

# 国内外驱油聚合物研究进展

刘磊<sup>1</sup>, 李沼萱<sup>2</sup>, 胡洋<sup>3</sup>, 贾志伟<sup>4</sup>, 潘一<sup>2\*</sup>

- (1. 中国石油天然气集团公司勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 辽宁石油化工大学, 辽宁 抚顺 113001;  
3. 中国石油渤海钻探工程有限公司第二录井分公司, 河北 任丘 062550;  
4. 中国石油冀东油田陆上油田作业区作业四区, 河北 唐山 063000)

**摘要:**综述了近年来国内外聚合物驱的研究现状,对聚合物驱的机理及应用做了简单阐述,并着重介绍了几种常见的驱油聚合物近几年的研究进展,主要包括交联聚合物、生物聚合物(黄原胶)、疏水缔合聚合物、梳性聚合物和星形聚合物等。通过这些驱油聚合物性能的评价和对比,对驱油聚合物今后的研究方向提出了建议。

**关键词:**聚合物驱;疏水缔合聚合物;梳性聚合物;生物聚合物;交联聚合物

**中图分类号:**TE357.46

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-4320(2014)12-0037-04

## Development of polymer flooding treatment

LIU Lei<sup>1</sup>, LI Zao-xuan<sup>2</sup>, HU Yang<sup>3</sup>, JIA Zhi-wei<sup>4</sup>, PAN Yi<sup>2\*</sup>

(1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China;

2. Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China;

3. Chinese Bohai Petroleum Drilling Engineering Company Limited second Logging Company, Renqiu 062550, China;

4. Chinese Jidong Oilfield Operations on Land oil Field Operation Area Four District, Tangshan 063000, China)

**Abstract:** The current research situation of polymer flooding is summarized. The mechanism of polymer flooding is also introduced. Several kinds of polymers used in flooding frequently are listed, such as crosslinked polymers, biopolymers (xanthan gum), hydrophobic associating polymer, comb polymer and star polymer. In addition, some suggestions about the research direction of the polymer flooding technology are proposed as well.

**Key words:** polymer flooding; hydrophobic associating polymer; comb polymer; biopolymers; crosslinked polymers

三次采油技术是提高石油采收率中最有效的一种手段。三次采油是用化学、物理、生物、热量等方法来改变油藏的岩石性质,提高驱油的波及效率和体积,来提高采收率。三次采油的技术主要有气驱、化学驱、热力驱和微生物驱,其中化学驱主要包括表面活性剂驱、碱驱、聚合物驱和复合驱。化学驱是指在注入水中添加各种化学剂,以改善水的驱油及波及性能,从而提高原油采收率的采油方法。在提高石油采收率技术上,化学驱明显是一种实用且有着很好效果的一项技术<sup>[1]</sup>。经过诸多学者的近20年研究与实践,中国化学驱的技术与规模等方面已排在世界前列。中国现有的近30个矿场实际开发效果表明,聚合物驱能提高采收率10%,聚合物驱已成为一项提高采收率的关键技术<sup>[2]</sup>。本文中综述了聚合物驱的研究现状,重点阐述了了几种常见的驱油聚合物,包括生物聚合物(黄原胶)、交联聚合物、疏水缔合聚合物、梳型聚合物和星形聚合物,说明了这些驱油聚合物的驱油机理与应用特点,以期研究人员和油田生产实际提供一些参考,同时也对驱油聚合物的研究提出了一些建议。

## 1 聚合物驱的机理

聚合物驱是指在注入水中混入聚合物溶液,通过增加注入水的黏度,降低水相渗透率,改善水油流度比,调整注入剖面,扩大波及体积,提高原油采收率。聚合物被注入油层后主要产生2方面作用:一是可以增加注入水的黏度,二是因聚合物的滞留导致油层渗透率的下降。就是在这2方面共同作用下导致聚合物的水溶液在油层中流度的降低。配制的聚合物溶液的黏度越高,其波及面积越大,驱油效果也就越理想。从聚合物驱油机理可以看出,提高注入水黏度和降低注入水渗透率是聚合物驱油的核心技术。

## 2 聚合物驱的实际应用

从20世纪40年代到60年代属于聚合物驱油发展的前期。我国于20世纪60年代在聚合物驱油领域开始进行研究和试验。大庆油田是最早进行聚合物驱油试验的油田,在1996年得到了工业化推广。如今,大庆油田以聚合物驱的作用对象为基础,

收稿日期:2014-07-02;修回日期:2014-10-06

作者简介:刘磊(1987-),男,硕士生,助理工程师;潘一(1976-),男,博士,副教授,从事油气田开发研究,通信联系人,024-56865313,panyi\_hj@126.com。

以渗透率和厚度为分类指标,将其分为 3 类储层。如今在一、二类油藏中,该项技术使得采收率提高了 8% 左右,每年可增产 170 万 t<sup>[3]</sup>。国内自大庆油田在 1972 年开展聚合物驱油矿场试验以来,吉林、辽河、南阳、胜利、大港和新疆等油田都在工业和矿场等领域开展试验。经过国家“七五”、“八五”、“九五”期间诸多学者的共同努力研究下,我国在聚合物驱领域已有稳定的发展。我国现已成为世界上在油田领域上使用聚合物驱油技术最多,大面积增产效果最好的国家,聚合物驱油已经成为我国石油行业提高采收率的重要技术措施<sup>[4]</sup>。

学者们在聚合物领域进行的研究从未停止,丁保东<sup>[5]</sup>表示聚合物驱应用在胜利油田原油 500 ~ 1 000 mPa·s 黏度的油藏,有很好的增油效果。ASP 试验在大庆油田的现场工业试验已经使得采收率增加 18.5% ~ 26.5%<sup>[6]</sup>。曹新等<sup>[7]</sup>通过分析对注聚井堵塞原因,发明出由复合酸和聚合物降解剂组成的新型复合解堵剂,现已在渤海油田试验成功,并得以推广应用。笔者认为试验中的 J29-3w4-4 井进行解堵作业前注入压力无法达到配置要求较为可惜,需要进一步改进与加强。还有冀东油田高浅北区聚合物驱项目的研究,该项目旨在为冀东油田的稳产起到促进作用<sup>[8]</sup>。笔者认为该项目中近年的含水特高期的问题较为严重,应该格外重视,否则会影响整体效果。

### 3 驱油聚合物

#### 3.1 生物聚合物(黄原胶)

黄原胶又称黄胶、汉生胶、黄单胞多糖,是一种由假黄单胞菌属发酵产生的单胞多糖,是重要的工业化生物聚合物<sup>[9]</sup>。王世高<sup>[10]</sup>针对黄原胶在使用时耐温有限且用量高等问题,应用紫外吸收光谱对改性黄原胶中改性剂的含量进行了定量分析,改变黄原胶的分子结构,对其进行改性。该研究较为深入,克服黄原胶耐温性差等缺点,为诸多学者今后研究提供了很有意义的参考价值。Nasr 等<sup>[11]</sup>在改变温度、pH 和盐含量等某些特定条件下研究黄原胶的黏度。实验发现,温度和盐含量没有影响到黄原胶,这些黄原胶水溶液保持至少 80% 的原发性黏度,此外,获悉当温度升高到 120℃ 时用黄原胶提高采收率最为合适。该实验对 pH 方面研究不够深入,实验方案在温度和盐含量上较为全面。Hee 等<sup>[12]</sup>研究黄原胶对不同盐度采油的适应性,比较了黄原胶和水解聚丙烯酰胺(HPAM)黏度、剪切性等发展潜

力,流变试验结果表明,HPAM 较黄原胶溶液在高温与盐性更敏感,在高盐度情况下注射黄原胶比 HPAM 更有利于储层环境。该研究的影响因素较为单一,如果能同时考虑多个因素,例如 HPAM 和黄原胶分别在耐温性、耐磨性、热稳定性、pH 等方面的差距以及检验不同性质之间是否存在较为明显的影响,该实验会更加完善一些。

黄原胶作为应用最广泛的生物聚合物具有优良的增稠性、悬浮性、乳化性和水溶性,并具有良好的酸碱稳定性,但黄原胶在使用过程中存在用量较大、耐温性、耐磨性和抗剪切性较差的缺点。今后应该加强黄原胶在耐温性、耐磨性等方面的实验研究。

#### 3.2 非生物聚合物

##### 3.2.1 交联聚合物

交联是指在聚合物大分子链之间产生化学反应,从而形成化学键的过程。交联聚合物又称交联高分子,是一种三维网状结构的聚合物。聚合物交联后,其力学性能、热稳定性、耐磨性、耐溶剂性及抗蠕变性都有着不同程度的提高。如果交联反应发生在不同聚合物尤其是互不相容的聚合物之间,可大大提高 2 种聚合物的相容性,甚至使不相容组分变为相容组分。Lu 等<sup>[13]</sup>为提高采收率对交联聚合物在黏度低的驱油液中的效果进行研究。国内学者刘延峰<sup>[14]</sup>也对交联聚合物驱提高采收率机理进行调研。这 2 位学者在机理分析上的研究不够深入和彻底,有进一步提高的空间。Fu 等<sup>[15]</sup>针对河南油田在交联聚合物驱油过程中地层堵塞的问题,对地层堵塞(FP)和交联聚合物等方面进行分析。研究表明,在低渗透( $K=0.267 \mu\text{m}^2$ )的核心聚合物交联率(PCR) 200/50 和 300/50 可以被注入;在高渗透( $K=2.063 \mu\text{m}^2$ )下,交联聚合物体系 PCR 为 200/50、300/50、400/50 和 600/50 都可以被注入。在  $2.063 \mu\text{m}^2$  渗透岩心,当 PCR 高于 400/50,FP 的程度为中度严重。当 PCR 为 400/50,渗透率越低,堵塞越严重。Wang 等<sup>[16]</sup>通过对注水油层中插入交联聚合物与膨胀颗粒的联合物,对采收率进行研究。该实验效果明显,不仅对交联聚合物的各个参数处理得当,且表明交联聚合物的抗剪切性强。

交联聚合物的主要特性是具有良好的相溶性,聚合物的力学性能、热稳定性、耐磨性、耐溶剂性及抗蠕变性也都因为交联而显著提高。此外,注入液黏度、溶液在深部地层中的残余阻力系数和阻力系数也很好。交联聚合物在酸碱稳定性等方面较差,今后需加强在这方面的研究。

### 3.2.2 疏水缔合聚合物

疏水缔合水溶性聚合物是指在聚合物亲水性大分子链上引入疏水基团。由于疏水基团的引入,产生的疏水作用、静电、氢键或范德华力的作用,在分子间自动产生可逆的物理缔合,形成巨大的三维立体网状结构。疏水集团使得疏水缔合聚合物较一般水溶性聚合物表现出更好的剪切恢复性,不同的剪切方式所获得疏水缔合聚合物溶液的黏度不一定相同,溶液的黏弹性与非牛顿性存在一定差异<sup>[17]</sup>。近年来,不断有学者研制出具有耐温、耐盐、抗剪切的新型疏水缔合水溶性聚合物。徐辉<sup>[18]</sup>就对超高分子缔合聚合物通过安东帕流变仪和冷冻蚀刻扫描电镜等方式进行研究,证明它较常规聚合物具有更好的黏弹性与增黏性,具有良好的应用前景。Jiang等<sup>[19]</sup>把驱油效果、聚合物分子线团尺寸、渗流特性和聚合物溶液黏度等因素设为评价指标,进行了缔合程度对疏水缔合聚合物性能及其油藏适应性影响的研究。研究表明,调节剂 beta-环糊精可以对疏水缔合聚合物分子链上疏水基团间缔合作用发生抑制,疏水缔合聚合物缔合程度和分子聚集尺寸可通过改变调节剂质量分数发生改变,从而使得聚合物在多孔介质内渗流特性和传输运移能力改变;当调节剂质量分数增加时,疏水缔合聚合物驱采收率呈现先增加后减小趋势,研究发现,合适的缔合程度可以改善储层与疏水缔合聚合物间适应性,提高聚合物驱采收效果。该学者可以进一步建立一个数学模型,在研究结果的基础上计算驱油效果、聚合物分子线团尺寸、渗流特性和聚合物溶液黏度的关系,更加有效地讨论缔合程度对疏水缔合聚合物性能和油藏适应性的关系。杨化彪<sup>[20]</sup>在水解聚丙烯酰胺亲水主链上连接上少量的疏水单体变成疏水缔合聚丙烯酰胺,使它不仅具有良好的耐温与抗盐的性能,而且还具有一定的表面活性。该学者在聚合物的纯化和后处理等问题的处理上较为合理,但希望同时能对此类聚合物多做一些抗剪切性的研究。Li等<sup>[21]</sup>为改善聚合物驱油效果,以海上稠油油藏地质特征为背景,用聚合物微球与缔合聚合物进行复配,进行人造岩心驱油实验和填砂管封堵实验,研究发现,复合体系不仅兼具深部调剖和增黏驱油的性能,而且在液流改向能力、封堵性能和驱油效果等方面均优于单纯的聚合物溶液。研究表明,微球和缔合聚合物之间可产生较好的协同作用。该实验非常成功,今后可以用微球和其他聚合物做复配实验,进而比较不同驱油聚合物间的性质特点。Lin等<sup>[22]</sup>基于静

态吸附原理,创建了一套测定疏水缔合聚合物 AP-P4 在油、水、固三相体系间分配规律的实验方法。该试验方法在不同溶液浓度与矿化度条件下测定疏水缔合聚合物在三相间的分配规律。实验结果表明,尽管聚合物不溶于油相之中,但油相的引入造成了在油水界面间出现了疏水缔合聚合物明显富集的现象。该方法为预测实际油藏化学驱过程中的吸附滞留行为、评估采出液处理过程中乳化相含量提供了理论支持。该实验方法虽然较传统的两相静态吸附方法研究更为全面,对疏水缔合聚合物的性质更加清晰,但缺少实际方面的应用与实践,在实际操作过程中可能会导致与研究结论偏差。

疏水缔合聚合物有着很好的剪切恢复性、黏弹性与增黏性,现不断有人研究出具有耐温、耐盐、抗剪切等诸多优点的疏水缔合聚合物,如今该聚合物的机理研究已相对成熟,今后应该加强在力学性能、溶解性、耐磨性和抗蠕变性等方面的研究。

### 3.2.3 梳型聚合物

梳型聚合物属于接枝聚合物的一个分类,因为它的侧链有“梳状”的结构,所以称为梳型聚合物。梳状聚合物较线性聚合物相比,因其侧链的特殊结构而有更好的溶液性能。宋志瑞<sup>[23]</sup>模拟大庆油田的底层与水质条件,验证梳形聚合物 K35 等几种聚合物的增黏性能均好于 2 500 万分子质量的部分水解聚丙烯酰胺,且黏度与剪切速率与温度均呈反比,随着后两者的增加,黏度不断降低。该学者在耐温性能和抗剪切性能方面做得比较好,如果在抗盐性方面的研究能多做一些,研究会更加充实。这位学者在研究时可以参考李美容等<sup>[24]</sup>学者的研究,李学者就考察了梳型聚合物在模拟炮眼剪切前后的宏观与微观的变化,研究较为深入,值得借鉴。Wang等<sup>[25]</sup>为提高油藏的开发效果,对梳型聚合物、磺化聚合物和低分子质量聚合物进行比较研究。结构表明,梳型聚合物有着良好的热稳定性与耐盐性,分子质量为 1 000 万的梳型聚合物溶液注入人造岩心的渗透率为  $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,对渗透率  $< 30 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  的天然岩心,则会产生阻碍作用。还有诸多学者对梳型聚合物进行研究,例如王历历等<sup>[26]</sup>选用新型梳型聚合物做了耐温抗盐的相关研究,效果明显。Huff<sup>[27]</sup>对两性梳型聚合物进行了实验研究。

梳型聚合物在溶解性方面优势显著,在抗剪切性、热稳定性等方面存在不足,今后应该加强在这 2 方面的实验研究和机理探讨。

### 3.2.4 星形聚合物

星形聚合物是指由一个星核和多个聚合分子链连接成的一种具备耐温抗盐性能的水溶性聚合物。因为星形聚合物主链的星形化使得聚合物分子链的刚性有效增强,且具有规整的分子结构,这使得聚合物分子链不易卷曲,分子链旋转的水力学半径变大,耐温抗盐能力和增黏性得到明显的增强。星形聚合物在油田中广泛用作驱油剂、泥浆助剂、堵剖剂等。Iwashita 等<sup>[28]</sup>曾多次对星形聚合物的结构及性质进行研究,比较星形聚合物和线性聚合物之间溶解性等问题。Luo 等<sup>[29]</sup>对一种接有 $\beta$ -CD 功能性单体和丙烯酸酯单体的耐盐碱的星形聚合物采用聚合后水解的方法进行研究。通过红外光谱确定星形聚合物的结构,测定水解度、过滤因子、水溶性物质、溶解速率和表观黏度等参数,表明满足油田应用要求。该学者如果在满足油田应用要求的基础上对星型聚合物和其他类集合物进行各个性质的比较研究,这对星型聚合物的发展会起到更大的作用。

星形聚合物具有优良的耐温抗盐和增黏性,但在酸碱稳定性、抗剪切性、耐磨性等方面存在不足,今后应该加强酸碱稳定性、抗剪切性、耐磨性、溶解性方面的实验研究。

## 4 结论与建议

从聚合物的机理可以看出影响聚合物驱油的因素有很多,例如聚合物的剪切性、黏弹性、热稳定性和生物稳定性等。在聚合物驱油时,地层的岩石和流体等的复杂性同样会影响聚合物的驱油效果。选用最适合油田的聚合物应该满足以下几点,首先具有水溶性,还要具有非牛顿特性和良好的增黏性,化学稳定性和剪切稳定性都需要很好,以及具有抗吸附性,在多孔介质中有良好的传输性,在价格和来源上也要合适。为此,我国各大油田的研究方向大都放在新型廉价质优的聚合物研究上,如疏水缔合物、改性聚丙烯酰胺等。

聚合物驱油是一种很有潜力的驱油技术,其应用范围将会越来越广。值得注意的是,通常渗透率太低的油层,泥质含量 >25% 的油层,水驱残余油饱和度 <25% 的油层和底水油层,不适合用聚合物驱油。而随着高渗透、低泥质含量油藏逐渐应用聚合物驱油技术后,为了从地下采出更多的原油,中低渗油层使用聚合物驱油技术必将成为研究热点和趋势。国外一些学者已经开始了在中低渗油层使用聚合物驱油技术的研究,如外国学者 Benyamin 等<sup>[30]</sup>

就已经做了一些相关的基础研究。因此,我国石油科研工作者应尽早就这一领域展开研究,争取能够开发出适合我国地质条件的中低渗油层驱油聚合物。

## 参考文献

- [1] Zhu Youyi, Hou Qingfeng, Jian Guoqing, *et al.* Current development and application of chemical combination flooding technique [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(1): 96-103.
- [2] Wang Jing, Liu Huiqing. A novel model and sensitivity analysis for viscoelastic polymer flooding in offshore oilfield [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2014, 20: 656-667.
- [3] 史毓泉, 鲁晓华. 提高采收率技术研究 [J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2014, 34(1): 47.
- [4] 李美蓉, 黄漫, 曲彩霞, 等. 疏水缔合型和非疏水缔合型驱油聚合物的结构与溶液特征 [J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2013, 37(3): 167-172.
- [5] 丁保东, 张贵才, 葛际江, 等. 普通稠油化学驱的研究进展 [J]. *西安石油大学学报: 自然科学版*, 2011, 26(3): 52-56.
- [6] Zhu Youyi, Hou Qingfeng, Jian Guoqing, *et al.* Current development and application of chemical combination flooding technique [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(1): 96-103.
- [7] 曹新, 赵卫兵, 黄荣贵. 渤海油田注聚复合解堵技术现场应用 [J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2013, 33(4): 136-137.
- [8] 陈广辉. 冀东油田高浅北区聚合物驱项目研究 [J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2013, 33(6): 83-84.
- [9] Wevera D A Z, Picchionia F, Broekhuysa A A. Polymers for enhanced oil recovery: A paradigm for structure-property relationship in aqueous solution [J]. *Progress in Polymer Science*, 2011, 36: 1558-1628.
- [10] 王世高. 黄原胶的化学改性及其性能和结构的研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2011.
- [11] Nasr Shaghighy, Soudi Mohammad Reza, Haghighi Manouchehr. Xanthan production by a native strain of *X. campestris* and evaluation of application in EOR [J]. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 2007, 10(17): 3010-3013.
- [12] Hee Yeon Jang, Ke Zhang, Bo Hyun Chon, *et al.* Enhanced oil recovery performance and viscosity characteristics of polysaccharide xanthan gum solution [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2014, 1: 1-5.
- [13] Lu Jiao, Peng Bo, Li Ming-yuan, *et al.* Development in crosslinked polymer based flooding fluids of low viscosity for EOR [J]. *Oilfield Chemistry*, 2010, 27(1): 106-111.
- [14] 刘延峰. 交联聚合物驱提高采收率机理调研 [J]. *化工管理*, 2014, (1): 173.
- [15] Fu Mei-long, Zhou Jing-cai, Xiong Fan, *et al.* A study on formation plugging mechanism of crosslinked polymer flooding in Henan Oilfield [J]. *Oilfield Chemistry*, 2010, 27(2): 188-191.
- [16] Wang Wei, Lu Xiangguo. Property evaluation of EOR technology by means of expansive granular crosslinked polymer [C]. *SPE Production and Operations Symposium: Society of Petroleum Engineers*, 2009: 711-722.
- [17] 薛新生, 张健, 舒政, 等. 剪切方式对疏水缔合聚合物溶液性能的影响 [J]. *油气地质与采收率*, 2013, 20(1): 59-63.

究和控制油田注水中也十分重要,因此中高渗透油藏的注水开发仍然存在着很大的空间,对其注水技术的改进仍然是相关专业人员的首要任务,不同的含水期采用不同的注采方式,才能将中高渗透油藏注水开发提高到一个新的高度。

## 2 低渗透油藏注水开发

随着国内勘探程度的逐步深入以及油层改造工艺技术的不断提高,在近几年探明的石油地质储量中,低渗透油层储量占 60% 以上。因此,开发低渗透油藏,对我国石油工业今后的持续稳定发展有着十分重要的意义。对于低渗、特低渗油田的划分,国内外尚无统一标准。李道品<sup>[7]</sup>提出了在现有条件下低渗透油田分类的物性标准:第一类为一般低渗透油田,油层平均渗透率为  $10 \times 10^{-3} \sim 50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;第二类为特低渗透率油田,油层平均渗透率为  $1.0 \times 10^{-3} \sim 10.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;第三类为超低渗透率油田,油层平均渗透率为  $0.1 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。我国大部分低渗透油田底水不活跃,弹性能量小,投产压力大幅度下降,产量快速递减,因此需要采用注水<sup>[8]</sup>保持压力平衡的方式进行开采。

### 2.1 一般低渗透油藏注水开发

低渗透油层以小微孔隙和细微细喉道为主,其原油边界厚度大,贾敏效应和表面分子力作用强烈,因此,其渗流规律不遵循达西定律,具有非达西型渗流特征。我国的低渗透油田分布也十分广泛,例如

东西沟油田、新民油田以及我国西部鄯善油田等都属于低渗透油田<sup>[9-11]</sup>。

对于低渗透油田的注水开发,美国在 20 世纪 40—50 年代首先提出低渗透油藏注水开发的合理性,1955 年 Guthrie 等<sup>[12]</sup>对 73 个完全水驱和部分水驱的砂岩油田的基础数据,利用多元回归分析法得到预测注水开发油田的水驱可采储量的经验公式。1871 年美国发现著名的勃莱德福油田,已有 100 多年历史<sup>[11]</sup>。他们一般先利用溶解气驱能量和弹性能量开采,但油层产能递减较快,一次采收率低,只达到 8% ~ 15%。而进入低产期时转入注水开发,用注水保持能量后,二次采收率可提高到 25% ~ 30%。

我国的榆林等油田<sup>[7]</sup>根据先前经验,在开发一个油田(区块)时,先打注水井,进行排液,然后在生产井投产时,注水井全面转注,进而达到同步注水采油。对于那些没有裂缝的低渗透砂岩油田,则在地层微破裂条件下注水,适当地提高注采比,来保持地层压力在原始压力附近。西安石油大学的姜晓波<sup>[9]</sup>对东西沟油田长 2 油藏的正方形反九点法井网形式做出合理调整,调整后共有采油井 258 口,注水井 83 口,转注 32 口油井,将其采油速度提高了 0.5%,加大注采比至 1.004,增加水井配注量到  $5.199 \text{ m}^3/\text{d}$ 。目前来看,单井日产量仍然较低,预计应该提高单井日采油量至  $0.23 \text{ t/d}$ 。杨大刚<sup>[13]</sup>通过对大庆油田萨中开发区低渗透砂岩储层萨零组油层进行研究,分析其水驱开发驱替剂的合理注入参

(上接第 40 页)

[18] 徐辉. 超高分子缔合聚合物溶液特性及驱油性能研究[J]. 石油与天然气化工, 2014, 43(1): 62-67.

[19] Jiang Weidong, Kang Xiaodong, Xie Kun, *et al.* Degree of the Association of Hydrophobically Associating Polymer and its Adaptability to the oil Reservoir[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2013, 32(4): 103-107.

[20] 杨化彪. 季铵型疏水缔合聚丙烯酰胺的合成及性质研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.

[21] Li Xianjie, Zhang Jian, Zheng Xiaoyu, *et al.* Sealing characteristics of compound system of cross-link polymer microspheres and association polymer[J]. Modern Chemical Industry, 2013, 33(8): 86-89.

[22] Li Ruyin, Tan Guorong, Zhang Jian. Different distribution behavior of hydrophobic associated polymer AP-P4 between oil-water-solid three-phase system and water-solid two-phase[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2013, 35(3): 80-85.

[23] 宋志瑞. 四种新型驱油聚合物 ASP 体系基础性能对比[J]. 内蒙古石油化工, 2013, 23(23): 26-28.

[24] 李美蓉, 黄漫, 曲彩霞, 等. 剪切作用对功能聚合物微观结构性

能的影响研究[J]. 燃料化学学报, 2013, 41(4): 449-445.

[25] Wang Ye Fei, Liu Chen, Qi Zi Yuan, *et al.* Polymer flooding in high temperature and low permeability reservoir[J]. Oilfield Chemistry, 2013, 30(2): 202-206.

[26] 王历历, 旷曦域, 任强. 耐温抗盐驱油聚合物性能评价研究[J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2013, 15(4): 70-73.

[27] Huff Juergen, Oetter Guenter, Kuehne Angelika, *et al.* Surfactant mixtures for tertiary oil recovery[C]. Engineering Village, 2013.

[28] Iwashita J, Hirayama T, Takagi I, *et al.* Characteristics of main chain decomposable STAR polymer for EUV resist[C]. Conference on Advances in Resist Materials and Processing Technology XXVIII, 2011: 79-72.

[29] Luo Wenli, Han Dong, Wei Li, *et al.* Synthesis and property evaluation of a salt- and alkali-resistant star-polymer[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(4): 477-482.

[30] Benyamin Yadali Jamaloei, Riyaz Kharrat, Farshid Torabi. A mechanistic analysis of viscous fingering in low-tension polymer flooding in heavy-oil reservoirs[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2011, 78(2): 228-232. ■