

引用格式:于萌,铁磊磊,李翔,等.驱油用聚合物在渤海油田中高渗储层的适应性实验研究[J].油气藏评价与开发,2020,10(6):40-45.

YU M, TIE L L, LI X, et al. Experiments on adaptability of polymer flooding for medium-high permeability reservoir in Bohai Oilfield[J].

Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(6):40-45.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2020.06.006

驱油用聚合物在渤海油田中高渗储层的适应性实验研究

于萌,铁磊磊,李翔,张博,刘文辉,常振

(中海油田服务股份有限公司油田生产事业部,天津 300459)

摘要:针对渤海油田中高渗储层(渗透率为 $(200 \sim 1\,000) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$),在模拟油藏条件下,对3种聚驱用聚合物(线性聚合物、疏水缔合聚合物、聚表剂),开展了流变性、热稳定性、黏弹性和运移性研究。流变性测试结果显示,在低剪切速率下(模拟油藏深部, $5.88 \sim 14.42 \text{ s}^{-1}$),疏水缔合聚合物和聚表剂黏度较大;在高剪切速率下(模拟近井地带, $149.9 \sim 223.4 \text{ s}^{-1}$),3种聚合物的黏度均较低。振荡频率测试结果表明,疏水缔合聚合物和聚表剂弹性较大,储能模量高于损耗模量。传导性实验结果显示,线性聚合物和聚表剂在多孔介质中的传导性较好,疏水缔合聚合物的传导性较差。透射电镜和激光粒度仪表征结果表明,疏水缔合聚合物的聚集体尺寸较大($1.22 \mu\text{m}$),线性聚合物($0.28 \mu\text{m}$)和聚表剂($0.52 \mu\text{m}$)与油藏孔喉($4 \mu\text{m}$)的配伍性优于疏水缔合聚合物。研究结果表明:对于目标储层,聚表剂与储层的适应性更好,其次为线性聚合物,疏水缔合聚合物与该储层的适应性较差。海上储层聚驱用聚合物的筛选,需要将聚合物的流变性能与油藏适应性及分子微观结构结合考虑,建立一种多尺度的聚合物筛选评价方法。该研究对海上油田聚驱用聚合物的筛选具有一定的参考意义。

关键词:聚合物驱;线性聚合物;聚表剂;疏水缔合聚合物;流变性能;运移性;封堵性能

中图分类号:TE357

文献标识码:A

Experiments on adaptability of polymer flooding for medium-high permeability reservoir in Bohai Oilfield

YU Meng, TIE Leilei, LI Xiang, ZHANG Bo, LIU Wenhui, CHANG Zhen

(Production Optimization Division, China Oilfield Services Limited, Tianjin 300459, China)

Abstract: In order to explore the medium-high permeability reservoir with the permeability of $(200 \sim 1\,000) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, the rheological behavior, thermal stability, viscoelasticity, and propagation performance of three kinds of polymer (linear polymer, hydrophobic association of partially hydrolyzed polyacrylamide (HAHPAM), and active polymer) acting as the chemical flooding agents in Bohai Bay, are studied under the simulated reservoir condition. Results of rheological behavior indicate that HAHPAM and active polymer solutions exhibit shear thickening at low shearing rate (simulation of deep reservoir, $5.88 \sim 14.42 \text{ s}^{-1}$), and all three polymers show shear thinning at high shear rates (simulation of immediate vicinity of wellbore, $149.9 \sim 223.4 \text{ s}^{-1}$). The oscillation frequency measurements show that HAHPAM and active polymer have larger elasticity, and their storage modulus are greater than their loss modulus. Results of sand-pack flow experiments show that linear polymer and active polymer can propagate better in porous media to achieve in-depth conformance control, whereas HAHPAM shows poor propagation behavior. The results of TEM and LPSA indicate that HAHPAM shows larger aggregation sizes ($1.22 \mu\text{m}$), and the compatibility of linear polymer ($0.28 \mu\text{m}$) and active polymer ($0.52 \mu\text{m}$) with pore throats ($4 \mu\text{m}$) of reservoirs is better than that of HAHPAM. The results show that for the target reservoir, the polymer has better adaptability to the reservoir, followed by the linear polymer, while the hydrophobic association polymer has poor adaptability to the reservoir. The selection of polymer for polymer flooding in offshore reservoirs needs to consider the rheological properties of polymer, reservoir adaptability, and molecular microstructures so as to establish a multi-scale evaluation method for polymer screening. This study has a certain significance for screening polymer for polymer flooding in offshore oilfields.

Key words: polymer flooding, linear polymer, active polymer, HAHPAM, rheological properties, propagation properties, plugging effect

收稿日期:2019-05-05。

第一作者简介:于萌(1989—),女,硕士,工程师,从事提高采收率用化学材料的研发及性能研究工作。地址:天津市滨海新区塘沽海洋高新技术开发区海川路1581号,邮政编码:300459。E-mail:ymshida@126.com

基金项目:2019年中海油资助科研项目“智能控释型调一堵一驱复合EOR体系研发”(YSB19YF022)。

聚合物驱作为一种有效经济的稳油控水措施,在渤海油田应用后,取得较好的效果。目前聚驱应用区块渗透率较高(大于 $2\,000\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$)。渤海Q油田平均渗透率为 $600\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,由于中低渗储层注采强度大,至今还未开展实施化学驱,因此,对此类油田开展聚驱用聚合物的筛选研究具有重要意义。谢坤等^[1-10]研究表明,聚合物的黏度受质量浓度、矿化度、剪切速率、自身黏弹性影响较大,需要开展黏浓关系、抗盐、耐剪切和流变性评价实验。鉴于海上油田井距较大,且聚驱作业周期较长,对聚合物溶液的长期黏度保留率提出更高要求,因此开展模拟实际油田温度下的热稳定性测试,具有重要意义。张云宝等^[11-18]研究表明,随着长期注水冲刷,近井地带的剩余油饱和度较低,剩余油富集区已向油层深部转移。杨斌等^[19-20]研究显示,聚合物的黏度是影响流量控制和驱油效果的主要指标,但高分子聚合物从地面泵送到井筒、射孔段以及进入地层后会受到强剪切作用,导致其在地层深部的黏度下降明显。采用注入高黏聚合物的方法,会导致注入压力过高、注入性变差的问题,亟须解决如何保证“良好的注入性”和“地层深部高的黏度保留”平衡的问题。由于聚合物溶液工作环境是油藏岩石孔隙,其空间尺寸远小于室内配制聚合物溶液的容器,因此,有必要开展抗盐聚合物在油藏条件下的传导运移性实验。此外,为了从机理上分析不同类型聚合物在有效波及区内的黏度保留性能,开展了聚合物聚集体尺寸和透射电镜实验。

在中孔、中渗储层聚驱用聚合物筛选时,建立了一种多尺度的聚驱用聚合物与储层适应性评价的新方法,即提出需以聚合物溶液运移到地层深部的黏度保留率为主要判定因素,而不应过度关注其静态实验得到的黏度数值。综合考虑聚合物溶液的黏度、黏弹性等流变学参数及分子聚集体尺寸,在多孔介质中的运移能力和封堵效果等微观尺度指标的基础上,评价聚合物与储层的适应性。该研究为渤海Q油田聚驱用聚合物的筛选提供了有利的技术支持。

1 实验条件

1.1 化学试剂

抗盐聚合物:疏水缔合聚合物,有效含量为90%,相对分子质量为 $1\,100\times 10^4$,成都SY化工有限公司生产;聚表剂,有效含量为88%,相对分子质量 700×10^4 ,深圳JL石油开发有限公司生产;线性聚合物,有效含

量为90%,速溶型聚合物,具有线性结构,相对分子质量 $1\,800\times 10^4$,东营市SJ化工有限责任公司生产。

实验用水为渤海Q油田模拟注入水,模拟水组成见表1。

表1 渤海Q油田模拟注入水组成

Table 1 Composition of simulated injection water in Bohai Oilfield-Q

水型	阳离子			阴离子			总矿化度	
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻		SO ₄ ²⁻
模拟水	568.9	228.9	2 551.9	0	190.6	5 470.7	36.6	9 047.6

1.2 填砂模型

传导实验使用带多测压管的填砂管模型^[8-9],通过各测压点的压力响应考察3种聚合物在储层中的传导性能。填砂管的尺寸为 $\phi 2.5\text{ cm}\times 50\text{ cm}$,填砂目数为200目。填砂模型孔隙度24.5%,水测平均渗透率 $652\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。从入口端到出口端,均匀分布3个不同的测压点,分别在3个测压点处接入压力传感器,记录测压点压力值变化。

1.3 实验方法

聚合物性能评价:根据目标油藏模拟水配制成不同类型聚合物溶液,在实验温度为65℃的条件下,围绕聚合物本身及其在地层中的剪切、老化和流变性开展增黏性能和流变性能评价,分析得到聚合物的静态性能。

聚合物运移效果评价:先将石英砂装入50 cm填砂管并压实,然后将填砂管抽至真空,饱和模拟地层水,计算孔隙度;连接砂管驱替实验装置,并检测流程密封性,测定水测渗透率;将设备加热至65℃,以1 mL/min流速注入1PV的聚合物溶液,记录填砂管上不同测压点的压力读数,对比实验得出的压力数值,进行体系运移性能评价。

2 结果分析

2.1 黏浓关系

利用模拟水配制聚合物溶液,用RS-6000旋转流变仪,在温度65℃、剪切速率 7.34 s^{-1} 的条件下,测试聚合物黏度随浓度的变化曲线(图1)。可看出,当浓度超过800 mg/L,聚合物的黏度随浓度上升的趋势更为明显。在800 mg/L以下,范德华力和氢键不足以使聚合物溶液形成三维网络结构。在浓度低于800 mg/L时,疏水缔合聚合物和聚表剂的黏度随浓

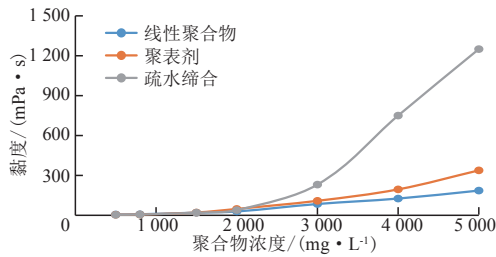


图1 三种聚合物溶液黏浓关系曲线

Fig. 1 Changes of viscosity with concentration of three kinds of polymer solution

度的上升趋势要低于线性聚合物的黏度上升趋势,因此,800 mg/L是疏水缔合聚合物和聚表剂的临界缔合浓度。高于临界缔合浓度后,疏水缔合聚合物和聚表剂分子间通过链间的相互作用,形成超分子结构,显著提高聚合物溶液的黏度。

2.2 热稳定性评价

用模拟水配制质量分数为0.2%的3种聚合物溶液,转移至老化瓶中,采用通氮气除氧的方式(溶解氧含量约15 $\mu\text{g/L}$),然后密封放在65 $^{\circ}\text{C}$ 恒温箱中恒温老化,老化7 d,间隔一定时间取出老化瓶,在7.34 s^{-1} 的剪切速率下测量老化的聚合物溶液黏度随时间的变化(图2)。

0.2%的线性聚合物老化7 d后,黏度从最初的29 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 降至15.6 $\text{mPa}\cdot\text{s}$,黏度下降率为46.21%。疏水缔合聚合物和聚表剂老化3 d后,黏度上升显著,分别从初始的39 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 和48 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 上升到188 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 和87 $\text{mPa}\cdot\text{s}$,黏度分别上升了382%和81%。65 $^{\circ}\text{C}$ 老化7 d后,疏水缔合聚合物和聚表剂的黏度下降不明显。随着老化时间的增长,线性聚合物溶液的水解度从初期的28%增加到32.5%,聚表剂溶液的水解度从27.1%上升至31.6%,疏水缔合聚合物水解度从25.3%上升至28.4%。说明相较于线性聚合物,聚表剂和疏水缔合聚合物具有更好的保黏能力。这主要是由于两种聚合物分子间的疏水缔合、氢键、范德华力等综合作用在一定程度上抑制了酰

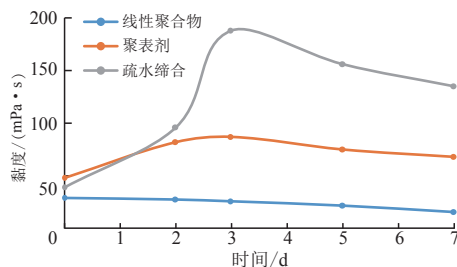


图2 三种聚合物热稳定性评价结果

Fig. 2 Thermal stability evaluation results of three kinds of polymer

胺基在油藏环境下的水解反应。

2.3 稳态流变性测试

对于海上油田使用的聚驱工艺,近井地带的流速及剪切作用最高,随着向地层深部推进,流速及剪切作用迅速降低。聚合物溶液从近井地带向地层深部运移过程中,剪切速率的变化情况可通过公式(1)计算得到:

$$\dot{\gamma} = \alpha 4v/r \quad (1)$$

式中: $\dot{\gamma}$ 代表剪切速率, s^{-1} ;对于不规则颗粒 α 取值2.5; v 为注入速度单位, m/s ; r 为孔喉半径,通过毛管束模型计算得到。

Q油田目前驱替相的推进速度约为0.2~0.5 m/d ,根据式(1)算得剪切速率为5.88~14.42 s^{-1} 。近井地带注入速度约为5.1~7.6 m/d ,计算得到的剪切速率约为149.9~223.4 s^{-1} 。本次研究中,首次将稳态流变测试与地层径向流相结合。高剪切速率下的测试模拟了近井地带或注入端受到的剪切作用,低剪切速率下的测试模拟了地层深部的剪切作用。使用模拟水分别配制浓度为2000 mg/L 的3种聚合物溶液,用RS-6000旋转流变仪,在0.1~1000 s^{-1} 的剪切速率下,测试3种聚合物溶液的黏度随剪切速率的变化(图3)。

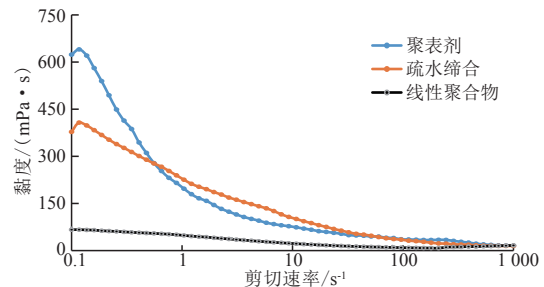


图3 三种聚合物溶液的变剪切测试

Fig. 3 Rheological curves of three polymer solutions

从图3可以看出,3种聚合物溶液均表现出剪切变稀的性质。使用Carreau模型拟合3种聚合物的流变特性曲线,Carreau模型见式(2),拟合结果见表2。

$$\eta = \eta_0 \left(1 + (\lambda \dot{\gamma})^2 \right)^{\frac{n-1}{2}} \quad (2)$$

式中: η 为表观黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; $\dot{\gamma}$ 为切应变; η_0 为零剪切黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; n 为流动指数, $0 < n < 1$ 。

表2 3种聚合物的Carreau模型拟合结果

Table 2 Fitting result based on Carreau models of three kinds of polymer

聚合物类型	η_0	λ	n	R^2
聚合物A	66.436 4	-2.928 9	0.698 7	0.973 6
聚合物B	910.052 4	-14.995 7	0.477 1	0.991 3
聚合物C	407.544 3	4.495 9	0.626 4	0.995 9

从表2可以看出,3种聚合物使用Carreau模型的拟合结果均较好,其中,聚表剂和疏水缔合聚合物的 n 值偏小,说明其剪切变稀性更强。从图3可以看出,当向油层中注入聚合物时,在近井地带受到高剪切作用,3种聚合物溶液均表现出剪切变稀的特性。考虑到渤海油田的注入流体在油藏深部的推进速度约为0.2~0.5 m/d,剪切速率范围约为5.88~14.42 s⁻¹。疏水缔合聚合物在该剪切范围内黏度最高,其次为聚表剂,线性聚合物在该范围内黏度最低。因此,流变测试的结果表明,疏水缔合聚合物在地层深部对应的剪切速率下,黏度最大,其次为聚表剂,线性聚合物的黏度最低。

2.4 振荡扫描测试

2.4.1 振荡应力扫描

为保证待测样品在线性黏弹区域,对3种聚合物溶液进行振荡应力扫描,扫描范围为0.01~10 Pa,振荡频率设为1 Hz,结果见图4。

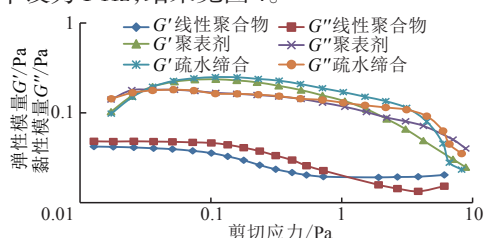


图4 3种聚合物溶液的振荡应力扫描

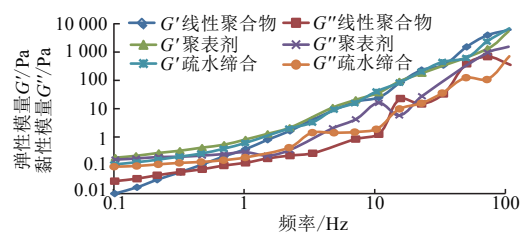
Fig. 4 Oscillation stress test of three kinds of polymer solution

可以看出,线性黏弹区的范围在0.01~0.1 Pa。对于聚表剂和疏水缔合聚合物,应力低于临界剪切应力时, G' 高于 G'' ,说明弹性属性高于黏性属性;对于线性聚合物溶液, G'' 远高于 G' ,表现出更强的黏性属性;当剪切应力高于临界剪切应力时, G' 和 G'' 的数值均降低。由于疏水缔合聚合物和聚表剂分子间存在较强的缔合作用,当剪切应力高于临界剪切应力时,这两种聚合物分子的延展性更弱,对剪切应力的变化更敏感,因此线性黏弹区范围比线性聚合物宽。

2.4.2 振荡频率扫描

图5为3种聚合物溶液的振荡频率扫描结果,浓度为2 000 mg/L。对于疏水缔合聚合物和聚表剂溶液,从高频到低频范围内扫描,两者的弹性模量 G' 均高于黏性模量 G'' ,表现为显著的弹性响应。弹性模量 G' 随频率的增加而增大, G'' 受频率影响较小。

对于疏水缔合聚合物溶液和聚表剂溶液,在整个振荡频率扫描的过程中,弹性模量 G' 和黏性模量



注:注入水矿化度9 000 mg/L,[Ca²⁺]+[Mg²⁺]=900 mg/L,T=65 °C,质量分数=0.2%

图5 3种聚合物溶液的振荡频率扫描

Fig. 5 Oscillating frequency sweep of three kinds of polymer solution

G'' 不存在交点,而线性聚合物在该频率范围内存在交点。这表明相较于线性聚合物,疏水缔合聚合物和聚表剂在质量分数为0.2%,聚合物溶液分子链条变形性较弱,表现出较强的弹性属性。振荡测试的结果表明,疏水缔合聚合物和聚表剂具有更强的弹性,更有利于发挥弹性驱油的作用,其次为线性聚合物。

从图5可以看出,聚表剂和疏水缔合聚合物的黏弹模量随频率的波动幅度比线性聚合物明显。主要是因为聚表剂和疏水缔合聚合物溶液,除了聚合物链段间的穿透和缠结对网络结构的形成起作用,聚合物链上的疏水部分还可以通过疏水力发生缔合而使聚合物聚集在一起。

为了更好地分析3种聚合物溶液的内部结构,对质量分数为0.2%的海水速溶聚合物溶液、疏水缔合聚合物溶液和聚表剂溶液拍摄了TEM照片。将制备好的3种聚合物试样置于透射电子显微镜的样品托架上,用TEM观察样品的结构。从图6中可以清晰地看出,这3种聚合物溶液呈现出不同的分子结构。线性聚合物呈长链结构,由于静电排斥使链更为伸展。对于疏水缔合聚合物,聚合物分子链相互缠绕,形成无规网络结构。对于聚表剂溶液,整个分子呈现片—网状结构,网络结构存在粗主干和细分支,这是由于聚表剂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。

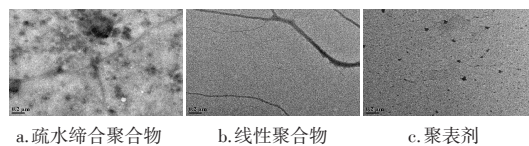


图6 3种聚合物溶液的TEM

Fig. 6 TEM of three kinds of polymer solution

2.5 传导性实验

在模拟渤海Q油藏环境下,3种聚合物溶液的填砂管实验结果见图7。3种聚合物溶液注入过程中的

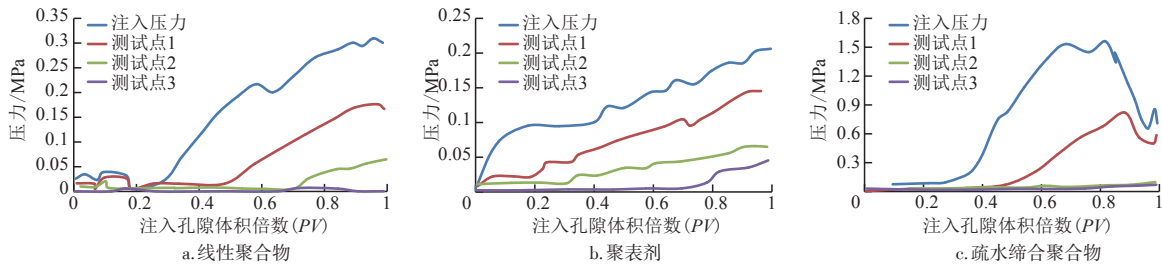


图7 3种聚合物溶液的动态传导实验

Fig. 7 Propagation performance of three kinds of polymer solution

压力响应表明,疏水缔合聚合物溶液的升压过程较快。从3种聚合物溶液传导过程中的压力响应可以看出,线性聚合物溶液在传导过程中,3个测压点均有压力响应,表明其可以传导至填砂管深部。

此外,传导性实验表明聚表剂溶液的传导性最好。根据前期研究结果,聚表剂分子聚集体的评价尺寸在500~600 nm,在目的油层中,可以较好地传导至油层深部。对于疏水缔合溶液,具有较强弹性的聚合物溶液较难运移至地层深部,大量溶液聚集在注入端附近及管线中,进而引起注入压力的持续升高。因此,疏水缔合聚合物溶液注入后,填砂管的前、中、后3个测压点压力响应不明显。其传导性差的原因可能是由于分子间疏水基团的缔合作用,形成了具有区域性网络结构的聚合物分子聚集体,表现出宏观尺度上较高的黏性和弹性特征。在传统观点中,高弹性有利于驱油过程。但是,聚合物溶液真实的工作环境是多孔介质,其孔喉尺寸远小于室内评价的容器尺寸。因此,具有较大分子聚集体尺寸的疏水缔合聚合物对中渗储层可能存在适应性问题。

在多孔介质条件下,聚合物分子链相互缠绕,在溶液中形成较强的三维网络结构。由于疏水缔合聚合物溶液的分子质量高于聚表剂,分子量越大,聚合物分子链越长,导致分子回旋半径增大,因此,填砂管或油藏条件下的传导性较差。

为了进一步证实以上观点,使用动态光散射激光粒度仪测试了3种溶液的分子回旋半径(r_p)。测试结果见表3,渤海Q油田的孔喉尺寸(r_h)用式(1)计算。

表3 聚合物分子尺寸和在填砂管中的传导性能
Table 3 Polymer molecular sizes and conductivity in sand-packs

聚合物类型	分子回旋半径 (r_p)/ μm	孔喉尺寸 (r_h)/ μm	r_p/r_h	传导结果
线性聚合物	0.28	4.00	14.29	良好
聚表剂	0.52	4.00	7.69	良好
疏水缔合聚合物	1.22	4.00	3.28	差

线性聚合物和聚表剂的 r_p/r_h 高于疏水缔合聚合物。

在油层微观尺度条件下,聚合物的流动性受到很多因素的影响。除去分子构型、分子黏弹性,聚合物分子与孔喉的配伍性及其运移到深部后体系的保黏能力,均对聚合物体系在多孔介质中的传导性能起到至关重要的作用。

综合流变性、在地层深部的传导性及分子构型多种因素,对于该目标储层,聚表剂与目标储层具有更好的适应性,其次为线性聚合物,疏水缔合聚合物与该储层的适应性最差。结合流变测试和传导性的结果可以看出,聚合物具有高的黏弹性并不能保证其在多孔介质中表现出优良的传导性。而模拟储层孔喉条件下的传导性实验结果,更能真实地表现出聚合物在地层中的注入、运移及驱替效果。因此,对于渗透率不是特别高的储层(中高渗储层),聚合物在地层中的运移及传导效果,受聚合物聚集体尺寸与多孔介质的匹配性影响显著。对于此类储层,在做聚驱用聚合物的筛选时,除了综合考察聚合物筛选的各个因素外,应主要评价聚合物与储层孔喉的配伍性及其在模拟地层条件下的运移能力。

3 结论和认识

1) 基于流变测试结果,聚表剂和疏水缔合聚合物,弹性属性高于黏性属性。线性聚合物溶液表现出更强的黏性属性。

2) 聚合物的流变性及聚合物聚集体尺寸和孔喉尺寸的配伍性对其在多孔介质中的传导性影响较大:聚表剂表现出更强的剪切变稀能力,有利于其在高剪切速率下,具有更优的注入性和传导性;疏水缔合聚合物的分子回旋半径较大,在油藏条件下的传导性较差。对于该目标储层,聚表剂与目标储层具有更好的适应性,其次是线性聚合物,疏水缔合聚合物的适应性最差。

3) 在聚驱用聚合物的筛选时,不能一味选择高

黏弹性的聚合物,应综合考虑聚集体尺寸与孔喉的配伍性,以聚合物与储层孔喉的配伍性及其在模拟地层条件下的运移能力为主要评价参数。按照该筛选方法,对于目标储层,聚表剂具有更好的适应性,其次为线性聚合物,疏水缔合聚合物适应性最差。只有在“注得进,走得远”的前提下,聚合物的弹性才能对其传导及提高采收率起到积极作用。

参考文献

- [1] 谢坤,卢祥国,姜维东,等.抗盐聚合物储层适应性及其作用机制[J].中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(3):145-147.
XIE K, LU X G, JIANG W D, et al. Reservoir adaptability of salt-resistant polymer and its mechanism[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017, 41(3): 145-147.
- [2] 李宗阳,王业飞,曹绪龙,等.新型耐温抗盐聚合物驱油体系设计评价及应用[J].油气地质与采收率,2019,26(2):106-112.
LI Z Y, WANG Y F, CAO X L, et al. Design evaluation and application of a novel temperature-resistant and salt-tolerant polymer flooding system[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(2): 106-112.
- [3] 高梦天,杜学斌,叶茂松,等.渤海湾盆地石臼坨凸起东缘混积岩储层特征及物性主控因素[J].油气地质与采收率,2017,24(3):50-56.
GAO M T, DU X B, YE M S, et al. Characteristics of the mixed sedimentite reservoir and its controlling factors for petrophysical properties in the eastern margin of Shijituo uplift, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(3): 50-56.
- [4] 邓景夫,吴晓慧,王刚,等.缓中油田各项措施增油效果劈分方法[J].油气地质与采收率,2017,24(2):107-110.
DENG J F, WU X H, WANG G, et al. Splitting method of incremental oil effect by composite measures in Suizhong oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(2): 107-110.
- [5] 黄新春,梁凤儒,马绪鹏,等.海上油田井下增压泵注聚合物可行性试验研究[J].石油机械,2017,45(2):50-53.
HUANG X C, LIANG F R, MA X P, et al. Feasibility test of polymer injection by reversed ESP for offshore oilfield[J]. China Petroleum Machinery, 2017, 45(2): 50-53.
- [6] 钟锴,朱伟林,薛永安,等.渤海海域盆地石油地质条件与大中型油气田分布特征[J].石油与天然气地质,2019,40(1):92-100.
ZHONG K, ZHU W L, XUE Y A, et al. Petroleum geologic conditions and distributional features of large- and medium-sized oil and gas fields in Bohai Sea Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(1): 92-100.
- [7] 王美楠,张宏友,王少鹏,等.聚驱稠油数字岩心模型建立及驱替规律分析[J].石油机械,2019,47(8):87-93.
WANG M N, ZHANG H Y, WANG S P, et al. Establishment of digital core modeling and displacement analysis for polymer flooding in heavy oil reservoir[J]. China Petroleum Machinery, 2019, 47(8): 87-93.
- [8] 王斐斐,王子振,舒腾飞.聚合物分散溶解系统数值模拟研究[J].石油机械,2018,46(10):65-71.
WANG F F, WANG Z Z, SHU T F. Numerical simulation study on polymer dispersion and dissolution system[J]. China Petroleum Machinery, 2018, 46(10): 65-71.
- [9] 王刚,刘斌,王欣然,等.海上油田水聚干扰影响因素分析及矿场试验研究[J].石油地质与工程,2020,34(1):91-95.
WANG G, LIU B, WANG X R, et al. Influencing factors analysis and field test of water and polymer interference in offshore oilfields[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2020, 34(1): 91-95.
- [10] GHOURRASSI-BARR S, ALIOUCHE D. A rheological study of Xanthan polymer for enhanced oil recovery[J]. Journal of Macromolecular Science (Part B), 2016, 55(8): 204-206.
- [11] 张云宝,卢祥国,王婷婷,等.渤海油藏优势通道多级封堵与调驱技术[J].油气地质与采收率,2018,25(3):82-88.
ZHANG Y B, LU X G, WANG T T, et al. Study on technology of multi-stage plugging and profile control for advantage channels in Bohai Oilfield[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(3): 82-88.
- [12] 王晓超,王锦林,魏俊,等.渤海B油田水驱储层孔喉尺寸变化分析及应用[J].海洋石油,2018,38(3):31-35.
WANG X C, WANG J L, WEI J, et al. Analysis and application of reservoir pore throat size change after water flooding in B Oilfield of Bohai[J]. Offshore Oil, 2018, 38(3): 31-35.
- [13] 陈文林.聚驱后强水洗油层微观剩余油量分布及挖潜研究[J].海洋石油,2017,37(4):47-52.
CHEN W L. Study of distribution and potentiality exploiting of microscopic residual oil in strong water-washing layer after polymer flooding[J]. Offshore Oil, 2017, 37(4): 47-52.
- [14] 陈晶,湛祥惠.化学驱微观剩余油启动顺序及驱油效果实验研究[J].海洋石油,2018,38(2):46-53.
CHEN J, ZHAN X H. Experimental study on the startup sequence and oil displacement efficiency of micro remaining oil by chemical flooding[J]. Offshore Oil, 2018, 38(2): 46-53.
- [15] 李石权,范莉红,邓彩云,等.特高含水油藏开发后期剩余油精准挖潜技术[J].非常规油气,2019,6(1):62-68.
LI S Q, FAN L H, DENG C Y, et al. Precise drilling technology for residual oil in the later stage of development of extra-high water-cut reservoir[J]. Unconventional Oil & Gas, 2019, 6(1): 62-68.
- [16] 王成俊,洪玲,高瑞民,等.低渗透油藏提高采收率技术现状与挑战[J].非常规油气,2018,5(3):102-108.
WANG C J, HONG L, GAO R M, et al. Status-quo and challenges of enhanced oil recovery in low permeability reservoirs[J]. Unconventional Oil & Gas, 2018, 5(3): 102-108.
- [17] 吕洲,王玉普,李莉,等.油气储层岩心实验的样本量设计[J].石油实验地质,2018,40(4):589-594.
LYU Z, WANG Y P, LI L, et al. Sample size design for oil and gas reservoir core-plug experiments[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(4): 589-594.
- [18] 杨彬,高建崇,吴彬彬,等.渤海Q油田三种不同驱油体系传输运移能力对比研究[J].石油地质与工程,2019,33(5):84-87.
YANG B, GAO J C, WU B B, et al. Comparative study on transmission and migration capacity of three different oil displacement systems in Bohai Q oilfield[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2019, 33(5): 84-87.
- [19] 王业飞,曲正天,张菁,等.高渗区分布形态对砾岩油藏聚合物驱窜流的影响[J].油气地质与采收率,2019,26(6):92-99.
WANG Y F, QU Z T, ZHANG J, et al. Influence of distribution patterns of high-permeability zones on polymer crossflow in conglomerate oil reservoirs[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(6): 92-99.
- [20] 王欣然,周凤军,刘斌,等.海上注聚油田聚合物强化泡沫驱实验研究与应用[J].石油地质与工程,2019,33(1):92-96.
WANG X R, ZHOU F J, LIU B, et al. Experimental study and application of polymer enhanced foam flooding in offshore polymer injecting oilfield[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2019, 33(1): 92-96.

(编辑 徐佩)