

引用格式:王志远,张烈辉,谭龙,等.砾岩储集层聚合物驱油机理与控制因素实验研究[J].油气藏评价与开发,2020,10(3):109-114.

WANG Z Y, ZHANG L H, TAN L, et al. Study on mechanism and controlling factors of polymer flooding in conglomerate reservoir[J].

Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(3): 109-114.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2020.03.017

砾岩储集层聚合物驱油机理与控制因素实验研究

王志远¹,张烈辉¹,谭龙²,张朝良²,唐洪明¹

(1.油气藏地质及开发工程国家重点实验室西南石油大学,四川 成都610500;

2.中国石油新疆油田公司勘探开发研究院,新疆 克拉玛依 834000)

摘要:以克拉玛依油田七东,区下克拉玛依组砾岩储集层为研究对象,通过室内实验研究了物性、岩性、孔隙结构模式与聚合物驱提高采收率程度的关系。通过核磁共振技术,建立了聚合物原油动用规律研究的实验方法,分析了砾岩油藏储集层聚合物驱过程中微观孔隙的动用规律。通过微观驱油实验,分析了砾岩油藏聚合物驱后各类剩余油的采收情况。研究表明,聚合驱主要驱替簇状剩余油、孤岛状剩余油,聚合物驱后孤岛状剩余油占总剩余油的比例最大;聚合物驱的过程中,由于砾岩复杂的孔隙结构及聚合物溶液的高黏特性,大油滴被剪切为小油滴,并部分被聚合物溶液拖拽出孔隙。聚合物驱提高采收率程度与岩心孔隙度、渗透率等之间的相关性不明显,与储集层的岩性、孔隙结构有关。不同岩性聚合物驱提高采收率幅度由大到小次序为:含砾粗砂岩>砂砾岩>不等粒小砾岩>细小砾岩;聚合物提高采收率程度与可动油饱和度呈现出二次抛物线关系。

关键词:克拉玛依油田;砾岩油藏;聚合物驱;驱油机理;采收率

中图分类号:TE341

文献标识码:A

Study on mechanism and controlling factors of polymer flooding in conglomerate reservoir

WANG Zhiyuan¹, ZHANG Liehui¹, TAN Long², ZHANG Chaoliang², TANG Hongming¹

(1.State Key Laboratory of Petroleum Reservoir Geology and Development Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2.PetroChina Xinjiang Oilfield Company Exploration and Development Research Institute, Karamay, Xinjiang 834000, China)

Abstract: Taking the conglomerate reservoir of the Lower Karamay Formation in Qidong-1 area of Karamay Oilfield as the research object, the relation between physical properties, lithology and pore structure modes and the degree of recovery of polymer flooding is studied by laboratory experiments. And by means of nuclear magnetic resonance (NMR) technology, the experimental method of the study on the kinetics of polymer crude oil utilization is established and the kinetics of micro-porosity in the polymer flooding process of conglomerate reservoirs is analyzed. Through the micro-displacement experiments, the residuals after polymer flooding in conglomerate reservoirs are analyzed. The results show that the polymer flooding mainly displaces the cluster-like residual oil and the island-like residual oil. The polymer-driven residual oil accounts for the largest proportion of the total remaining oil. During the polymer flooding process, due to the complex pore structure of conglomerate and high viscosity of polymer solution, the large oil droplets are sheared into small oil droplets, and partially of which are dragged out of the pores by the polymer solution. The correlation between the degree of enhanced oil recovery by polymer flooding and core porosity and permeability is not obvious, however, it is related to the lithology and pore structure of the reservoir. The order of enhanced oil recovery with different lithologic polymer flooding from coarse to small is: boulder coarse sandstone>glutenite>unequal grain small conglomerate>fine conglomerate. There is a quadratic parabola relation between the degree of polymer recovery and dynamic oil saturation.

Key words: Karamay Oilfield, conglomerate reservoir, polymer flooding, flooding mechanism, oil recovery

收稿日期:2019-05-06。

第一作者简介:王志远(1994—),男,在读硕士研究生,油气田开发工程。通讯地址:四川省成都市新都区新都大道8号西南石油大学国家重点实验室 A412,邮政编码:610500。E-mail:wangzhiyuan3@foxmail.com

基金项目:国家自然科学基金“三维大变化尺度缝洞型碳酸盐岩油藏流体流动规律及流-固耦合综合模型研究”(51374181)。

砾岩油藏是最难开发的油藏之一,具有相变快、岩性变化快、孔隙结构复杂、非均质性严重等特点^[1]。新疆克拉玛依油藏经过50多年的注水开发,现已进入高含水阶段,水驱开发稳产的难度越来越大,实施以聚合物为先导试验的三次采油技术成为必然的趋势。聚合物驱主要是通过提高驱替液的黏度、并通过滞留在孔隙中的聚合物来降低水相渗透率,从而改善油水流动度比,进而扩大波及体积,达到提高采收率的目的^[2-3]。聚合物驱油技术在中国已经发展了近30年,但主要应用在砂岩油藏,在砾岩油藏的应用较少,尤其是新疆地区砾岩属于山麓洪积扇,填隙物含量高,颗粒分选差,呈现出非均质性严重、孔喉结构复杂、喉道半径均质小及孔喉比大等特点^[4-5]。砂岩油藏的聚合驱油成果不能直接运用到砾岩油藏中,还需要进行专门的研究。

目前新疆七东₁区砾岩油藏聚合物驱试验取得了阶段性成果,但是对砾岩油藏聚合物驱微观驱油机理与控制因素还不清楚。针对砾岩油藏聚合物驱微观驱油机理的研究,刘卫东^[6]利用压汞法测量了不同渗透率岩心的孔喉直径,建立了不同相对分子量聚合物与砾岩油藏孔隙结构的匹配关系;胡小东^[7]利用核磁共振技术研究了砾岩油藏不同孔隙结构对聚合物驱后剩余油的影响,并且确定了剩余油的分布规律;冯慧洁等^[8]利用微观透明实验技术模拟聚合物的驱油过程,揭示了聚合物驱后剩余油的分布特征;谭锋奇等^[9]采用CT扫描技术研究了聚合物驱微观驱油机理,建立了砾岩油藏聚合物驱最终采收率计算模型。以上研究虽然取得了一定的进展,但对影响砾岩油藏聚合驱油效果的主要控制因素没有进行系统研究。该文结合核磁共振等手段,全面分析了砾岩油藏孔隙原油的动用规律与控制因素,在此基础上研究了孔隙度、渗透率、岩性、可动油饱和度与聚合物驱提高采收率幅度的关系。

1 储集层特征

克拉玛依七东₁区克下组位于克拉玛依油田第七断块区的东端,是典型的砾岩储集层。储集层是以正旋回沉积为主的粗碎屑岩,属山麓洪积相和辫状河流相沉积,储集层岩性复杂,主要岩石类型为砂砾岩、含砾粗砂岩、不等粒小砾岩、细粒小砾岩等,其中细粒小砾岩占16%,含砾粗砂岩占40%,砂砾岩

占24%,不等粒小砾岩占8%,砾质砂岩等其它岩性占12%。砾岩储集层沉积环境特殊,表现出多模态的孔隙结构特征,七东₁区克下组储集层单模态占13%、双模态48%、复模态占39%。单模态岩心孔隙发育好,孔喉粗大,孔喉网络状连通,胶结物含量少,岩心孔喉分布均匀,孔喉以中粗喉道为主。双模态岩心一级颗粒形成的孔隙半充填,孔喉发育好—中等,呈网络状分布或星点状分布;复模态岩心孔喉发育较差,一般为零星散乱状分布,渗流系统以“稀网状”和“非网状”形态为主^[10-16]。储层岩石胶结疏松,成分成熟度和结构成熟度均较差,平均孔隙度19.6%,有效渗透率 $395.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于中孔—中高渗储集层。

2 实验器材与方法

2.1 实验器材

实验装置:主要包括恒速恒压泵、压力容器、岩心夹持器、核磁共振系统、控制系统、计量装置等。核磁共振仪器为纽曼生产的MacroMR12,核磁共振主要参数如下:磁体类型,永磁体;磁场强度, $0.3 \pm 0.05 \text{ T}$;仪器主频率,12.8 MHz;探头线圈直径,150 mm;有效样品检测范围,150 mm×100 mm。

实验材料:重水、聚合物、模拟地层水等。岩心直径约为3.8 cm,长度在5~7 cm;原油为七东₁区克下组脱气脱水原油,26℃下黏度为77 mPa·s,实验时加煤油配制成模拟油,室温下黏度为15.4 mPa·s。聚合物为北京恒聚油田化学试剂有限公司产品,平均相对分子质量 2.5×10^7 的聚丙烯酰胺,用注入水或者重水配液,质量浓度2 000 mg/L,室温下黏度95 mPa·s。模拟水为重水配制的地层水,矿化度334.46 mg/L,水型为CaCl₂型。微观刻蚀模型(尺寸45 mm×15 mm,平面有效尺寸为25 mm×13 mm);微观刻蚀用模拟油(硅油与油溶黄染色剂,室温下黏度10 mPa·s)。

实验用岩心均为新疆油田七东₁区天然岩心,长度在3.99~8.106 cm,岩心平均孔隙度17.07%,平均渗透率 $992.93 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均含油饱和度64.66%。岩心基本参数见表1。

实验用微观刻蚀模型借助光刻法复制砾岩岩心铸体薄片的孔隙网络,再经制版、涂胶、光成像、化学刻蚀和烧结成型。

表1 实验用岩心基本参数

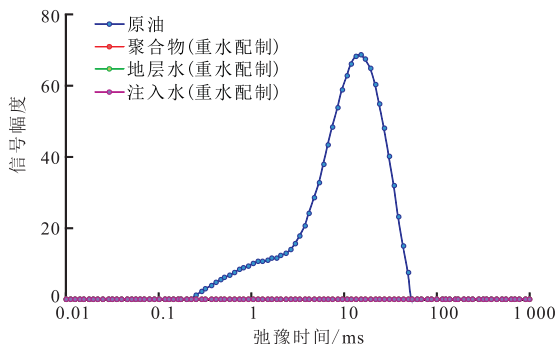
Table 1 Basic parameters of experimental cores

| 编号 | 长度/cm | 直径/cm | 原始含水饱和度/% | 孔隙度/% | 渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$ | 岩性 |
|----|-------|-------|-----------|-------|-----------------------------|--------|
| 1 | 5.686 | 3.785 | 31.34 | 19.09 | 2 333 | 细粒小砾岩 |
| 2 | 5.144 | 3.816 | 31.23 | 13.92 | 2 047 | 细粒小砾岩 |
| 3 | 5.416 | 3.842 | 36.25 | 15.39 | 1 803 | 细粒小砾岩 |
| 4 | 5.458 | 3.864 | 33.73 | 15.77 | 50 | 细粒小砾岩 |
| 5 | 5.130 | 3.762 | 31.92 | 16.68 | 995 | 砂砾岩 |
| 6 | 6.151 | 3.781 | 46.01 | 17.75 | 577 | 砂砾岩 |
| 7 | 5.300 | 3.774 | 33.58 | 18.16 | 1 588 | 砂砾岩 |
| 8 | 5.196 | 3.756 | 36.15 | 16.15 | 17 | 砂砾岩 |
| 9 | 6.972 | 3.780 | 25.75 | 19.04 | 1 588 | 砂砾岩 |
| 10 | 8.106 | 3.772 | 42.92 | 17.43 | 2 570 | 砂砾岩 |
| 11 | 3.990 | 3.778 | 41.55 | 15.58 | 1 011 | 含砾粗砂岩 |
| 12 | 7.182 | 3.784 | 27.24 | 17.95 | 671 | 含砾粗砂岩 |
| 13 | 7.238 | 3.788 | 30.45 | 20.12 | 362 | 含砾粗砂岩 |
| 14 | 5.116 | 3.842 | 40.16 | 19.36 | 2 031 | 含砾粗砂岩 |
| 15 | 4.764 | 3.808 | 36.55 | 15.55 | 1 507 | 含砾粗砂岩 |
| 16 | 5.674 | 3.780 | 33.16 | 15.96 | 48 | 含砾粗砂岩 |
| 17 | 5.630 | 3.772 | 29.63 | 16.22 | 14 | 含砾粗砂岩 |
| 18 | 6.030 | 3.808 | 42.76 | 21.04 | 1 552 | 含砾粗砂岩 |
| 19 | 6.720 | 3.804 | 29.74 | 16.52 | 30 | 含砾粗砂岩 |
| 20 | 6.380 | 3.810 | 35.01 | 19.28 | 29.2 | 含砾粗砂岩 |
| 21 | 6.960 | 3.774 | 40.87 | 16.63 | 1 743 | 不等粒小砾岩 |
| 22 | 6.640 | 3.756 | 33.62 | 15.82 | 135 | 不等粒小砾岩 |
| 23 | 5.290 | 3.780 | 45.42 | 17.64 | 1 876 | 砂质砾岩 |
| 24 | 5.200 | 3.816 | 35.22 | 16.11 | 101 | 砾质砂岩 |
| 25 | 6.460 | 3.806 | 33.25 | 13.81 | 145.05 | 泥质砂岩 |

2.2 天然岩心驱油实验步骤及原理

2.2.1 实验原理

核磁共振测试可以直接检测岩石孔隙中的油水信号(氢原子信号),用重水来代替普通水,可以使水信号消失,而油的弛豫时间(T_2 时间)不变,进而区分出油水信号。图1为重水配制的驱替液(聚合物、地层水、注入水)与原油核磁信号对比,图1表明,重水配制的驱替液基本没有信号,只有原油具有核磁共振信号,因此,本次实验能有效区分原油与驱替液、地层水、注入水。

图1 不同体系 T_2 时间信号幅度对比Fig. 1 Comparison of T_2 time signal amplitude of different system

2.2.2 实验步骤

1) 岩心洗油、洗盐处理,烘干岩心,测试岩心基础物性参数。

2) 抽空饱和模拟地层水,第1次测试 T_2 谱;表征岩石初始孔隙分布特征。

3) 再次洗盐,并烘干岩心,抽空饱和重水;用核磁第2次测试 T_2 谱,确保岩心无任何信号,开始开展驱替实验。

4) 用模拟原油驱替重水,建立束缚水饱和度,第3次测试 T_2 谱。

5) 用重水配制的模拟地层水恒速(0.1 mL/min)驱替模型中的原油,直至含水率达98%,第4次测试 T_2 谱。

6) 再注入重水配制的聚合物段塞0.7PV,继续重水驱至含水率达98%,第5次测试 T_2 谱。

7) 将岩心放入离心机中离心(离心力0.69 MPa),甩出其中的可动油,第6次测试 T_2 谱,与第3次测量的 T_2 谱进行对比,计算可动油饱和度。

2.3 微观驱油实验步骤

实验步骤:①将微观刻蚀模型抽真空12 h、饱和地层水48 h;②模拟油驱替地层水并稳定48 h;③以固定压差(0.015 MPa)水驱油至含水率达到100%为止,形成水驱残余油;④以固定压差注入聚合物溶液驱替残余油,记录驱替过程;⑤实验结束,用石油醚清洗微观模型。

3 实验结果与讨论

3.1 微观驱替实验结果讨论

根据微观模型驱油实验,研究砾岩油藏聚合物驱微观驱油机理。模型驱油效率66.52%,其中水驱油效率43.0%,聚合物驱提高驱油效率23.5%。模型水驱后形成大量孤岛状残余油(图2a中A区)和簇状残余油(图2a中B区);还有一部分以柱状(图2a中C区)和膜状残余油(图2a中D区)存在于孔隙及喉道中。此外,还有较少部分存在死孔隙中,形成盲端残余油(图2a中E区)。同砂岩油藏相比,5类残余油在模型中均存在,只是由于砾岩油藏小喉道包围大孔的现象,簇状残余油和孤岛状残余油所占的比例更大(图2a)。

聚合物增加了驱替相流体在孔隙介质的流动阻力,引起水相渗透率下降,提高微观波及系数,使水

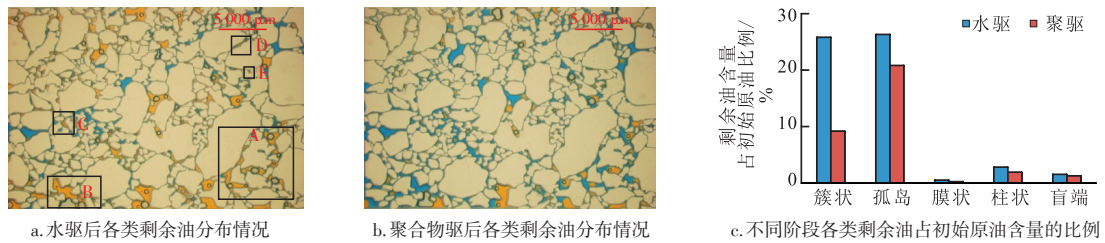


图2 各类剩余油分布及含量变化情况

Fig. 2 Distribution and content change of various remaining oil

驱后的簇状剩余油、柱状剩余油驱替出来。在聚合物驱油压差不大于水驱油压差的条件下,由于聚合物分子体相黏度大于注入水的黏度,并且聚合物在经过弯曲孔隙和小喉道时,聚合物链会出现拉伸,大幅度提高驱替液的黏度^[9]。当聚合物流经孤岛状、膜状残余油表面时,聚合物作用在油相上的剪切应力远大于注入水作用在油相上的剪切力,将孤岛状、膜状残余油拉扯成小油珠。由于砾岩孔隙结构更复杂,剪切作用更强,孤岛状残余油更容易被拉扯成更小的油珠,更容易通过小喉道,被携带运移。

图2b是聚合物驱后剩余油的分布情况。从图中明显可以看出簇状残余油大量减少,并有部分转化为孤岛状残余油。聚合物驱后,孤岛状残余油占总剩余油的比例最大,占初始含油饱和度比例为20.83%(图2c),要将这部分油采出,还需要注入二元体系(三元体系)进一步降低原油分子之间的内聚力,进一步提高采收率。

3.2 岩心驱替实验结果讨论

3.2.1 驱油效率

对25块具有代表性岩心进行聚合物驱替实验,水驱平均采收率47.94%,最高为54.90%,最低23.89%。聚合物驱平均提高采收率13.10%,最高19.07%,最低7.65%。最终采收率平均61.03%,最高72.93%,最低46.00%。无论是水驱还是聚合物驱,不同岩心采收率差别大,即使孔隙度和渗透率相近的两块岩心,由于孔隙结构的差别,聚合物驱提高采收率的幅度差别也很大。

3.2.2 剩余油微观分布研究

应用核磁共振技术测试了25个岩样不同驱替阶段的 T_2 谱,平均含油饱和度64.66%,水驱后平均含油饱和度32.20%。 T_2 分布可以反映待测液体的大小

特征^[17],当岩心中饱和和普通地层水时,地层水充满孔隙,此时的 T_2 分布可以反映岩心的孔喉分布特征。图3为其中1块岩心的实验结果,岩心烘干后饱和重水及原油后,饱和原油的 T_2 分布与饱和水的 T_2 分布在第2个峰上基本重合,原油主要分布在大孔隙中。注入重水后,原油的信号幅度逐渐下降,峰值逐渐下降,并逐渐向左偏移,这表明大孔隙中的原油逐渐被采出。注入聚合物后,峰值继续下降并向左偏移,并且7~43 ms弛豫时间内的信号幅度小幅度增加,由于聚合物溶液与原油的剪切应力大于油水的剪切应力,聚合物溶液作用于簇状残余油,将油滴“撕裂”为多个小油滴,并将部分油滴夹带运移走,这与微观驱替实验展现的结果基本一致。实验在不同驱替阶段时,采出程度增加,剩余油减少,随着1PV水驱、水驱结束、聚驱、后续水驱进行,核磁测量的总剩余油量在图中是明显减少。

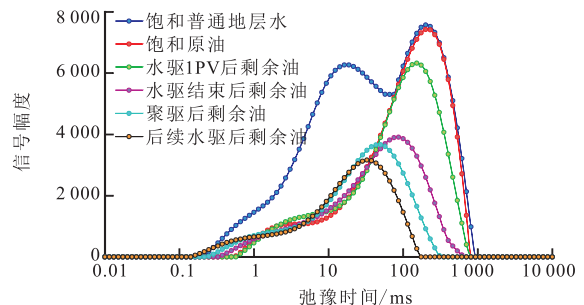


图3 岩心核磁共振测试不同驱替阶段 T_2 分布
Fig. 3 T_2 distribution of core nuclear magnetic resonance at different displacement stages

3.3 聚合物驱油效率影响因素

3.3.1 物性对聚合物驱提高采出程度影响评价

对不同物性的岩心与聚合物提高采出程度进行分析发现(图4),聚合物驱提高采出程度与岩心物性(孔隙度、渗透率)存在明显的非相关关系,这与传统的砂岩油藏聚合物驱驱油规律相左。对砂岩油藏而

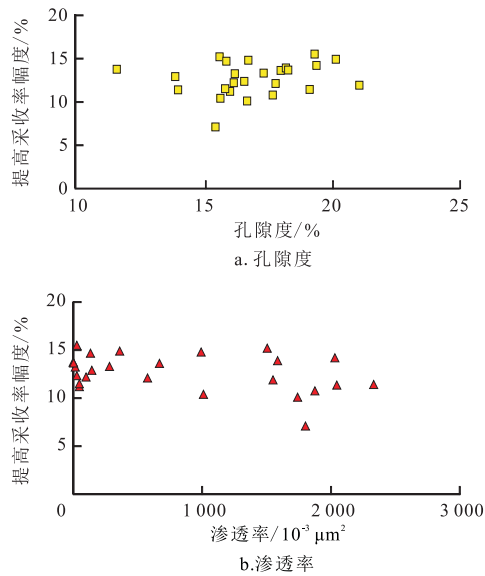


图4 物性参数与聚合物驱提高采收率幅度关系
Fig. 4 Relation between physical property parameters and EOR amplitude of polymer flooding

言,孔隙度和渗透率是储集层储集能力与渗流能力的反映,在一定程度上能反映出油藏原油的采出能力。但砾岩油藏与砂岩油藏在微观孔隙结构上相比,孔隙结构更为复杂,孔隙连通性差,喉道半径小且少,且填隙物含量高,大量泥质颗粒充填于粒间粒表,这更增加聚合物渗流的复杂程度,导致岩石的物性与聚合物提高采出率程度关系不明显的现象。

3.3.2 岩性对聚合物驱提高采出程度影响评价

对不同岩性、不同驱替阶段采出程度进行分析时,发现不等粒小砾岩水驱采收率最低,平均为48.52%,而细粒小砾岩水驱采收率最高,平均为54.17%。含砾粗砂岩聚合物驱提高采出程度幅度最高,平均为14.52%。细粒小砾岩聚驱提高采收率幅度最低,平均为9.20%,但其最终采收率最高,平均为63.36%。含砾粗砂岩、砂砾岩聚合物驱提高采收率幅度由大到小次序为:含砾粗砂岩>砂砾岩>不等粒小砾岩>细粒小砾岩(图5)。水驱后,含砾粗砂

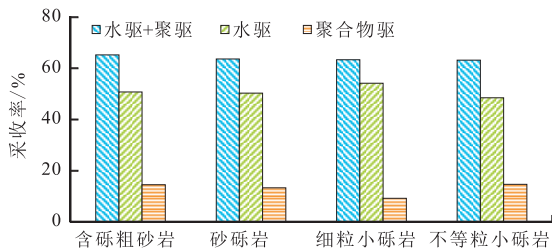


图5 岩性与采收率关系
Fig. 5 Relation between lithology and oil recovery

岩和不等粒小砾岩剩余油含油饱和度较高,但不等粒小砾岩聚合物驱采收效率较低,这说明含砾粗砂岩储层是聚合物驱潜力储层。

3.3.3 孔隙结构对聚合物驱提高采出程度影响

孔隙度、渗透率是笼统表征岩石物性的参数,关键的还是孔隙结构。图6为11号岩心和13号岩心的铸体薄片及核磁共振 T_2 分布,11号岩心与13号岩心储层矿物类型基本一致,粒间孔均发育,但11号岩心孔隙发育较差且泥质含量高。11号岩心水驱油效率38.4%,13号岩心水驱油效率38.8%,2块岩心水驱油效率基本一致。11号岩心渗透率远大于13号岩心的渗透率,但13号岩心孔隙分布跟均匀,孔隙发育更好,聚合物驱采收率比11号高出4.5%,这表明,孔隙结构是聚合物驱提高采收率的主控因素。

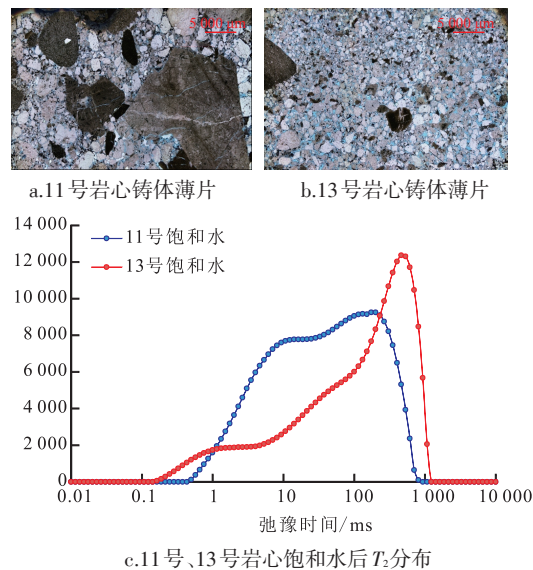


图6 岩心铸体薄片及饱和水后 T_2 分布
Fig. 6 Core casting Slices and T_2 distribution after saturated with water

可动油饱和度是指孔隙可以被动用的原油与孔隙体积的比值,它受到孔隙结构及连通性的影响,能反映出岩石孔隙结构的好坏。水驱后原油主要以孤岛状和簇状剩余油为主,优势通道中已经没有剩余油存在,而聚合物溶液由于剪切稀释性,在不同孔喉中表现出不同的黏度特性。在大喉道表现出高黏特性,在小喉道表现出低黏特性,从而将被小喉道控制的孤岛及簇状剩余油驱替出来。但对于孔喉结构特别差的岩石,由于毛管压力极大,聚合物溶液无法波及到。因此,聚合物提高采收率程度与可动油饱和度表现出抛物线相关关系(图7),可动油饱和度较低

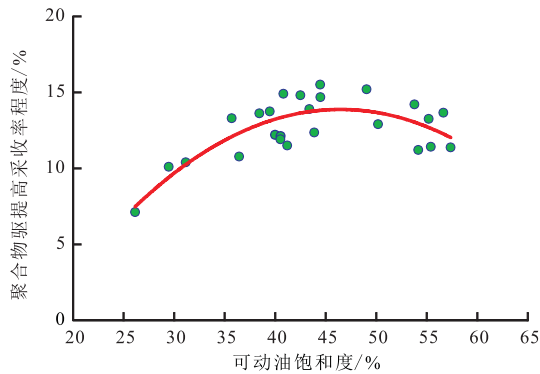


图7 可动油饱和度与聚合物驱提高采收率程度关系
Fig. 7 Relation between mobile oil saturation and oil recovery of polymer flooding

时,聚合物提高采收率程度较低,随着可动油饱和度增加,聚合物提高采收率程度增加,可动油饱和度继续增加,孔隙结构越来越好,水驱采收率越来越高,当残留在孔隙中的原油大量减少,聚合物提高采收率的幅度表现出下降的趋势。

4 结论

1) 砾岩油藏孔隙结构复杂,聚合物驱后孤岛状剩余油占比最大,后续可以通过降低油相与驱替液之间的界面张力来进一步提高采收率。

2) 核磁共振实验表明,对于砾岩储集层,水驱主要驱替大孔中的原油。由于聚合物溶液作用于油滴上的剪切应力较大,促使大油滴被剪切为小油滴,并部分被聚合物溶液拖拽出孔隙。

3) 聚合物提高砾岩油藏的采收率与岩心的孔隙度、渗透率的相关性不明显,与岩性、可动油饱和度关系密切,通过核磁共振测试岩心的可动油饱和度,聚合物提高采收率程度与其呈现出抛物线的关系。

参考文献

[1] 许长福,刘红现,钱根宝,等. 克拉玛依砾岩储集层微观水驱油机理[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(6): 725-732.
XU C F, LIU H X, QIAN G B, et al. Microcosmic mechanisms of water-oil displacement in conglomerate reservoirs in Karamay Oilfield, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(6): 725-732.

[2] 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 X L, WANG R J, LU X G, et al. Experimental study on the reservoir adaptability of polymer molecular weight[J]. Oilfield Chemistry, 2014, 31(2): 269-273.

[3] 刘刚,侯吉瑞,邱首鹏,等. 聚合物分子尺寸与砾岩油藏孔喉匹配关系[J]. 断块油气田, 2014, 21(6): 771-774.
LIU G, HOU J R, QIU S P, et al. Matching relationship between polymer molecular size and pore throat of conglomerate reservoir[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2014, 21(6): 771-774.

[4] TAN F, LI H, XU C, et al. Quantitative evaluation methods for water-flooded layers of conglomerate reservoir based on well logging data[J]. Petroleum Science, 2010, 7(4): 485-493.

[5] 胡复唐,李联伍,刘顺生,等. 砾岩油藏开发模式[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 15-54.
HU F T, LI L W, LIU S S, et al. Development model of glutenite reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 15-54.

[6] 刘卫东,佟占祥,徐国勇,等. 聚合物与砾岩油藏孔隙结构匹配关系研究[J]. 油田化学, 2008, 25(3): 241-244.
LIU W D, TONG Z X, XU G Y, et al. A study on conformity of polymers to pore size in conglomerate oil reservoirs[J]. Oilfield Chemistry, 2008, 25(3): 241-244.

[7] 胡小冬,吕建荣,程宏杰,等. 砾岩油藏微观结构对聚驱后剩余油影响研究[J]. 新疆石油天然气, 2014, 10(3): 52-56.
HU X D, LU J R, CHENG H J, et al. Analysis on changeable rules of remaining oil in conglomerate reservoir after polymer flooding[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2014, 10(3): 52-56.

[8] 冯慧洁,聂小斌,徐国勇,等. 砾岩油藏聚合物驱微观机理研究[J]. 油田化学, 2007, 24(3): 232-237.
FENG H J, NIE X B, XU G Y, et al. Microscopic mechanisms of oil displacement by polymer solution for conglomerate reservoir[J]. Oilfield Chemistry, 2007, 24(3): 232-237.

[9] 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.
TAN F Q, XU C F, WANG X G, et al. Differences in micro-seepage mechanism between water flooding and polymer flooding in conglomerate reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(11): 1414-1427.

[10] CLARKE R H. Reservoir properties of conglomerates and conglomeratic sandstones[J]. AAPG Bulletin, 1979, 63(5): 799-803.

[11] 刘敬奎. 克拉玛依油田砾岩储集层的研究[J]. 石油学报, 1986, 7(1): 42-50.
LIU J K. A study on the thick conglomeratic reservoirs in the Karamay oil field[J]. Acta Petrolei Sinica, 1986, 7(1): 42-50.

[12] 刘敬奎. 砾岩储层结构模式及储层评价探讨[J]. 石油勘探与开发, 1983, 10(2): 49-56.
LIU J K. An investigation on structure model of conglomeratic reservoir and its evaluation[J]. Petroleum Exploration and Development, 1983, 10(2): 49-56.

[13] 高永利,何秋轩,闫庆来. 砾岩油藏复合体系驱油机理研究: 以克拉玛依砾岩油藏为例[J]. 石油勘探与开发, 1998, 15(2): 65-67.
GAO Y L, HE Q X, YAN Q L. The displacing mechanism of the compound system in conglomerate oil reservoir—an example of karamay conglomerate oil reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 1998, 15(2): 65-67.

[14] 胡复唐. 克拉玛依油田砾岩储层水驱渗流的基本特征[J]. 新疆石油地质, 1995, 16(1): 43-47.
HU F T. Fundamental characteristics of percolation in waterdrive conglomerate reservoir, Karamay Oilfield[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1995, 16(1): 43-47.

[15] 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.
LUO M G, ZHANG T H. Micropore structure and classification of conglomerate reservoir formation in Karamay Oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 1992, 13(2): 201-210.

[16] 罗明高. 碎屑岩储层结构模式的定量模型[J]. 石油学报, 1991, 12(4): 31-38.
LUO M G. Quantitative models for pore structures of clastic sedimentary rocks[J]. Acta Petrolei Sinica, 1991, 12(4): 31-38.

[17] LANIGAN D, MCLEAN P A, CURRAN B, et al. Comparison of low-field NMR and mercury intrusion porosimetry in characterizing pore size distributions of coals[J]. Fuel, 2012, 95(1): 152-158.

(编辑 尹淑容)