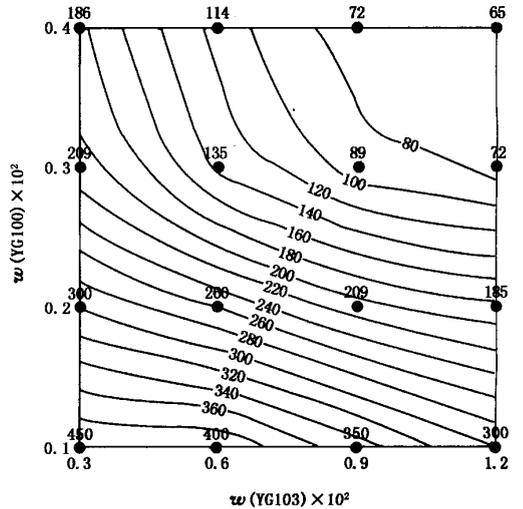


图3 孤岛油田西区酚醛树脂冻胶的成冻时间(h)等值图

表6 孤岛油田西区不同成冻时间的酚醛树脂冻胶的配方

成冻时间 t/d	酚醛树脂冻胶配方
3	0.40% YG100+0.90% YG103
5	0.30% YG100+0.72% YG103
7	0.25% YG100+0.75% YG103
10	0.20% YG100+0.80% YG103
15	0.12% YG100+0.60% YG103

3 高效洗油技术

高效洗油技术是通过使用高效洗油剂达到提高采收率的目的。这项技术的使用既可通过提高洗油效率来弥补聚合物驱机理的不足,又可通过高效洗油剂进入聚合物不可入的孔隙,弥补聚合物驱所损失的那部分波及系数。

高效洗油剂由阴离子型表面活性剂和(或)非离子型表面活性剂配成。高效洗油剂优化配方由不同质量分数的两组分表面活性剂体系与原油的界面张力等值图决定。图4为 70°C 时不同质量分数阴离子型表面活性剂 KPS 与非离子型表面活性剂 Ninol 体系与孤岛原油的界面张力等值图。由图4得到的高效洗油剂配方为 0.50% Ninol。该配方与孤岛原油的界面张力为 $3.99\times 10^{-4}\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$,比超低界面张力值($10^{-3}\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$)低 1 个数量级,因而洗油效率较高^[3]。

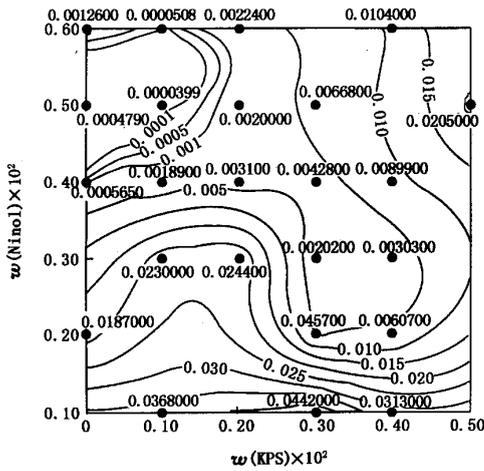


图 4 KPS-Nino1 体系与孤岛原油的界面张力($\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$)等值图

聚合物存在只影响高效洗油剂与原油的动界面张力,但不影响平衡界面张力。由于洗油剂在地层内起作用的时间较长,所以聚合物的存在会引起达到平衡界面张力时间的延长而不会影响驱油效果。

表 7 试验井的基本情况、注聚情况和注聚合物再利用剂情况

试验井	注水层位	射孔井段 H_p/m	射孔层厚 度 D_p/m	注水压力 p_i/MPa	日注量 Q_w/m^3	聚合物溶液		注入干粉		注入量 Q_{in}/m^3		药剂用量 Q_y/t	
						注入量 Q_1/m^3	注入量 Q_2/m^3	固定剂	絮凝剂	YG107	YG340-1		
30-N507	Ng5 ² , 5 ⁴	1262.0~1292.0	21.0	7.0	237	14.3076×10 ⁴	379	482	1929	5.8	58		
30-507	Ng5 ³⁻⁵	1276.0~1295.2	15.2	7.7	260	14.7958×10 ⁴	373	334	3009	4.0	90		

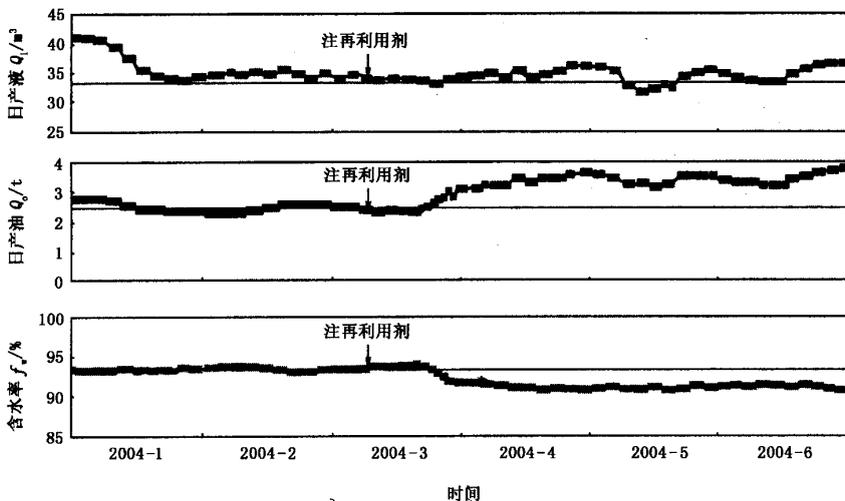


图 5 30-N507 井对应油井 31-XN506 的采油曲线

4 矿场试验

2003 年 12 月至 2004 年 6 月,在孤岛油田馆 5 和双河油田北断块进行了注聚合物再利用剂的矿场试验,取得了好的结果。

孤岛油田馆 5 的试验井为 30-N507 井和 32-507 井。这两口试验井所在地层温度为 70 ℃,干线压力为 12.0 MPa,在 2001 年 11 月至 2004 年 6 月间注聚,注入聚合物相对分子质量在 1.6×10^7 以上,聚合物水解度为 25%~30%,聚合物溶液质量浓度为 1850~2000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。试验井的其他基本情况、注聚情况及注聚合物再利用剂情况见表 7。

试验井注聚合物再利用剂后的效果主要表现在注水压力提高了 1.5~2.0 MPa;井口压降曲线变平缓;指示曲线提高了,相应地层启动压力提高了 1.0~1.5 MPa;吸水剖面层内换位、层间调整;对应油井中明显增油的油井有 3 口,其中 1 口油井的采油曲线见图 5。

重要意义。

(2)聚合物驱后提高采收率技术由地层残留聚合物再利用技术、深部调剖技术和高效洗油技术组成。

(下转第 101 页)

5 结论

(1)聚合物驱后提高采收率技术是一项具有四次采油性质的技术,在提高采收率技术发展具有

的可逆性,当接触载荷降为零时样品的表面变形将完全恢复,不会产生不可恢复的残余塑性变形。TiNi合金冲击过程中吸收能量,降低接触区域应力水平的这种特性是其具有良好耐冲蚀性能和抗冲击能力的主要原因。

3 结 论

(1)马氏体 TiNi 合金冲击响应行为受温度的影响明显。当温度低于逆马氏体相变开始温度时, TiNi 合金样品的性能不发生变化,冲击响应曲线基本重合。而当温度高于逆马氏体相变开始温度时,样品发生逆马氏体相变而向母相转变,弹性模量和硬度增加,随温度的升高, TiNi 合金最大接触载荷增加而接触时间缩短。

(2)当母相 TiNi 合金表面冲击应力大于应力诱发马氏体相变极限应力值时,样品会发生应力诱发马氏体相变,样品的最大冲击载荷出现平台段。

参考文献:

- [1] SHIDA Y, SUGIMOTO Y. Water jet erosion behavior of Ti-Ni binary alloys[J]. *Wear*, 1991, 146:219-228.
- [2] CHENG F T, SHI P, MAN H C. Cavitation erosion resistance of heat-treated NiTi[J]. *Materials Science and Engineering*, 2003, 339A:312-317.
- [3] WU S K, LIN H C, YE H C H. A comparison of the cavitation erosion resistance of TiNi alloy, SUS304 stain-

less steel and Ni-based self-fluxing alloy [J]. *Wear*, 2000, 244:85-93.

- [4] LAGOUDAS D C, RAVI-Chandar K, SARH K, et al. Dynamic loading of polycrystalline shape memory alloy rods[J]. *Mechanics of Materials*, 2003, 35:689-716.
- [5] LIN H C, WU S K and CHANG Y C. Damping characteristics of Ti50 Ni49.5 Fe0.5 and Ti50 Ni40 Cu10 ternary shape-memory alloys[J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 1995, 26A:851-858.
- [6] NI W Y, CHENG Y T and GRUMMON D S. Recovery of microindents in a nickel-titanium shape-memory alloy: "self-healing" effect[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 80A:3310-3312.
- [7] NI W Y, CHENG Y T and GRUMMON D S. Microscopic superelastic behavior of a nickel-titanium alloy under complex loading conditions[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 82:2811-2813.
- [8] LIU R, LI D Y. Indentation behavior of pseudoelastic TiNi alloy[J]. *Scripta Materialia*, 1999, 41:691-696.
- [9] NI W Y, CHENG Y T, GRUMMON D S. Microscopic shape memory and superelastic effects under complex loading conditions[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2004, 177-178:512-517.
- [10] QIAN L M, XIAO X D, SUN Q P, et al. Anomalous relationship between hardness and wear properties of a superelastic nickel-titanium alloy [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84:1076-1079.

(编辑 沈玉英)

(上接第89页)

(3)从措施的投入和对提高采收率的贡献考虑,聚合物驱后提高采收率技术的使用顺序应为:地层残留聚合物的再利用技术、深部调剖技术、高效洗油技术。

(4)地层残留聚合物再利用技术对注聚油田具有适应性和可行性。

参考文献:

- [1] 郭尚平,田根林,王芳,等.聚合物驱后进一步提高采收率的四次采油问题[J]. *石油学报*, 1997, 18(4):49-53.
- GUO Shang-ping, TIAN Gen-lin, WANG Fang, et al.

The problem of quaternary oil recovery succeeding a polymer flooding[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1997, 18(4):49-53.

- [2] 李宜坤,赵福麟,刘一江.区块整体调剖的PI决策技术研究[J]. *石油大学学报:自然科学版*, 1997, 21(2):39-42.
- LI Yi-kun, ZHAO Fu-lin, LIU Yi-jiang. Decision technique for pressure index on profile control in an entire tract[J]. *Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science)*, 1997, 21(2):39-42.
- [3] 赵福麟. EOR原理[M]. 东营:石油大学出版社, 2001: 123-126.

(编辑 李志芬)