

不同非均质砾岩油藏聚合物驱模拟实验

谭新¹, 蒲万芬¹, 王宁², 王利³, 孙波帅¹

(1. 西南石油大学石油与天然气工程学院, 四川 成都 610500; 2. 中国石油新疆油田公司实验检测研究院, 新疆 克拉玛依 834000; 3. 中国石油新疆油田公司风城油田作业区, 新疆 克拉玛依 834000)

摘要:砾岩油藏具有强非均质性的储层特征和复模态的孔隙结构, 开发动态比砂岩油藏更加复杂。目前新疆砾岩油藏的开采已进入高含水阶段, 面临着水窜严重、采收率低、开发难度大等问题, 亟需开展砾岩储层聚合物驱室内评价实验, 为制定克下组砾岩油藏的后期开发方案提供参考。以克拉玛依油田七东区克下组为例, 选取不同非均质模型进行驱替实验, 以研究层间非均质性对油藏采收率和聚合物窜流情况的影响。研究结果表明, 强非均质模型的中、低渗岩心中原油的动用程度极低, 实验中的原油采收率绝大部分来自于高渗岩心的采出, 仍有大量的原油残留在岩心中。各实验组在驱替过程中出现严重的水窜现象, 大大降低了聚合物的驱油效率, 如何处理聚合物窜流问题将是砾岩油藏今后开发中的一大难点。

关键词:砾岩油藏; 层间非均质性; 采收率; 聚窜

中图分类号: TE357

文献标识码: A

Polymer displacing modeling experiment of conglomerate reservoir with different interlayer heterogeneous

Tan Xin¹, Pu Wanfen¹, Wang Ning², Wang Li³ and Sun Boshuai¹

(1. School of Petroleum and Natural Gas Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China;
2. Experimental Testing Research Institute, Xinjiang Oilfield Company, CNPC, Karamay, Xinjiang 834000, China;
3. Fengcheng Oilfield Operation Region, Xinjiang Oilfield Company, CNPC, Karamay, Xinjiang 834000, China)

Abstract: Because of the strong heterogeneity and complex modal pore structure, the develop dynamic of the conglomerate reservoirs are more complex than those of the sandstone reservoirs. At present, the conglomerate reservoirs in Xingjiang have been in high water cut stage. It faces the problems such as the serious water channeling, low recovery rate, and great production difficulty, so it is necessary to carry out the polymer flooding evaluation experiment of the conglomerate reservoirs to provide references for designing the later development in maturing field. Taking the lower Karamay formation in No. 7 reservoir in east district of Karamay Oilfield as an example, we choose different heterogeneous models for the displacement experiments to analyse the effects of interlayer heterogeneity on the recovery and polymer channeling. The results prove that the producing reserves in the medium-low permeability cores of the strong heterogeneity model are very low, and the oil recovery in the experiment is mostly from the extraction of the high permeability core. There is still a large amount of oil remaining in the core. During the displacement, the serious polymer channeling exists in all test groups, which greatly reduced the sweep efficiency. It is a challenge of dealing with polymer channeling in the future development of the conglomerate reservoir.

Key words: conglomerate reservoir, interlayer heterogeneous, recovery, polymer channeling

收稿日期: 2017-08-17。

第一作者简介: 谭新(1993—), 女, 在读硕士研究生, 提高采收率研究。

基金项目: 国家科技重大专项“缝洞型油藏注水物理模拟实验及效果评价方法研究”(2016ZX05053-006)。

克拉玛依油田七东区克下组属于典型的砾岩油藏,具有常规物性差、孔隙结构复杂、非均质性强等特点,注水开发过程中会出现含水上升快、易水窜和水淹的情况。经过多年的注水开发,大多数砾岩油藏已处于高含水开采阶段,综合含水率高达85%^[1-3],面临着采收率低、后期开采难度加大的困境。为了保证油田持续有效的稳产,实施聚合物驱先导性试验成为必然趋势。聚合物驱技术在20世纪70年代引入我国,目前已在大庆、胜利等油田进入大规模工业化应用的阶段,其核心技术是通过提高注入流体的黏度来降低水相渗透率,改善流度比,以达到提高原油采收率的目的^[4]。但目前国内聚合物驱配套技术主要应用于砂岩油藏,在砾岩油藏中的研究和应用较少^[5,6]。基于以上研究现状,针对克拉玛依七东区油藏地质情况,探讨砾岩储层非均质性对聚合物驱的影响,不仅对该油田聚驱调剖方案的编制具有指导意义,而且可为砾岩油藏的后期开发提供技术保障。

1 砾岩油藏开发地质特征

克拉玛依油田七东区位于准噶尔盆地西北缘克一乌逆掩断裂带白碱滩段的下盘,是一个四周被断裂切割的封闭断块油藏。该区下克拉玛依组是在古生界变质岩—火成岩风化壳上,快速沉积的一套山麓洪积相砂砾岩体,是由多次结构和成分不同的洪积物叠覆而成的成层性沉积构造,沉积厚度为100~170 m,各层之间构造特征有很好的继承性^[7,8]。七东区克下组油藏岩性以砾岩为主,夹有砂岩、泥岩,属于克拉玛依砾岩I类储层^[9],其中主力油

层S₇²⁺³⁺⁴层砾石含量41.2%~73.6%,以酸性火成岩为主;砂屑成分以石英和长石为主,石英占18.9%~36.5%,长石占33.8%~43.7%;岩屑含量29.7%~38.5%,岩石成分成熟度较高。胶结物自下而上由钙质胶结为主渐变以泥质胶结为主,胶结物总量5.8%~12.9%。油藏储层物性分布特征统计表明,该区域储层有效孔隙度为17%,平均有效渗透率为614×10⁻³μm²,属于中孔—中高渗油藏。

新疆油田七东区克下组储层温度为34.3℃,原始地层压力为16.8 MPa,地层原油黏度为5.13 mPa·s,地面原油密度为0.857 g/cm³,地层水为NaHCO₃型,总矿化度为28 868 mg/L,储层润湿性为亲水。

2 室内物理模拟实验

2.1 实验条件

1) 根据七东区克下组砾岩油藏的非均质情况,选用人造岩心,基本参数见表1。

2) 实验流体:七东区脱气原油,模拟地层水,HJ2500聚丙烯酰胺(采用注入水配置,质量浓度为1 500 mg/L)。产出液测定试剂:冰乙酸、甲酸钠、淀粉—碘化铬、饱和溴水等,均为分析纯。

3) 实验仪器:ISCO多功能驱替泵、多功能岩心驱替装置、UV-1800型紫外可见分光光度计等。

4) 实验设置:驱替速度为0.3 mL/min;温度与克拉玛依组油藏保持一致,为35℃。

2.2 实验步骤

实验装置如图1所示,实验具体步骤为:

表1 模拟岩心基本参数
Table 1 Basic parameters of core simulation

组号	高渗组		中渗组		低渗组		平均渗透率/10 ⁻³ μm ²	变异系数,f
	渗透率/10 ⁻³ μm ²	孔隙度,%	渗透率/10 ⁻³ μm ²	孔隙度,%	渗透率/10 ⁻³ μm ²	孔隙度,%		
1	945	24.03	418	17.67	120	17.67	494	0.70
2	1 101	32.17	276	15.76	85	17.98	494	0.88
3	2 061	17.73	859	19.23	233	17.98	1 051	0.72
4	2 318	16.31	455	17.80	259	15.63	1 010	0.91
5	3 864	32.44	1 606	31.44	535	15.64	2 001	0.69
6	4 546	33.39	1 101	16.31	417	17.62	2 021	0.89
7	9 820	29.70	3 882	31.8	1 455	21.60	5 052	0.70
8	11 081	33.72	3 035	32.52	1 107	17.04	5 074	0.85

1) 实验基本数据的建立:①选取高、中、低不同渗透率的岩心,按照平均渗透率及渗透率变异系数要求,3块为一组,并进行烘干,测定气测渗透率,称取干重;②将各组岩心以0.3 mL/min的驱替速度饱和原油,待出口端出油速度与泵速相同时,计算其原始含油饱和度。

2) 驱替实验过程:①将3块岩心并联,以0.3 mL/min的驱替速度进行水驱油实验,水驱至综合含水99.9%时结束;②在水驱的基础上,以相同的流速开展聚合物驱,在注入0.37 PV聚合物后进入后续水驱阶段,水驱至综合含水达99.9%实验结束。

3) 实验数据的收集与处理:实验过程中记录不同阶段的注入压力、产液量、注入PV数(PV指三根岩心总孔隙体积)等数据,并检测从注聚合物开始后至实验结束过程中的产出液见聚浓度。

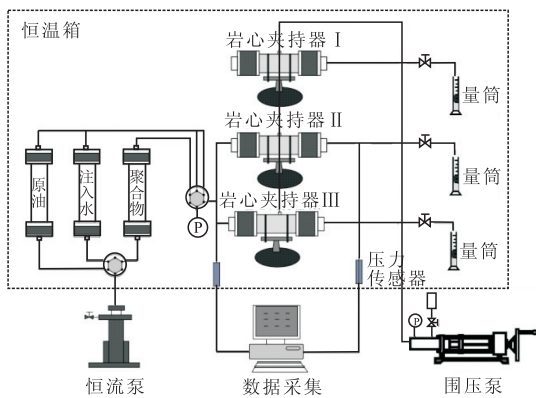


图1 驱替实验装置

Fig. 1 Device of displacement experiment

3 结果与讨论

3.1 层间非均质性对采收率的影响

根据七东₁区的地质情况,在平均渗透率为 $(500 \sim 2\,000) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 分别组合了渗透率变异系数为0.7、0.9的8组实验模型,并应用上述非均质并联模型进行驱替实验,结果见表2。随着模型平均渗透率的增大,模型水驱阶段采收率普遍下降,多数实验组的原油集中于高渗层产出,大部分中、低渗层几乎未被启动。虽然通过聚合物的调剖作用,各实验组的原油采出程度均有增加,但模型采收率总体仍呈现出下降趋势,最低已降至23.06%。

表2 层间非均质性模拟驱替实验数据统计
Table 2 Data statistics of simulation displacement experiment of interlayer heterogeneity

组号	岩心类型	原始含油饱和度	不同阶段采收率			模型综合采收率
			水驱	聚合物驱	后续水驱	
1	高渗	87.90	54.31	64.65	83.85	67.91
	中渗	87.00	32.03	42.75	67.75	
	低渗	86.45	15.65	30.15	52.14	
2	高渗	90.50	59.47	81.06	86.74	44.63
	中渗	80.30	4.88	36.59	47.15	
	低渗	82.41	0	0	0	
3	高渗	86.20	42.74	53.65	68.70	50.00
	中渗	73.80	21.74	45.02	62.24	
	低渗	66.42	0	14.29	19.05	
4	高渗	89.11	49.40	63.69	76.19	31.00
	中渗	74.90	0.00	8.80	16.80	
	低渗	72.10	0	0	0	
5	高渗	88.74	39.34	46.72	63.37	39.51
	中渗	86.52	10.71	34.82	55.16	
	低渗	85.63	0	0	0	
6	高渗	77.63	48.42	68.78	82.81	27.60
	中渗	78.88	0	0	0	
	低渗	80.21	0	0	0	
7	高渗	83.40	48.82	67.30	69.19	23.06
	中渗	83.27	0	0	0	
	低渗	75.90	0	0	0	
8	高渗	83.53	35.77	67.07	76.02	25.34
	中渗	89.10	0	0	0	
	低渗	84.30	0	0	0	

研究表明,砾岩孔喉细长曲折、孔隙配位数低,其严重的非均质性会导致岩石中存在优势渗流通道和水驱由过程中缺乏稳定的水驱前缘^[10-13],这会使注入水在高渗通道中迅速突破,而在其它孔道中渗流缓慢,因此水驱过程主要采出高渗层中的原油,岩心整体水驱采收率低(均低于35%)。而当进入聚合物驱阶段后,由于高黏度聚合物溶液的注入,改善了驱替体系的流度比,调整了吸水剖面,能够较为有效地提高原油采收率。在注入过程中,聚合物溶液仍优先进入高渗岩心,再进入中、低渗岩心。由于聚合物在多孔介质中具有吸附滞留的特性,从而有效降低了油相渗流阻力,促进了油相的流动,并对优势通道起到了堵塞作用,使部分中、低渗层能够得到启动^[14]。实验数据表明,聚驱阶段的模型总体采收率比水驱阶段提高了6.16%~17.77%,但仍存在严重的

非均匀驱替现象。进入后续水驱阶段后,模型中的原油被进一步采出,提高采收率0.63%~22.06%,但并未开辟新的渗透通路,部分实验组的中、低渗层仍旧处于未被启动状态^[15]。

从整个驱替过程来看,实验组平均有效渗透率和非均质性强弱的变化会使得岩心驱油效率存在显著差异。但实验数据表明,在强非均质性的并联模型驱油试验中,各组高渗层内的原油动用程度最高,在开采过程中对采出程度起主要贡献。

3.2 层间非均质性对窜聚的影响

与水驱相比,聚合物驱可通过聚合物自身的黏弹性和小分子链的冲刷作用,有效提高波及体积和微观驱油效率,采出分散在各种大小孔隙中的残余油^[16,17]。由于砾岩油藏具有近物源、多水系和快速多变的特殊沉积环境,其储层非均质性极为严重,孔隙结构呈复模态特征,使得聚合物驱微观渗流机理区别于砂岩油藏,渗流系统以“稀网状”和“非网状”形态为主^[10,18]。研究表明,聚合物溶液通过对油滴的剪切、拖拽及携带作用提高了残余油的采出^[19,20],但砾岩储层本身具有的“稀网—非稀网”孔隙结构会使聚合物的驱替特征缩短,以“突进”为主的渗流机理将导致优势通道的快速形成。当优势通道形成后,稳定的聚合物前缘随即消失,此时的渗流特征将表现为严重的非均匀驱替,极易发生聚窜。另一方面,对于长期进行注水开采的油田而言,注入水的冲刷及

黏性原油的流动会使储层物性发生较大改变,更加促使了优势流场的形成,导致聚驱过程中聚合物沿优势流场窜流指进,降低了聚合物驱油效率。

实验表明,本次选用的8组强非均质性实验模型,在聚合物驱的过程中均出现了不同程度的聚窜现象(表3)。聚驱过程中,聚合物溶液优先进入在水驱阶段已形成的优势通道,由于黏度的增加及吸附滞留作用,促进了中、低渗层中水线的推进,具有一定的调剖作用。聚合物的注入虽然降低了高渗层的含水率,改善了高渗层中的吸水强度,但窜流现象仍旧存在。并且随着岩心平均渗透率的增加,实验组的聚窜时间提前,部分渗透率较高的模型出现了“一注即窜”的情况。而窜流完全形成时间也逐步从0.77 PV减少至0.07 PV,并且随着岩心变异系数的增大还有逐步缩短的趋势,表明了孔隙中的聚合物溶液沿高渗通道快速窜流,非均匀驱替情况极为严重。

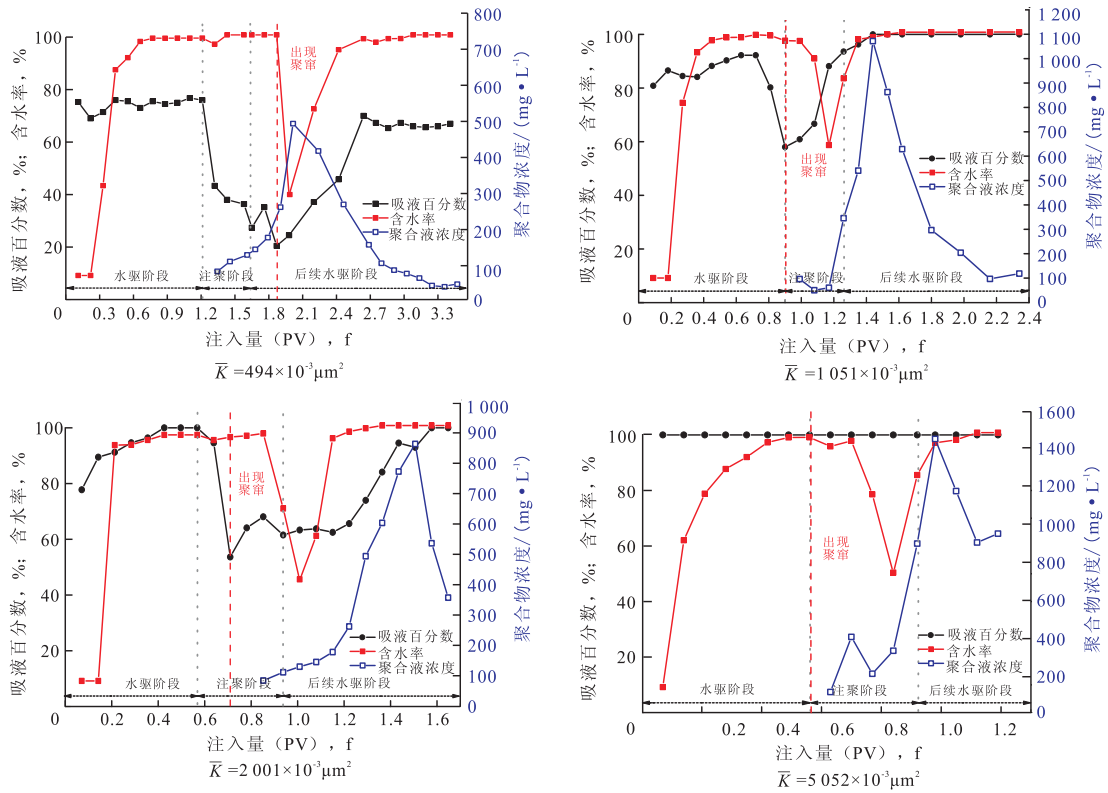
从产出液的检测情况来看,随着驱替的进行,各实验组中的聚合物均集中于其高渗层产出,且见聚浓度受模型的平均渗透率和变异系数的影响(图2)。在非均质性极强的高渗岩心中,随着岩心渗透率的增加,模型见聚高值不断增大,部分实验组产出端测定峰值已接近注入浓度1 500 mg/L,高达1 468.85 mg/L,聚驱效果极差。实验数据显示,各组的见聚浓度曲线呈现出明显的“尖峰”形态,且变化趋势滞后于吸液百分数和含水率的变化,当产出端见聚时,模型中的聚窜均已发生。

表3 模型聚窜形成情况

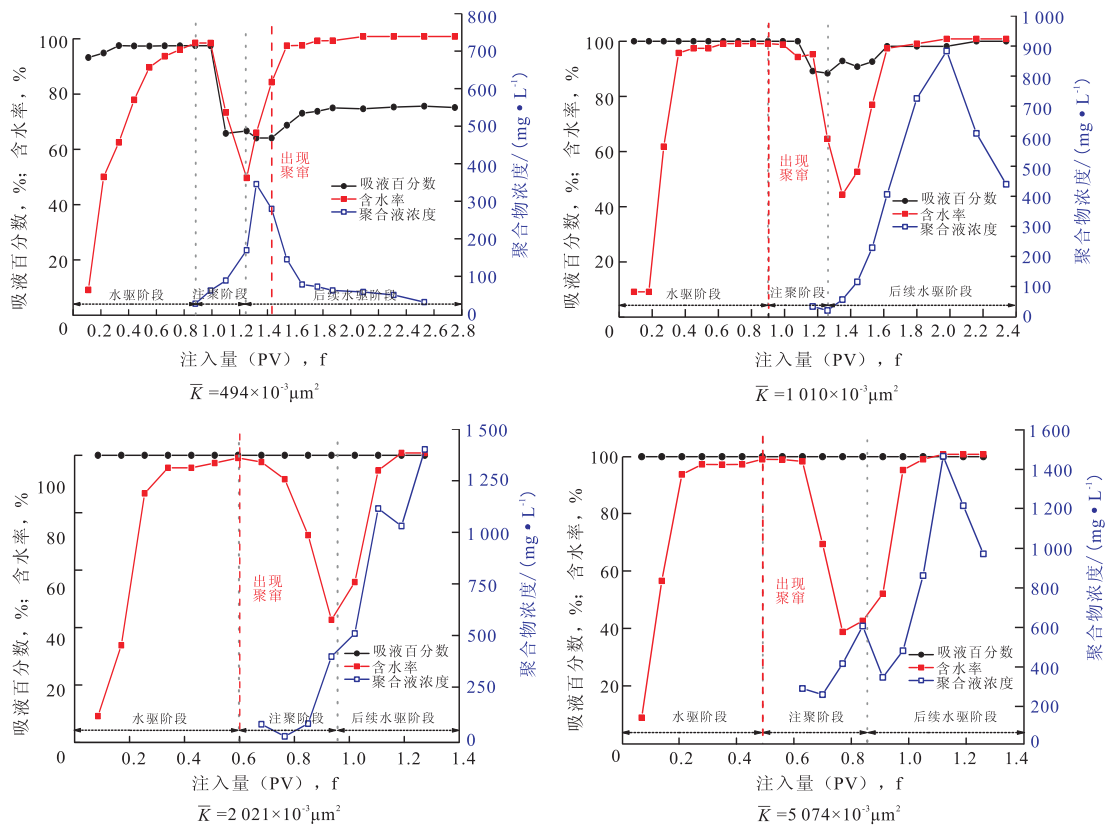
Table 3 Cluster formation situation of different models

组别	平均渗透率/ 10 ⁻³ μm ²	变异系数, f	窜流开始(PV), f	高渗层吸液百分数, %	窜流完全形成(PV), f	高渗层吸液百分数, %	聚窜高峰值/ (mg·L ⁻¹)
1	494	0.7	0.66	37	1.43	70	493.64
3	1 051	0.72	0.18	58	0.72	100	863.46
5	2 001	0.69	0.14	54	0.28	68	279.65
7	5 052	0.7	0	100	0.07	100	1 401.54
2	494	0.88	0.55	64	0.88	75	279.65
4	1 010	0.91	0	100	0.09	100	1 445.77
6	2 021	0.89	0	100	0.09	100	883.64
8	5 074	0.85	0	100	0.07	100	1 468.85

注:窜流开始和完全形成的时间从注聚开始后计算。



a. 变异系数 $C_v=0.7$



b. 变异系数 $C_v=0.9$

图2 模型高渗层驱替情况

Fig. 2 Displacement situation of different models in high permeability layer

4 结论与认识

1) 强非均质性的砾岩油藏水驱采收率较低。在驱油过程中,高渗岩心内原油是主要采出对象,大部分中、低渗岩心未被有效启动,造成了大量剩余油的残留。因此,砾岩油藏后期开采的重点仍是提高中、低渗层的采收率。

2) 砾岩油藏特殊的复模态孔隙结构决定了其渗流特征是以优势通道突进及严重的非均匀驱替为主,而长期注水导致的储层物性变化更会促使聚合物驱过程中窜流的发生。在强非均质性的实验条件下,大部分实验组均表现出见聚早、产聚浓度上升快的驱替现象,大大降低了聚合物的驱替效率和波及效率,对油田开采极其不利。

3) 新疆七东区砾岩油藏提高采收率技术的发展,需要综合考虑到以下几点:如何克服聚合物驱调剖能力不强、洗油效率不高的缺陷;如何有效抑制驱替过程中的窜流,避免注入井聚合物突破过早的问题;如何在保证油田持续有效稳产的基础上,尽可能地降低提高采收率成本。

参考文献

- [1] 朱水桥,钱根葆,刘顺生. 克拉玛依砾岩油藏二次开发[M]. 北京:石油工业出版社,2015.
- [2] 袁述武,韩甲胜,萨如力·草克提,等. 深部调驱技术在砾岩油藏二次开发中的应用——以克拉玛依油田七中区克下组油藏深部调驱试验为例[J]. 新疆石油天然气,2015,11(2):61-65.
- [3] 周国隆,李重明. 克拉玛依砾岩油田注水开发特征[J]. 石油勘探与开发,1990,17(5):52-60.
- [4] 胡博仲,刘恒,李林. 聚合物驱采油工程[M]. 北京:石油工业出版社,2004.
- [5] 邹玮,陈玉琨,楼仁贵,等. 新疆油田七东区砾岩油藏聚合物驱见聚特征与影响因素研究[J]. 石油知识,2015,31(1):50-52.
- [6] 高明,王强,顾鸿君,等. 新疆砾岩油藏七东区聚合物驱研究[J]. 科学技术与工程,2012,12(22):5597-5601.
- [7] 李庆昌,吴虹,赵立春. 砾岩油田开发[M]. 北京:石油工业出版社,1997.
- [8] 吕建荣,谭锋奇,许长福,等. 克拉玛依砾岩油藏储层分类特征及水驱油规律[J]. 东北石油大学学报,2015,39(4):21-30.
- [9] 罗明高,张庭辉. 克拉玛依砾岩油藏微观孔隙结构及分类[J]. 石油与天然气地质,1992,13(2):201-210.
- [10] 谭锋奇,许长福,王晓光,等. 砾岩油藏水驱与聚合物驱微观渗流机理差异[J]. 石油学报,2016,37(11):1414-1427.
- [11] Simlote V N, Ebanks W J, Eslinger E V. Synergistic evaluation of a complex conglomerate reservoir for enhanced oil recovery, Barrancas Formation, Argentina[J]. Journal of Petroleum Technology, 1985, 37(2): 295-305.
- [12] Wegner J. Investigation of polymer enhanced oil recovery (EOR) in microfluidic devices that resemble porous media: An experimental and numerical approach[J]. Dgmk Tagungsbericht, 2015, (3): 385-396.
- [13] Luo W, Ma D, Nie X, et al. Study on matching relation between polymer molecular size and pore size for conglomerate reservoir [C]// paper IPTC-16660-MS presented at the International Petroleum Technology Conference, 26-28 March 2013, Beijing, China.
- [14] 邓世冠,吕伟峰,刘庆杰,等. 利用CT技术研究砾岩驱油机理[J]. 石油勘探与开发,2014,41(3):330-335.
- [15] 刘红现,许长福,覃建华,等. 砾岩油藏孔隙结构与驱油效率[J]. 石油天然气学报,2010,32(4):189-191.
- [16] 唐洪明,张亚琦,王俊杰,等. 克拉玛依油田七东区砂砾岩油藏聚合物驱实验评价[J]. 新疆石油地质,2016,37(5):549-555.
- [17] 叶仲斌. 提高采收率原理[M]. 北京:石油工业出版社,2007.
- [18] Meybodi H E, Kharat R, Araghi M N. Experimental studying of pore morphology and wettability effects on microscopic and macroscopic displacement efficiency of polymer flooding[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering. 2011, 78 (2): 347-363.
- [19] 陈海玲,郑晓宇,蒋庆哲. 砾岩油藏聚驱后提高采收率技术研究[J]. 现代化工,2013,33(3):12-16.
- [20] Buchgraber M, Clemens T, Castanier L M, et al. A Microvisual Study of the Displacement of Viscous Oil by Polymer Solutions [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering. 2011, 14 (3): 269-280.

(编辑 黄颖)