

聚合物、聚表剂和 Cr^{3+} 聚合物凝胶分子构型 及其渗流特性差异

牛丽伟¹, 卢祥国¹, 王晓燕², 殷庆国², 李建冰³

(1. 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; 2. 中国石油吐哈油田公司工程技术研究院, 新疆哈密 839009; 3. 中国石油大庆油田有限责任公司第八采油厂, 黑龙江大庆 163514)

摘要:利用扫描电镜(SEM)、动态光散射(DLS)、流变仪和岩心驱替等实验方法研究聚合物、聚表剂和 Cr^{3+} 聚合物凝胶的分子结构形态、分子线团尺寸、流变性、传输运移能力和渗流特性差异。结果表明:聚合物分子在水溶液中形成无规则的空间立体网络结构;聚表剂分子结构形态呈现片-网状结构;聚合物凝胶 1 发生以分子内为主、分子间为辅的交联反应, 聚合物凝胶 2 发生以分子间为主、分子内为辅的交联反应;在相同质量浓度条件下, 聚表剂分子线团尺寸最大, 其次是聚合物凝胶 2, 再次为聚合物。聚合物凝胶 1 分子线团尺寸最小;聚表剂分子线团尺寸分布最分散, 其次是聚合物凝胶 1, 再次为聚合物凝胶 2, 聚合物分子线团尺寸分布最集中;4 种驱油剂均表现出先剪切增稠、后剪切变稀的流变特性, 其中聚表剂剪切增稠和剪切变稀现象最明显;聚合物溶液传输运移能力最好, 其次为聚合物凝胶 1, 再次为聚合物凝胶 2, 聚表剂溶液传输运移能力最差;聚合物凝胶残余阻力系数大于阻力系数, 表现出独特的渗流特性。

关键词:驱油剂; 分子结构形态; 分子线团尺寸; 流变性; 渗流特性; 机制分析

中图分类号:TE 357.46

文献标志码:A

引用格式:牛丽伟, 卢祥国, 王晓燕, 等. 聚合物、聚表剂和 Cr^{3+} 聚合物凝胶分子构型及其渗流特性差异[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2014, 38(6):186-191.

NIU Liwei, LU Xiangguo, WANG Xiaoyan, et al. Differences in molecular configuration and seepage properties among polymer, active polymer and Cr^{3+} polymer gel[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(6):186-191.

Differences in molecular configuration and seepage properties among polymer, active polymer and Cr^{3+} polymer gel

NIU Liwei¹, LU Xiangguo¹, WANG Xiaoyan², YIN Qingguo², LI Jianbing³

(1. Key Laboratory of Enhanced Oil and Gas Recovery of Education Ministry, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China;

2. Engineering and Technology Institute, PetroChina Tuha Oilfield Company, Hami 839009, China;

3. The Eighth Oil Production Plant of Daqing Oilfield Company Limited, PetroChina, Daqing 163514, China)

Abstract: The differences in molecular configuration, molecular coil dimension, as well as rheological and seepage properties among polymer, active polymer, and Cr^{3+} polymer gel were investigated by scanning electron microscopy (SEM), dynamic light scattering (DLS), rheometer and core flow experiment. The results show that a kind of stereoscopic random reticulation is formed when polymer molecules are dissolved in the water solution. The molecular structure of active polymer presents a flake-network configuration. For polymer gel 1 molecules, intra-molecular cross-linking is dominant with subsidiary inter-molecular cross-linking. However, for polymer gel 2 molecules, inter-molecular cross-linking is dominant with subsidiary intra-molecular cross-linking. At the same concentration, the molecular coil dimension (D_h) of active polymer is the largest, followed by polymer gel 2, then the polymer. And the D_h of polymer gel 1 is the smallest. The D_h distribution of active poly-

收稿日期:2014-03-08

基金项目:“十二五”国家科技重大专项(2011ZX05010-003, 2011ZX05057-005); 黑龙江省自然科学基金重点项目(ZD201312)

作者简介:牛丽伟(1979-),女,讲师,博士,研究方向为油田化学和提高油气采收率。E-mail: niuliwei1979@163.com。

mer is the most decentralized, followed by polymer gel 1, then the polymer gel 2. And the D_h distribution of polymer is the most centralized. Four oil displacement agents exhibit the rheological property of shear-thickening and followed by shear-thinning, in which the shear-thickening and the shear-thinning of active polymer are most significant. The migration capacity of polymer solution in the porous media is the greatest, followed by polymer gel 1, then polymer gel 2. And the active polymer is the worst. The residual resistance factor of polymer gel is bigger than the resistance factor, showing a kind of peculiar seepage characteristics.

Key words: oil displacement agent; molecular configuration; molecular coil dimension; rheological property; seepage property; mechanism analysis

大庆油田聚合物驱和复合驱增油量已连续 10 a 超过 $1000 \times 10^4 \text{ t}^{[1-2]}$, 同时, 聚合物凝胶调驱技术在矿场试验中取得了较好的增油降水效果^[3-4]。新型驱油剂聚表剂(又称活性聚合物, 简称 P-2)具有较强的增黏性、抗盐性和耐温性, 同时具有一定的表面活性^[5-6]。聚合物(简称 P-1)和聚合物凝胶(简称 P-3 和 P-4)宏观特性^[7-10]及其微观结构^[11-12]研究日益被重视, 笔者通过利用扫描电镜(SEM)、动态光散射(DLS)、流变仪和岩心驱替实验等方法, 对 P-1、P-2、P-3 和 P-4 的分子结构形态、分子线团尺寸、流变性、传输运移能力和渗流特性等方面进行研究, 并对其特性差异原因进行深入分析。

1 实 验

1.1 化学药剂

P-1 为大庆炼化公司生产的“中分”部分水解聚丙烯酰胺, 相对分子质量 $1\,300 \times 10^4$, 固含量 90%。P-2 为上海海博公司生产的海博 I 型聚表剂, 相对分子质量 $1\,200 \times 10^4$, 固含量 88%。P-3 和 P-4 中聚合物为“中分”部分水解聚丙烯酰胺, 交联剂为有机铬, Cr^{3+} 有效含量 2.7%。实验用水为大庆油田采油一厂注入污水, 矿化度 4012.7 mg/L, 离子组成(mg/L)为: $\text{Na}^+ + \text{K}^+ 1\,265.0$ 、 $\text{Ca}^{2+} 32.1$ 、 $\text{Mg}^{2+} 7.3$ 、 $\text{Cl}^- 780.1$ 、 $\text{SO}_4^{2-} 9.6$ 、 $\text{CO}_3^{2-} 210.1$ 和 $\text{HCO}_3^- 1\,708.6$ 。

1.2 岩 心

流动性实验岩心为石英砂环氧树脂胶结人造均质柱状岩心^[13], 几何尺寸 $\Phi 2.5 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$, 气测渗透率为 $1\,000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。传输运移能力实验岩心为石英砂环氧树脂胶结人造均质方岩心^[13], 高×宽×长为 $4.5 \text{ cm} \times 4.5 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$, 气测渗透率为 $1\,000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 在岩心入口和中间部位各设有 1 个测压点, 岩心结构及测压点分布见图 1。

1.3 实验设备

采用 Hitachi (日立) S-3400N 扫描电镜观测分子结构形态, 采用 BI-200SM 型广角动/静态光散射系统测试分子线团尺寸及分布, 采用德国哈克

(HAAKE)公司 RS-150 流变仪测试流变性。岩心驱替实验装置由无锡石油仪器厂生产, 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。

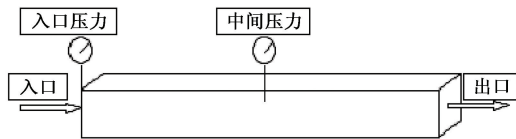


图 1 传输运移能力实验模型及测压点分布

Fig.1 Schematic diagram of experimental core for transmission migration ability and its pressure measurement points

1.4 实验温度

扫描电镜(SEM)实验温度为常温, 其余实验温度为 45°C 。

2 结果分析

2.1 分子结构形态

P-1 (200 mg/L)、P-2 (200 mg/L)、P-3 (200 mg/L, 聚合物: $\text{Cr}^{3+} = 120$) 和 P-4 (200 mg/L, 聚合物: $\text{Cr}^{3+} = 60$) 的分子结构形态电镜照片见图 2。

从图 2 可知, 不同驱油剂具有不同的分子结构形态。P-1 分子呈现长链结构, 分子链段间静电斥力较强, 使高分子链构象比较舒展, P-1 分子长链间接触, 互相缠绕在一起, 构成了无规则的空间立体网络结构, 这种网络结构存在粗主干和细分支, 且大部分网络骨架是由 P-1 分子聚集体形成的。与 P-1 相比较, P-3 分子构型仍存在网络结构, 但其立体性不强, 且其凝胶分子呈球状不规则地分布在每条网络骨架上, 由于加入了较低质量浓度的 Cr^{3+} , Cr^{3+} 与 HPAM 间发生以分子内为主、分子间为辅的交联反应^[14], 导致 HPAM 分子链间的缠绕遭到破坏, 使其空间骨架变稀疏, 呈现局部性网状结构。与 P-3 不同, P-4 分子结构以聚集体-聚集体的结合方式形成存在, Cr^{3+} 与 HPAM 间发生以分子间为主、分子内为辅的交联反应^[14], 使 HPAM 分子紧密敛集, 体系中分子呈现胶冻状态。对于 P-2, 整个分子呈现片-网

状结构,这是由于 P-2 分子主链带有含极性端基的短侧链,且侧链上嫁接了活性基团,使主链舒展程度更好,可以发生大规模交联反应。但由于其分子结构中主干体积不一样,使得 P-2 溶液黏度性能不太稳定^[15]。

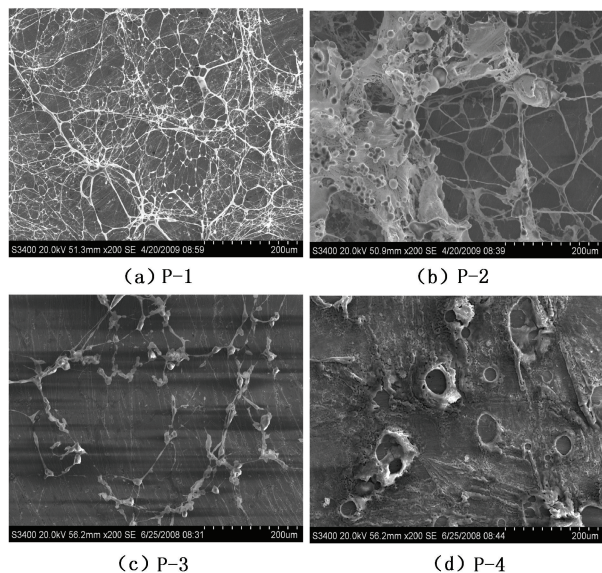


图 2 分子结构形态 SEM 照片(200 倍)

Fig. 2 SEM pictures of molecule configuration
(magnified 200 times)

2.2 分子线团尺寸

4 种驱油剂(质量浓度与分子结构形态实验相同)分子线团尺寸 D_h 分布曲线见图 3。

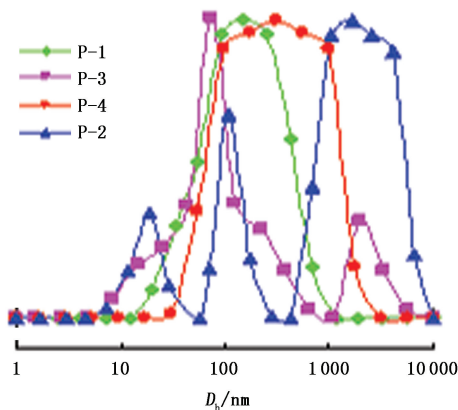


图 3 驱油剂 D_h 分布曲线

Fig. 3 D_h distribution curves of flooding agents

从图 3 可以看出,在相同质量浓度条件下,P-2 D_h 最大,平均为 1 270.5 nm,分布最分散,出现 3 个波峰,且峰值依次增大,最大值出现在 1 700 nm;其次是 P-4,为 277.8 nm,该值远远小于 P-2,且其分布只有一个波峰;再其次为 P-1, D_h 平均值为 143.6 nm,分布最集中;P-3 的 D_h 最小,平均仅为 132.5

nm,其分布出现 2 个波峰。上述现象主要取决于各种驱油剂在水溶液中的分子构型。在 P-1 溶液中,聚合物分子带负电,静电斥力使聚合物分子链更加舒展,在水溶液中呈现无规则线团状^[16-17]。在 P-3 和 P-4 中,交联反应可以改变聚合物分子线团尺寸,分子内交联会使 HPAM 分子支链变短,分子线团回缩,尺寸变小;而分子间交联会将 2 个甚至多个 HPAM 分子交联在一起,使得分子线团尺寸变大。P-3 由于其 Cr^{3+} 质量浓度较低,体系内主要发生分子内交联,使得平均尺寸变小;而 P-4 的 Cr^{3+} 质量浓度较大,体系内发生分子间交联较多,所以平均分子线团尺寸变大。对于 P-2,由于其溶液中发生大范围的交联反应,且两种交联反应同时发生,许多分子聚集在一起,使得分子线团尺寸最大。

2.3 流变性

P-1(1 000 mg/L)、P-2(1 000 mg/L)、P-3(1 000 mg/L,聚合物: $\text{Cr}^{3+} = 120$) 和 P-4(1 000 mg/L,聚合物: $\text{Cr}^{3+} = 60$) 的视黏度与剪切速率关系曲线见图 4。

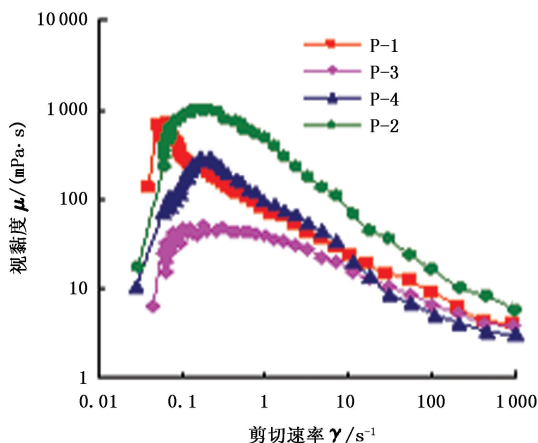


图 4 视黏度与剪切速率关系曲线

Fig. 4 Relationships between apparent viscosity
and shearing rate

从图 4 可以看出,4 种驱油剂均表现出先剪切增稠、后剪切变稀的流变特性,即在最初很小剪切速率范围内,视黏度随剪切速率增加而增大,超过这一剪切速率范围后,视黏度随剪切速率增加而减小。说明多分散体系黏度的变化正是体系微观结构变化及其内部基团间相互作用的宏观体现。结合 Hoffman 的 ODT 机制(有序到无序)和 Brady 等通过 Stokesian 动态模拟提出的粒子簇生成机制^[18-19],当静止时,驱油体系中分子是以各向异性的分形结构存在的,分子间有较强的静电斥力或位阻作用来保证驱油剂粒子间形成有序结构,且固液间通过氢键

的桥梁作用形成稳定的连续空间结构。在低剪切速率下,驱油体系中粒子的有序结构受到破坏,流体作用力成为主要作用力,这就导致了粒子簇的生成,粒子簇随着流体作用力的增大而变大,对流体的阻碍作用也就变大,体系黏度增大。随着剪切速率增大,一方面,体系中固液间作用力变大,阻止了粒子簇的生成;另一方面,剪切速率的增大使得分子间作用力无法使受到破坏的空间结构得到修复,体系空间立体网状结构受到破坏的程度越来越大,且驱油剂分子在流动时各液层间速度梯度变大,细而长的大分子同时穿过几个流速不等的液层时,导致同一个大分子的各个部分前进速度差变大,分子的取向活动增强,驱油剂视黏度大幅下降。当剪切速率增加到一定程度后,驱油剂分子网状结构大部分已改变为线性结构,剪切作用对其产生的影响变小,视黏度逐渐趋于常数。

进一步分析发现,等剪切速率条件下,P-1 溶液视黏度总大于 P-3;当剪切速率在 $0.15 \sim 8 \text{ s}^{-1}$ 时,P-4 视黏度大于 P-1 溶液;当剪切速率大于 19 s^{-1} 时,P-4 视黏度最小。这主要是因为 Cr^{3+} 与聚合物分子发生了不同程度的交联反应,当剪切速率较低时,以分子间交联为主的 P-4 视黏度较大,以分子内交联为主的 P-3 由于形成了局部网状结构,视黏度反而小于 P-1 溶液。当剪切速率较高时,P-4 由于分子聚集体较大,抗剪切能力变弱,视黏度最低。此外,P-2 剪切增稠和剪切变稀的现象均比较明显,是由于剪切过程中 P-2 体系形成的粒子簇较大,但其分子空间网络结构稳定性不好造成的。

2.4 传输运移能力

从岩心一端注入驱油剂(质量浓度与流变性实验相同),测量岩心入口压力和中间压力,利用岩心前半部分和后半部分流动压差及其变化来评价驱油体系在多孔介质内的传输能力。实验过程中岩心前、后半部分压差实验数据见表 1。

表 1 测压点压差测试数据

驱油剂	Table 1 Pressure difference of pressure measurement points MPa			
	化学驱阶段结束		后续水驱阶段结束	
	前半部分	后半部分	前半部分	后半部分
P-1	0.043	0.023	0.012	0.0340
P-2	0.399	0.001	0.169	0.0008
P-3	0.213	0.011	0.112	0.0180
P-4	0.349	0.001	0.134	0.0006

从表 1 可以看出,P-1 溶液沿岩心长度方向滞

留比较均匀,无论是化学驱还是后续水驱阶段,岩心前后部分压差差异都较小,表明其传输运移能力较强。与此相反,P-2 和 P-4 由于交联反应以分子间为主,其分子线团尺寸变大,在两个驱替阶段岩心前后部分压差差异都较大,表明 P-2 和 P-4 在岩心前半部分滞留量较大(甚至堵塞在岩心端面),后半部分滞留量较小,传输和运移能力较差,且 P-2 最差。对于 P-3,由于体系中交联反应以分子内为主,分子线团尺寸变小,其传输运移能力好于 P-4。但由于交联反应导致其分子刚性增强,柔性变差,其运移能力比同浓度 P-1 溶液差。

2.5 流动实验

4 种驱油剂(质量浓度与流变性实验相同)阻力系数和残余阻力系数测试结果见表 2。

表 2 阻力系数和残余阻力系数测试结果

Table 2 Experimental results of resistance factor and residual resistance factor		
驱油剂	阻力系数 F_R	残余阻力系数 F_{RR}
P-1	20.0	6.7
P-2	251.8	93.9
P-3	156.7	281.0
P-4	224.1	357.2

从表 2 可知,P-1 溶液阻力系数和残余阻力系数最小,P-4 和 P-3 阻力系数和残余阻力系数较大,且残余阻力系数大于阻力系数,P-2 溶液阻力系数最大,但残余阻力系数较小,仅大于 P-1 溶液。上述现象的主要原因为:对于 P-1 溶液,其体系中分子链柔性较强,后续水驱时被孔隙喉道捕集分子很多都可以被采出,导致流动阻力减小。对于 P-4 和 P-3, Cr^{3+} 与聚合物分子发生交联反应,分子线团尺寸变大或刚性增强,使其更容易被岩石喉道捕集。随着注入水的稀释, Cr^{3+} 浓度降低导致岩石孔隙中矿化度降低,分子线团膨胀占主要作用^[20],使注入压力升高,残余阻力系数大于阻力系数。对于 P-2 溶液,由于分子聚集体过大,会出现堵塞岩心端面的情况,注入压力出现虚高,从而使阻力系数最大而残余阻力系数较小。

3 结 论

(1)P-1 分子在水溶液中构成无规则的空间立体网络结构。P-2 分子结构形态呈现片-网状结构。P-3 发生以分子内为主、分子间为辅的交联反应。P-4 发生以分子间为主、分子内为辅的交联反应。

(2)在相同质量浓度条件下,P-2 分子线团尺寸

最大,其次是P-4,再次为P-1,P-3分子线团尺寸最小;P-2分子线团尺寸分布最分散,其次是P-3,再次为P-4,P-1分子线团尺寸分布最集中。

(3)4种驱油剂均表现出先剪切增稠、后剪切变稀的流变特性,其中P-2剪切增稠和剪切变稀现象最明显。

(4)P-1溶液传输运移能力最好,其次为P-3,再次为P-4,P-2溶液传输运移能力最差。

(5)P-1溶液阻力系数和残余阻力系数最小,P-4和P-3阻力系数和残余阻力系数较大,且残余阻力系数大于阻力系数,P-2溶液阻力系数最大,但残余阻力系数较小。

参考文献:

- [1] 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 Oil-field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005,26(1):74-78.
- [2] 朱友益,侯庆锋,简国庆,等. 化学复合驱技术研究与应用现状及发展趋势[J]. 石油勘探与开发,2013,40(1):90-96.
ZHU Youyi, HOU Qingfeng, JIAN Guoqing, et al. Current development and application of chemical combination flooding technique[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013,40(1):90-96.
- [3] 李先杰,侯吉瑞,岳湘安,等. 剪切与吸附对弱凝胶深部调驱作用的影响[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2007,31(6):147-151.
LI Xianjie, HOU Jirui, YUE Xiang'an, et al. Effects of shear and absorption on in-depth profile control and oil displacement of weak gels[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2007,31(6):147-151.
- [4] 孔柏岭,吴天亚,昌润珍,等. 微凝胶与聚合物组合驱复合效应研究及矿场应用[J]. 油田化学,2012,29(1):43-47.
KONG Bailing, WU Tianya, CHANG Runzhen, et al. Investigation and application of microgel flooding and polymer flooding in combination [J]. Oilfield Chemistry, 2012,29(1):43-47.
- [5] 刘平德,张松,杨宁,等. 新型表面活性聚合物驱油剂[J]. 石油勘探与开发,2012,39(5):580-584.
LIU Pingde, ZHANG Song, YANG Ning, et al. A novel surface active polymer oil displacement agent[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012,39(5):580-584.
- [6] 李丹,费春光,王楠楠. 聚表剂溶液性能及矿场应用研究[J]. 长江大学学报:自然科学版,2013,10(16):128-134.
LI Dan, FEI Chunguang, WANG Nannan. Performance of active polymer solution and its field application [J]. Journal of Yangtze University (Edition of Natural Science), 2013,10(16):128-134.
- [7] 张志英,姜汉桥. 聚合物溶液注入附加阻力对驱油效果的影响[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2010,34(2):89-92.
ZHANG Zhiying, JIANG Hanqiao. Influence of additional resistance during polymer injection on oil displacement effect [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2010,34(2):89-92.
- [8] 赵凤兰,侯吉瑞,李洪生,等. 聚合物驱后二次聚驱可行性及质量浓度优化研究[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2010,34(4):102-106.
ZHAO Fenglan, HOU Jirui, LI Hongsheng, et al. Study on feasibility of secondary polymer flooding and concentration optimization after polymer flooding [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2010,34(4):102-106.
- [9] 姜维东,卢祥国,刘义刚,等. 稠油油藏有机铬交联聚合物调驱实验研究[J]. 中国海上油气,2008,20(2):102-110.
JIANG Weidong, LU Xiangguo, LIU Yigang, et al. An experimental study on flooding effects of chromium-organic cross-linked polymer in heavy oilfields [J]. China Off-shore Oil and Gas, 2008,20(2):102-110.
- [10] 刘进祥,卢祥国,李国桥,等. 特高矿化度 Cr^{3+} 交联聚合物溶液渗流特性及其机制 [J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2013,37(6):145-152.
LIU Jinxiang, LU Xiangguo, LI Guo-qiao, et al. Seepage characteristics and mechanism of Cr^{3+} cross-linked polymer solution in ultra-high salinity media [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013,37(6):145-152.
- [11] 景艳,吕鑫. 延缓交联水基凝胶的制备、性能及溶液微观结构 [J]. 石油学报:石油加工,2009,25(1):124-127.
JING Yan, LÜ Xin. Reparation, characterization and structure of delay-action crosslinked aqueous gel [J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2009,25(1):124-127.
- [12] 徐辉,孙秀芝,韩玉贵,等. 超高分子聚合物性能评价及微观结构研究 [J]. 石油钻探技术,2013,41(3):114-118.
XU Hui, SUN Xiuzhi, HAN Yugui, et al. Performance

- evaluation and microstructure study of ultra high molecular weight polymer[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2013,41(3):114-118.
- [13] 卢祥国,高振环. 人造岩心制作及其影响因素实验研究[J]. *大庆石油地质与开发*,1994,13(4):53-55.
LU Xiangguo, GAO Zhenhuan. Experimental study of factors influencing permeability of artificial core[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 1994,13(4):53-55.
- [14] 卢祥国,姜维东,王晓燕,等. Cr^{3+} 、碱和表面活性剂对聚合物分子构型及渗流特性影响[J]. *石油学报*, 2009,30(5):749-754.
LU Xiangguo, JIANG Weidong, WANG Xiaoyan, et al. Study on effects of Cr^{3+} , alkali and surfactant on polymer molecular configuration and seepage flow characteristics[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009,30(5):749-754.
- [15] 卢娜. 炼化聚表剂与海博聚表剂体系特性研究[D]. 大庆:东北石油大学石油工程学院,2012:12-14.
LU Na. Study on the properties of refining and haibo polymer surfactant system[D]. Daqing: Petroleum Engineering Institute of Northeast Petroleum University, 2012:12-14.
- [16] 符若文,李谷,冯开才. 高分子物理[M]. 北京:化学工业出版社,2005:332-337.
- [17] LU Xiangguo, WANG Xiaoyan, JIANG Weidong. Experimental study on the molecular dimension and configuration of polymer and its flow characteristics from electrolyte effect[J]. *Chinese Journal of Chemistry*, 2009, 27:839-845.
- [18] RAGHAVAN S R, KHAN S A. Shear-thickening response of fumed silica suspensions under steady and oscillatory shear[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1997,185(1):57-67.
- [19] 伍秋梅,阮建明,黄伯云,等. 低固相含量 SiO_2 分散体系流变性研究[J]. *化学学报*,2006,64(15):1543-1547.
WU Qiumei, RUAN Jianming, HUANG Boyun, et al. Study on the rheological behavior of SiO_2 dispersions with low volum fraction [J]. *Acta Chimica Sinica*, 2006,64(15):1543-1547.
- [20] 卢祥国,王伟. Al^{3+} 交联聚合物分子构型及其影响因素[J]. *物理化学学报*,2006,22(5):631-634.
LU Xiangguo, WANG Wei. The molecular configuration and its influential factors of Al^{3+} cross-linked polyacrylamide gel[J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2006,22(5):631-634.

(编辑 刘为清)