

改善聚表剂溶液储层适应性方法及其效果评价

姜晓磊¹, 卢祥国², 苑盛旺², 曹伟佳²

(1. 中国石油大庆油田有限责任公司 第八采油厂, 黑龙江 大庆 163000;

2. 东北石油大学 提高油气采收率教育部重点实验室, 黑龙江 大庆 163318)

摘要:以油藏工程、物理化学和有机化学为理论指导,以仪器分析、化学分析和物理模拟为技术手段,以大庆油区储层和流体为研究对象,以抗盐聚表剂溶液粘度、流变性、粘弹性、界面特性、分子线团尺寸、分子聚集体形态和注入压力等为评价指标,开展了改善聚表剂溶液储层适应性方法及其效果实验研究。结果表明,在大庆污水或清水条件下,聚表剂分子间缔合作用完全消失所需 β -环糊精的最低质量分数为0.065%。随着 β -环糊精质量分数的增加,聚表剂分子链间缔合作用减弱,连接各个聚集体的支链变细,呈现松散分枝状结构,进而造成聚表剂溶液粘度降低和粘弹性减弱。随着 β -环糊精质量分数的增加,聚表剂溶液中聚表剂分子线团尺寸减小,与其相匹配岩心孔喉尺寸降低,适应渗透率范围增加。

关键词:聚表剂 β -环糊精 分子线团尺寸 孔喉尺寸 适应性

中图分类号:TE357.431

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2015)06-0096-06

Method of improving the reservoir adaptability of polymer-surfactant and its application effect

Jiang Xiaolei¹, Lu Xiangguo², Yuan Shengwang², Cao Weijia²

(1.No.8 Oil Production Plant of Daqing Oilfield Company Ltd., Daqing City, Heilongjiang Province, 163000, China;

2.Key Laboratory of Enhanced Oil and Gas Recovery of Educational Ministry, Northeast Petroleum University, Daqing City, Heilongjiang Province, 163318, China)

Abstract: Guided by theories of reservoir engineering, physical chemistry and organic chemistry, by means of instrumental analysis, chemical analysis and physical simulation, taking reservoir and fluid of Daqing oilfield as research object, experiments have been carried out considering evaluation indexes of viscosity, rheological property, viscoelasticity, interface property, molecular coil size, state of molecular aggregation and injection pressure of salt-resistance polymer-surfactant solution, so that polymer-surfactant can be more suitable for the reservoir. Results show that the minimum concentration of β -cyclodextrin that is needed to completely inhibit the association of polymer-surfactant molecules is 0.065% under the condition of sewage or clean water from Daqing. With the increase of the concentration of β -cyclodextrin, the association of the molecular chains of the polymer-surfactant became weaker and the branch connected each aggregation became thinner, thus the molecular configuration presented a kind of loose branching structure. This resulted in the drop of viscosity and the loss of viscoelasticity. With the increase of the concentration of β -cyclodextrin, the molecular coil size of the polymer-surfactant solution decreased as well as the compatible pore throat size, which resulted in a wider permeability scope.

Key words: polymer-surfactant; β -cyclodextrin; molecular coil size; pore throat size; adaptability

大庆油区自1997年实施聚合物驱工业化应用以来,应用对象已从主力油层逐渐向二、三类油层拓展^[1-3],溶解聚合物干粉用水也从清水转换为清配

污稀和污水配制^[4]。与清水相比较,污水矿化度较高,导致聚合物溶液粘度下降,增油效果受到影响。为适应清配污稀和污水配制的客观状况,一些抗盐

收稿日期:2015-09-21。

作者简介:姜晓磊(1988—),女,吉林梨树人,硕士,从事提高采收率技术研究。联系电话:(0459)6503406, E-mail:jiangxiaolei613@126.com。

基金项目:黑龙江省自然科学基金重点项目“抗盐型聚合物缔合程度及其油藏适应性研究”(ZD201312)。

能力强的聚合物产品如聚表剂、疏水缔合聚表剂和功能聚表剂等开始在大庆油区投入矿场试验^[5-8]。与普通部分水解聚丙烯酰胺相比,抗盐聚表剂通常是通过改变聚合物分子聚集体,即将现有聚合物分子聚集体由线性支链型转变为区域网状型,从而使其具有较好增粘性即抗盐性^[9]。尽管通过改变聚合物分子聚集体形态可以实现提高溶液视粘度的目的,但也导致聚合物分子聚集体尺寸与储层岩石孔隙尺寸间适应性变差^[10],造成聚合物溶液在注入储层过程中受到的剪切作用加剧甚至注入困难,最终导致聚合物驱增油效果变差^[11]。为此,笔者以油藏工程、物理化学和有机化学为理论指导,以仪器分析、化学分析和物理模拟为技术手段,以大庆油区储层和流体为研究对象,以抗盐聚表剂溶液粘度、分子线团尺寸、分子聚集体形态和注入压力等为评价指标,开展了改善聚表剂溶液储层适应性方法及其效果实验研究,对于提高抗盐型聚合物驱增油效果具有重要理论意义。

1 实验条件

1.1 实验原理

β -环糊精具有疏水性内腔,可以包含一系列客体分子。因此,常作为主体分子被广泛应用于构建超分子聚集体。 β -环糊精与客体分子间通过相互作用,进行自组装,实现对客体分子聚集体尺寸和内摩擦力的调节。在抗盐聚表剂溶液中,由于存在“功能基团”,其分子间可以通过缔合作用自行组装成大分子网络结构。当 β -环糊精主体分子加入到抗盐聚表剂溶液中后,它可以包含“功能基团”,拆散缔合网络结构,改变分子聚集体尺寸,引起溶液粘度大幅度下降^[12-13]。

将缔合程度定义为

$$\lambda = \frac{\eta_c - \eta}{\eta_i - \eta} \times 100\% \quad (1)$$

式中: λ 为缔合程度,%; η_c 为添加不同质量分数 β -环糊精时溶液粘度,mPa·s; η 为聚表剂溶液中缔合作用受到完全抑制时溶液粘度,即临界粘度,mPa·s; η_i 为未添加 β -环糊精时溶液初始粘度,mPa·s。

1.2 实验材料

抗盐聚表剂相对分子质量为 700×10^4 ,固含量为90%,大庆炼化公司生产;调节剂为 β -环糊精,国药集团化学试剂有限公司生产;界面特性实验用油为航空煤油;实验用水为大庆油区采油一厂注入

水,水质分析结果见表1;实验用岩心为人造柱状岩心^[13],直径和长度分别为2.5和10 cm,气测渗透率为 $100 \times 10^{-3} \sim 535 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

表1 大庆油区采油一厂注入水水质分析结果

Table1 Water quality analysis of the injection water from 1st oil production plant of Daqing oilfield mg/L

水型	阳离子质量浓度			阴离子质量浓度				总矿化度
	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	
清水	231.20	34.10	24.30	90.00	225.10	88.70	36.00	729.30
污水	1 265.00	32.06	7.30	210.07	1 708.56	780.12	9.61	4 012.72

采用DV-II型布氏粘度计(Brookhaven Instruments Cop, USA)测试聚表剂溶液粘度,转速为6 r/min。采用Haake Rheo-Stress6000型流变仪测试聚表剂溶液流变性和粘弹性。采用DHR流变仪(美国TA公司)测试聚表剂溶液与原油间界面流变性和界面粘弹性。采用BI-200SM型广角动/静态光散射仪(Brookhaven Instruments Cop, USA)系统测试驱油剂中聚表剂分子线团尺寸(D_h)。采用HitachiS-3400N扫描电镜SEM(日本东京日立公司)观测聚表剂分子聚集态。采用驱替实验装置测试聚表剂溶液的流动特性,该实验装置主要包括平流泵、压力传感器、岩心夹持器、手摇泵和中间容器等。除平流泵和手摇泵外,其他部分置于恒温箱内。

所有实验在油藏温度(45 ℃)条件下进行。

2 实验结果分析

2.1 β -环糊精对聚表剂溶液性能的影响

2.1.1 增粘性和粘弹性

粘度 分别采用清水和污水配制质量浓度为1 000 mg/L的聚表剂溶液,再加入不同质量分数 β -环糊精进行粘度测试。由聚表剂溶液粘度测试结果(表2)可知,随着 β -环糊精质量分数增加,聚表剂溶液粘度降低。当 β -环糊精质量分数超过0.065%时,聚表剂溶液粘度不再减小,此时缔合程度为0,表明缔合作用受到完全抑制。这是由于 β -环糊精的疏水缔合空腔包含了聚表剂的“功能基团”,降低其缔合程度直至完全抑制其缔合。进一步分析发现,矿化度对 β -环糊精抑制缔合作用几乎没有影响。

流变性 采用污水配制质量浓度为1 000 mg/L的聚表剂溶液,加入不同质量分数 β -环糊精,由其视粘度与剪切速率关系(图1)可知, β -环糊精对聚表剂溶液的流变性存在影响。在聚表剂质量浓度一定的条件下,加入不同质量分数的 β -环糊精后溶

表2 聚表剂溶液粘度测试结果
Table2 Viscosity test result of polymer-surfactant solution

β-环糊精质量分数, %	清 水		污 水	
	粘度/(mPa·s)	缔合程度, %	粘度/(mPa·s)	缔合程度, %
0	65.2	100	36.6	100
0.002	60.5	78.6	34.0	74.8
0.005	55.5	55.9	31.3	48.5
0.01	49.2	27.3	28.6	22.3
0.02	47.6	20.0	28.3	19.4
0.03	45.8	11.8	27.7	13.6
0.04	44.6	6.4	27.1	7.8
0.05	44.1	4.1	26.9	5.8
0.06	43.5	1.4	26.5	1.9
0.065	43.2	0	26.3	0
0.07	43.3	0.5	26.3	0

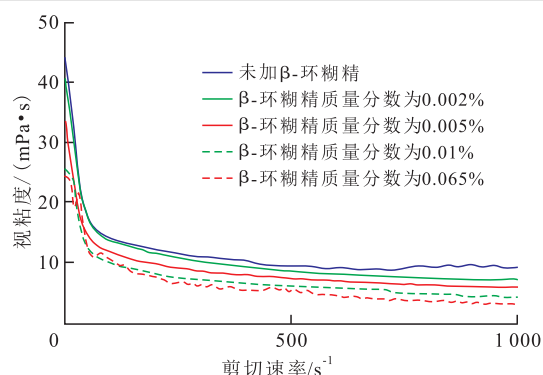


图1 聚表剂溶液视粘度与剪切速率的关系

Fig.1 Relationship between visual viscosity of polymer-surfactant solution and shearing rate

液流变性相近,即随着剪切速率增加,聚表剂溶液表现出剪切变稀的流变特性。进一步分析发现,在剪切速率相同条件下,随着β-环糊精质量分数降低,缔合程度增加,聚表剂溶液视粘度增大。

粘弹性 采用污水配制质量浓度为1 000 mg/L的聚表剂溶液,加入不同质量的β-环糊精,进行粘弹性测试。由储能模量和损耗模量与振荡频率的关系(图2)可知,β-环糊精对聚表剂溶液储能模量和损耗模量存在影响。加入不同质量分数的β-环糊精,聚表剂溶液储能模量和损耗模量与振荡频率变化趋势相似,即随着振荡频率增大,聚表剂溶液表现出增弹特性和增粘特性。随着β-环糊精质量分数减小,储能模量和损耗模量增大,粘弹性增强。

界面流变性 采用污水配制质量浓度为1 000 mg/L的聚表剂溶液,加入不同质量分数β-环糊精,由其界面粘度与剪切速率关系(图3)可知,在聚表剂质量浓度一定的条件下,加入不同质量分数β-环糊精后溶液界面流变性相近,即随着剪切速率增加,界面粘度降低。随着β-环糊精质量分数增加,

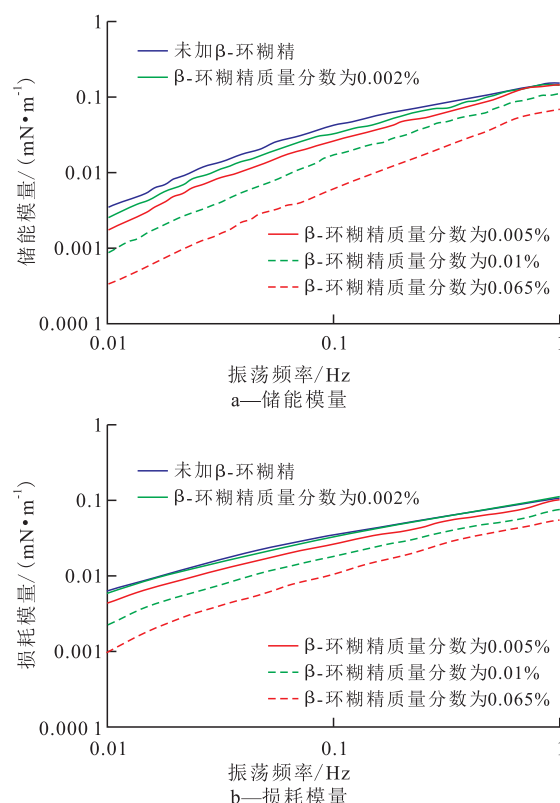


图2 聚表剂溶液储能模量和损耗模量与振荡频率的关系

Fig.2 Relationship between oscillation frequency and storage modulus of polymer-surfactant solution, loss modulus of polymer-surfactant solution

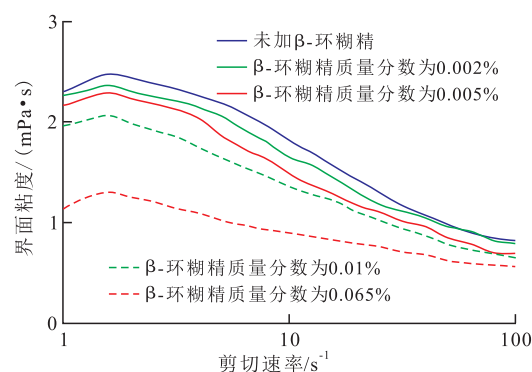


图3 聚表剂溶液界面粘度与剪切速率的关系

Fig.3 Relationship between interfacial viscosity of polymer-surfactant solution and shearing rate

聚表剂溶液界面粘度逐渐降低。其原因在于,聚表剂分子链上具有多个链节,而这些链节都可能吸附在界面上,β-环糊精抑制功能基团缔合,使得分子链变细、变短,进而使得在油水界面上聚表剂分子间相互作用力减弱。聚表剂在油水界面上吸附和定向排列,可以形成油水界面膜,使界面吸附层变薄,表现为膜强度的降低,界面的流动性变好^[14-17]。

界面粘弹性 采用污水配制质量浓度为1 000 mg/L的聚表剂溶液,加入不同质量分数的β-环糊精,由其储能模量和损耗模量与角频率的关系(图4)可以看出,随着β-环糊精质量分数的增加,聚表

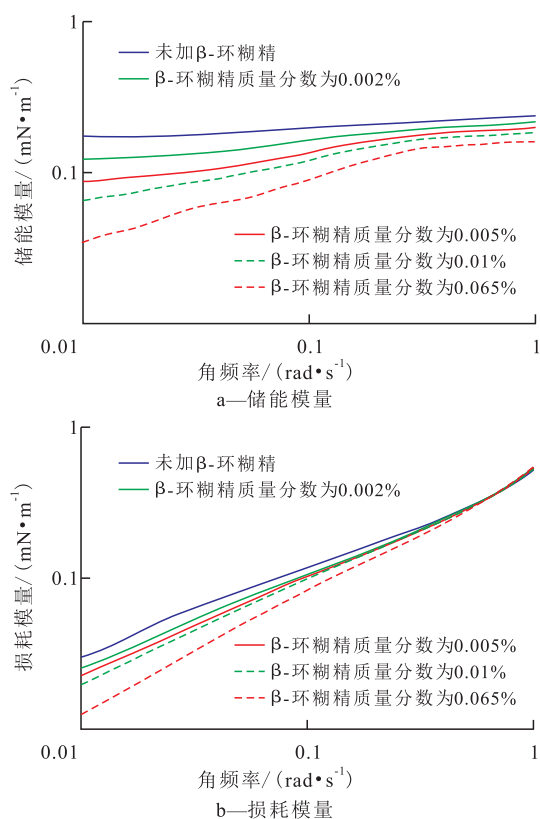


图4 聚表剂溶液储能模量和损耗模量与角频率关系

Fig.4 Relationship between angular frequency and storage modulus of polymer-surfactant solution, loss modulus of polymer-surfactant solution

剂溶液的储能模量和损耗模量降低。其原因在于,随着 β -环糊精质量分数增加,聚表剂溶液粘度降低,界面膜强度降低,导致聚表剂溶液界面储能模量和损耗模量降低。在 β -环糊精质量分数相同的条件下,随着角频率增加,储能模量和损耗模量逐渐升高。其原因在于,随着剪切速率增加,界面通过各种弛豫过程耗散外力作用程度逐渐减弱,界面对抗剪切形变阻力增大。因此,随着剪切速率的增大,界面储能模量和损耗模量增大。从图4还可以看出,随着角频率增加,储能模量变化幅度不大,表明振荡频率对界面粘弹性影响不大^[18-19]。

2.1.2 分子聚集体形态和线团尺寸

分子聚集体形态 采用污水配制质量浓度为1 000 mg/L的聚表剂溶液,加入不同质量分数的 β -环糊精,然后稀释为质量浓度为100 mg/L的目的液,由其扫描电镜实验(SEM)结果(图5)可见, β -环糊精对聚表剂溶液分子聚集体形态存在影响。未加 β -环糊精时,聚表剂分子链上无规则分布疏水基团通过链内或链间缔合作用,形成尺寸较大的聚集体,而聚集体之间又通过链间缔合作用连接在一起,形成了致密多层立体空间网络结构,支链较粗(图5a)。随着 β -环糊精的加入和质量分数的增加,

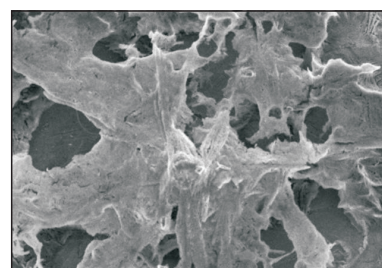
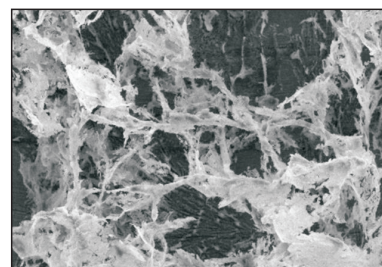
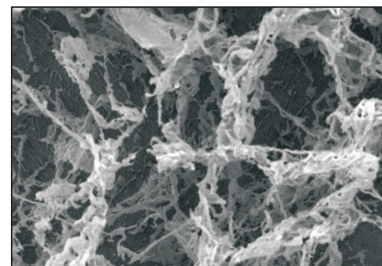
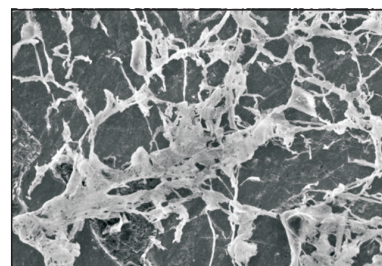
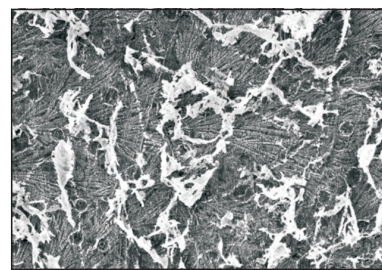
a—未加 β -环糊精b— β -环糊精质量分数为0.002%c— β -环糊精质量分数为0.005%d— β -环糊精质量分数为0.01%e— β -环糊精质量分数为0.065%

图5 聚表剂溶液分子聚集体SEM照片

Fig.5 SEM photos of the aggregation of polymer-surfactant solution molecules

聚表剂分子链间缔合作用减弱,连接聚集体的支链变细,呈现出松散的枝状结构(图5b—5e)。

分子线团尺寸 采用污水配制质量浓度为1 000 mg/L的聚表剂溶液,加入不同质量分数的 β -环糊精,然后稀释成质量浓度为100 mg/L。 β -环糊精质量分数分别为0, 0.002%, 0.005%, 0.01%和

0.065%时,对应的聚表剂分子线团尺寸分别为587.5,547.5,477.7,346.5和281.6 nm。可以看出, β -环糊精对聚表剂分子线团尺寸存在影响。随着 β -环糊精质量分数的增加,分子线团尺寸逐渐降低。由此可见, β -环糊精可以屏蔽疏水基团,抑制聚表剂分子链间的缔合作用,进而降低分子线团尺寸。

2.2 β -环糊精对聚表剂溶液储层适应性的影响

将添加不同质量分数 β -环糊精的聚表剂溶液(质量浓度为1 000 mg/L)注入渗透率从高到低的岩心中,确定注入压力可以达到稳定时对应岩心渗透率即渗透率极限。 β -环糊精质量分数分别为0,0.002%,0.005%,0.01%和0.065%时,对应的渗透率极限分别为 490×10^{-3} , 345×10^{-3} , 230×10^{-3} , 195×10^{-3} 和 $160 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。随着 β -环糊精质量分数的增加,与 β -环糊精/聚表剂体系相适应岩心渗透率降低^[14-15]。由此可见, β -环糊精增加了聚表剂可进入储层渗透率范围,有利于扩大波及体积和提高采收率。

大庆油区储层岩石气测渗透率与孔喉半径中值统计关系为

$$K_g = 9.853 4 D_\phi^2 + 18.09 D_\phi \quad (2)$$

式中: K_g 为气测渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; D_ϕ 为孔喉半径中值, μm 。

利用式(2)将渗透率转换为孔喉半径中值,得到其与聚表剂分子线团尺寸间关系曲线(图6)。从图6可以看出,曲线将图中区域分为上、下2部分,下部区域为配伍区,上部区域为堵塞区^[19-20];孔喉半径中值与分子线团尺寸之比为8~12。

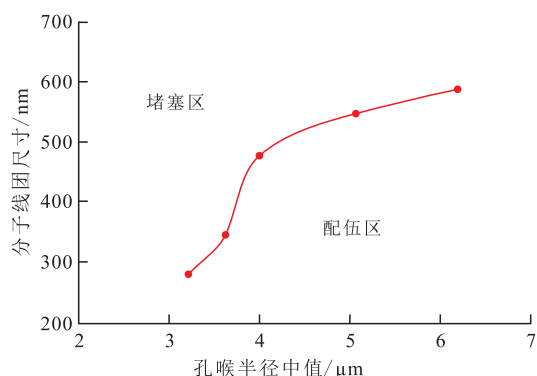


图6 聚表剂分子线团尺寸与孔喉半径中值关系

Fig.6 Relationship between molecular coil size of polymer-surfactant and median pore throat radius

3 结论

在大庆污水或清水条件下,聚表剂分子间缔合

作用完全消失所需 β -环糊精最低质量分数为0.065%。随着 β -环糊精质量分数的增加,聚表剂分子链间缔合作用减弱,连接各个聚集体的支链变细,呈现松散分枝状结构,进而造成聚表剂溶液粘度降低和粘弹性减弱。 β -环糊精可以抑制功能基团缔合作用,减小聚表剂分子线团尺寸,进而减小它能够进入的储层岩石渗透率极限,孔喉半径中值与分子线团尺寸之比为8~12。

参考文献:

- [1] 曹绪龙,刘坤,韩玉贵,等.耐温抗盐缔合聚合物的合成及性能评价[J].油气地质与采收率,2014,21(2):10-14.
Cao Xulong, Liu Kun, Han Yugui, et al. Synthesis and properties of heat-tolerance and salt-resistance hydrophobically associating water-soluble polymer[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(2): 10-14.
- [2] 张晓芹,关文婷,李霞,等.大庆油区聚合物驱矿场合理停注时机及实施方法[J].油气地质与采收率,2015,22(1):88-92.
Zhang Xiaoqin, Guan Wenting, Li Xia, et al. Reasonable polymer injection stopping-time and methods for polymer flooding in the field of Daqing oilfield[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(1): 88-92.
- [3] 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 Petrolei Sinica, 2005, 26(1): 74-78.
- [4] 樊剑,韦莉,罗文利,等.污水配制聚合物溶液黏度降低的影响因素研究[J].油田化学,2011,28(3):250-253.
Fan Jian, Wei Li, Luo Wenli, et al. Influencing factors of the viscosity decrease on polymer sewage solution[J]. Oilfield Chemistry, 2011, 28(3): 250-253.
- [5] 葛广章,王勇进,王彦玲,等.聚合物驱及相关化学驱进展[J].油田化学,2001,18(3):282-284.
Ge Guangzhang, Wang Yongjin, Wang Yanling, et al. Progresses in polymer and related chemical flooding for EOR[J]. Oilfield Chemistry, 2001, 18(3): 282-284.
- [6] 朱怀江,刘强,沈平平,等.聚合物分子尺寸与油藏孔喉的配伍性[J].石油勘探与开发,2006,33(5):609-613.
Zhu Huaijiang, Liu Qiang, Shen Pingping, et al. Compatibility between polymer molecular size and pore throat in reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(5): 609-613.
- [7] 周亚洲,殷代印,张承丽.大庆油区三元复合驱耐碱性调剖剂的研制与段塞组合优化[J].油气地质与采收率,2014,21(5):73-76.
Zhou Yazhou, Yin Daiyin, Zhang Chengli. Preparation and plug optimization of profile control agent in ASP flooding[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(5): 73-76.
- [8] 吴淑云,白艳明,宋杰,等.大庆油田中区西部三次加密井注聚试验效果评价[J].石油勘探与开发,2004,31(4):123-125.
Wu Shuyun, Bai Yanming, Song Jie, et al. Polymer-injection re-

- sponse of tertiary infilling producers in the west-central area, Daqing Oilfield [J].Petroleum Exploration and Development, 2004,31(4):123-125.
- [9] 冯玉军,郑焰,罗平亚.疏水缔合聚丙烯酰胺的合成及溶液性能研究[J].化学研究与应用,2000,12(1):70-73.
Feng Yujun, Zheng Yan, Luo Pingya. Aqueous solution properties of hydrophobically associating polyacrylamide [J]. Chemical Research and Application, 2000, 12(1): 70-73.
- [10] 卢祥国,高振环.聚合物相对分子质量与岩心渗透率配伍性——孔隙喉道半径与聚合物分子线团回旋半径比[J].油田化学,1996,13(1):72-75.
Lu Xiangguo, Gao Zhenhuan. Pore throat radius to coil gyration radius ratio as characteristic of adaptivity of polymer molecular mass to core permeability [J]. Oilfield Chemistry, 1996, 13(1): 72-75.
- [11] 姜晓磊,王荣健,卢祥国,等.聚合物相对分子质量与油藏储层适应性研究[J].油田化学,2014,31(2):269-273.
Jiang Xiaolei, Wang Rongjian, Lu Xiangguo, et al. Experimental study on the reservoir adaptability of polymer molecular weight [J]. Oilfield Chemistry, 2014, 31(2): 269-273.
- [12] 张玉梅.改善抗盐聚合物油藏适应性方法及其效果研究[D].大庆:东北石油大学,2013.
Zhang Yumei. Study on improving the reservoir adaptability of salt-resisting polymer and its application effect [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2013.
- [13] 卢祥国,高振环,闫文华.人造岩心渗透率影响因素试验研究[J].大庆石油地质与开发,1994,13(4):53-55.
Lu Xiangguo, Gao Zhenhuan, Yan Wenhua. Experimental study of factors influencing permeability of artificial core [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 1994, 13(4): 53-55.
- [14] 夏慧芬,吕江艳,冯海潮,等.弱碱对三元复合体系/油界面扩张黏弹性影响[J].实验技术与管理,2013,30(10):34-37.
Xia Huifen, Lü Jiangyan, Feng Haichao, et al. Influence of different weak alkali on interface dilation viscoelastic properties of ASP flooding system and oil [J]. Experimental Technology and Management, 2013, 30(10): 34-37.
- [15] 侯吉瑞,谢玉银,赵凤兰,等.复合体系各组分对油水界面剪切粘弹性的影响规律[J].油气地质与采收率,2015,22(1):68-73.
Hou Jirui, Xie Yuyin, Zhao Fenglan, et al. Effects of components in combination system on oil-water interfacial shear viscoelasticity [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(1): 68-73.
- [16] 叶仲斌,刘向君,杨建军,等.聚合物与表面活性剂二元驱油体系界面性质研究[J].油气地质与采收率,2002,9(3):7-9,15.
Ye Zhongbin, Liu Xiangjun, Yang Jianjun, et al. Laboratory study on the interfacial property of polymer/surfactant two component displacement system [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2002, 9(3): 7-9, 15.
- [17] 张宏方,王德民,王立军.聚合物溶液在多孔介质中的渗流规律及其提高驱油效率的机理[J].大庆石油地质与开发,2002,21(4):57-60.
Zhang Hongfang, Wang Demin, Wang Lijun. Flow laws of polymer solution in porous media and their mechanism on enhancing displacement efficiency [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2002, 21(4): 57-60.
- [18] 祝仰文.聚合物MO-4000与油藏渗透率的配伍性研究[J].油田化学,2006,25(1):38-42.
Zhu Yangwen. A study on conformity of HPAM polymer MO-4000 to reservoir permeability in EOR [J]. Oilfield Chemistry, 2006, 25(1): 38-42.
- [19] 韩杰,唐金星,刘峥君.聚合物分子尺寸大小及其与岩石孔喉尺寸配伍关系的试验研究[J].长江大学学报:自科版理工卷,2006,3(4):59-61.
Han Jie, Tang Jinxing, Liu Zhengjun. Experimental detection of polymer size with different molecular weights [J]. Journal of Yangtze University: Nat Sci Edit Sci & Eng V, 2006, 3(4): 59-61.
- [20] 卢祥国,王晓燕,李强,等.高温高矿化度条件下驱油剂中聚合物分子结构形态及其在中低渗油层中的渗流特性[J].化学学报,2010,68(12):1 229-1 234.
Lu Xiangguo, Wang Xiaoyan, Li Qiang, et al. The polymer molecular configuration in the oil displacement agent with high temperature and salinity and its seepage property in the medium-low permeability layer [J]. Acta Chimica Sinica, 2010, 68(12): 1 229-1 234.

编辑 经雅丽