

国外三次采油新技术水平调查(一)

中国石油天然气总公司情报研究所

学(北京)

5-53

001

国外三次采油新技术水平调查

(一)

中国石油天然气总公司情报研究所

1992年12月

前 言

目前世界上许多油田应用注水开发,其中大多数已进入开发的~~中、后期~~,由于储层的非均质性及油、水流度比不利,使得这些油田尽管含水率很高,但仍然~~残存一定的~~石油,如何提高此类油藏的目前产量及石油采收率已成为当前的一项重要研究课题。除了采用加密井网外,化学驱仍是一种最有发展前途的方法。

由于目前油价低、化学剂成本高,制约着其广泛应用。但是,国外各石油公司仍在积极开展室内研究及部分矿场的先导性试验,为今后的大规模推广应用做好技术储备。

在三次采油新技术中,聚合物驱技术已趋成熟,正在不断加以完善。聚合物强化的碱驱、表面活性剂强化的碱驱及聚合物驱,以及表面活性剂、聚合物强化的威驱近年在室内研究及矿场先导试验中已取得一定进展。这种二元或三元化学复合驱由于化学剂间的协合效应,不仅可以降低昂贵化学剂用量,而且还能较大幅度地提高石油采收率,因此受到人们很大的重视。

生物聚合物及新型高温耐盐聚合物的研制及矿场试验也正在进行中。

我国在聚合物驱的室内研究及矿场试验方面均已取得一定成绩,目前正在不断加以完善。二元及三元化学复合驱的室内研究也已开始,并在一些矿场进行了或将要进行先导性试验。生物聚合物研制应用及新型驱油剂的研制也在进行中。

为了有助于我国的三次采油新技术的研究及矿场先导试验。跟踪国外三次采油新技术的发展水平及动向,编写有关的信息供国内研究人员及矿场操作人员借鉴。

国内三次采油新技术水平调查共分两册,其中第一册包括 1986 年—1992 年初国外重要石油文献期刊资料;第二册包括 1992 年—1994 年的资料。每个调查报告包括水平综合调查及有关重要文献的译文。

此调查报告由朱恩灵负责编写、编辑及审核,因受时间及所收集材料的限制,可能尚存在不足之处,敬希读者批评指正。

目 录

- 5730/12
- 1、国外三次采油新技术水平调查 朱恩灵编写
 - 2、表面活性剂及聚合物改善碱水驱的机理:应用 DavidLloyminster 和 WinwrightSparky 油田
..... 石 宇译,王鸿勋校
 - 3、西 Kiehl—Minnelusa 单元的碱—表面活性剂—聚合物驱 金静芷译、朱恩灵校
 - 4、应用贝瑞岩心及油藏岩心设计碱/聚合物驱的策略 田 火译、王鸿勋校
 - 5、Isenbour 单元独特的聚合物加强碱驱..... 王国清译、金静芷校
 - 6、助表面活性剂强化碱水驱现场试验..... 朱文杰译、田 火校
 - 7、Chateauxrenard 油田新聚合物驱获得高采收率的分析 朱恩灵译、王鸿勋校
 - 8、在阿曼 Marnul 油田所进行的聚合物驱先导试验的评价 张卫国译、石 宇校
 - 9、控制地层伤害和聚合物注入能力的因素..... 腾学顺,朱恩灵校
 - 10、聚合物堵塞的特性以及减少堵塞井筒的方法 钱兴坤译、金静芷校
 - 11、高温下黄原胶的稳定性 闫熙照译、朱恩灵校
 - 12、建立在聚合物物理学方面的最新概念上的一种改进的聚合物驱数值模拟器.....
..... 雷光伦译、朱恩灵校

国外三次采油新技术水平调查

朱恩灵 编写

一、前言

〔目前世界上许多水驱开发油田已处开发的中、后期,由于储层的非均质性以及不利的油水流动比,使其仍然存在着大量的水驱后残余油。为了开发这类剩余储量,除了采用加密井网外,化学驱仍是具有发展前途的方法之一。尽管由于油价低、化学剂成本高限制了这类方法的广泛应用,但是国外仍然在进行室内研究及矿场先导性试验,为今后大规模应用做好技术储备。〕

在三次采油新技术中,聚合物驱已得到广泛的应用,并由砂岩储层扩大到碳酸盐储层,在操作及质量控制方面正在不断地加以完善。此外,为了提高化学驱的效果及降低生产费用,正在开发各种化学复合驱的研究工作,其中如碱—聚合物驱、表面活性剂—碱驱、表面活性剂—聚合物驱的二元复合驱,以及碱/表面活性剂/聚合物的三元复合驱。通过各种化学剂间的协合作用,不仅可以降低昂贵化学剂的用量,而且还可以较大地提高石油采收率。上述各类化学复合驱不仅进行了大量室内机理研究,并且还进行了一些矿场先导性试验。〕

为了适应高温、高矿化度油藏的聚合物驱,除了对聚丙烯酰胺的制备加以改进外,正在应用生物聚合物,特别是黄原胶聚合物。对其结构特性、热稳定性及抗剪切降解性能进行了研究,并且用于北海及德国矿场先导试验中。

我国在聚合物的室内研究及矿场先导性试验方面均已取得一定成绩,目前正在不断加以完善,为工业性推广做好准备。二元及三元化学复合驱也开始了室内研究,并在一些矿场进行了先导性试验。生物聚合物的性能研究及矿场应用也在积极进行。

为了借鉴国外经验,有助于我国的三次采油新技术的研究及矿场试验工作,我们将追踪国外三次采油新技术的进展情况,不断地为国内研究人员及矿场操作人员提供新的信息。

二、八十年代末国外聚合物驱工艺技术水平

(一)聚合物驱的应用日趋广泛

通过不断的研究工作,聚合物驱已由以往只用于单层砂岩逐步扩大到各类储层,其中包括碳酸盐岩油藏,例如怀俄明州北 Oregon 盆地的 Byron 油田 Embar 层,为存在微小孔隙、溶洞及垂直裂缝的白云岩层状油藏。得克萨斯州 Regular 油田中的 Cardo 礁灰岩,孔隙度为 13.2%、渗透率为 0.1~234 毫达西、含水率为 90% 以上,由于水驱残余油饱和度高均获得较好聚合物驱效果。

此外,在中东沙漠地区阿曼 Marmul 油田的 Al Khlata 油藏,原油粘度为 80 厘泊、储层渗透率高达 1—20 达西,也成功地实施了聚合物驱先导性试验。

美国得克萨斯州 King 郡的 Twin Peaks 油田是位于边远地区的一个油藏,由于缺乏淡水,而又不易获得聚合物供应,但通过一些改进措施也实施了聚合物驱。由于地层水的矿化度很高,而且含有大量的钙和镁二价离子,改用非离子型聚合物,使其获得较佳的粘度,如图 1 所示。在聚合物与油田水混合之前加入过氧化氢来溶解铁离子使其成为非溶解的铁离子,随后再通砂层及硬煤过滤层进行过滤来降低非溶解的铁和有机杂质水平,达到有效的混合。

为了连续而又可靠地在边远地区提供非离子型聚合物研制出一种轻便的滑撬式聚合物反应

器, 聚合物单体与催化剂在反应器中反应 4 小时, 每小时可以生产 75 加仑聚合物。此种装置的流程图如图 2 所示。

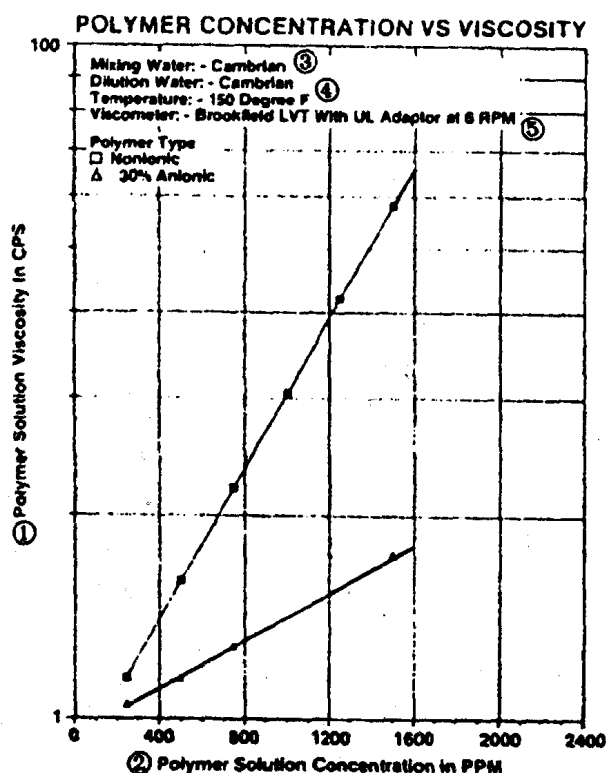


图 1 聚合物溶液粘度与浓度关系曲线

①聚合物溶液的粘度, 厘泊; ②聚合物溶液的浓度, ppm; ③混合水、稀释水为 Cambrian 地层水; ④温度, 150 F; ⑤在 6 转/分条件下应用具有 UL 转换接头布氏粘度计测出的粘度; ⑥聚合物类型: 非离子型, 及 30% 阴离子型

这套装置中包括双管聚合物反应器, 用来计量向管路系统混合室注入反应剂的化学计量泵、反应器的进出口管汇及自动操作的各种传感器及控制器。

由于反应生成或的聚合物的粘度很大, 在水中溶解很慢, 可通过装在滑梯上的稀释装置逐步将聚合物加入水中, 并利用低速离心泵进行搅拌加以混合。经过稀释的聚合物溶液再通过泵和静态混合器对注入的聚合物再进行稀释, 达到 500ppm 浓度。

此外聚合物驱还用 99℃ 以上高温油藏及具有裂缝性的油藏。因此聚合物驱的应用范围正在不断扩大。

通过先导性试验, 聚合物驱的采收率对于各油田来说并不一致, 例如美国怀俄明 Powder 河盆地的 Minnelusa 层聚合物驱可提高 7.5% 石油地质储量的石油采收率。聚合物加上设备费用, 每增产 1 桶原油为 2 美元。而北布尔班克增产一桶原油的费用高达 7.2 美元。

中东阿曼 Marmual 油田 Al Khilata 油藏由于储层渗透率高、地层水中含盐度低, 加上油藏温度不高 (46℃), 以及充足的淡水供应, 聚合物驱先导性试验获得较好的效果。采用 0.3 孔隙体积聚合物段塞, 使石油采收率提高 20—30% 原始石油地质储量。每采出 1 米³ 原油, 仅需聚合物 2.3~3.2 公斤。

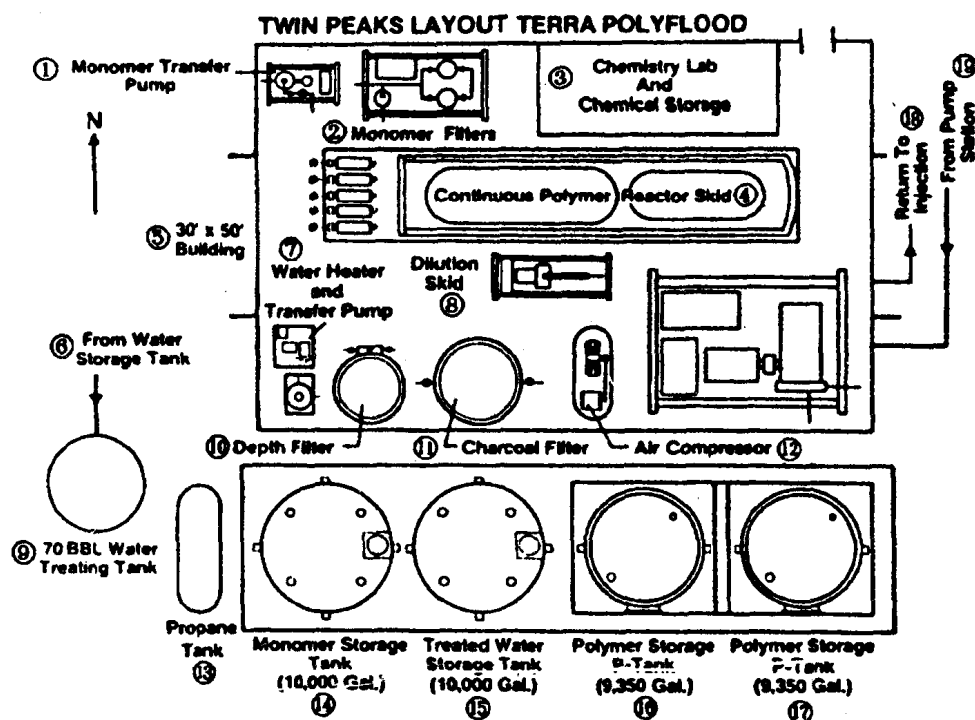


图 2 就地制备聚合物装置

①单体传送泵;②单体过滤器;③化学实验室及化学剂储存;④连续聚合物反应器滑撬;⑤30英尺×50英尺的建筑;⑥来自储水罐的水;⑦水加热器及输送泵;⑧滑撬稀释装置;⑨70桶水处理罐;⑩砂层过滤器;⑪硬炭过滤器;⑫空气压缩机;⑬丙烷罐;⑭单体储存罐(10,000加仑);⑮处理水储存罐(10,000加仑);⑯⑰聚合物储存罐;⑱返回到注入端;⑲来自泵站

(二)质量控制是聚合物驱获得成功的关键因素

根据国外聚合物驱先导试验的经验,为了获得成功,必须加强质量控制,减小粘度损失为此采取了下述一些做法

(1)尽量克服储层严重非均质及窜流

注聚合物驱储层的渗透率不均质及存在高渗层及通道的窜流均会影响聚合物驱的效果,为此在注聚合物以前应对地层进行预处理,一般是先向地层中注入阳离子型聚丙烯酰胺,使其吸附在岩层表面,然后注入柠檬酸铝溶液,使其与吸附在岩层表面上的聚合物相互接触产生化学反应,并在吸附聚合物与随后注入的聚合物段塞之间形成“桥堵”。注入的聚合物与铝—聚合物体系的自由端产生反应,在岩层表面形成聚合物—铝—聚合物层,可以通过几个周期重复进行,使岩层的渗透率降低到预定程度。北布尔班克油田 97 区块,在进行预冲洗及聚合物—柠檬酸铝交联处理后,通过压降试井指出,经过处理后的残余阻力系数达到 2.5,而未经处理的仅为 1。

为了使这种预交联处理更为有效,应当使柠檬酸铝进入地层深处与吸附的聚合物相接触。

一些矿场还采用先注入阴离子型聚丙烯酰胺,随后注入硫酸铝溶液加以交联;或者应用铬还原氧化过程,使高分子量阴离子型聚合物在地下交联成冻胶,它们在西塔萨斯具有天然裂缝的 Arbuckle 白云岩储层中获得成功。

(2)加强对聚合物的质量的检查

国外十分重视所供应聚合物的性能,因此对于每罐车所供应的聚合物,需对其进行团块检查、

溶液粘度测定,并且应用渗透率为 300~500 毫达西的贝雷岩心进行驱替试验,检查其注入能力,保证性能与卖主所提供规格是一致的。有的矿场还对所取样品通过蒸发方法来测定产品中的固体含量。为了加强对供料的质量控制,在铁路供货点建立质量控制实验室;在油田建立生产评价实验室,用来监测注入和产出流体的性质;此外还通过由计算机控制的测试卫星站,经常获得有关质量测试方面的数据。

(3)降低铁、氧及细菌对聚合物溶液粘度的影响

为了降低水中所含铁、氧及细菌对聚合物粘度的影响,对于储罐及注水管线,一般采用玻璃纤维罐及塑料涂层注入管线,有的甚至采用不锈钢管线,使聚合物溶液中铁的含量小于 0.1ppm。

为了消除溶液中的氧气,配制溶液的水罐采用天然气气封,而聚合物溶液为氮气气封,有的水源井套管也采用氮气加以气封。此外在泵上装置滑环密封、静密封件均可防止在配制聚合物溶液时外部氧的进入。

一般在聚合物溶液配制过程中的加下 30%浓度甲醛做为杀菌剂,其浓度介于 50~100ppm 之间。

此外还对于水溶液中的铁、氧及细菌加以连续监测和定期测定。

(4)减小机械降解对粘度的影响

对于 Eliasville 地层机械剪切和聚合物注入量的关系式如下:

$$\gamma(\text{秒}^{-1}) = \frac{(1.16)(q, \text{桶/日})}{(A, \text{英寸}^2)\phi} \div \left[\frac{(K, \text{毫达西})(8 \times 10^{-11})}{\phi} \right]^{1/2}$$

式中 γ —切剪速率,秒⁻¹;

q —注入量,桶/日;

A —炮眼面积,英寸²;

ϕ —岩层孔隙度,小数;

K —地层的渗透率,毫达西;

当日注入量为 350 桶/日时,将产生 4800 秒⁻¹的剪切速率。聚合物粘度与剪切速率关系如图 3 所示。

由图中可以看出,在剪切速率为 100 秒⁻¹时,初始粘度为 100%,而当剪切速率增加到 4800 秒⁻¹时,聚合物的粘度则下降到初始粘度的 40%左右。尽管在许多聚合物驱工程项目中,机械降解是一个严重问题,但通过合理设计可以达到能加以接受的程度,例如在得克萨斯 Hitts 湖单元工程中应用下述方法降低机械降解:

- a. 采用裸眼完井,或者增大注入井的炮眼密度和孔径,一般每英尺的射孔密度为 12 孔;
- b. 每口注入井均应装置独立的注入泵,而不应应用油咀或阀来调节注入量。注入管线中的聚合物在泵的下游加以测定;
- c. 采用小型水力压裂,改善井底注入层面的渗透性;
- d. 应用井口动剪切装置(一种多级侧向通道泵),通过对注入速率、旁流量及级数的控制来调节聚合物溶液注入的剪切强度。这种连续和非连续的控制方法的组合,能使注入的聚合溶液满足注入条件及非连续的渗透率变化。经过动剪切过的粘度损失仅为 10%。

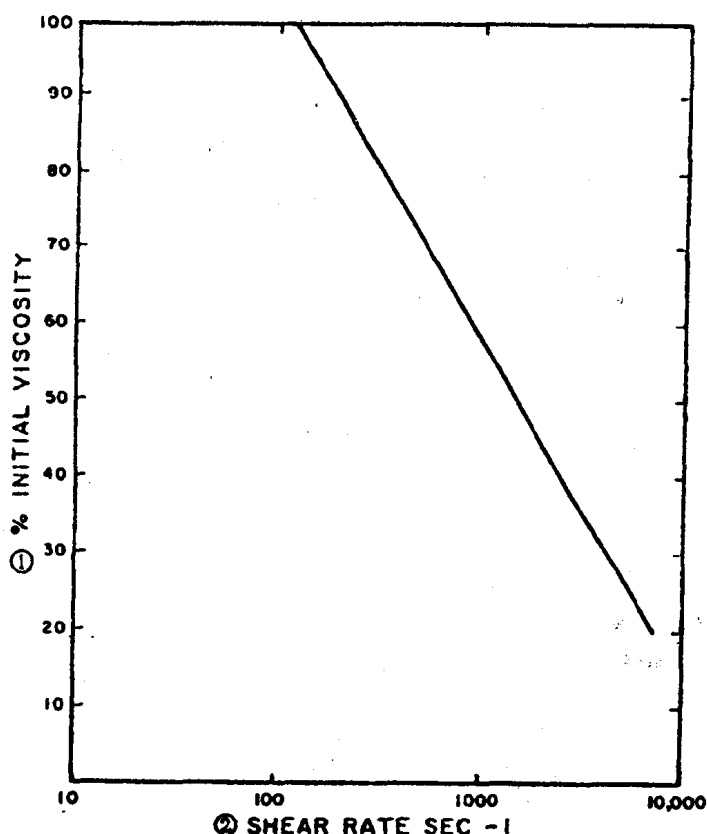


图3 聚合物溶液粘度与剪切速率的关系

①初始粘度,%;②切剪速率,秒⁻¹

(三)递变浓度段塞可以节约聚合物用量

国外矿场试验指出,采用浓度递变的多个聚合物段塞是节省聚合物用量和降低聚合物驱费用的一种有效方法。通过对各个段塞尺寸的合理选择,可以控制由于段塞之间因为粘度指进所引起的非稳定驱替。

段塞界面之间的粘度指进所导致的非稳定驱现象,会使波及效率下降,从而成为影响油藏聚合物驱的增产油量的一个重要因素。为此在一个直径为1米的赫尔—肖氏室中进行两相流中指进情况研究。

研究认为聚合物的流变性质对于粘滞指进形状,即对于扫油效率有着很大的影响。具有粘弹性不会发生剪切变稀性质的 Pusher 聚丙烯酰胺溶液可以极大地提高聚合物驱的石油采收率。

研究结果还认为,对于非牛顿流体,剪切变稀流体的波及系数似乎比相同粘度的牛顿流体的波及系数差,由于驱替水在界面尾部所产生的粘滞指进与在界面前端是同等重要。

为了保证在各种浓度聚合物段塞之间所形成的指进带,在其移过地层中不会发生相互贯通,选择各种适宜段塞尺寸的一个重要参数为各聚合物段塞之间的有效粘度比,此有效粘度比将会受到分散和弥散所产生混合程度的影响。

应用 Heuristic 模型来确定段塞之间聚合物有效粘度 K 。此模型建立在横向弥散基础上,并且假定存在线性浓度。

在段塞 i 中,浓度为 C_i ,粘度为 $\mu(C_i)$,而段塞 $i+1$ 的浓度为 C_{i+1} ,其小于 C_i ,它们的粘度为 μ

$(C_{i+1}) < \mu(C_i)$ 。在指进带的中心保持原来的浓度,由于横向弥散,使两个段塞界面上的浓度为 $\frac{1}{2}(C_i + C_{i+1})$,而且沿界面形成浓度梯度。

指进带前端的有效粘度 $K_f, K_f = \frac{2M}{1 + \sqrt{M}}$;

指进带后端的有效粘度 $K_b, K_b = \frac{1}{2}(M + \sqrt{M})$

式中 M 为地下相继段塞之间的粘度比 μ_i/μ_{i+1} ,而且 $K_b > K_f, M < 5$ 。

由上面可以看出段塞尺寸对指进前缘移动速度的敏感性比尾部大。可以选择 $K = K_f$ 来代表浓度递变段塞的有效粘度比, K 可以近似写为 $K = M^{\frac{1}{2}}$ 。应用 Koval 烃类混合半径经验法则, $K = (0.78 + 0.22M^{\frac{1}{2}})^4$; 而根据 Todd 和 Logtaff 混合法则, 则 $K = M^{\frac{1}{2}}$ 。应用 Kopval 混合法则所得出的聚合物用量是足够的。

在递变浓度聚合物段塞之间是否存在指进情况可以应用下述匹配准数来加以判断:

(1) 根据达西粘度 μ 、粘度比 M 和孔隙介质的因次及弥散特性所确定的稳定数 N_s , 可以估测多段塞聚合物驱指进的开始。当 $N_s < 4\pi^2$ 时元指进情况产生;

(2) $\lambda c/b$ 数值 (λc —最小指进距离, b —孔隙介质的宽度) > 1 , 指进将是很大的, 不能包括在上述模型中;

(3) $\frac{1}{\sqrt{L}}$ 和 $\frac{t}{2}$ (V —孔隙介质中的流动速度 μ/ϕ , L —孔隙介质长度, t —时间) 可以用来估测由于纵向弥散 D_L 和横向弥散 D_T 使指进变得模糊的范围, 当上述数值超过 0.06 时, 则指进变得模糊。

研究认为对于中东阿曼的 Marmul 油田, 由于采用浓度递变段塞使聚合物用量节省 17%。如果在驱替过程中各个聚合物溶液段塞之间, 无指进贯穿情况, 预计还可节省 10—12% 的用量。当浓度递变级数达到 10 级, 尽管可以节约 30~40% 的聚合物, 但比较难以在实际中加以应用。目前国外先导试验中一般采用 3—4 级, 其所使用的浓度及段塞尺寸介绍如下:

怀俄明州北 Oregon 盆地的 Byron 油田聚合物驱工程项目中, 采用三级段塞, 即 500ppm 的 0.3PV、330ppm 及 165ppm 的各 0.1PV。

得克萨斯州 Hitts 湖单元采用 5 级段塞, 即 660ppm 0.054PV、540ppm (0.03PV), 440ppm (0.024PV); 355ppm (0.018PV); 290ppm (0.12PV)。

美国北布尔班克油田采用三级段塞: 550ppm (0.15PV); 250 (0.10PV); 50ppm (0.15PV)。

各个段塞聚合物浓度及段塞尺寸大小根据储层特点, 应用计算机加以计算, 以期达到在节省聚合物用量下, 又能保证最大驱替效果。

(四) 裂缝性储层中聚合物渗吸作用的研究

一般在水湿的裂缝性油层中, 在注水开发时水的渗吸成为主要驱油机制。对于流度比不利而渗透率变异又很大的裂缝性油层, 聚合物驱比水驱更具吸引力, 这是由于聚合物可以提供较佳的流度比控制。另外, 聚合物在油层中的滞留作用可以改变所注入聚合物的流动方向。为了研究聚合物在裂缝性油层中的渗吸作用状况, 首先研究了聚合物分子量的影响, 采用分子量相应为 200 万的低分子量聚合物、500 万的中等分子量聚合物及 1100 万的高分子量聚合物, 配制了不同分子量、聚合物浓度和含盐量的聚合物溶液。在研究中为了避免聚合物在孔隙介质中产生堵塞, 聚合物分子的尺寸要比孔隙介质的平均喉道尺寸小 30%。

进行了静态及动态渗吸试验。静渗吸试验的目的在于了解聚合物的渗吸比水渗吸滞后的原因, 以及聚合物渗吸驱油的过程, 在试验中确定岩心渗透率及阻力系数的变化。而动渗吸试验可以用来研究具有裂缝饱和原油的岩心, 应用盐水和不同聚合物溶液驱替的石油采出速度及数量。

通过静吸附试验可以得出下述结论：

- (1)在相同的条件下水和聚合物渗吸所获得的最大石油量实际上最相同的；
- (2)聚合物溶液渗吸作用所获得的石油采收率通常比水低，这是由于聚合物渗吸采油滞后所致；
- (3)滞后情况是由于聚合物的滞留及高的视粘度造成孔隙介质渗透率下降所造成的；
- (4)聚合物的分子量越高，聚合物的分子将越大，将会对孔隙介质中聚合物的滞留及渗透率下降产生影响；
- (5)聚合物的吸附及滞留所造成的渗透率下降情况，在相同浓度和含盐量下，聚合物的分子量越大，则下降的越严重；
- (6)在渗吸的过程中，在相同条件下，高分子量的聚合物溶液比低分子量聚合物呈现出更高的视粘度，而渗透率的下降与高的视粘度的综合效应将导致较高分子量聚合物溶液低的流动性和高的阻力系数。
- (7)孔隙介质中聚合物的滞留与聚合物的浓度及孔隙介质中吸附量增大有关，但随聚合物溶液中含盐量的增加而下降；
- (8)由于聚合物滞留量增加，使孔介质的渗透率下降，使渗吸的聚合物溶液体积下降。

通过动渗吸试验可以给出下述看法：

- (1)裂缝性岩层中的开采状态与渗吸速度、注入速率及裂缝中残余油的驱替效率相关；
- (2)与水驱相比，裂缝性地层中聚合物驱石油采收率由初期突破状态来加以表征。在聚合物溶液突破以后，为了开采一定数量的石油，需要增大聚合物溶液的用量；
- (3)高分子量和高浓度聚合物溶液发现具有过早产生突破的特征，而高含盐量溶液则使突破滞后；
- (4)如果聚合物溶液的渗吸速度大于生产时的注入速率，尽管聚合物溶液的渗吸速度不高，其驱油效果也优于水驱；
- (5)对于高浓度聚合物溶液，提高粘滞力和裂缝中的聚合物滞留量可以克服渗吸速度低的问题，从而导致突破时间较水驱要晚以及获得较高的石油采收率。

(五)聚合物驱堵塞特性研究及其解决措施

在进行聚合物驱中，注入井中由于堵塞对于地层的伤害，不仅降低井的注入能力，而且对于聚合物驱的经济效果也有着极大的影响。

影响聚合物对地层产生堵塞的因素有以下五种：

- (1)单位横截面积的聚合物注入量(累计通量)；
- (2)岩层的渗透率；
- (3)聚合物的水动力尺寸；
- (4)储层岩石的矿物组成；
- (5)地面状态

为了进行研究国外采用了两米长的非金属岩心驱替装置(图4)，对聚合物造成的地层伤害的物理—化学环境进行评价。有的研究者将三种直径不同的岩心按顺序串连在一起，模拟井筒及井筒附近的剪切条件。现将二种方法研究概况叙述如下。

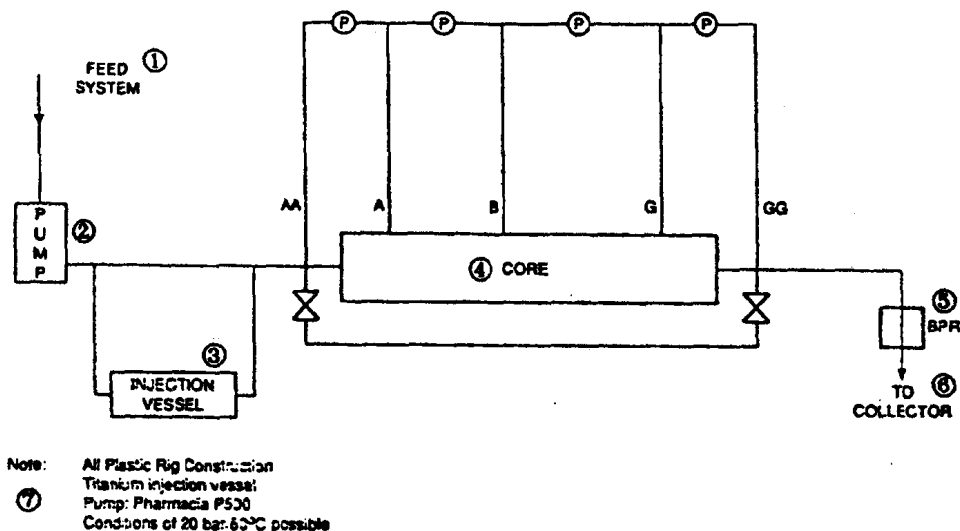


图4 非金属多孔岩心驱替装置

①供给系统, ②泵, ③注入容器, ④岩心, ⑤回压阀, ⑥至收集装置

1. 聚合物堵塞与产层单位面积的关系

聚合物的堵塞仅发生在井筒附近, 其特性与岩心的横断面积有关, 由于井筒的表面积与油藏内部发生径向流横断面积相比小得多, 因此在注入量一定时, 随着聚合物溶液进入油藏深部, 其注入长度越来越短, 所谓注入长度等于注入液体体积除以岩心横断面积与岩石孔隙度的乘积。在应用三种不同直径岩心串连在一起的模拟试验中, 注入 5400 毫升的聚合物溶液, 对于直径为 $\frac{1}{4}$ 英寸、1 英寸和 2 英寸的岩心, 其注入长度分别为 4170、240 和 60 英尺。对于直径为 $\frac{1}{4}$ 英寸的岩心, 在注入长度为 700 英尺时开始显示堵塞, 因此距井筒较远地层处不会产生聚合物堵塞。

2. 渗透率与聚合物发生堵塞的关系

对于盐水渗透率分别为 80 和 560 毫达西的贝雷岩心 1 和 5, 以恒定速率 (6 厘米³/小时) 注入浓度为 1200ppm 的 Cyanator1950 聚合物溶液, 当注入长度为 150 英尺时, 贝雷 1 号岩心的端面压力升高了 5.5 倍, 而贝雷 5 号岩心仅升高了 2 倍, 试验表明, 岩层的渗透率越低, 发生堵塞的时间越早。

3. 聚合物溶液的过滤对于注入能力的影响

经过 5 微米多孔过滤器过滤的浓度为 500ppm 的黄原胶生物聚合物, 以 12 厘米³/小时的速率通过初始渗透率为 135 毫达西、孔隙体积为 356 厘米³ 的岩心。在注入 5 倍孔隙体积情况下, 阻力系数为 6.5, 注入 14.3 倍孔隙体积后, 压力基本上未产生变化。接着注入 12 倍孔隙体积未经过滤的聚合物, 使入口端剖面上的压差增大到 38 磅/英寸², 阻力达到 88.4。这些结果表明, 未经过滤的聚合物溶液中存在大量凝胶及其它颗粒物质, 因此造成岩心入口端的堵塞, 而岩心其它部分的压力未产生变化, 表明对远离井筒部分未受到影响。

4. 三价铁离子及配制盐水矿化度对于聚合物堵塞的影响

聚合物的注入能力对于三价铁离子是非常敏感的, 即使三价铁离子的浓度很低 (<5ppm), 也会对岩层造成严重的损害。在经过过滤的应用模拟海水所配制的 500ppm 聚合物溶液中, 加入 1ppm FeCl₃, 然后以 12 厘米³/小时的速率注入。岩心的初始渗透率为 61 毫达西, 孔隙体积为 371 厘米³, 在注入 9.1 倍孔隙体积的聚合物溶液后, 发现岩心入口端的压差增大, 最终阻力系数为 5.1。将

三价铁离子浓度增加到 3.4ppm,立即产生严重影响,压力的增大为无三价铁情况下的 10 倍。三价铁浓度增大到 5ppm 时,压力不再发生变化。

应用高矿化度盐水配制黄原胶溶液,对聚合物的注入能力损害较小。应用总溶解固体量为 74230 的硬盐水配制 500ppm 聚合物溶液,经过滤后通过渗透率为 115 毫达西的岩心,在整个聚合物注入期间,岩心任何断面上的压力均没有升高,参看图 5。

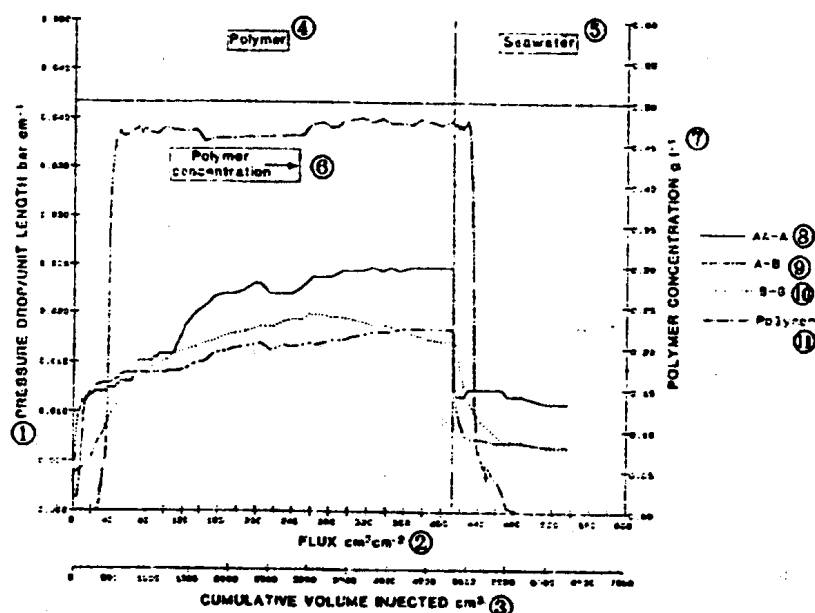


图 5 高矿化度硬盐水对聚合物注入能力的影响

①压降/单位长度,巴/厘米;②通量,厘米³/厘米²;③累计注入量,厘米³;④聚合物;⑤海水;
⑥聚合物浓度;⑦聚合物浓度,1/加仑;⑧AA-A 剖面;⑨A-B 剖面;⑩B-G 剖面;⑪聚合物

5. 聚合物分子的水动力尺寸对堵塞的影响

聚合物的水动力尺寸严重影响岩心内的聚合物的堵塞。岩心端面压力与初始压力之比与聚合物求入长度与分子量的关系如图 6 所示。所使用的油田岩心 A 原始渗透率为 80 毫达西,此岩心在以前注聚合物时产生堵塞,应用 1.5%次氯酸钠溶液和大量盐水清除堵塞,岩心端面的盐水渗透率达到 50 毫达西,然后再注入粘度为 7.4 厘泊的聚合物溶液在注入过程中岩心的压力不断升高,最后当聚合物的注入长度达到 500 英尺时,压力升高 5.5 倍,如图 6 所示,岩心再次应用次氯酸钠溶液解堵,解堵后渗透率降到 35 毫达西。随后注入的聚合物溶液预先通过 1/4 英寸直径岩心进行剪切并用硫酸钙饱和,聚合物溶液经剪切后,分子量降低,而且有可能将少量分子太大的聚合物从溶液中除去。另外,用硫酸钙溶液饱和也可能大幅度减小聚合物的水动力尺寸,结果注入长度达到 500 英尺时,压力仅升高 2 倍。

6. 岩层界面聚合物的堵塞对具有裂缝注入井注入能力的影响

向存在裂缝的注入井注入经过过滤的聚丙烯酰胺或未经过滤的黄原胶聚合物,对于井的注入能力的下降和裂缝延伸均无明显影响。层面堵塞严重而且表皮两端压差无上限的聚合物确实能使裂缝尺寸大大增加,它能大大抵销由于堵塞而引起的注入压力的增加。裂缝的存在对于聚合物的注入能力有很大影响,注入井的岩心破裂对于聚合物提高采收率的面积扫油效率和对于凝胶调剖效率也有着很大的影响。

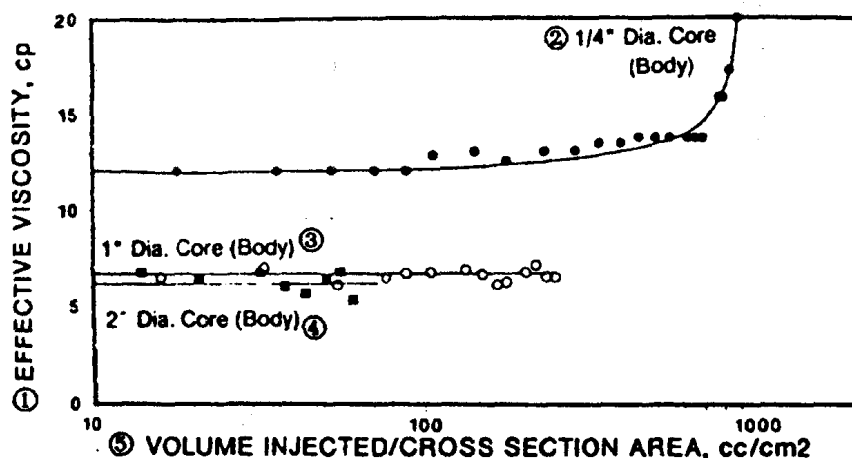


图6 分子量大小对于聚合物堵塞的影响

①压力/原始压力比值,②聚合物注入长度,英尺,③油田岩心 core A 在残余水饱和度下原始油相渗透率为 80 毫达西,解堵后盐水渗透率为 50 毫达西,注入 7.4 厘泊的聚合物溶液,④油田岩心 A 在残余水饱和度下原始油相渗透率为 80 毫达西,解堵后盐水渗透率为 35 毫达西,注入 2.7 厘泊聚合物

7. 降低聚合物堵塞预处理方法

(1)预注入石油磺酸盐 预先注入石油磺酸盐(6%浓度的 Neodol25-3S)有助于延缓已进行过 2%柠檬酸或 2.5%的 Wrtco 10-410)及少量 1.5%次氯酸钠处理过岩层聚合物堵塞的发生。

(2)应用有机阳离子处理井筒来减少聚合物堵塞,向井中定期注入加有氯化已胺的聚合物溶液,由于岩层中粘土与有机阳离子之间的离子交换,使有机阳离子占据所有进行离子交换的岩石表面,由于有机阳离子的烃基与极性聚合物之间的作用力较弱,从而降低聚合物对地层堵塞的可能性;

(3)通过压裂或射孔方法增大注入井井筒的流过面积,以减少井眼附近的堵塞。

(4)对于含有较高三价铁的地层和溶液,在过滤的聚合物溶液中加入 100ppm 的柠檬酸,可以控制因三价铁离子对聚合物的污染,从而可以避免注入能力的下降。

(六)新型聚合物的研究

由于北美 200 个油田中有 900 个油层的温度大于 76℃。研究认为当油层温度大于 76℃,对于二价金属离子含量高的地层,聚丙烯酰胺已不适于调剖及聚合物驱。聚合物的水解程度也受到温度的影响,当温度超过 76℃—82℃,硬度超过某一阈值后,水解后的聚合物将失去粘度及凝胶强度。Drilling Specialties 公司研制出一种称为 HE™或 Hostil Enviroment 的新型合成水溶性聚合物,在 121℃条件下,可保持稳定一年以上。此种新型聚合物在 110℃条件下可用于高硬度束缚水油藏的调剖,以及 121℃下应用海水配制聚合物驱溶液。

另外一家公司生产了一种称为 Cranatrol 465HT 系列的聚合物,这种合成水溶性聚合物,它们通过在水中的溶液聚合或反相的油包水乳状液聚合作用生成,分子量由 100 万至 1750 万。

新型聚合物在 90℃下至少保持稳定性 2 年,在老化 660 天以后仍然保持其初始粘度的 2/3,而未出现沉淀及胶凝情况。应用红外线光谱、C¹³及核磁共振分析指出,水解程度为 40%以内,而在 90℃时水解程度达 80%,随后保持稳定。

聚合物溶液的粘度与聚合物浓度的关系如图 7 所示,即聚合物溶液的粘度随分子量增大而增大。在剪切速率为 1 至 10 秒⁻¹范围内均可用于流度控制。稀释的 Cranatrol 465 HT 聚合物溶液可

看作为牛顿流体,其粘度与剪切速率无关,当浓度超过 1500ppm 时,溶液逐步变为假塑性流体。对于 Cyanatrol 465 HT H 高分子量聚合物,在所研究的浓度下均属于非牛顿流体。

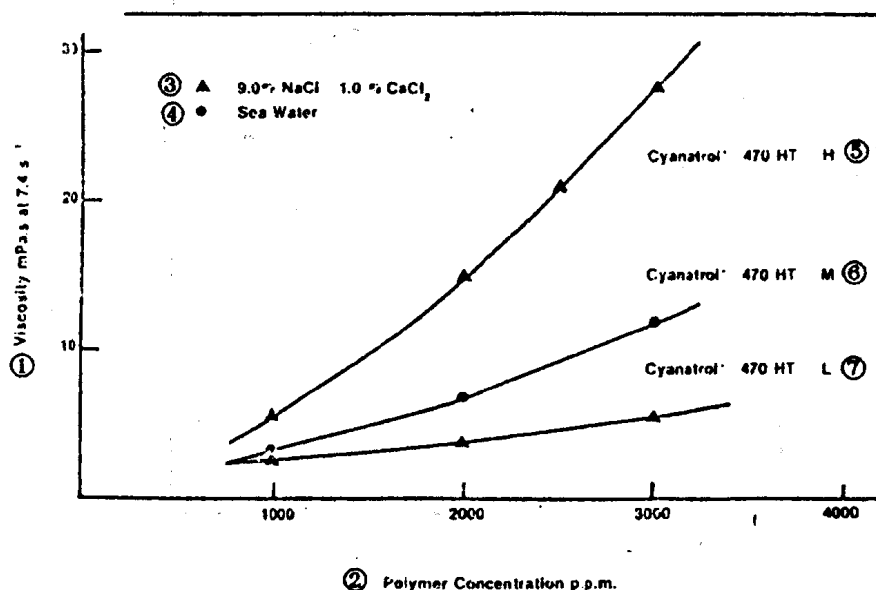


图 7 25℃下聚合物粘度与浓度的关系

① 7.4 秒⁻¹的粘度,毫帕·秒;② 聚合物的浓度,ppm;③ 9% NaCl 及 1% CaCl₂ 水配制的原液;④ 应用海水配制的溶液;⑤ 高分子量 Cyanatrol 470 HT 聚合物;⑥ 中等分子量的 Cyanatrol 470 HT 聚合物;⑦ 低分子量的 Canatrol 470 HT 聚合物。

机械降解 通过直径为 2 英寸渗透率为 200 毫达西的贝雷岩心驱替试验,过筛系数不同的两种 Cyanatrol 465 HT H 聚合物与阴离子型聚丙烯酰胺(30%摩尔)及聚环氧乙烷的机械降解状况如图 8 所示。由图中可以看出 Cyanatrol 465 HT 聚合物具有极强的抗机械剪切能力,在流速为 270 英尺/日条件下,过筛系数为 26.9 的聚丙烯酰胺比过筛系数高一倍(50.2)的新型聚合物的降解大 20%。

新型水溶性聚合物除了在高浓度二价金属离子盐水中具有长期的热稳定性、较好的注入能力、极佳的抗机械降解能力,而且在高温条件下溶液粘度的损失远远低于聚丙烯酰胺。在环境温度下其在岩层中吸附数量大约为阴离子聚丙烯酰胺的 1/3 左右。

(七)有关聚合驱模拟研究的进展

近几年关于聚合物驱模拟研究工作又有了很大进展,此处仅将描述孔隙介质中地下聚合物流变模型、层状地层中聚合物驱以及将聚合物渗流物理学中基本概念引入油藏模拟工作做一简要介绍。

1. 孔隙介质中聚合物流变性研究

在进行聚合物驱时,其地下流变性是指聚合物溶液流过孔隙介质时所呈现出的压降/流速(或视粘度/流速)的状态。在孔隙介质流动时,聚合物的流变性是比较复杂的。研究的目的是将体积流变状态与孔隙介质中所观测的流变特性相关起来。应用孔隙介质中非牛顿流体的网络计算,再将比较真实的聚合物流体状态模型与孔隙介质中的网络模型相配合,通过求解最终非线性网络方程,可以预测宏观的地下流变特性以及有关微观流动方面的信息,以及由于非牛顿状态所引起的流变性

变化。

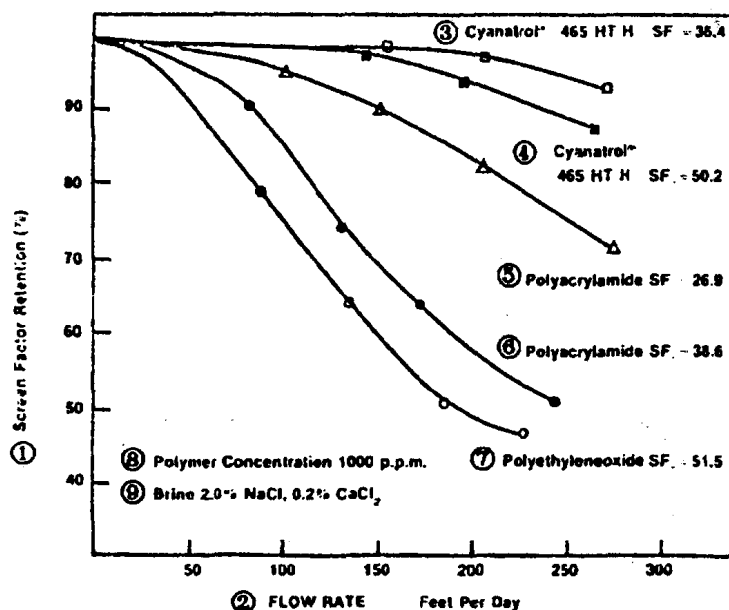


图 8 各种聚合物机械降解程度的对比

①过筛系数降低百分比,②流速,英尺/日,③Cyanatrol 465 HT H 过筛系数为 36.4,④Cyanatrol 465 HT H 过筛系数为 50.2,⑤过筛系数为 26.9 的聚丙烯酰胺,⑥过筛系数为 38.6 的聚丙烯酰胺,⑦过筛系数为 51.5 聚环氧乙烯烷,⑧聚合物浓度,1000ppm,⑨含有 2%NaCl 和 0.2%CaCl₂ 的盐水

非牛顿的网络模型的基本要求如下:

- (1)单元网络由给定的配位数构成,以毛管代表单元,并将配位数 φ 连接在一个矩形平面网络上。网络中的节点取决于无因次体积,并在整个研究过程中,网络中无附加的压降;
- (2)应用有效“孔隙大小”分布 $P(\gamma)$ 来随意设计二维网络中的毛管半径;
- (3)在网络毛管中,液体粘度/剪切速率的关系如下:

$$\eta(\gamma) = \eta_0 \{ (1 + (\lambda\gamma)^2) \}^{(n-1)/2}$$

式中 η_0 —低剪切速率下的粘度极限值; λ —时间常数; n —幂律指数。

利用迭代求解技术求解非线性网络方程。

对于孔隙介质中黄原胶的聚合物流变特性具有下述特点:

- (1)聚合物溶液呈假塑性状态,可以应用幂律模型来描述其广义的渗流量。在低的流动速率下,对于相当稀的溶液,可以视粘度来量度牛顿流的平缓段;
- (2)孔隙介质中聚合物溶液的幂律指数 n_{pm} 接近于体积溶液所观测到的 n 值,可能稍大一些,即视粘度 η_{app} 与孔隙介质中视剪切速率 γ_{app} 关系曲线的斜率在剪切变稀范围中比较平缓。由于表面排斥和衰竭层的影响,可能达到较大的 η_{pm} 值。如果液体只呈现幂律状态,则在容积与孔隙介质中的数值应当相同。

孔隙介质中的视剪切速率 γ_{app} 可根据下式计算出来:

$$\gamma_{app} = \frac{C(3n+1)^n}{4n} \frac{U}{\sqrt{K\varphi}}$$

$$\text{或 } \gamma_{app} = \frac{\alpha 4U}{\sqrt{8K\sigma}}$$

式中 n 为容积液体的幂律指数; U 为达西速度, K 和 ϕ 相应为孔隙介质的渗透率及孔隙度; C 为一取决于孔隙介质曲折度的常数; 指数 μ 在一些研究中可规定为 1 或 $n/n-1$; α —与孔隙介质特性有关参数, 一般对于砂岩来讲, 其数值为 3~5。

(3) 在低于牛顿平缓段的视粘度, 在相同聚合物浓度下, 在孔隙介质中的流变断面图的数值比在容积中数值低, 这些归结为表面排斥和衰竭层现象, 由于靠近孔隙壁处低粘流体产生明显的滑脱效应。

2. 新的聚合物驱软件的研制

为了对变化多端的矿场聚合物驱进行完整的描述, 将聚合物渗流物理学中的基本概念引到油藏模拟中。

新的聚合物驱软件为一种与三相多元模拟程序相配合, 它们包括聚合物、离子及示踪剂在水中的传递、弥散—扩散定律方程, 因此能够模拟较宽分子量分布的聚合物的影响, 而且利用不同分子量拟组分来描述聚合物, 以及根据聚合物组分的局部分布来处理渗透率降低及递减的流变性。软件中包括与聚合物分子量密切相关的吸附和孔壁排阻的竞争性色谱分离的影响。

由于目前聚合物驱数值模拟采用的输入数据只能描述聚合物宏观状态, 而模拟软件 SCORPOL 是在原来聚合物驱软件已经引入高分子在溶液中特征(因次、多分散性及化学特性)以及它们与岩石相互作用(吸附层的吸附密度及厚度), 并且考虑了孔隙介质中孔隙度、渗透率、粘土含量局部特征以及含盐量及流动条件对聚合物驱的影响。

3. 层状地层中聚合物驱动态的模拟

通过模拟研究垂向非均质多层油藏中聚合物驱的动态。研究认为尽管向地层中连续或以段塞形式注入高粘聚合物溶液, 由于层间的干扰, 使得普通聚合物的结构粘度不足以补偿由于油层非均质性所造成的流度比方面的巨大差异, 因而不会获得活塞式驱替。

通过研究认为, 在应用非牛顿液体进行段塞驱, 在预冲洗过程中, 最高渗透率层中的平均特征粘度急剧下降, 而在最低渗透率层中仍然保持不变。向多层地层中注入高粘聚合物溶液, 由于高渗层中液体的强制吸入, 而会检测出液体粘度的迅速增大, 由于在饱和聚合物层中流度可能极大地下降, 从而引起所有低渗层中可测粘度的变化。而进入后冲洗阶段, 高渗层中的聚合物将会迅速地水驱出, 由于其它低渗层中粘度较大而停止流动, 低渗层中所存在的聚合物将会降低以后注入水驱油的机会。

当应用非牛顿流体通过各层后, 当聚合物溶液离开注入井筒后, 粘度将继续增大, 一直到零剪切速率, 然而在其它层段由于吸收加快, 使注入液体产生重新分布, 将导致粘度下降。

当段塞尺寸设计合理, 而操作计划又恰当时, 应用非牛顿聚合物溶液将可以获得两种效益: (1) 粘度的增大能够暂时补偿弥散、吸附和降解所带来的不利影响; (2) 层间的高粘度差, 也可促进低渗透层对液体的加快吸入。

在此种情况下, 应用段塞驱油中产生“活塞式”驱替的机会比连续注入时还小。形成“活塞式”驱的前提是在所有层中液体的数量应当相同, 然而即命名注入非牛顿聚合物溶液, 由于地层非均质性非常严重, 因此对于不同的层其吸收的聚合物溶液在数量上仍然存在着较大的差异, 因此永远不会出现“活塞式”驱替。

应用流变模型还可以评价其它物理化学参数的影响。在综合研究中已经考虑到预冲洗液的体积、段塞尺寸、聚合物类型及浓度、非离子电解质的存在、降解、聚合物滞留、注入速率、储层参数等

动态及体积清扫效率。

研究结果认为,如果聚合物驱液体呈非牛顿液体状态,如果再配合好化学剂设计及适宜的水动力学设计,可使波及系数增大 10—20%,采收率增加 6~12%。

(八)聚合物驱工程实施中一些问题的研究

国外在进行聚合物先导试验中积累了一些经验,值得我们借鉴,其中包括聚合物对油田生产所带来的问题、聚合物段塞粘度及分子量选择、示踪剂监测、产出流体的表征方法以及聚合物效果的估测,现简述如下:

1. 注聚合物对油田生产所带来的问题

在注聚合物时,如果应用产出油田水配制聚合物溶液时,水中所含二价钙镁离子会导致聚合物溶液的降解。采出污水中所含铁离子、细菌、垢及缓蚀剂及其它有机污染物对聚合物有不良的影响,因此在使用前应进行预处理。

聚合物一旦窜入到生产井,由于粘度较大,并含有一些悬浮固体颗粒,对于油水分离将会带来一些不利影响,但无详细报道。

在美国北 Oregon 盆地 Byron 油田,由于注入的聚合物溶液过早地突进到生产井,因聚合物溶液所携带固体产生的磨蚀作用,生产井内的流体使抽油杆及油管的损坏数量增大。由 1982 年未注聚合物时的 42 次/年,增加到 1984 年的 266 次,1985 年又下降到 244 次。一般在有问题的井中下入抽油杆导向器,就能降低抽油杆与油管之间的磨蚀,或者对抽油杆柱表面进行金属喷涂处理。

有些矿场在注入聚合物后 3~4 个月,出现油井停抽情况,这是由于聚合物在地层中的滞留及对一些流动通道的堵塞,使地层中流体传导能力下降所致,一般可将泵下的深些或改用小排量泵加以解决。

聚合物粘附在抽油杆上,为斑点腐蚀创造了条件,一般可沿环空定期(每周)注入非水溶性的持久性生膜胺类缓蚀剂加以解决。

2. 聚合物段塞粘度及分子量的选择

目前在段塞粘度设计时是根据油、水相粘度比加以考虑,得克萨斯州 Hitts 湖矿场的经验认为,在选择聚合物的设计粘度时,根据用于胶束驱的 Gogerty 方法,根据所测出的油—水相对渗透率数据,提供一个在驱替过程中与所预计的最不利的油—水流度相拟合的流度。

根据 Hitts 湖几口井岩心所绘出的两相油水相对渗透率曲线如图 9 所示。束缚水饱和度为 10%,端点油饱和度为 30%,此相对渗透率曲线可用来估测驱替过程中油—水带处能加以预计的最低流度。在不同含水饱和度时的油、水相对渗透率可与适宜油、水粘度相配合,用来计算作为各油、水流度之和的总流度。由图 9 可以看出,预计的最小总流度为 0.17 厘泊⁻¹,它代表着在油—水带处的最低流度,因此聚合物段塞的设计应与最不利的流度比相拟合。

为了使设计的聚合物粘度与流度相拟合,可以假设聚合物的相对渗透率在驱替相中为 1,由于在水驱或聚合物驱中残余油是不能流动的,100%的含水饱和度永远达不到,要求设计的粘度大些,在此条件下聚合物段塞设计粘度为 6 厘泊。应用 6 厘泊的聚合物,使粘度比为 0.72,可以形成较好的油带。为了保证聚合物的粘度在地层保持 6 厘泊,在设计地面聚合物粘度时就考虑上热力及机械降解所导致的粘度损失,以及聚合物与高含盐度地层水接触时的附加损失,聚合物吸附所引起的损失。应当使设计的粘度过量,而不要设计不足,因此地面粘度达到 82 厘泊。地下与地面粘度关系如图所示。