

文章编号:0253-9985(2012)03-0479-05

聚合物溶液对孔隙结构特征的影响

李朝霞¹, 夏惠芬²

(1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 东北石油大学石油工程学院, 黑龙江 大庆 163318)

摘要:通过水驱、聚合物驱及后续水驱实验,研究了不同相对分子质量、不同质量浓度聚合物溶液的阻力系数和残余阻力系数;通过常规压汞实验,研究了聚合物驱后岩心孔隙结构特征,对比分析了不同相对分子质量、不同质量浓度的聚合物溶液驱替对岩心孔隙结构特征的影响。结果表明,由于聚合物溶液在岩心孔隙中的吸附滞留,随聚合物溶液相对分子质量、质量浓度的增加,阻力系数和残余阻力系数增大,渗透率下降幅度越大;毛管压力曲线从左下方到右上方依次排列,孔隙体积在大孔道处减少,而在下一级的小孔道处增加,岩心的平均孔隙半径、半径均值、歪度、结构系数、均质系数各参数降低,其结果对聚合物驱后进一步提高原油采收率的方法研究具有重大的指导意义。

关键词:吸附;滞留;孔隙结构;阻力系数;聚合物驱;提高采收率

中图分类号:TE357.4

文献标识码:A

Effect of polymer solution on pore structure characteristics

Li Zhaoxia¹ and Xia Huifen²

(1. SINOPEC Petroleum Exploration & Production Research Institute, Beijing 100083, China.

2. Petroleum Engineering College, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China)

Abstract: Resistance coefficient & residual resistance factor of polymer solutions with different molecular weight and mass concentration were studied based on water flooding, polymer flooding and subsequent waterflooding tests. This paper also researched the pore structure characteristics of the cores after the polymer flooding by conventional mercury porosimetry, and analyzed the influences of polymer flooding with polymer solution of different molecular weight and mass concentration on pore structure of cores. The results show that the resistance coefficient and the residual resistance factor increase and the amplitude of permeability decline enlarges along with the increasing molecular weight and mass concentration of polymer solution. Capillary pressure curves were successively arranged from bottom left to top right, pore volume reduces at big pore throat but enlarge at smaller pore throat. The average pore radius & mean values, skewness, structure coefficient and uniformity coefficient show a decreasing trend. The above results have great significances for the research of post-polymer flooding EOR methods.

Key words: adsorption, retention, pore structure, resistance coefficient, polymer flooding, EOR

聚合物溶液在多孔介质中流动,由于表面吸附、机械捕集、水动力学捕集和集合物分子间的相互作用而产生滞留,一方面造成流动阻力的增加,影响岩心孔隙结构^[1],另一方面造成聚合物的损失。在国内已经对聚合物在地层中的滞留、吸附

和捕集进行了很多研究,徐永春,李秀生,付大强等^[2]通过物质平衡法对岩心中粘土含量对聚合物滞留与捕集的影响进行了研究,给出了吸附量、滞留量与捕集量的关系。朱健,刘伟利等^[3]通过室内实验,给出了聚合物驱过程中聚合物在岩心孔

收稿日期:2012-04-01;修订日期:2012-05-08。

第一作者简介:李朝霞(1964—),女,博士、高级工程师,油气藏工程。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05009-004)。

隙中的吸附和滞留作用对渗透率的影响大于聚合物溶液对孔隙的冲刷所产生的影响。郭艳东,赵英杰,李治平等^[4]通过实验研究得出,聚合物的吸附降低了水溶液和油溶液的渗透率,而在高渗的储层中,聚合物吸附对油溶液流动几乎没有影响。石京平,杨清彦等^[5]通过研究聚合物溶液吸附对油层物性的影响因素,得出聚合物溶液的吸附、滞留使油层渗透率下降,但孔隙度没有明显变化的结论。聚合物驱后岩心的平均孔隙半径和半径中值减小,孔喉分布的峰位没有改变,峰值依据聚合物驱方式的不同而不同。吴文祥,刘洋^[6-7]通过压汞实验,给出了聚合物驱后岩心孔隙结构参数^[8-9]的变化趋势。这些论述了聚合物溶液的吸附和滞留对渗流特性的影响,并对孔隙结构有一定影响,而没有给出不同相对分子质量、不同质量浓度聚合物溶液的阻力系数和残余阻力系数的变化以及对孔隙结构的影响。本文通过渗流实验,研究了不同质量浓度聚合物溶液渗流的阻力系数和残余阻力系数^[10]。通过压汞实验,研究了不同质量浓度的聚合物驱后储层岩心的孔隙结构特征的变化,其结果对聚合物驱后进一步提高原油采收率的方法研究具有重大的指导意义。

1 实验样品的选取及实验步骤

实验样品选用渗透率为 $800 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的两块长 10 cm、直径 2.52 cm 的人造均质岩心,分别切成 4 段长度 2.5 cm 左右。实验所用的聚合物相对分子质量为 $2\,500 \times 10^4$ 和 $3\,500 \times 10^4$ 两种,配置成质量浓度为 $1\,000 \times 10^{-6}$, $1\,500 \times 10^{-6}$ 和 $2\,500 \times 10^{-6}$ 的聚合物溶液,配置聚合物溶液用矿化度为 3 700 mg/L 的模拟盐水,实验温度为 45°。

实验步骤:①测定初始状态下岩心各项参数,包括气测渗透率、质量、体积、密度;②将岩心抽真空,饱和模拟盐水,记录下岩心饱和水的体积并测定岩心孔隙度;③把 2 段岩心用来做空白对比,其余岩心进行聚合物驱;④以 0.1 mL/min 的驱替速度水驱至压力平稳后记录水驱压力;⑤以相同的驱替速度进行聚合物驱,压力平稳后记录聚合物驱压力,计算阻力系数;⑥以相同的驱替速度进行后继水驱至压力平衡后记录后续水驱压力,计算

残余阻力系数;⑦将聚合物驱后的 6 块岩心及 1 块空白岩心烘干,然后进行压汞实验。

2 压汞实验原理

压汞法^[11-12]就是将非湿相流体——水银注入到被抽真空的岩心内。由于水银在注入时一定要克服岩石孔隙对其的毛管阻力,因此注入水银的每一点压力就是代表一个相应的孔隙大小下的毛管压力,所对应的毛细管半径即孔隙喉道半径,在这个压力下进入孔隙系统的水银量就代表这个相应的孔喉大小在系统中所连通的孔隙体积。提高注入压力,汞可进入更小的喉道所控制的孔隙之中,得到一组注入压力、毛细管压力、孔隙喉道半径。由注入汞体积(孔隙喉道所连通的孔隙体积)可计算岩石润湿相饱和度。不断改变注入压力,就可以得到孔隙大小分布曲线和毛细管压力曲线^[13]。

3 实验结果

3.1 残余阻力系数

聚合物分子在油层孔隙介质中渗流时,由于受机械捕集、化学吸附和滞留作用的影响,将有一部分聚合物分子滞留在油层孔隙介质中,从而使得在聚合物溶液驱油后油层孔隙的渗透率将有不同程度的降低,使流体流动阻力增加。对于一定的油层,聚合物溶液驱油效果与聚合物溶液改善流度比和降低渗透率能力有关,即与聚合物溶液的阻力系数和残余阻力系数有关。在聚合物驱中,流度降低的度量用阻力系数来表示;渗透率下降系数,即残余阻力系数则是指聚合物溶液通过多孔介质后,用于度量多孔介质渗透率下降的一种指标^[14-15]。

聚合物驱后,由于吸附和捕集作用将引起大量聚合物滞留在孔道中。可以看出,随着聚合物溶液质量浓度增加,残余阻力系数和阻力系数增加。聚合物的相对分子质量较大时,其残余阻力系数和阻力系数也较大。而聚合物驱的阻力系数越大,说明聚合物在油层中的渗流阻力越大。残余阻力系数越大,说明油层孔隙介质的渗透率下降的越大(表 1)。

表1 室内实验测定的岩心参数

Table 1 Core parameters based on the laboratory test

聚合物相对分子质量/ 10^4	岩心编号	聚合物质量分数/ 10^{-6}	质量/g	直径/cm	长度/cm	孔隙体积/ cm^3	孔隙度/%	阻力系数	残余阻力系数
2 500	1-1	1 000	20.231	2.52	2.30	3.65	31.78	9.20	4.90
	1-2	1 500	18.193	2.52	2.27	3.60	31.81	13.00	5.31
	1-3	2 500	18.560	2.53	2.28	3.65	31.86	25.42	12.11
3 500	2-1	1 000	19.626	2.51	2.32	3.70	32.25	23.91	9.55
	2-2	1 500	20.469	2.52	2.30	3.66	31.92	40.27	22.27
	2-3	2 500	19.657	2.52	2.26	3.65	32.40	61.92	35.08

3.2 岩心毛细管压力曲线特征

由图1可以看出,岩样的毛细管压力曲线,综合反映了由喉道控制的孔隙大小及连通状况,毛细管压力的形态特征,表示样品的孔隙结构不同。毛细管压力曲线与渗透率密切相关,随着渗透率的由大变小,毛细管压力曲线从左下方向右上方依次排列,渗透率越大,毛细管压力曲线越凸向左下角,与横坐标相平行的平缓段长,说明微观孔隙结构好,喉道尺寸越大,孔喉均匀,排驱压力越低。反之,渗透率低的样品,毛细管压力曲线远离横坐标轴,越是远离横坐标轴,平缓段逐次减小,微观孔隙结构越差,渗透率越低,排驱压力越高^[16]。

3.3 聚合物驱后孔隙体积分布特征

随着毛细管压力的逐渐增加,孔隙半径(r)逐渐减小,把孔隙半径大小分为5个区间,统计不同孔隙半径区间孔隙体积分数的分布。图2和图3给出了相对分子质量分别为 $2\,500 \times 10^4$ 和 $3\,500 \times 10^4$ 的聚合物,在不同质量浓度驱替下的孔隙体积分布规律。

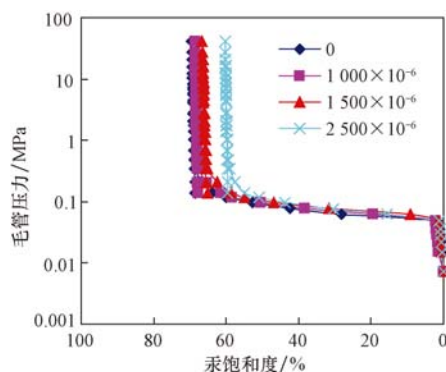


图1 不同质量浓度聚合物溶液驱后的岩心毛细管压力曲线
(聚合物分子质量为 $2\,500 \times 10^4$)

Fig. 1 Capillary pressure curves after polymer flooding with polymer solutions with different mass concentrations
(polymer molecular weight 25 million)

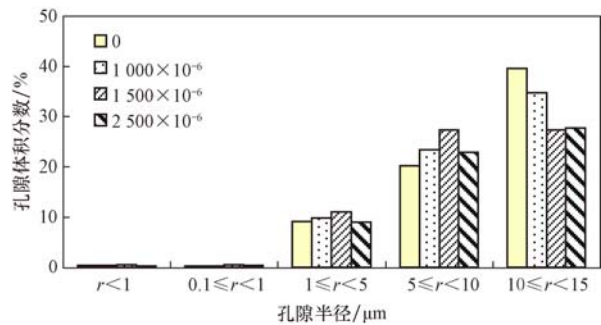


图2 不同质量浓度聚合物溶液驱后的孔隙体积分布
(聚合物分子质量为 $2\,500 \times 10^4$)

Fig. 2 Distribution of pore volume after polymer flooding with polymer solutions with different mass concentrations
(polymer molecular weight 25 million)

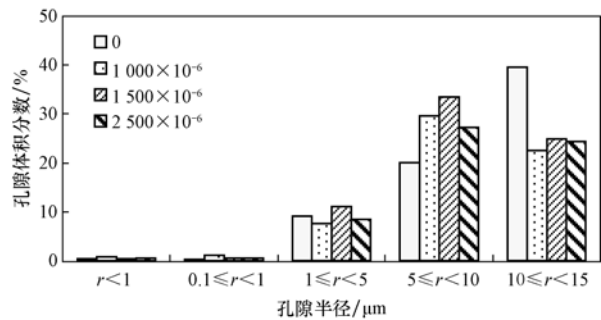


图3 不同质量浓度聚合物溶液驱后的孔隙体积分布
(聚合物分子质量为 $3\,500 \times 10^4$)

Fig. 3 Distribution of pore volume after polymer flooding with polymer solutions with different mass concentrations
(polymer molecular weight was 35 million)

由图2和图3可以看出,随着聚合物溶液质量浓度的增加,孔隙半径大于等于 $10\,\mu\text{m}$ 的大孔隙处的孔隙体积在减少,而半径区间在 $5 \sim 10\,\mu\text{m}$ 的孔隙体积迅速增加。说明聚合物溶液在多孔介质中流动时,因流变性以及吸附、滞留等特性与一般水溶液有较大区别,聚合物分子在岩石孔隙中的滞留会造成孔隙流动通道的减小。随着聚合物

表2 不同条件下聚合物溶液驱后的残余阻力系数和阻力系数

Table 2 Residual resistance factor and resistance coefficient after polymer flooding at different conditions

相对分子质量/ 10^4	质量分数/ 10^{-6}	平均孔隙半径/ μm	歪度	半径均值/ μm	结构系数	相对分选系数	均质系数
0	0	9.23	0.871	7.025	4.244	0.670	0.615
2 500	1 000	8.68	0.823	6.169	4.120	0.758	0.579
	1 500	8.21	0.844	6.327	3.617	0.739	0.549
	2 500	8.74	0.859	6.754	3.732	0.695	0.584
	1 000	7.95	0.838	6.006	3.305	0.775	0.530
3 500	1 500	7.87	0.858	6.343	2.877	0.735	0.525
	2 500	8.14	0.834	6.082	3.360	0.767	0.543

溶液质量浓度的增加,聚合物在大孔隙中的滞留量增加,使得孔隙半径变小,导致原来的大孔道变成次一级的小孔道。因此随着聚合物溶液质量浓度的增加,孔隙体积在大孔道处减少,而在下一级的小孔道处增加。对比图2和图3,相对分子质量为 $3\,500 \times 10^4$ 的聚合物分子在大孔道处的孔隙体积降低的较多,说明随着聚合物相对分子质量的增加,聚合物分子在岩石孔隙中的吸附和滞留作用增加。

3.4 孔隙结构参数

通过对压汞实验数据进行整理,筛选出具有代表性的孔隙结构参数进行分析。表2给出了不同聚合物溶液质量浓度下各孔隙结构参数数据。

由表2可以看出:相对于空白岩心,聚合物驱后岩心的平均孔隙半径、半径均值、歪度、结构系数、均质系数都减小。这主要是由于聚合物驱后,岩心中较大的孔隙中滞留的聚合物主要是被吸附的聚合物,滞留量比较少,岩心的中小孔隙对聚合物的吸附、捕集作用使岩心孔隙尺寸之间的差异变大,因此聚合物驱后岩心孔隙分布相对更不均匀。而随着聚合物溶液质量浓度的增加,岩心孔隙中被吸附和滞留的聚合物增加,使得孔道变小,在小孔道中的不可及孔隙体积增加,平均孔隙半径减少。

4 结论

1) 聚合物驱后,随着聚合物溶液质量浓度增加,残余阻力系数和阻力系数增加,聚合物的相对分子质量较大时,其残余阻力系数和阻力系数也较大。

2) 随着聚合物溶液质量浓度的升高,毛管压力曲线从左下方到右上方逐次排列。表明聚合物驱后,岩石孔隙的渗透率随着聚合物质量浓度的升高而下降。

3) 随着聚合物溶液质量浓度的增加,孔隙体积在大孔道处减少,而在下一级的小孔道处增加;岩心的平均孔隙半径、半径均值、歪度、结构系数、均质系数各参数降低。

参 考 文 献

- [1] 苏娜,段永刚,于春生. 微CT扫描重建低渗气藏微观孔隙结构[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(54): 792-796.
Su Na, Duan Yonggang, Yu Chunsheng. Reconstruction of microscopic pore structure in low permeability gas reservoirs by micro-CT scanning[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(54): 792-796.
- [2] 徐永春,李秀生,付大强,等. 岩心中粘土含量对聚合物滞留与捕集的影响[J]. 内蒙古石油化工, 2008, 19: 140-142.
Xu Yongchun, Li Xiusheng, Fu Daqiang, et al. The effect of the content of clay on polymer retention and entrapment[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2008, 19: 140-142.
- [3] 朱健,刘伟利,李兴,等. 聚合物驱后储层物性参数的变化特征[J]. 油气地质与采收率, 2007, 14(4): 65-71.
Zhu Jian, Liu Weili, Lixing, et al. Variations of physical property parameters of reservoirs after polymer flooding[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2007, 14(4): 65-71.
- [4] 郭艳东,赵英杰,李治平. 聚合物驱对储层及其自身性质影响实验研究[J]. 内蒙古石油化工, 2008, 10: 4-6.
Guo Yandong, Zhao Yingjie, Li Zhiping. The experimental study on the affection on property of reservoir and polymer by polymer flooding[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2008, 10: 4-6.
- [5] 石京平,杨清彦. 聚合物溶液吸附对油层物性影响的试验研究[J]. 石油天然气学报, 2005, 27(1): 224-227.
Shi Jingping, Yang Qingyan. The experimental study of the effect of polymer solution's adsorption on petrophysical property

- [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2005, 27(1): 224-227.
- [6] 吴文祥,刘洋. 聚合物驱后岩心孔隙结构变化特性研究[J]. 油田化学, 2002, 19(3): 253-258.
- Wu Wenxiang, Liu Yang. The changes of pore structure of polymer flooded sandstone reservoir cores[J]. Oilfield Chemistry, 2002, 19(3): 253-258.
- [7] 何胡军,王秋语,程会明. 孤岛中一区聚合物驱后储层参数变化规律[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(2): 255-259.
- He Hujun, Wang Qiuyu, Cheng Huiming. A study on reservoir parameter changes after polymer injection in Block 1 of the central Gudao[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(2): 255-259.
- [8] 全洪慧,朱玉双,张洪军,等. 储层孔隙结构与水驱油微观渗流特征[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(54): 952-960.
- Quan Honghui, Zhu Shuangyu, Zhang Hongjun. Reservoir pore structure and micro-flow characteristics of water flooding[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(54): 952-960.
- [9] 陈伟,李鹏,彭承文,等. 大庆油田肇35区块葡萄油层储层特征及控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 802-809.
- Chen Wei, Li Peng, Peng Chengwen, et al. Characteristics and controlling factors of pore features in the Putaohua oil reservoir in the Block Zhao-35, Daqing oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6): 802-809.
- [10] 程杰成,石梅,高秀梅,等. 阻力系数 R_F 和残余阻力系数 R_K 的影响因素[J]. 大庆石油学院学报, 1992, 16(3): 31-35.
- Cheng Jiecheng, Shi Mei, Gao Xiumei, et al. Effects on resistance factor and residual resistance factor for polymer solution flow through porous media[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 1992, 16(3): 31-35.
- [11] 朱永贤,孙卫,于锋. 应用常规压汞和恒速压汞实验方法研究储层微观孔隙结构[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(4): 553-556.
- Zhu Yongxian, Sun Wei, Yu Feng. Study on reservoir microscopic pore structure by high pressure Hg injection and rate controlled Hg penetration experimental technique[J]. Natural Gas Geosciences, 2008, 19(4): 553-556.
- [12] 徐赢,潘有军,张中劲,等. 恒速压汞实验的低渗透储层孔隙结构特征研究[J]. 吐哈油气, 2011, 16(3): 237-241.
- Xu Ying, Pan Youjun, Zhang Zhongjin, et al. Study on pore structure characteristics of low permeability reservoir based on constant velocity mercury penetration experiment[J]. Tuha Oil & Gas, 2011, 16(3): 237-241.
- [13] 辛长静,何幼斌,董桂玉. 毛管压力曲线在储层微观非均质性研究中的应用[J]. 河南石油, 2006, 20(3): 57-59.
- Xin Changjing, He Youbin, Dong Guiyu. Application of the study of capillary pressure curve in microscopic reservoir heterogeneity[J]. Henan Petroleum, 2006, 20(3): 57-59.
- [14] 张彦辉,曾雪梅,王颖标,等. 大庆油田三类油层聚合物驱数值模拟研究[J]. 断块油气田, 2011, 18(2): 232-234.
- Zhang Yanhui, Zeng Xuemei, Wang Yingbiao, et al. Numerical simulation of polymer flooding in Class III reservoir of Daqing Oilfield[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 18(2): 232-234.
- [15] 舒成强,李华斌. 疏水缔合聚合物的阻力系数和残余阻力系数及驱油效率研究[J]. 海洋石油, 2005, 25(3): 58-60.
- Shu Chengqiang, Li Huabin. Study of the coefficient of resistance and residual resistance factor and displacing efficiency of hydrophobically associating polymer[J]. Offshore Oil, 2005, 25(3): 58-60.
- [16] 洪秀娥,戴胜群,郭建宇. 应用毛细管压力曲线研究储层孔隙结构[J]. 江汉石油学院学报, 2002, 24(1): 53-54.
- Hong Xiue, Dai Shengqun, Guo Jianyu. Study on reservoir pore structure by using capillary pressure curve[J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 2002, 24(1): 53-54.

(编辑 高岩)

《中国油气田开发志》简介

《中国油气田开发志》是石油行业内的油气田开发专业志,是我国油气田开发专业的资料性文献,全面系统地记载各油气田、油气区和全国范围内油气田开发工作的历史进程与现状,主要内容包括油气田地质、开发部署、油藏工程、钻井工程、测井测试、采油工程、地面工程、组织管理以及石油人物等方面。

全书共分为62卷,其中国内油气田卷30卷,油气区卷31卷以及全国综合卷1卷,约7600万字。《中国油气田开发志》的出版,是我国石油工业界的一件盛事。这部巨著对于认识开发规律、完善技术体系、提升管理水平、转变发展方式、推进油气田科学有效开发,具有借鉴和指导意义。