

引用格式:曹绪龙,季岩峰,祝仰文,等.聚合物驱研究进展及技术展望[J].油气藏评价与开发,2020,10(6):8-16.

CAO X L, JI Y F, ZHU Y W, et al. Research advance and technology outlook of polymer flooding[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(6):8-16.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2020.06.002

聚合物驱研究进展及技术展望

曹绪龙,季岩峰,祝仰文,赵方剑

(中国石化胜利油田分公司,山东 东营 257000)

摘要:随着我国对石油的需求量不断增加,对油气田的进一步挖潜显得至关重要。化学驱技术是提高采收率的重要技术之一,而聚合物驱作为最主要的化学驱提高采收率方法,在矿场上已经得到了广泛应用,并取得良好的驱油效果。该文通过对聚合物驱的基本原理以及各种驱油用聚合物的发展现状进行综述,对聚合物驱的矿场应用效果进行总结,展望了聚合物驱在高温高盐等苛刻油藏环境下的发展方向。通过综述可以看出,虽然耐温抗盐共聚物、速溶聚合物、两亲聚合物等功能型聚合物已成功研发,但应用于矿场的聚合物类型仍然有限,如何将新型聚合物的研发成果应用于现场提高采收率是重点发展方向。随着不同聚合物类型的研发,对聚合物驱油机理的研究需要继续深入。

关键词:聚合物;驱油原理;研究进展;矿场实验;新型聚合物

中图分类号:TE357

文献标识码:A

Research advance and technology outlook of polymer flooding

CAO Xulong, JI Yanfeng, ZHU Yangwen, ZHAO Fangjian

(Sinopec Shengli Oilfield, Dongying, Shandong 257000, China)

Abstract: With the increasing oil demand in China, it is very important to further tap the potential of oil and gas fields. Chemical flooding technology is one of the important technologies of EOR, and polymer flooding, as the most important method of EOR, has been widely used in the field and achieved good oil displacement effects. Therefore, by summarizing the basic principles of polymer flooding, the development status of various kinds of polymer for oil displacement and the field application effect of polymer flooding, the development direction of polymer flooding in harsh reservoir conditions, such as high temperature and high salt, has been prospected. Through the review, although functional polymers, such as temperature resistant and salt resistant copolymers, instant polymers and amphiphilic polymers, have been successfully developed, the types of polymers used in the field are still limited. How to apply the research and development achievements of new polymers to on-site EOR is the key development direction. With the development of different polymer types, further research on polymer flooding mechanism is needed.

Key words: polymer, oil displacement principle, research advance, field tests, novel polymer

随着工业的发展,世界能源的需求日益增加。相比于太阳能、风能等其他能源,现阶段的化石燃料,特别是石油和天然气,在能源供应方面发挥着更加重要的作用^[1]。近年来,我国石油的需求量不断增加。2019年,我国原油进口量超过 5×10^8 t,同比增长9.5%,石油对外依赖度上升至72%^[2]。为缓解这种

情况,对老油田进一步挖潜以提高原油采收率或通过发现新的油气田来提高油气产量是至关重要的^[3]。油田开采一般经历3个阶段。通过油层自身能量进行石油开采的方式称之为一次采油。一次采油结束后,将气体或水注入油田储层以保持油层与生产井之间的压力差,这种方式称为二次采油。在一

收稿日期:2020-10-29。

第一作者简介:曹绪龙(1964—),男,博士,教授级高级工程师,本刊第二届编委会委员,主要从事油田提高采收率技术研究。地址:山东省东营市东营区聊城路2号勘探开发研究院,邮政编码:257000。E-mail:caoxulong.slyt@sinopec.com

基金项目:国家科技重大专项“高温高盐油田化学驱提高采收率技术”(2016ZX05011-003)。

次和二次采油阶段之后,由于油井的含水率不断增加,需要更多的地面设备来分离油井采出的油气和水,导致产油成本高昂,很难以低成本继续采油^[4-7]。三次采油是二次采油后进一步提高采收率的重要阶段,利用化学、热能、物理、生物等方法改变储层岩石或驱替液的性质,从而提高波及系数和洗油效率。化学驱提高采收率(CEOR)是提高采收率的重要技术之一,在油田得到广泛应用。有关提高采收率的研究表明,全球11%提高采收率项目中,有11%是化学驱。在化学驱提高采收率技术中,聚合物驱所占比例超过77%,23%是聚合物/表面活性剂二元驱^[8]。

聚合物驱通过向水相中加入聚合物,增加水的黏度,降低水油流度比,同时降低水的相对渗透率,实现吸水剖面的调整,提高水相波及体积^[9]。聚合物驱已在油田现场应用50多年,与其他提高采收率技术相比成本更低^[10]。但是在矿场应用过程中也存在一些问题:在高温高矿化度油藏,聚合物分子易发生蜷曲导致流度控制能力减弱;在海上油田聚合物溶解熟化时间长,配聚效率低;在低渗透稠油油藏聚合物注入性差,难以驱替稠油。各种新型聚合物的研发有效地解决了上述问题,促进了聚合物驱在油田的进一步应用^[11]。该文首先综述了聚合物驱的基本原理以及各种驱油用聚合物的发展现状,然后对聚合物驱的矿场应用效果进行总结,最后展望了聚合物驱未来的发展趋势。

1 聚合物驱研究进展

1.1 聚合物驱的原理

1.1.1 增加水相黏度,避免横向指进

在非均质油藏中,水驱会导致严重的指进现象,即受层内非均质性及油水黏度差异的影响,注入水的渗流速度远远快于原油,在注水井和采出井间形成优势通道,最终导致水驱后油藏的大部分区域没有被水波及^[12]。1964年,PYE^[13]与SANDIFORD^[14]提出向水中加入水溶性聚合物能够降低水的流度,进而降低水油流度比,实现活塞式的水驱油方式。Buckly-Leverett方程表明流度比对含水率存在影响,如式(1),并认为当水油流度比 M 降低到 $M < 1$ 时,水驱油为活塞式的驱替,此时平均含水饱和度较大,剩

余油的数量也因此减少。

$$f_w = \frac{\frac{k_w}{\mu_w}}{\frac{k_w}{\mu_w} + \frac{k_o}{\mu_o}} = \frac{M}{1+M} = \frac{1}{1+\frac{1}{M}} \quad (1)$$

式中: f_w 为含水率,%; k_w 为水相渗透率, μm^2 ; μ_w 为水相黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; k_o 为油相渗透率, μm^2 ; μ_o 为油相黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; M 为水油流度比。

1.1.2 提高纵向波及

在纵向上,聚合物先与高渗储层接触,在阻力相对较小的大孔道中缓慢渗流。由于聚合物与孔壁间存在相互吸附作用,使高渗层渗透率减小。此外,聚合物溶液黏度高,渗流过程中存在很大的摩擦阻力,降低了在高渗透层中流动速度,减小聚合物溶液在高渗透层与低渗透层间推进速度之差,调整吸水剖面,从而扩大纵向波及^[15]。

1.1.3 黏弹性提高洗油效率

聚合物溶液不同于水,是一种非牛顿流体,非牛顿流体是黏弹性流体,黏弹性流体产生的拉伸变形和黏弹效应,使得孔隙夹缝中不易波及的残余油,在孔道中变成丝絮状态或以活塞式推进,被聚合物溶液驱替出来,从而提高洗油效率^[16]。然而,在高温高矿化度下,聚丙烯酰胺和部分水解聚丙烯酰胺易水解,洗油效率大幅降低,此时向主链引入特殊官能团的多元共聚物在高温高矿化度下亦可表现出良好的黏弹性,进一步提高了高温高矿化度油藏中的洗油效率^[17]。

1.1.4 胶束作用剥离岩石壁面原油

近年来,有学者提出两亲聚合物和聚合物表面活性剂等新型功能聚合物可通过胶束作用将原油从岩石壁面剥离,从而提高采收率。聚合物将原油从岩石表面剥离分为5个阶段,分别为:表面物理吸附、形成高覆盖层、聚合物预胶束沉积、聚合物胶束覆盖、胶束裹挟原油剥离。聚合物与原油作用后,通过吸附作用在油膜表面形成吸附层,随着吸附作用的进行,聚合物胶束覆盖整个油膜,随后原油进入聚合物胶束的疏水内核,最终聚合物胶束裹挟原油从岩石壁面剥离,其机理如图1所示^[18]。但是该类聚合物目前在矿场应用较少,并且其驱油机理并不适用于传统表面活性剂。

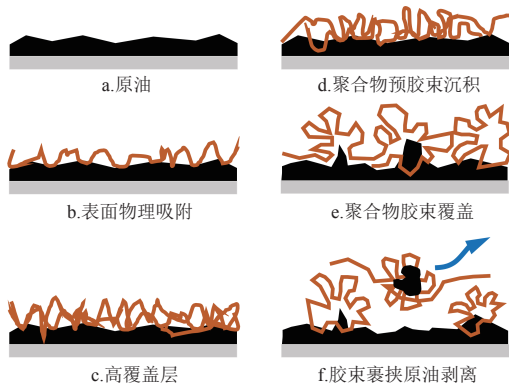


图1 聚合物与原油相互作用机理

Fig. 1 Interaction mechanism between polymer and crude oil

1.1.5 吸附、捕集作用降低岩石渗透率

聚合物分子可以被孔隙表面吸附,也可以被狭窄吼道捕集。聚合物降低岩石渗透率的作用可由两个参数表示,分别为阻力系数(RF)和残余阻力系数(RFF)。阻力系数表示聚合物溶液与水相比所增加的流动阻力^[19],如式(2)所示。阻力系数越高,说明聚合物溶液越难在岩石孔隙中渗流。残余阻力系数是初始水驱的流度与注聚后后续水驱的流度之比,表征了聚合物分子由于吸附滞留在岩石中导致渗透率降低的程度^[20],如式(3)所示:

$$RF = \frac{\lambda_{\text{水驱}}}{\lambda_{\text{聚合物驱}}} = \frac{\Delta P_{\text{聚合物驱}}}{\Delta P_{\text{水驱}}} \quad (2)$$

$$RFF = \frac{\lambda_{\text{初始水驱}}}{\lambda_{\text{后续水驱}}} = \frac{\Delta P_{\text{后续水驱}}}{\Delta P_{\text{初始水驱}}} \quad (3)$$

式中: RF 为阻力系数; RFF 为残余阻力系数; $\lambda_{\text{水驱}}$ 为水流度, $\mu\text{m}^2 \cdot (\text{Pa} \cdot \text{s})^{-1}$; $\lambda_{\text{聚合物驱}}$ 为聚合物溶液流度, $\mu\text{m}^2 \cdot (\text{Pa} \cdot \text{s})^{-1}$; $\Delta P_{\text{聚合物驱}}$ 为聚合物驱压差,MPa; $\Delta P_{\text{水驱}}$ 为水驱压差,MPa; $\lambda_{\text{初始水驱}}$ 为初始水驱时水相流度, $\mu\text{m}^2 \cdot (\text{Pa} \cdot \text{s})^{-1}$; $\lambda_{\text{后续水驱}}$ 为后续水驱时水相流度, $\mu\text{m}^2 \cdot (\text{Pa} \cdot \text{s})^{-1}$; $\Delta P_{\text{初始水驱}}$ 为初始水驱压差,MPa; $\Delta P_{\text{后续水驱}}$ 为后续水驱压差,MPa。

1.2 驱油用聚合物研究进展

1.2.1 传统驱油用聚合物

传统的聚合物驱主要使用的聚合物有两类:合成聚合物与天然聚合物。部分水解聚丙烯酰胺(HPAM)是应用最广泛的合成聚合物^[21],结构式如图2所示。

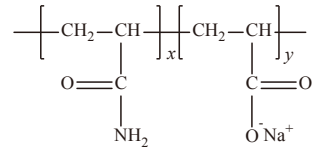


图2 HPAM结构式

Fig. 2 HPAM structural formula

部分水解聚丙烯酰胺合成原料易得,合成方式简单,成本低,易于工业化生产,具有良好的增黏性能,是聚合物驱应用最多的聚合物。但是HPAM在多孔介质中受到高温高矿化度及微生物活动等环境因素的影响,极易发生降解导致黏度损失^[22]。HPAM在高温下易发生水解反应,使水解度增大,羧基含量增加,在高矿化度地层水中,高浓度的二价金属离子(Ca^{2+} 和 Mg^{2+})通过静电作用与羧基结合,减弱高分子链的带电性,从而使HPAM分子发生蜷曲甚至出现絮凝^[23]。因此,HPAM不适用于高温高矿化度油藏。

另一种应用较为广泛的天然聚合物是黄原胶,它是一种高分子生物多糖,通常由一种叫作黄瘤的细菌通过发酵过程产生,图3为黄原胶的结构式^[24]。

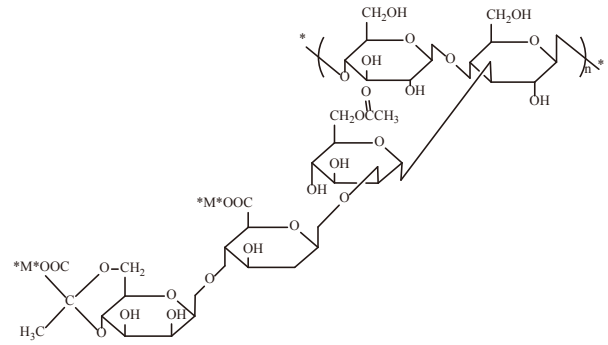


图3 黄原胶分子结构式

Fig. 3 Molecular structural formula of xanthan gum

黄原胶分子在低温下具有双螺旋结构,但随着温度的升高,高温下双螺旋结构改变为无序螺旋^[25]。加入少量盐后,由于电荷屏蔽效应,黄原胶溶液黏度会降低。黄原胶比聚丙烯酰胺更适用于高盐条件。一般来说,黄原胶在较高的矿化度和温度下比HPAM更稳定,但它们都在高温高矿化度(HTHS)条件下降解。因此,黄原胶也不适用于高温高矿化度储层。

1.2.2 耐温抗盐聚合物

近年来,随着油田开发的不断深入,储层条件较好的油藏经过常年的水驱和聚合物驱开发,增油稳

产的难度越来越大,高温高矿化度油藏逐渐成为开发的重点。由于常规的HPAM并不适用于高温高矿化度油藏,学界针对提高丙烯酰胺类聚合物耐温抗盐性做了大量研究,促进了耐温抗盐聚合物的合成与研发,形成了耐温抗盐单体共聚物、疏水缔合聚合物、温增黏聚合物、纳米颗粒增强聚合物等产品。

1) 耐温抗盐单体共聚物

耐温抗盐单体共聚物从聚合物分子的化学组成出发,设计研发不同的耐温抗盐单体,将其与丙烯酰胺、丙烯酸通过自由基聚合合成耐温抗盐共聚物。耐温抗盐单体多选用含C-N、C-C、C-O等对温度和矿化度不敏感的强键单体,避免使用酯基等弱键单体^[26]。耐温抗盐单体根据带电性质可分为非离子型、阴离子型、阳离子型、两性型、疏水缔合型。

非离子型耐温抗盐单体本身不带电,因此对于矿化度不敏感,这类单体主要包括N-乙烯基吡咯烷酮、N,N-二甲基丙烯酰胺等。李新勇等^[27]使用非离子耐温抗盐单体N-丙烯酰吗啉合成了耐温抗盐三元共聚物,结果表明由于吗啉环的引入,共聚物具有优异的耐温抗盐及抗老化性能。

阴离子耐温抗盐单体是使用及研究最广泛的一类单体,目前应用最多的是2-丙烯酰胺基-2-甲基丙磺酸。这类单体通常含有磺酸基等强极性基团,在高温下抑制酰胺基的水解,同时取代HPAM中的部分羧基,降低水解度,减弱羧基与二价金属离子的结合,提高聚合物的抗盐能力。孙群哲等^[28]使用苯乙烯磺酸钠作为耐温抗盐单体,制备出磺化聚丙烯酰胺SPAM,虽然分子量仅有736万,但与工业化产品相比耐温抗盐性能有很大改善。近年来,多种新型耐温抗盐单体被研发出来,但所合成的耐温抗盐聚合物仅限于室内研究阶段,矿场应用最广泛的仍为含AMPS单体的耐温抗盐聚合物。

阳离子单体一般不能作为驱油用耐温抗盐聚合物的聚合物单体,因为阳离子聚合物极易在地层中吸附,造成黏度损失。同样的,两性离子单体也存在地层吸附问题。但是两性离子单体合成的共聚物具有反聚电解质性质,由于两性离子单体含有数目相等的正负电荷,其溶液黏度反而会随矿化度的增加而增大,是一种前景广阔的耐温抗盐聚合物^[29]。但是,两性聚合物容易因为高温下酰胺基水解等原因导致分子链正负电荷数目发生变化,从而失去反聚电解质效应,这是两性聚合物急需解决的问题^[30]。

2) 疏水缔合聚合物

疏水缔合聚合物(HAWP)是在聚丙烯酰胺分子链中引入少量(一般小于2%)缔合型单体形成的水溶性聚合物^[31]。根据疏水基在分子链上的分布不同,分为接枝型和嵌段型。疏水缔合聚合物存在临界缔合浓度(CAC),即高于CAC时,聚合物分子链开始聚集^[32],链间疏水基发生缔合,形成空间网状结构,实现增黏性能的提升^[33]。

1967年,DUBIN和STRAUSS^[34]合成第一种疏水缔合聚合物,是由烷基乙烯基醚与马来酸共聚而成。而疏水缔合聚合物第一次用于提高采收率是由Landoll Corporation(美国蓝道)在1985年疏水缔合聚合物的美国专利中提出。此后研究人员研发出多种疏水单体,形成了多种类型的疏水缔合聚合物。MAIA等^[35]利用N,N-二己基丙烯酰胺合成出疏水缔合聚合物,并与工业化产品PHPA做比较,发现外加Na⁺不会影响疏水缔合聚合物溶液的黏度。马喜平等^[36]合成出一种疏水性季铵盐单体ADMA-16。并以AM、DMC与ADMA-16为反应单体合成了一种三元疏水缔合聚合物PADA,具有良好的耐温抗盐性。除此之外,近年来,许多学者研发出一些特殊分子结构的疏水缔合聚合物,具有良好的应用前景。SHARKER等^[37]通过RAFT链转移自由基聚合方法合成了17个聚合物臂的核交联聚(N-异丙基丙烯酰胺)星型聚合物,具有温度响应和pH响应特性;刘锐^[38]利用自制的亲水多官能度大分子PAMAMF与AM、AA、阳离子疏水单体(DMDCC)共聚合成出超支化缔合聚合物,超支化缔合聚合物相比于普通疏水缔合聚合物具有更强的黏弹性。

3) 温增黏聚合物(TVP)

温增黏型聚合物通过在聚合物分子链中引入具有较低临界溶解温度(LCST)特性的疏水温敏嵌段或接枝形成^[39],在高温高矿化度油藏具有良好的应用前景。常见的温敏型单体包括聚(环氧乙烷)-聚(环氧丙烷)(PEO-PPO)、聚(N-异丙基丙烯酰胺)(PNIPAM)和基于丙烯酰胺二丙酮(MPAD)的大单体共聚物等^[40-41]。

温增黏型聚合物在室温下表现出与常规高分子溶液相似的性质,但当温度高于LCST时,温敏基团依靠物理作用相互缠结形成疏水微区,使得溶液黏度大幅提高^[42]。

1994年,HOURET等^[43]利用聚丙烯酰胺修饰

PEO温敏基团,合成出温增黏型聚合物,并首次将其引入油田开发领域。此后,许多学者也开展了适用于高温高矿化度油藏的温增黏聚合物的研发工作。WANG等^[44]通过自由基聚合合成出温增黏型聚合物P(AM-MPAD),并研究了其在高温高盐条件下的性能。结果表明外加盐浓度的增大能够降低LCST,使聚合物在较低温度下就可以表现出温增黏特性。郭睿威等^[45]对温增黏聚合物聚(N-异丙基丙烯酰胺)(PNIPAm)进行了研究,结果表明随着温敏基团接枝率和链长的增大,温增黏效应逐渐增强。

4) 纳米颗粒增强聚合物

纳米颗粒增强聚合物是向聚合物中引入纳米颗粒,如二氧化硅、纳米氧化铝、氧化钛、氧化镍等,通过氢键作用或其他分子间作用力使纳米颗粒与聚合物分子结合,利于纳米颗粒自身的特性,改善聚合物的耐温抗盐性及抗剪切性,是一种应用前景广阔的聚合物驱油体系。ZHENG等^[46]将纳米二氧化硅使用硅烷偶联剂十六烷基三甲氧基硅烷进行改性,使纳米二氧化硅表面接枝疏水长链,增强纳米二氧化硅与疏水缔合聚合物分子间的相互作用,从而表现出更优异的增黏性及耐温抗盐性。

1.2.3 特殊类型聚合物

高温高矿化度油藏的开发使耐温抗盐聚合物的研究不断深入。此外,海上油田、稠油油藏等特殊类型油藏的开发也促进了速溶聚合物、两亲聚合物等特殊类型聚合物的合成与研究。

1) 速溶聚合物

随着原油需求量的增加和陆上油田开发的深入,近年来海上油田开发数量逐渐增多,聚合物驱油技术在海上油田试验规模逐渐扩大。与陆上油田相比,海上平台空间狭小,难以通过增加熟化罐数量或容积来提高熟化效果。此外,海上油田矿化度高,增大了聚合物溶解难度。聚合物干粉溶解效果差不仅会影响聚合物自身增黏性和驱油效果,而且会造成聚合物溶液注入压力虚高甚至造成注入困难。

针对上述问题,课题组提出研发速溶聚合物用以改善聚合物驱在海上油田的开发效果。目前主要的研究思路有:①引入亲水的离子型结构单元或适量的其他单体进行共聚改性,减少聚丙烯酰胺链上酰胺基及其氢键的数量;②在合成过程或后处理过程中加入适量的能与酰胺基产生氢键的低分子

物质(如致孔剂),以减少聚丙烯酰胺链间氢键数量,或加入亲水性的表面活性剂即渗透剂,使聚丙烯酰胺颗粒与水接触后在表面形成水膜,降低水的表面张力,促进水向颗粒内的扩散和聚合物的溶解;③改变聚合物产品剂型。采用反相乳液聚合法生产反相乳液产品或水分散聚合法生产水包水乳液。乳液型聚丙烯酰胺的分散相是高浓度的聚合物溶液,分散粒子尺寸很小,溶解时不需要经过溶胀阶段只是浓溶液的稀释。ZHENG等^[47]利用PDMC为稳定剂,浓硫酸铵溶液为分散介质,通过双水相聚合法制备了溶解性能良好的疏水缔合型聚合物HAPAM,该聚合物溶液20 s内黏度即可达到峰值。上述方法虽然能够有效提高聚合物的溶解速率,但是合成过程中需要大量有机溶剂及表面活性剂,生产成本高且易对环境造成污染。也有许多学者仅通过优化聚合物合成工艺,研发出具有速溶能力的聚合物。

2) 两亲聚合物

随着常规油田产量的递减,稠油油田的开采对于保证我国石油能源的供应具有重要意义。但是稠油中含有大量的胶质沥青质,流动性差,难以开采,需要对稠油进行降黏处理。稠油冷采是稠油开发的重点研究方向,即通过加入化学降黏剂来降解原油中的胶质沥青质或使原油乳化成为O/W型乳状液从而实现原油的化学降黏。表面活性剂驱是稠油冷采的重要技术,但是对于非均质性强的稠油油藏,表面活性剂容易沿高渗层渗流。许多学者提出将两亲单体引入聚合物中,合成两亲聚合物,从而综合聚合物和表面活性剂的技术优势,促进聚合物驱在稠油油藏的应用。张向峰等^[48]采用沉淀法研究了两亲聚合物中高分子量组分(HM)和低分子量组分(LM)各自的流变和乳化性质,结果发现HM组分对黏性起主导作用,而LM组分具有较强的乳化能力。朱洲等^[49]合成了不同疏水基含量并具有盐增黏特性的丙烯酰胺类甜菜碱两亲聚合物PAMA,在高矿化度条件下,PAMA能够形成稳定的O/W型乳状液,有利于高矿化度稠油油藏提高采收率。于斌^[50]研究了两亲聚合物复配体系的性能,将S型两亲聚合物与L型两亲聚合物复配,复配体系中的S型两亲聚合物的聚醚结构链段与L型两亲聚合物的异构烷烃链形成类混合胶束,增强体系的结构强度,实现对两亲聚合物体系增黏性能和乳化性能的调控。

3) 核壳型聚合物

聚合物注入过程中经历配聚污水及注聚管道内的Fe、S腐蚀、井口炮眼剪切,近井地带岩石吸附,实际的地下工作黏度有一定损失,不利于聚合物的深部调驱。本课题组通过分子包埋法,将HPAM包埋在外壳中,形成核-壳型聚合物,保护HPAM分子,从而实现延时增黏和靶向增黏,提高聚合物在地层深部的流度控制能力。张超^[51]评价了核壳型聚合物的延时增黏性和深部封堵能力,结果表明核壳型聚合物在85℃下老化90d后,黏度保留率可达92.11%,其受溶液矿化度、pH的影响,岩心的吸附量均小于聚丙烯酰胺,且50cm长岩心3个测压点均检测到压力上升,具有良好的深部运移封堵特性。

驱油用聚合物研发的不断深入归功于不同类型油藏的逐渐开发,未来驱油用聚合物研发重点仍以提高各种类型油藏适应性为主。保证驱油用聚合物具有良好的溶解性、增黏性、耐温耐盐性、抗剪切性、抗吸附性、注入性。同时,也需保证合成聚合物的成本。

2 聚合物驱矿场应用效果

世界上已开展的聚合物驱大部分应用于砂岩油藏,因为聚合物极易吸附在碳酸盐岩油藏的岩石表面。但目前许多聚合物驱项目在碳酸盐岩油藏也逐渐开展。截至目前,全世界范围内24个国家开展了733个聚合物驱项目,均以陆上砂岩油藏为主,仅有8个海上聚合物驱,其中约仅1/7为碳酸盐岩油藏^[52]。

2.1 常规聚合物驱矿场试验

最初的聚合物驱仅限于室内研究,但许多研究

人员报道了聚合物驱的一些现场应用,2012年MOE SOE LET等^[53]报道了Suriname的Tambaredjo油田采用注入25~40 mPa·s的聚合物溶液成功采出非均质储层中500 mPa·s黏度的原油,进一步说明聚合物驱在稠油开采中具有很大潜力。2001年,Yabin报道了大庆油田聚合物驱的矿场应用,大庆油田聚合物驱的矿场应用始于1996年,聚合物驱提高采收率比水驱高出12%。而后,大庆油田在聚合物驱的基础上大足发展了二元或三元复合驱。据报道2019年大庆油田结合同心分层注入技术和分质注入技术,油井累计增油将近 $126 \times 10^4 \text{t}$ ^[54]。

相对于HPAM,黄原胶在聚合物驱油中的应用报道较少。黄原胶首次应用是在挪威的Vorhøp-Knesebeck油田和德国的Eddesse-Nord油田^[55]。一般来说,黄原胶在较高的盐度和温度下比丙烯酰胺更稳定,但它们都在高温高盐度(HTHS)条件下降解。因此,这类合成生物聚合物不适用于高盐度、高温储层^[56]。

2.2 高温高盐聚合物驱矿场试验

进入20世纪后,聚合物驱在高温高矿化度油藏的应用受到限制,促进了许多新型聚合物的研发^[57]。如对聚丙烯酰胺进行硫化处理、温增黏聚合物(TVPs)、纳米颗粒增强聚合物体系^[58]。但目前矿场应用较多的仍为耐温抗盐聚丙烯酰胺类聚合物,如表1所示。后两种方式仍处在实验室研究阶段,尚未有矿场试验报道。

胜利油田报道了2012年11月胜利油田在胜坨油田二区Ed34单元开展了梳形抗盐聚合物驱先导试验^[59]。试验区含油面积 3.2 km^2 ,地质储量 $421 \times 10^4 \text{ t}$,地下原油黏度70 mPa·s,油藏温度70℃,矿化度

表1 国内外一些高温高盐油藏聚合物驱矿场试验

Table 1 Field test of polymer flooding in some high temperature and high salinity reservoirs in China and other countries

国家	油田	开始时间	岩性	聚合物类型	聚合物浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	注入孔隙体积 倍数	注入 方式	结果评价
印度	Sanand	1985年04月	砂岩	丙烯酰胺	800	0.15	梯式	提高采收率11%,投资回报率28%
德国	Edesse-Nord	1985年10月	砂岩	黄原胶聚合物	800~1000	0.20	一体	增产5%~7%,经济成功
美国	White Castle	1986年01月	砂岩	聚丙烯酰胺	500	0.40	一体	未评价
德国	V-K	1989年12月	砂岩	黄原胶聚合物	500~600	0.40	梯度	提高采收率6%,经济成功
德国	Ploen-ost	1989年05月	砂岩	合成聚合物	1000	0.60	梯度	大幅增产,经济成功
美国	Adon Road	1990年10月	砂岩	胶态分散凝胶	600	0.30	梯度	提高采收率18%,0.72美元/桶
中国	双河油田	1994年02月	砂岩	聚丙烯酰胺	800		梯度	提高采收率10%,吨油成本390元/t
中国	胜利油田胜二区	2012年11月	砂岩	聚丙烯酰胺	2200	0.65	梯式	提高采收率7.3%

18 035 mg/L, 钙镁离子含量 678 mg/L, 属于典型的高盐高钙镁型油藏。经聚驱后, 含水由 96.5 % 降至 88.5 %, 下降 8.0 个百分点。日产油量由 86 t 上升至 268 t, 增加了 182 t, 提高采收率 2.5 %。

将聚合物微交联或者制作成凝胶颗粒可有效提升聚合物耐温耐盐性能。WU 等^[60]研究了一种超高温超高温矿化度聚合物微球, 在中国某油田成功应用。在该研究中, 采用了微凝胶颗粒(SMG)作为新型高分子材料, 可在高温条件下保持稳定, 采收率从 44 % 提高至 66 %。

3 结论

在对前人工作总结的基础上, 对聚合物驱未来发展的主要结论和建议如下:

1) 聚合物驱通过增加水相黏度, 降低水油流度比, 提高波及系数; 通过自身黏弹性对原油产生拉拽作用从而提高洗油效率。但随着多种适用于不同类型油藏聚合物的研发, 对聚合物驱油机理的研究需要继续深入。

2) 聚合物能够适用的油藏条件不断拓宽, TVPs(温增黏聚合物)、疏水缔合聚合物、耐温抗盐共聚物的研发使聚合物能够应用于高温高盐油藏; 速溶聚合物的研发提高了海上油田的配聚效率; 两亲聚合物的研发将聚合物驱引入稠油油藏。未来适用于多种类型油藏的功能型聚合物的研发是聚合物发展的重要方向, 但是如何降低功能型聚合物的研发及应用成本也是亟须解决的问题。

3) 目前聚合物驱矿场实验仍以耐温抗盐部分水解聚丙烯酰胺、交联聚合物凝胶、聚合物微球、聚表二元复合体系为主, 如何将新型聚合物的研发成果转化为矿场应用的采收率提高是今后聚合物驱的重点发展方向。

参考文献

- [1] 钱兴坤, 刘朝全, 姜学峰, 等. 全球石油市场艰难平衡发展风险加大—2019年国内外油气行业发展概述及2020年展望[J]. 国际石油经济, 2020, 27(1): 2-9.
QIAN X K, LIU Z Q, JIANG X F, et al. Overview of the domestic and foreign oil and gas industry development in 2019 and outlook for 2020[J]. International Petroleum Economics, 2020, 27(1): 2-9.
- [2] 阿依加马力·艾尼. 高含水油田水驱聚驱后剩余油分布特征研究及提高采收率对策[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.
AINI A. Study on residual oil distribution after water and polymer flooding for high water cut field and the method of improving oil recovery[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2017.
- [3] MOGENSEN K, MASALMEHA S. A review of EOR techniques for carbonate reservoirs in challenging geological settings[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 195: 1-13.
- [4] SCHEXNAYDER P, BAUDOIN N, CHIRDON W M. Enhanced oil recovery from denatured algal biomass: Synergy between conventional and emergent fuels[J]. Fuel, 2020.
- [5] 王斌, 周迅, 王敏, 等. 三次采油技术在中原油田的应用进展[J]. 油田化学, 2020, 37(3): 552-556.
WANG B, ZHOU X, WANG M, et al. Application of tertiary oil recovery technology in Zhongyuan Oilfield[J]. Oilfield Chemistry, 2020, 37(3): 552-556.
- [6] 魏华旭. 三次采油阶段提高采收率的措施[J]. 化学工程与装备, 2020, 49(10): 105.
WEI H X. Measures to enhance oil recovery in tertiary oil recovery stage[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2020, 49(10): 105.
- [7] 刘玉章. EOR聚合物驱提高采收率技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006.
LIU Y Z. EOR Polymer flooding enhanced oil recovery technology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006.
- [8] RELLEGADLA S, PRAJAPAT G, AGRAWAL A. Polymers for enhanced oil recovery: Fundamentals and selection criteria[J]. Applied Microbiology & Biotechnology, 2017, 101(15): 1-16.
- [9] 侯吉瑞, 陈宇光, 吴璇, 等. 聚合物表面活性剂溶液微观驱油特征[J]. 油田化学, 2020, 37(2): 292-296.
HOU J R, CHEN Y G, WU X, et al. Microscopic oil displacement characteristics of polymeric surfactant solution[J]. Oilfield Chemistry, 2020, 37(2): 292-296.
- [10] 金亚杰. 国外聚合物驱油技术研究及应用现状[J]. 非常规油气, 2017, 4(1): 116-122.
JIN Y J. Progress in research and application of polymer flooding technology abroad[J]. Unconventional Oil & Gas, 2017, 4(1): 116-122.
- [11] 崔名喆, 张建民, 吴春新, 等. 渤海油田低渗透油藏黏性指进特性分析[J]. 中国石油勘探, 2018, 23(5): 94-99.
CUI M Z, ZHANG J M, WU C X, et al. Analysis of viscous fingering characteristics of low permeability reservoirs in Bohai oilfield[J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(5): 94-99.
- [12] ALMANSOUR A O, ALQURAIISHI A A, ALHUSSINAN S N, et al. Efficiency of Enhanced Oil Recovery Using Polymer-ugmented Low Salinity Flooding[J]. Journal of Petroleum Exploration & Production Technology, 2017, 7(1): 1149-1158.
- [13] PYE D J. Improved secondary recovery by control of water mobility[J]. Journal of Petroleum Technology, 1964, 16(8): 911-916.
- [14] SANDIFORD B B. Laboratory and field studies of water floods using polymer solutions to increase oil recoveries[J]. Journal of Petroleum Technology, 1964, 16(8): 917-922.
- [15] 未志杰, 康晓东, 何春百, 等. 非均质稠油油藏聚合物驱吸液剖面变化规律[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(8): 61-66.
WEI Z J, KANG X D, HE C B, et al. Polymer flood injection

- conformance behavior of heterogeneous heavy-oil reservoirs[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(8): 61-66.
- [16] 孙刚. 利用双极化干涉法研究聚合物与原油的相互作用[J]. *油田化学*, 2017, 34(2): 290-295.
SUN G. Insight into interactions between polymer and crude oil with dual polarization interferometry[J]. *Oilfield Chemistry*, 2017, 34(2): 290-295.
- [17] ABEL A, McCORMICK C L. Mechanistic insights into temperature-dependent trithiocarbonate chain-end degradation during the RAFT polymerization of N-arylmethacrylamides[J]. *Macromolecules*, 2016, 49(2): 465-474.
- [18] 邢恩浩,陶鑫,金磊,等. 阻力系数和残余阻力系数的测定及影响因素的研究[J]. *辽宁化工*, 2016, 45(3): 284-287.
XING E H, TAO X, JIN L, et al. Determination and influence factors of resistance coefficient and residual resistance coefficient[J]. *Liaoning Chemical Industry*, 2016, 45(3): 284-287.
- [19] ZHANG H C, GOU S H, ZHOU L H, et al. Synthesis and properties of betaine hydrophobic modified polymer flooding[J]. *Applied Chemical Industry*, 2019, 48(11): 2627-2631.
- [20] KURŞUN I, IPEKOĞLU B, ÇELİK M S, et al. Flocculation and adsorption-desorption mechanism of polymers on albite[J]. *Developments in Mineral Processing*, 2000, 13: 24-30.
- [21] 沈天阳,徐兆冉. POSS的合成及其在传统聚合物改性中的研究进展[J]. *化工管理*, 2018, 33(18): 29-30.
SHEN T Y, XU Z R. Synthesis of POSS and its research progress in modification of traditional polymers[J]. *Chemical Engineering & Equipment*, 2018, 33(18): 29-30.
- [22] ELHAEIAB R, KHARRATC R, MADANI M. Stability, flocculation, and rheological behavior of silica suspensions-augmented polyacrylamide and the possibility to improve polymer flooding functionality[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2020.
- [23] YOO H S, KIM H S, SUNG W M, et al. An experimental study on retention characteristics under two-phase flow considering oil saturation in polymer flooding[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2020, 87: 120-129.
- [24] 胡钰灵,全红平,黄志宇. 疏水改性黄原胶XG-C16溶液性能及微观结构探究[J]. *应用化工*, 2019, 48(11): 2657-2661.
HU Y L, QUAN H P, HUANG Z Y. Study on solution properties and microstructure of hydrophobic modified Xanthan gum-XG-C16[J]. *Applied Chemical Industry*, 2019, 48(11): 2657-2661.
- [25] XU L, XU G Y, LIU T, et al. The comparison of rheological properties of aqueous welan gum and xanthan gum solutions[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2013, 92(1): 516-522.
- [26] 祝仰文. 超高分三元共聚物流变特性及驱油性能[J]. *油气地质与采收率*, 2018, 25(6): 78-83.
ZHU Y W. Study on rheology and oil displacement properties of ultra high molecular weight terpolymer[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2018, 25(6): 78-83.
- [27] 李新勇,罗攀登,刘坤,等. 含有吗啉基的耐温抗盐聚合物合成及性能[J]. *当代化工*, 2020, 49(5): 838-841.
LI X Y, LUO P D, LIU K, et al. Synthesis and performance evaluation of salt-resistant and heat-tolerant polymer containing morpholine groups[J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2020, 49(5): 838-841.
- [28] 孙群哲,宋华,李锋,等. 三元驱油用磺化聚丙烯酰胺的合成与性能研究[J]. *化学工业与工程技术*, 2014, 35(3): 41-44.
SUN Q Z, SONG H, LI F, et al. Study on synthesis and property of terpolymer sulfonated polyacrylamide used in EOR[J]. *Journal of Chemical Industry & Engineering*, 2014, 35(3): 41-44.
- [29] 尚克剑. 两性聚合物的合成及应用[J]. *新疆化工*, 2016, 41(1): 5-10.
SHANG K J. Synthesis and application of amphoteric polymers[J]. *Xinjiang Chemical Industry*, 2016, 41(1): 5-10.
- [30] 伊卓,刘希,方昭,等. 三次采油耐温抗盐聚丙烯酰胺的结构与性能[J]. *石油化工*, 2015, 44(6): 770-777.
YI Z, LIU X, FANG Z, et al. Structure and properties of temperature-tolerant and salt-resistant polyacrylamide for tertiary oil recovery[J]. *Petrochemical Technology*, 2015, 44(6): 770-777.
- [31] BERRET J F, CALVET D, COLLET A. Fluorocarbon associative polymers[J]. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2003, 8(3): 296-306.
- [32] BAI Y R, SHANG X S, WANG Z B, et al. Experimental study on hydrophobically associating hydroxyethyl cellulose flooding system for enhanced oil recovery[J]. *Energy & Fuels*, 2018, 32(6): 6713-6725.
- [33] 王晓黎. 聚丙烯酰胺类疏水缔合聚合物的合成与表征[D]. 济南: 山东大学, 2015.
WANG X L. Study on synthesis and characterization of hydrophobically associating acrylamide-based copolymers[D]. Jinan: Shandong University, 2015.
- [34] DUBIN P L, STRAUSS U P. Hydrophobic hypercoiling in copolymers of maleic acid and alkyl vinyl ethers[J]. *Journal of Physical Chemistry*, 1970, 74(14): 2842-2847.
- [35] MAIA A M S, BORSALI R, BALABAN R C. Comparison between a polyacrylamide and a hydrophobically modified polyacrylamide flood in a sandstone core[J]. *Materials Science and Engineering*, 2009, 29(2): 505-509.
- [36] 马喜平,廖明飞,董江洁,等. 疏水缔合聚合物PADA的合成与性能评价[J]. *应用化工*, 2020, 49(3): 669-673.
MA X P, LIAO M F, DONG H J, et al. Synthesis and performance evaluation of hydrophobic association polymer PADA[J]. *Applied Chemical Industry*, 2020, 49(3): 669-673.
- [37] SHARKER K K, TAKESHIMA S, TOYAMA Y, et al. pH- and thermo-responsive behavior of PNIPAM star containing terminal carboxy groups in aqueous solutions[J]. *Polymer*, 2020: 122735.
- [38] 刘锐. 超支化缔合聚合物的制备及驱油性能[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2015, 37(2): 145-152.
LIU R. Preparation of hyperbranched association polyacrylamide and its oil displacement properties[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2015, 37(2): 145-152.
- [39] LI X E, XU Z, YIN H Y, et al. Comparative studies on enhanced oil recovery: Thermoviscosifying polymer versus polyacrylamide[J]. *Energy & Fuels*, 2017, 31(3): 2479-2487.
- [40] CHEN Q S, WANG Y, LU Z Y, et al. Thermo-viscosifying

- polymer used for enhanced oil recovery: Rheological behaviors and core flooding test[J]. *Polymer Bulletin*, 2013, 70(2): 391–401.
- [41] ROY D, BROOKS W L A, SUMERLIN B S. New directions in thermo-responsive polymers[J]. *Chemical Society Reviews*, 2013, 42(17): 7214–7243.
- [42] MOGOLLÓN J L, YOMDO S, SALAZAR A, et al. Maximizing a mature field value by combining polymer flooding, well interventions, and infill drilling[C]// paper SPE-194652-MS presented at the SPE Oil and Gas India Conference and Exhibition, 9–11 April, 2019, Mumbai, India.
- [43] HOURDET D, L'ALLORET F, AUDEBERT R. Reversible thermo-thickening of aqueous polymer solutions[J]. *Polymer*, 1994, 35(12): 2624–2630.
- [44] WANG Y, FENG Y J, WANG B Q, et al. A novel thermoviscosifying water-soluble polymer: Synthesis and aqueous solution properties[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2010, 116(6): 3516–3524.
- [45] 郭睿威, 吴大成, 鹿栋栋, 等. 热缔合接枝物 HPAM-g-PNIPAm 的温敏增稠性能[J]. *石油化工*, 2003, 32(8): 690–694.
- GUO R W, WU D C, LU X D, et al. Thermothickening properties of graft copolymer HPAM-g-PNIPAm[J]. *Petrochemical Technology*, 2003, 32(8): 690–694.
- [46] ZHENG C, CHENG Y, WEI Q, et al. Suspension of surface-modified nano-sio₂ in partially hydrolyzed aqueous solution of polyacrylamide for enhanced oil recovery[J]. *Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects*, 2017, 524(1): 169–177.
- [47] ZHENG C C, HUANG Z H. Self-assembly and regulation of hydrophobic associating polyacrylamide with excellent solubility prepared by aqueous two-phase polymerization[J]. *Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects*, 2018, 555: 621–629.
- [48] ZHANG X F, YANG H B, WANG P X, et al. Oil-displacement characteristics and EOR mechanism of amphiphilic polymers with two molecular weights[C]// paper SPE-192385-MS presented at the SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition, 23–26 April, 2018, Dammam, Saudi Arabia.
- [49] 朱洲, 康万利, 杨红斌, 等. 磺基甜菜碱型两亲聚合物的合成及其流变特性[J]. *石油化工高等学校学报*, 2017, 30(5): 32–36.
- ZHU Z, KANG W L, YANG H B, et al. Synthesis and rheological properties of a sulfobetaine amphiphilic polymer[J]. *Journal of Petrochemical Universities*, 2017, 30(5): 32–36.
- [50] 于斌. 驱油两亲聚合物性能调控方法及增效机理研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2019.
- YU B. Study on property control of amphiphilic polymers for oil displacement and its synergistic mechanism[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2019.
- [51] 张超. 延时增粘聚合物增粘特性及运移规律研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2016.
- ZHANG C. Study on Thickening Properties and Migration Law of Delayed Viscosity Increasing Polymer [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2016.
- [52] JIANG Z Z, ZHU J R. Cationic polyacrylamide: Synthesis and application in sludge dewatering treatment[J]. *Asian Journal of Chemistry*, 2014, 26(3): 629–633.
- [53] MOE SOE LET K P, MANICHAND R N, SERIGHT R S. Polymer flooding a 500-cpoil[C]// paper SPE-154567-MS presented at the SPE Improved Oil Recovery Symposium, 14–18 April, 2012, Tulsa, Oklahoma, USA.
- [54] 侯巍. 大庆油田三次采油提高采收率技术研究[J]. *化工管理*, 2019, 34(10): 222–224.
- HOU W. Analysis of influencing factors of polymer flooding and application of stratified injection technology in Daqing Oilfield[J]. *Chemical Enterprise Management*, 2019, 34(10): 222–224.
- [55] LI J R. Experimental investigation and simulation of polymer flooding in high temperature high salinity carbonate reservoirs [D]. Abu Dhabi: The Petroleum Institute, 2015.
- [56] KAMAL M S, SULTAN A S, AL-MUBAIYEDH U A, et al. Review on polymer flooding: Rheology, adsorption, stability, and field applications of various polymer systems[J]. *Polymer Reviews*, 2015, 55(3): 491–530.
- [57] SHENG J J, LEONHARDT B, AZRI N. Status of polymer-flooding technology[J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2015, 54(2): 116–126.
- [58] ZHU D W, WEI L M, WANG B Q, et al. Aqueous hybrids of silica nanoparticles and hydrophobically associating hydrolyzed polyacrylamide used for EOR in high-temperature and high-salinity reservoirs[J]. *Energies*, 2014, 7(6): 3858–3871.
- [59] 赵方剑, 曹绪龙, 祝仰文, 等. 胜利油区海上油田二元复合驱油体系优选及参数设计[J]. *油气地质与采收率*, 2020, 27(4): 133–139.
- ZHAO F J, CAO X L, ZHU Y W, et al. Injection parameters optimization of binary combination flooding system in offshore oil field, Shengli oil province[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2020, 27(4): 133–139.
- [60] WU X C, YANG Z J, XU H B, et al. Success and lessons learned from polymerflooding a ultra high temperature and ultra high salinity oil reservoir – A case study from West China[C]// paper SPE-179594-MS presented at the SPE Improved Oil Recovery Conference, 11–13 April, 2016, Tulsa, Oklahoma, USA.

(编辑 常燕)