

# 聚合物分子量及浓度优化方法研究

苑光宇<sup>1</sup> 罗 焕<sup>2</sup>

1. 中国石油辽河油田分公司, 辽宁 盘锦 124010;
2. 中国石油工程建设有限公司北京设计分公司, 北京 100085

**摘 要:** 化学驱是注水油田提高最终采收率的重要技术措施, 聚合物分子量确定及浓度优化是油田化学驱方案优化设计的重要内容。针对如何确定聚合物分子量及浓度问题, 分别进行了理论计算和天然岩心注入性评价实验。结果表明: 理论计算可以快速确定与渗透率对应的聚合物分子量技术界限及适用的浓度范围; 注入性评价实验能同时确定聚合物分子量和浓度与储层匹配的临界值, 分子量的确定结果与理论计算结果基本一致, 结果更接近真实情况; 聚合物分子量可采用理论计算结合注入性评价实验确定, 聚合物浓度可采用黏度比法结合注入性评价实验确定, 同时考虑注入过程各节点黏损; 不同物性条件的油藏需要开展有针对性的注入性实验确定聚合物参数。因此采用注入性实验并结合理论计算是确定聚合物参数的有效方法, 研究结果可以为化学驱方案设计提供参考。

**关键词:** 化学驱; 聚合物; 分子量; 浓度; 注入性能

DOI: 10. 3969 /j. issn. 1006 - 5539. 2018. 06. 012

## Research on Optimization Method of Polymer Molecular Weight and Concentration

Yuan Guangyu<sup>1</sup>, Luo Huan<sup>2</sup>

1. Liaohe Oilfield Company Ltd of CNPC, Panjin, Liaoning, 124010, China;
2. China Petroleum Engineering & Construction Corp. Beijing Design Company, Beijing, 100085, China

**Abstract:** Chemical flooding is an important technical measure to improve ultimate recovery in water flooding oilfield, and the molecular weight and concentration of polymer are important contents in the design of chemical flooding formula. Aiming at how to determine molecular weight and concentration of polymer, theoretical calculation and injection evaluation experiments in natural cores are carried out and the results indicate that the technical limits of molecular weight of polymer and applicable concentration range corresponding to the permeability of rock can be calculated rapidly by theoretical method. The critical value of molecular weight and concentration matching reservoirs can be determined simultaneously in injection evaluation experiments. The critical value of molecular weight determined by injection method, which represents the reality in reservoir, is basically the same as that of theoretical calculation. The

收稿日期: 2018 - 08 - 21

基金项目: 国家科技重大专项“辽河、新疆稠油 / 超稠油开发技术示范工程”(2016 zx 05055); 中国石油重大科技专项“辽河油田千万吨稳产关键技术研究与应用”(2017 E - 16)

作者简介: 苑光宇(1984 -), 男(满族), 辽宁阜新人, 工程师, 博士, 主要从事油气田开发及提高采收率技术工作。

polymer molecular weight can be determined by theoretical calculation and injection method, and the polymer solution concentration can be determined by viscosity ratio and injection method. At the same time, the viscosity loss of polymer solution in the course of injection should be considered. The targeting injection experiment is needed in different reservoir with different physical properties to determine polymer parameters. So using injection experiment with theoretical calculation is an effective method to determine polymer parameter, and the result can provide reference for the design of chemical flooding schemes.

**Keywords:** Chemical flooding; Polymer; Molecular weight; Concentration; Injection performance

## 0 前言

化学驱是注水油田提高最终采收率的重要技术措施,也是老油田二次开发的主要接替技术之一<sup>[1]</sup>。近年来,随着化学驱技术在大庆、辽河、胜利、新疆等油田取得成功应用,化学驱理论与技术越来越深入和完善,实施区块从储层物性较好的普通高渗、低温、稀油油藏,逐步转向高温、低渗、强非均质性、复杂油品性质的油藏<sup>[2-4]</sup>,化学驱体系与不同类型油藏的适应性是化学驱能否成功应用的关键,其中,化学驱体系能否顺利注入是适应性的基础,而聚合物是决定化学驱体系注入性的关键。在目的油藏确定的前提下,聚合物的分子量与浓度直接决定体系的黏度,也决定了其与目标储层物性适应性。

有相关研究通过实验得到一些特定分子量聚合物适合的渗透率下限<sup>[5-7]</sup>,或某一渗透率下适合的聚合物分子量<sup>[8-10]</sup>,但没有明确给出依据的标准或方法。还有其他方法通过研究不可及孔隙体积,以聚合物分子水动力学半径小于孔隙半径为界限,进而确定聚合物分子量<sup>[11]</sup>,但是这种方法确定的分子量偏大,因为考虑“架桥原则”,在动态的注入过程中,即使聚合物分子略小于孔喉,也有可能发生堵塞。以聚合物驱为例,通过理论计算与注入性评价实验相结合,为化学驱中聚合物参数,主要是分子量与浓度的确定,提供新的思路与方法。

## 1 化学驱目的层物性参数分析

为了保证化学驱体系的顺利注入,并发挥最佳的波及效果,首先要对化学驱目的层进行物性分析,利用取心井数据分析目的层渗透率的分布范围。研究表明,化学驱要发挥理想的效果,要保证较高的聚驱控制程度<sup>[12]</sup>,一般来说,聚驱控制程度至少应在70%以上<sup>[13]</sup>,也就是说化学驱体系至少能与70%以上的孔喉相匹配,同时考虑连通性,化学驱体系应至少能够进入70%的储层中,两者需要同时考虑。

以某油田S区块为例,分析化学驱试验区取心井数据,平均渗透率 $191.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,大于 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品数占总样品数的82%左右,大于 $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$

的样品数占总样品数的53%,渗透率大多分布在 $50 \times 10^{-3} \sim 400 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,达到70%左右,见图1;分析测井曲线数据, $75 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以上有效储层厚度比例为77.3%, $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以上有效储层厚度比例达到87.1%,综合考虑取心井渗透率分析数据和测井曲线数据,结合试验区有效储层连通系数(85.6%),要保证井组化学驱储量控制程度满足70%的技术界限,化学驱体系应能进入 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以上储层,即体系注入的渗透率下限值应为 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,见图2。

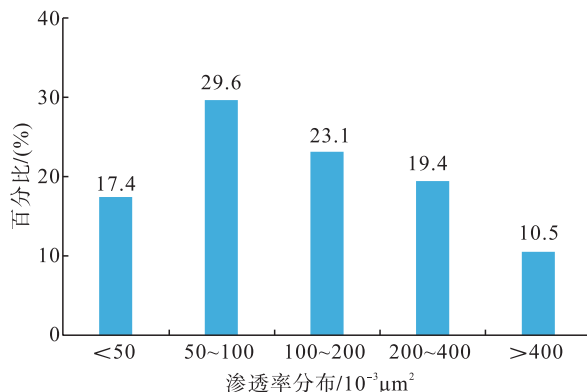


图1 S区块目的层渗透率分布

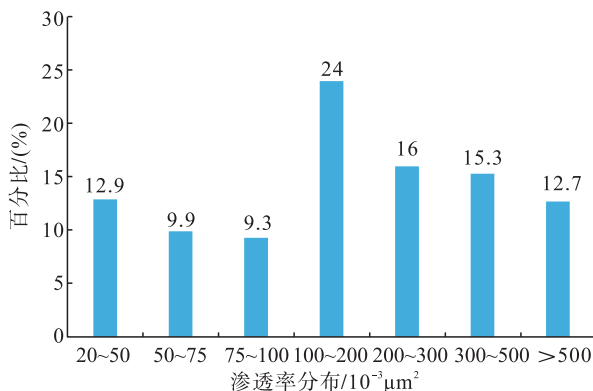


图2 S区块不同渗透率储层厚度比例

## 2 理论计算方法确定聚合物参数

### 2.1 聚合物分子量确定

研究聚合物与储层的匹配性,理论上首先要研究聚合物分子与地层孔喉之间的关系。传统“架桥理论”认

为:当聚合物分子水动力学半径  $r_c$  大于 0.46 倍孔喉半径  $r_h$  后可对多孔介质形成堵塞<sup>[14]</sup>,即当前者小于后者时可以顺利注入。但对于油藏实际地层,孔喉发育更为复杂,已有较多研究表明聚合物注入地层不发生堵塞的条件为:孔喉半径与聚合物分子回旋半径之比至少应大于 5<sup>[15]</sup>,即

$$\frac{r_h}{r_c} > 5 \quad (1)$$

真实地层条件下,比值可能还要更大<sup>[16]</sup>。

聚合物分子半径可以由以下几种方法得到:数学计算、微孔滤膜过滤、原子力显微镜法、动态光散射法<sup>[17-18]</sup>,每一种方法各有优劣,但是采用理论方法得到的是聚合物分子在水中不规则运动的统计平均值,更具有代表性。根据 Flory 公式,聚合物分子回旋半径可采用下式计算:

$$r_c = (2.37 \times 10^{-11} [\eta] M)^{1/3} \quad (2)$$

式中:[ $\eta$ ]为特性黏数, mL/g;  $M$ 为相对分子量。

孔喉半径  $r_h$  常用科泽尼-卡门公式计算<sup>[19]</sup>:

$$r_h = [K(1 - \phi)^2 / C\phi]^{1/2} \quad (3)$$

式中: $\phi$ 为孔隙度,%;  $K$ 为水测渗透率,  $\mu\text{m}^2$ ;  $C$ 为科泽尼常数,通常取  $C = 0.2$ 。

以上三式联立,带入相应参数,即可得到某一渗透率下适用的聚合物分子量上限。例如,将某油田 S 区块的参数带入公式,不同渗透率条件下适合的聚合物参数见表 1。  $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  下能够注入的某一类型聚合物分子量的最大值为  $1\,600 \times 10^4$ ,  $150 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  下能够注入的某一类型聚合物分子量的最大值为  $3\,200 \times 10^4$ 。

结合上述物性分析结果与聚合物参数计算结果,对于某油田 S 区块,  $1\,600 \times 10^4$  分子量聚合物即可以实现 70% 以上的聚驱控制程度,该区块可以采用  $1\,600 \times 10^4$  分子量聚合物。

表 1 某油田 S 区块不同渗透率储层适合的聚合物

物性参数	适合的某类型聚合物参数				
渗透率 / 孔隙度 / 孔喉半径 / 分子量 / 特性黏数 / 回旋 $10^{-3} \mu\text{m}^2$ (%)	$\mu\text{m}$	$10^4$	$(\text{mL} \cdot \text{g}^{-1})$	半径 / $\mu\text{m}$	
50	0.175	0.986 1	1 600	2 007	0.196 7
100	0.186	1.334 6	2 500	2 908	0.258 3
150	0.191	1.603 1	3 200	3 846	0.307 8

## 2.2 聚合物浓度确定

一般来说,驱替相黏度为被驱替相的 2~5 倍时,具有最佳的流度控制作用,波及效果最好<sup>[20]</sup>,因此根据孔喉与聚合物关系,基本确定聚合物分子量后,根据地层原油黏度比取一值,得到聚合物黏度后,根据浓黏关系

确定相应的聚合物浓度。

某油田 S 区块地下原油黏度  $2.3 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ,按照黏度比为 2~5 计算,则化学驱体系黏度驱替的黏度范围为  $4.6 \sim 11.5 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ,即为体系的地下工作黏度,由于体系在注入地层过程中,要经过地面泵站管线、井筒及炮眼,地层孔喉的剪切作用,如果地层剪切黏损按 60% 计,地面泵站管线的、井筒、炮眼剪切黏损按照 40% 计,按照式(4)计算,则化学驱体系地面黏度应为  $19.2 \sim 47.9 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。

$$\mu_b = \frac{\mu_a}{(1 - A) \times (1 - B)} \quad (4)$$

式中: $\mu_a$ 为化学驱体系地下工作黏度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ;  $\mu_b$ 为化学驱体系地面黏度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ;  $A$ 为地层剪切黏损,%;  $B$ 为地面泵站管线、井筒、炮眼剪切黏损, %。

对于某油田 S 区块,如果采用  $1\,600 \times 10^4$  分子量聚合物,根据浓黏关系,聚合物浓度范围应为 0.12%~0.2%,见图 3。流度比是考虑化学驱体系与原油之间的关系,此外还要考虑注入性能,即化学驱体系与储层孔喉之间的关系。

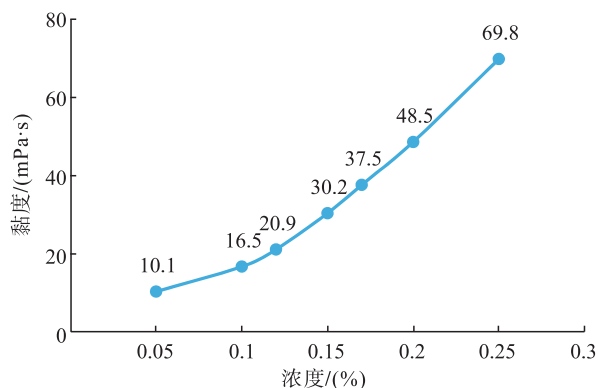


图 3  $1\,600 \times 10^4$  分子量聚合物浓黏曲线

## 3 注入性实验方法确定聚合物参数

理论计算的方法是基于理想化模型,而真实的地层孔隙结构极为复杂,因此采用天然岩心驱替更能代表注入压力变化的真实情况。

### 3.1 实验方法

岩心抽空饱和水后,空白水驱至压力平稳,注入聚合物溶液,固定注入量 3 PV,以平衡压力或注入结束时压力为准。

### 3.2 评价标准

注入性评价实验的关键是如何确定注入顺利与堵塞的标准,通过总结大量实验结果,确定了如下评价指标:

1) 计算阻力系数,阻力系数小于 100,认为注入顺利;阻力系数大于 100,认为注入堵塞。

2) 计算残余阻力系数与阻力系数的比值,小于 1/3,

认为注入顺利;大于1/3,注入堵塞。

综合两个参数进行判定,只有当两个参数均注入顺利,才认为在该渗透率下,该分子量、浓度注入顺利,否则认为注入困难,发生堵塞。

### 3.3 实验结果及分析

以某油田S区块为例,注入性评价实验结果见表2。从分析结果可以看出:聚合物分子量越大、浓度越大,注入性越差,对于该块油藏 $300 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以上的储层, $2500 \times 10^4$ 分子量以下、浓度0.25%以下均可以顺利注入; $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 储层, $2000 \times 10^4$ 分子量在浓度低于0.25%以下时均能顺利注入, $2500 \times 10^4$ 分子量只有在浓度低于0.15%时才能顺利注入; $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 储层, $1600 \times 10^4$ 分子量只有在浓度低于0.2%时顺利注入, $2000 \times 10^4$ 分子量仅能在浓度低于0.1%时可以顺利注入。

表2 聚合物分子量、浓度与地层渗透率匹配关系

地层渗透率 / $10^{-3} \mu\text{m}^2$	聚合物分子 子量 / $10^4$	不同聚合物浓度下的匹配关系			
		0.1 %	0.15 %	0.2 %	0.25 %
50	2 000	顺利	堵塞	堵塞	堵塞
	1 600	顺利	顺利	顺利	堵塞
100	2 500	顺利	顺利	堵塞	堵塞
	2 000	顺利	顺利	顺利	顺利
300	2 500	顺利	顺利	顺利	顺利
	2 000	顺利	顺利	顺利	顺利
500	2 500	顺利	顺利	顺利	顺利
	2 000	顺利	顺利	顺利	顺利

对比理论计算与注入性评价实验结果,对于某一渗透率下适用的聚合物分子量,理论计算的结果与注入性评价实验的结果基本一致,但不同浓度下略有差异。在临界分子量下,低浓度时注入顺利,但高浓度时容易发生堵塞。理论计算假设岩心是理想模型,孔隙结构简单,比较的是静态条件下孔隙与聚合物的关系,但是聚合物体系的流动是一个动态过程<sup>[21]</sup>,聚合物的浓度、注入速度、分子的滞留都会对聚合物体系的注入性能产生影响。因此,采用天然岩心开展的注入性评价实验更能代表真实注入情况。

相同用量条件下,聚合物分子量越大,提高采收率幅度越大<sup>[22]</sup>,因此根据注入性评价实验结果,在保证注入性前提下,聚合物分子量尽量取大值。分析某油田S区块的注入性评价实验结果,结合理论计算结果,可初步确定化学驱体系的聚合物分子量范围,对于笼统注入方式,要取得较好的效果,化学驱控制程度应在70%以上,主段塞可采用 $1600 \times 10^4$ ,根据上文分析结果,聚合物浓度范围可取0.12%~0.2%,结合注入性评价实验

结果, $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时浓度在0.2%以下时均可顺利注入,为了保证化学驱效果,浓度可确定为0.2%。

如果工艺能够实现分层注入,对 $50 \times 10^{-3} \sim 150 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 地层可采用 $1600 \times 10^4$ 分子量,覆盖有效厚度40%左右;对 $150 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以上地层可采用 $3000 \times 10^4$ 分子量,覆盖有效厚度为40%~50%,见图4。笼统注入低分子量在保证低渗注入性的条件下,与高渗层匹配性不佳,分层注入可使聚合物与高渗层的匹配性更好,驱替效果更好。同样根据浓黏关系,结合注入性评价实验结果,可确定适合的聚合物浓度。

聚合物的类型、油藏的温度、地层水的离子组成均会对聚合物分子回旋半径和黏度有较大影响,此外油藏孔隙结构千差万别,这些因素都会导致聚合物参数与储层的匹配关系均不同,因此注入性评价实验的结果不具有普遍适用性,特定的油藏均需要开展相应的注入性评价实验确定聚合物参数。

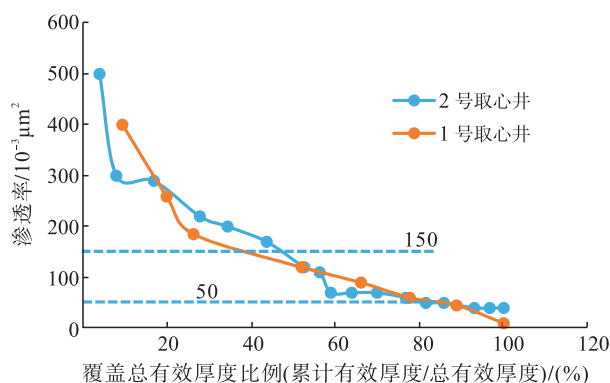


图4 某油田S区块不同渗透率储层覆盖有效厚度

## 4 结论

1) 理论方法可以快速计算与渗透率对应的聚合物分子量技术界限以及适用的浓度范围,采用天然岩心的注入性评价实验,可以同时确定聚合物分子量和浓度与储层匹配临界值,结果更接近真实情况。

2) 聚合物分子量可采用理论计算结合注入性评价实验确定,在保证注入性前提下应尽量取大值;聚合物浓度可采用黏度比法结合注入性评价实验确定,为保证体系最佳工作黏度,应考虑注入过程中各节点黏损。

3) 本文注入性评价实验结果不具有普遍适用性,不同物性条件油藏均需开展本油藏天然岩心注入性实验以获取相关参数值。

参考文献:

[1] 郭春萍,朱慧峰,王皓宇,等.三元复合体系界面张力与驱油效率相关性研究[J].天然气与石油,2011,29(4):59-

61.  
Guo Chunping, Zhu Huifeng, Wang Haoyu, et al. Characteristics of Interface Tension and Oil Displacement with ASP Flooding [J]. *Natural Gas and Oil*, 2011, 29 (4): 59 - 61.
- [2] 高达. 高温高盐油藏化学驱效果评价及油藏适应性研究 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2010.  
Gao Da. Effect Evaluation and Reservoir Adaptability of Chemical Flooding for High Temperature and High Salinity Reservoir [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2010.
- [3] 王倩. 低渗油藏表面活性剂驱降压增注及提高采收率实验研究 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2010.  
Wang Qian. Experimental Study of Surfactant Flooding in Reducing Injecting Pressure and EOR for Low-Permeability Reservoir [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2010.
- [4] 饶良玉, 韩冬, 吴向红, 等. 中低渗油藏化学驱方案优化与矿场对比评述 [J]. *西南石油大学学报: 自然科学版*, 2012, 34(5): 107 - 113.  
Rao Liangyu, Han Dong, Wu Xianghong, et al. Research and Field Comparison Comments on Chemical Flooding Scenario Design in Mid-Low Permeability Reservoir [J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2012, 34 (5): 107 - 113.
- [5] 孙伟国. 大庆萨南油田二类油层聚合物驱油技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2010.  
Sun Weiguo. Research of Polymer Flooding Technique in Class II Reservoirs of Sanan Oilfield in Daqing [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [6] 刘晨, 王凯, 王业飞, 等. 针对A油田的抗温、抗盐聚合物/表面活性剂二元复合驱油体系研究 [J]. *岩性油气藏*, 2017, 29(3): 152 - 158.  
Liu Chen, Wang Kai, Wang Yefei, et al. Polymer/Surfactant Binary Flooding in a Oilfield with High Temperature and High Salinity [J]. *Lithological Reservoirs*, 2017, 29 (3): 152 - 158.
- [7] 张跃国. 萨中开发区中区西部萨I + II组三类油层分期分质聚驱试验研究 [D]. 大庆: 大庆石油学院, 2008.  
Zhang Yueguo. Optimization Method Research on Reservoir Parameter Interpretation in SZ Thin and Low Productivity Development Region [D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2008.
- [8] 宋辉. 喇嘛甸油田二类油层聚驱分质分层注入研究 [D]. 大庆: 大庆石油学院, 2009.  
Song Hui. Design and Implement on the Prospecting Well Operation Management System Based on Workflow [D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2009.
- [9] 吴婷婷, 侯亚伟, 张绍辉, 等. 低渗透油层聚合物驱注入参数的确定 [J]. *特种油气藏*, 2009, 16(3): 59 - 61.  
Wu Tingting, Hou Yawei, Zhang Shaohui, et al. Determination of Polymer Flooding Parameters for Low Permeable Reservoirs [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2009, 16 (3): 59 - 61.
- [10] 张继红, 郭鑫. 聚合物与葡北油田储层孔隙结构适应性研究 [J]. *岩性油气藏*, 2016, 28(4): 101 - 105.  
Zhang Jihong, Guo Xin. Adaptability of Polymer to Reservoir Pore Structure in Pubei Oilfield [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2016, 28 (4): 101 - 105.
- [11] 冯玉良, 段兴华, 刘美佳, 等. 聚合物驱相对分子量的优选方法 [J]. *大庆石油学院学报*, 2007, 31(4): 29 - 31.  
Feng Yuliang, Duan Xinghua, Liu Meijia, et al. Optimization of Polymer Molecular Weight Selection [J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2007, 31 (4): 29 - 31.
- [12] 张立秋. 南二区东部二类油层上返层系组合优化 [J]. *岩性油气藏*, 2007, 19(4): 116 - 120.  
Zhang Liqiu. Optimization of Upward Strata Combination of Second Class Oil Layer in Eastern South II Area of Daqing Oilfield [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2007, 19 (4): 116 - 120.
- [13] 陈鹏, 邵振波, 刘英杰. 中、低渗透率油层聚合物相对分子量的确定方法 [J]. *大庆石油地质与开发*, 2005, 24(3): 95 - 96.  
Chen Peng, Shao Zhenbo, Liu Yingjie. Method for Determining Relative Molecular Mass of Polymer in Medium-Low Permeable Reservoirs [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2005, 24 (3): 95 - 96.
- [14] 朱怀江, 孙尚如, 罗健辉, 等. 南阳油田驱油用聚合物的水动力学半径研究 [J]. *石油钻采工艺*, 2005, 27(6): 47 - 50.  
Zhu Huaijiang, Sun Shangru, Luo Jianhui, et al. Research on Hydrodynamic Radius of Polymer Molecule for Oil Displacement in Nanyang Oilfield [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2005, 27 (6): 47 - 50.
- [15] 曹瑞波, 丁志红, 刘海龙, 等. 低渗透油层聚合物驱渗透率界限及驱油效果实验研究 [J]. *大庆石油地质与开发*, 2005, 24(5): 71 - 73.  
Cao Ruibo, Ding Zhihong, Liu Hailong, et al. Experimental Research on Permeability Limits and Displacement Characteristics of Polymer Flooding in Low Permeability Oil Layers [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2005, 24 (5): 71 - 73.
- [16] 卢祥国. 高振环. 聚合物分子量与岩心渗透率配伍性——孔隙吼道半径与聚合物分子线圈回旋半径比 [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.
- [17] 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:自然科学版,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: Natural Science Edition, 2006, 3 (4): 59-61.
- [18] 王加滢,尹中民,路春楠,等. 聚合物过孔能力与油层匹配关系研究[J]. 石油科技论坛,2013,(1):23-26.
- Wang Jiaying, Yin Zhongmin, Lu Chunnan, et al. Study of Polymer Through-Pore Capability and Its Compatibility with Oil Reservoir [J]. Oil Forum, 2013, (1): 23-26.
- [19] 张志英,姜汉桥,丁美爱,等. 聚合物注入能力的实验研究[J]. 实验力学,2009,24(1):8-12.
- Zhang Zhiying, Jiang Hanqiao, Ding Aimei, et al. Experiment Study of Polymer Injectivity [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2009, 24 (1): 8-12.
- [20] 翟瑞滨,曹铁,鹿守亮,等. 三元体系中化学剂浓度对驱油效果的影响[J]. 大庆石油地质与开发,2002,21(4):65-67.
- Zhai Ruibin, Cao Tie, Lu Shouliang, et al. The Effect of Chemical Concentration in ASP System on Oil Displacing Efficiency [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2002, 21 (4): 65-67.
- [21] 张运来,卢祥国,张云宝,等. 江苏油田中高渗油藏聚合物驱聚合物适应性研究[J]. 油田化学,2008,25(3):245-248.
- Zhang Yunlai, Lu Xiangguo, Zhang Yunbao, et al. Adaptability of EOR Polymers to Sandstone Reservoirs of Intermediate to High Permeability in Jiangsu Oil Fields [J]. Oilfield Chemistry, 2008, 25 (3): 245-248.
- [22] 程杰成,王德民,吴军政,等. 驱油用聚合物的分子量优选[J]. 石油学报,2000,21(1):102-106.
- Cheng Jiecheng, Wang Demin, Wu Junzheng, et al. Molecular Weight Optimization for Polymer Flooding [J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21 (1): 102-106.

(上接第53页)

- Performance Analysis of a Horizontal Wells of Stress-Sensitive Coal Seams [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2012, 19 (6): 108-111.
- [17] 伊向艺,张志,李成勇,等. 应力敏感气藏水平井试井解释方法[J]. 科学技术与工程,2013,13(7):1941-1945.
- Yi Xiangyi, Zhang Zhi, Li Chengyong, et al. Well Test Interpretation Method of Horizontal Well in Stress-Sensitive Gas Reservoir [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13 (7): 1941-1945.
- [18] 方思冬,程林松,李彩云,等. 应力敏感油藏多角度裂缝压裂水平井产量模型[J]. 东北石油大学学报,2015,39(1):87-94.
- Fang Sidong, Cheng Linsong, Li Caiyun, et al. The Productivity Model of Multi-Angled Fractured Horizontal Well in Stress-Sensitive Reservoir [J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2015, 39 (1): 87-94.
- [19] 曹丽娜. 致密气藏不稳定渗流理论及产量递减动态研究[D]. 成都:西南石油大学,2017.
- Cao Lina. Research on Unsteady Percolation Theory and Rate Transient Analysis in Tight Gas Reservoirs [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [20] 王新海,张冬丽,席长丰. 变形介质地层低渗非达西渗流的油藏数值模拟[J]. 江汉石油学院学报,2004,26(3):13-15.
- Wang Xinhai, Zhang Dongli, Xi Changfeng. Deformed Medium Formation Numerical Simulation of Low Permeability and Non-Darcy Percolation [J]. Journal of Jiangnan Petroleum Institute, 2004, 26 (3): 13-15.
- [21] Van-Everdingen A F, Hurst W. The Application of the Laplace Transformation to Flow Problem in Reservoirs [J]. Journal of Petroleum Technology, 1949, 1 (12): 305-324.