

改善聚合物驱油技术研究

王克亮 王凤兰 李群 袁涛 编著



大学(北京)

357.46
006

社

石油工业出版社

新华书店

PDG

登录号	127346
分类号	TE357.46
种次号	006

改善聚合物驱油技术研究

王克亮 王凤兰 李群 袁涛 编著



石油0121205

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是作者从事改善聚合物驱油技术研究成果的总结。介绍了国内外聚合物驱油技术的发展概况和大庆油田聚合物驱矿场应用情况;总结了聚合物相对分子质量优选方法及聚合物驱后进一步提高采收率的技术;给出了聚合物驱前深度调剖技术和聚合物驱产出水利用方法的最新研究成果。

本书可供从事聚合物驱油技术研究和应用的科技人员及有关院校师生参考。

DPSE/23

图书在版编目(CIP)数据

改善聚合物驱油技术研究/王克亮等编著.

北京:石油工业出版社,1997.12

ISBN 7-5021-2220-6

I. 改…

II. 王…

III. 高聚物-化学驱油-研究

N. TE357.46

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 28157 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

大庆石油学院印刷厂排版

北京密云华都印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 9.75 印张 228 千字 印 1—1200

1997 年 12 月北京第 1 版 1997 年 12 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-2220-6/TE·1862

定价:20.00 元

前 言

近十年来,聚合物驱油技术在我国取得了长足发展,特别是在大庆油田发展更快,目前已进入大面积工业化推广应用阶段,聚合物干粉年注入量已达万吨以上,其规模在世界上处于遥遥领先地位。为适应聚合物驱油技术发展的需要,大庆油田、大港油田的有关专家和技术人员已对聚合物驱油技术的实践经验进行了总结,发表了具有时代意义的论著。本书作者长期参加大庆油田聚合物驱油技术的攻关研究,承担有关聚合物驱油机理及改善聚合物驱油效果的研究工作,现将改善聚合物驱油技术方面的研究成果整理成册,以期与同行进行交流,共同推动聚合物驱油技术水平的进一步提高。由于作者学术水平有限,缺点和错误在所难免,恳请读者批评指正。

本书由王克亮、王凤兰、李群、袁涛编著,高振环对全书进行了审校。本书作者所进行的研究工作是在高振环研究员的直接带领下完成的,并得到了大庆油田科技处、大庆油田勘探开发研究院采收率室、大庆石油学院科研处、大庆石油学院石油工程系的大力支持;编著本书涉及大量实验数据,参加实验工作的有大庆石油学院卢祥国、伍如意、闫文华、宋合龙、宋文玲、王宝辉、孙立滨同志,中科院渗流流体力学研究所的刘德庭、田根林同志,在此一并表示衷心感谢。

作 者

一九九七年十月

目 录

第一章 聚合物驱油概论	(1)
第一节 聚合物驱油方法描述.....	(1)
第二节 聚合物驱油基本原理.....	(1)
第三节 适合聚合物驱油藏的筛选标准.....	(6)
第四节 国内外聚合物驱发展概况.....	(8)
第五节 聚合物驱油矿场应用效果评述	(25)
第二章 聚合物驱相对分子质量优选物理模拟研究	(27)
第一节 引言	(27)
第二节 聚合物物性参数测试及其分析	(28)
第三节 聚合物相对分子质量与阻力系数和残余阻力系数关系的实验研究	(32)
第四节 聚合物相对分子质量与岩心渗透率变异系数匹配关系的实验研究	(36)
第五节 聚合物流过多孔介质时剪切降解的实验研究	(42)
第六节 聚合物相对分子质量与驱油效果关系的实验研究	(46)
第七节 聚合物相对分子质量优选方法研究	(48)
第三章 聚合物驱产出水利用方法研究	(60)
第一节 引言	(60)
第二节 实验用水及聚合物	(60)
第三节 聚合物在产出水中的溶解性能测试实验	(61)
第四节 产出水配制聚合物溶液的粘度损失及其影响因素实验研究	(62)
第五节 多孔介质对聚合物溶液剪切降解的实验研究	(65)
第六节 产出水配制聚合物驱油效果物理模拟实验研究	(69)
第七节 小结	(73)
第四章 聚合物驱前深度调剖技术研究	(74)
第一节 引言	(74)
第二节 调剖技术分类及发展状况	(74)
第三节 大庆油田非均质人造油层物理模型的研制	(76)
第四节 阴、阳离子型深度调剖技术研究.....	(80)
第五节 胶态分散凝胶深度调剖技术研究	(84)
第六节 聚合物凝胶处理注入时机和窜流对水驱原油采收率影响 的数值模拟研究	(93)
第七节 窜流和层间渗透率差异对聚合物驱和水驱过程中凝胶处理 效果的影响.....	(103)
第八节 非均质系统中层间发生窜流时的凝胶布置.....	(113)
第九节 油田应用实例.....	(125)

第五章 聚合物驱后进一步提高原油采收率技术研究..... (133)

第一节 聚合物驱后剩余油分布规律研究..... (133)

第二节 聚合物驱后进一步扩大波及系数的实验研究..... (138)

第三节 聚合物驱后应用表面活性剂进一步提高洗油效率的实验研究..... (143)

参考文献..... (148)

第一章 聚合物驱油概论

第一节 聚合物驱油方法描述

聚合物驱是一种改善的水驱方法,它使用聚合物作为添加剂,在注入水中的浓度为 250~1500mg/L。聚合物溶液增加水的粘度,改善水油流度比,与不含添加剂的水驱相比,使油层波及效率提高。目前常使用两种类型的聚合物,一种是合成聚合物类,如部分水解聚丙烯酰胺;另一种是生物作用生产的聚合物,如黄胞胶(Xanthan gums)。

除了增加水的粘度外,聚丙烯酰胺还改变油层岩石的渗透率。当油层岩石的渗透率降低时,使用较低的聚合物浓度,可以获得相等的流度控制。然而,聚丙烯酰胺是盐敏性的,需要用淡水配制聚合物溶液。聚丙烯酰胺在剪切应力作用下,会发生机械降解。因此,在地面配制时应特别小心,尽量避免剪切降解。

黄胞胶对盐不敏感,并能抵抗机械剪切作用。因此,它易于用矿场注入泵和有关油田设备进行处理。它的主要缺点是堵塞地层和易受细菌的影响。堵塞物可用过滤的方法除掉。为了防止细菌降解,可加入杀菌剂。此外,在提高采收率过程中,黄胞胶在油层环境中长期停留,当油藏温度高于 71.11℃ 时,其稳定性需要进一步验证。聚合物性质的差别,油层流体、油层岩石性质以及淡水水源等问题,都会影响聚合物的选择。

聚合物驱在注水早期,当可动油饱和度较高时应用最有效。然而,这种方法已经有效地应用于注水后期的油藏。资料表明,这种方法能够用来驱替油层渗透率 $20 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以上、油层温度高达 109.4℃、油藏中粘度高达 126mPa·s 的原油。聚合物的用量与水的矿化度和岩石类型有关。一般来说,矿化度越高、二价阳离子浓度越高,要达到相同的效果,就需要更多的聚合物。油层中粘土的含量越高,聚合物的损耗越大。

由于生物聚合物(如黄胞胶)成本高且易造成井底附近的井筒堵塞,在采油中广泛使用的是聚丙烯酰胺。到目前为止,报导使用黄胞胶完成的大规模矿场试验仅有一个。

第二节 聚合物驱油基本原理

聚合物驱虽然不能较大幅度降低水已波及区的剩余油饱和度,但由于它增加了油层的波及效率,因而超过了水驱时的采收率。这种方法在中等非均质、中等原油粘度以及存在不利水油流度比的油藏中最有潜力。在驱替粘度大的原油时,由于驱动水穿过油区而指进,波及系数不高。通过在水中添加聚合物来增加水的粘度以及降低侵入区油层的渗透率,使驱替稳定,并增加波及体积。

在裂缝油藏或渗透率严重非均质(常常是层间不均匀)的油藏中,问题之一是油井过早见水,甚至在油的粘度不高时,也会出现不良的水驱状况。应先用粘度大的段塞堵塞窜层,段塞的粘度与盐水的粘度比大约等于窜层的渗透率与油层其它部分渗透率的比值。通过逐个地进行分层控制,使不良的水驱状况得到改善,增加垂向或“侵入”波及系数以提高采收率。

一、流度比

水驱过程中流度比的概念和定义已由克瑞格(Craig)做过详细的讨论。由等式(1-1)

$$M = \frac{\frac{K_w}{\mu_w}}{\frac{K_o}{\mu_o}} = \frac{\frac{K_{rw}}{\mu_w}}{\frac{K_{ro}}{\mu_o}} \quad (1-1)$$

所确定的流度比,通常是指油井见水以前的比值; K_{rw} 是指注入水波及区域平均含水饱和度下的数值。虽然聚合物驱在一个油藏上早些开始更有希望获得成功,但是很多情况下,聚合物的注入是在油井见水以后开始的。因此,在聚合物驱过程中,用下面的表达式计算流度比更为合理:

$$M_{po} = \frac{\lambda_{rp}}{\lambda_t} = \frac{\left(\frac{K_{rp}}{\mu_p} \right)}{\left(\frac{K_{ro}}{\mu_o} + \frac{K_{rw}}{\mu_w} \right)} \quad (2-2)$$

式中 λ_p 和 λ_t 分别为聚合物段塞的相对流度和总的油—水带的相对流度。这些数值可以由实验室所测的天然岩心相对渗透率曲线确定。

通常在残余油饱和度下测量聚合物溶液的流度。水的相对流度是 K_{rw}/μ_w ,它在油井见水以前等于零。

一组典型的相对渗透率曲线如图1-1所示,由这些曲线计算的总的相对流度曲线在图1-2中给出。油水混合带总的相对流度随着饱和度的增加下降到一个最小值,然后又逐渐增加。在聚合物驱期间,饱和度的变化方向由图1-2曲线上箭头所指示。因此,在同一聚合物浓度下,在中等饱和度的范围内(在总的相对流度曲线最小值处),聚合物驱期间的流度比由一个较低值增加到一个最大值。

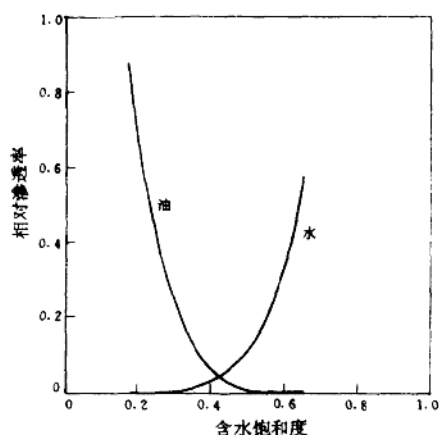


图 1-1 典型的水油相对渗透率曲线

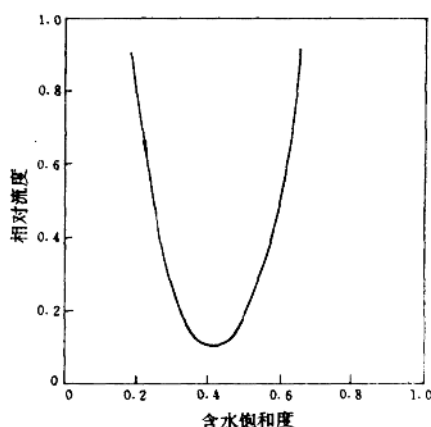


图 1-2 总的相对流度与水饱和度的典型曲线

当设计一个有效的流度可控制的驱替时,人们必须了解流体—岩石的性质及饱和度范围。一般来说,在均质油藏中,所考虑的流度比等于或小于1是有利的。聚合物驱的设计仅仅是为了改善流度比,因此,不象表面活性剂驱时作为驱动液所使用的聚合物,为了保护表

面活性剂段塞的完整,必须达到有利的流度比(小于1)。所以,与表面活性剂驱相比,聚合物驱可以用于粘度较高的原油。杰威蒂(Jewett)和斯卡兹(Schurtz)指出,在水油流度比大约为1~10的情况下,聚合物驱可使原油采收率有明显提高,而流度比在1以下时原油采收率的增值有限。莫里尔—西陶克斯(Morel-Seytoux)在五点法开发单元上,计算了流度比对面积波及效率(是累积注入量的函数)的影响,其结果(图1-3)与杰威蒂和斯卡兹的结果一致。然而,在垂向波及效率不好的情况下,使流度比降到1以下,可以有效的提高原油采收率。

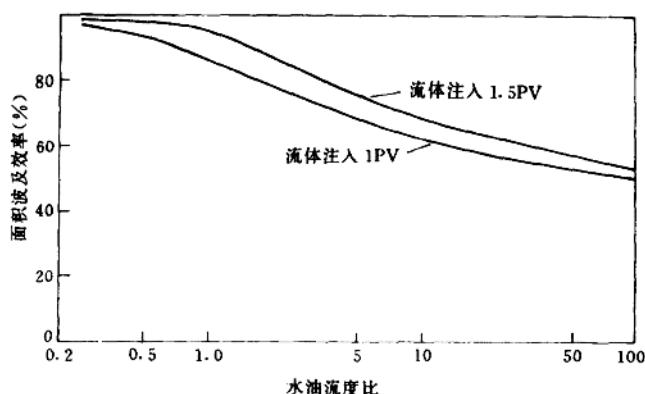


图1-3 流度比对面积波及效率的影响

二、聚合物的特性

上述两种聚合物溶液都呈现为非牛顿剪切降粘特性。图1-4和图1-5描述了这些聚合物溶液典型的粘度—剪切速率关系曲线。通常在实验室里使用布氏粘度计测定这种剪切降粘的性质。然而,由于岩石内的剪切速率不好确定,所以,在油藏内确定聚合物溶液的粘弹特性是比较复杂的。剪切速率与流速、岩石性质有关的等式已得到应用:

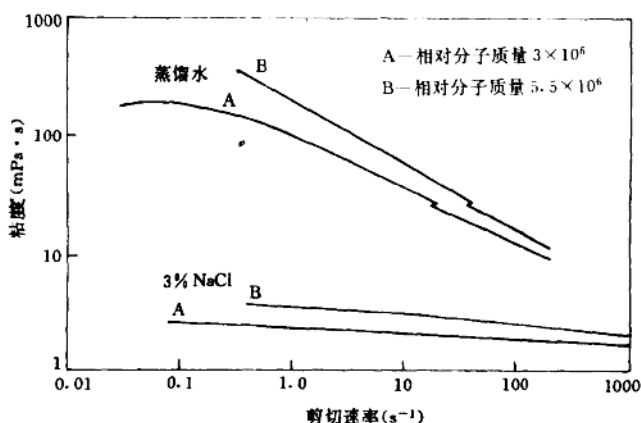


图1-4 500mg/L 聚丙烯酰胺溶液的粘度特性

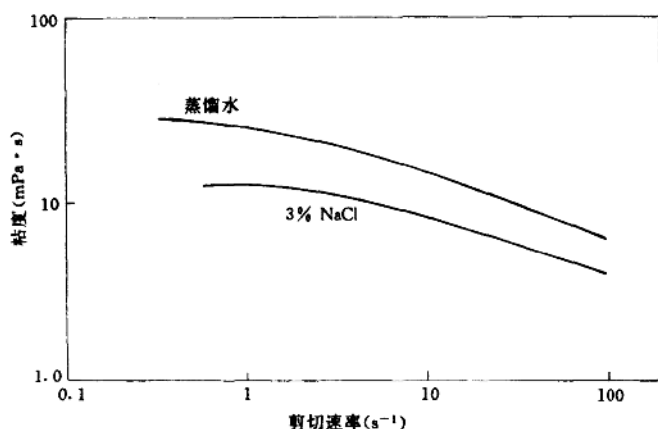


图 1-5 500mg/L 黄胞胶溶液的粘度特性

$$\dot{\gamma} = \frac{Cv}{\sqrt{K\phi}} \quad (1-3)$$

式中 $\dot{\gamma}$ ——剪切速率；

v ——流速；

K ——岩石渗透率；

ϕ ——岩石孔隙度；

C ——常数；

除剪切降粘的性质外,聚丙烯酰胺溶液还有粘弹性。金宁(Jennings)等人对其进行了描述,图 1-6 给出在贝雷砂岩中这种性质的例子。他们使用阻力系数 F_R 描述流度降低的性质,

$$F_R = \frac{\lambda_w}{\lambda_p} = \frac{\frac{K_w}{\mu_w}}{\frac{K_p}{\mu_p}} \quad (1-4)$$

并且用残余阻力系数 F_{RK} 来描述渗透率的降低。

$$F_{RK} = \frac{\lambda_{w1}}{\lambda_{w2}} = \frac{K_{w1}}{K_{w2}} \quad (1-5)$$

阻力系数由岩心注入数据确定。因为筛网系数测量方法简单,所以在初步评价中有时还用了筛网系数。为了把阻力系数和筛网系数与粘度联系起来,需要大量的岩心注入试验。然而,人们不能把这种相互关系应用到不同的聚合物—岩心体系中去。

聚合物的相对分子质量对粘度和降低流度的影响在图 1-4 和 1-6 中是明显的。在给定的剪切速率或流速下,聚合物的相对分子质量越高,降低流度的作用就越大。渗透率下降的程度(或残余阻力系数)也随着聚合物相对分子质量的增加而增加。其它类型的聚合物,如 HEC(多细胞氧化乙烯)和 PEO(聚乙烯氧化物),已建议在实验室里作为聚合物驱中水的增粘剂进行试验。HEC 像多糖那样,对含盐量和剪切是不敏感的,并在较高的温度($> 93.33^\circ\text{C}$)下是稳定的。然而,该化合物与多糖或聚丙烯酰胺任何一个相比剪切降粘都小,但

要达到同样的粘度需要较高的浓度。PEO 像聚丙烯酰胺那样,对盐和剪切降解作用十分敏感,在相同的浓度和矿化度下,与聚丙烯酰胺相比粘度更低。此外,PEO 在光照射下是不稳定的,并由于剪切降解作用,粘度和筛网系数会大大降低。HEC、PEO 和其它种类的聚合物驱尚未进行大规模的矿场试验。

三、水矿化度对聚合物特性的影响

水的矿化度严重地影响聚合物溶液的吸附作用、流度及渗透率的降低。向聚合物溶液中加入盐,首先引起分子的变形,由有点扩张变得更接近于球形。图 1—4 和 1—5 表明,当 3% 的 NaCl 加到溶液中时,粘度出现大幅度的下降。在低剪切速率下,聚丙烯酰胺的粘度降低大于 90%,而对黄胞胶的影响就不那么严重。渗透率的下降不象粘度对矿化度那样敏感。

二价阳离子(如钙)比钠离子对流度降低的影响更为显著。史密斯(Smith)指出,少量的钙会引起聚合物溶液效能的急剧下降。马克(Maerker)发现聚丙烯酰胺溶液的剪切降解在矿化度高的盐水中更为严重,钙离子比钠离子对剪切降解更有害。

四、聚合物的吸附

聚合物的吸附量取决于聚合物的性质及岩石表面的性质。聚合物在固体表面上的物理吸附,以及由机械捕集引起的聚合物的滞留,对聚合物在油藏中总的滞留量都起作用。总之,已经观察到了有关聚合物吸附作用的三种现象:1)室内试验得出的吸附量,常常比矿场的结果高;2)与松散岩心相比,在胶结岩心上的吸附作用非常小;3)吸附作用随着水矿化度的增加而增加。

典型的实验室吸附值范围介于 30~数百微克/克。但往往不能由室内结果外推来预测聚合物在油藏中的吸附作用。

聚合物的滞留也是很重要的。马克断定,由于实际油层流速较低,在油层条件下聚合物的滞留通常少于实验室测量的数值。

五、不可及孔隙体积

因为存在着吸附和不可及孔隙体积,所以聚合物溶液在孔隙介质中传播的速度与水不同。吸附作用使聚合物段塞前缘以比水带低的速度移动,而不可及孔隙体积则使聚合物段塞以比水带高的速度移动。两种因素联合作用,引起一个较小的交替推进的前缘段塞。这种不可及孔隙体积的现象,首先由道森(Dawson)和兰兹(Lantz)进行了报道。他们指出,聚合物分子不能进入所有的孔隙体积,这就可能使聚合物溶液以较快的速度(与以总孔隙为基础所预计的速度相比)前进和驱替原油。他们还根据室内试验的结果推断,在所使用的岩心模型上大约有 30% 的总孔隙体积,聚合物溶液是不能接触的。

不可及孔隙体积对现场应用会产生有利的影响。由于聚合物溶液所接触的岩石表面比总孔隙的表面要小,这样将减少聚合物的吸附量。更主要的是,如果在聚合物不能进入的小

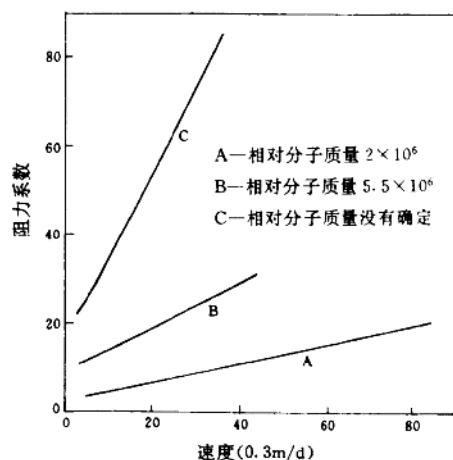


图 1—6 聚丙烯酰胺溶液(500mg/L, 3%NaCl) 在贝雷砂岩中的粘弹特性

的孔隙中有束缚水存在的话,那么,束缚水和在聚合物地带的前面不含聚合物的注入水地带,由于不可及孔隙体积而减少。然而,在某些情况下,位于小孔隙中的可动油,将不能被聚合物接触,因此它们也不能被聚合物驱替。

六、技术问题

在设计一个正确的处理程序时,调查分析影响注入动态不良的原因是很重要的。必须说明和评价由井底附近的井筒堵塞引起的对流体注入性能的影响、由各种机理引起的聚合物降解以及对地面机械设备的选择,还必须考虑诸如聚合物在油层固体上的吸附程度、不可及孔隙体积以及聚合物与油层盐水的配伍性等。

1. 流体的注入能力

黄胞胶溶液与聚丙烯酰胺溶液相比,对矿化度和机械剪切不太敏感,然而根据文献报导,使用黄胞胶的大规模的矿场试验仅有两次。使用生物聚合物少的主要原因是成本高且易堵塞井底附近的井筒。当前制造的聚合物可能需要通过微孔过滤器过滤(投资和生产费用高),以防井底附近井筒的堵塞。这些堵塞问题可能是由于细胞的碎片或聚合物的交联引起的(聚合物或配制用水中杂质的催化)。某些变价金属离子(如铬和铁离子)和多价离子(如钙和镁离子),以及某些阴离子(如硫和磷离子)和蛋白质的有机化合物,都能促进微粒胶凝和/或交联的形成。在油田应用之前,必须对流体—流体和流体—岩石同各种杂质和离子之间的相互作用进行详细研究。好的水质是配制好的聚合物溶液的先决条件。

许多处理方法,如粘土絮凝、酶澄清、化学处理、过滤等都已文献报导。亨克(Tinker)等人利用矿场测试取得的聚合物注入性能分析井筒的伤害问题。现在看来,酶澄清和硅藻土过滤是行之有效的方法。

2. 降解作用

聚合物溶液必须在油层条件下长期保持稳定。聚合物对于机械、化学、热和微生物降解作用是敏感的,但是,可以使用特殊的设备和技术来预防降解,使其降低到最小程度。各种降解机理的概况在表 1—1 中给出。

表 1—1 聚合物的降解机理

降解类型	敏 感 性		原 因	备 注
	聚丙烯酰胺	黄胞胶		
化 学	高	中等	阳离子 $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Mg}^{2+}$	二价离子更有害
化 学	高	高	变价金属离子	高温高 pH 值加重
化 学	高	高	酸或碱水解	有氧或高温加重
热	高 $>121.11^\circ\text{C}$	高 $>71.11^\circ\text{C}$	高 温	有氧或高 pH 值加重
微生物	中	高	酵母细菌、真菌	温暖和/或有氧加重
机械剪切	高	低	高剪切速率和高流量(如:通过阀、孔、低渗透层的流动)	二价和三价阳离子加重

第三节 适合聚合物驱油藏的筛选标准

当选择适合聚合物驱的油藏时,必须考虑诸如油藏温度、盐水的矿化度、可动油饱和度、

油水流量比以及油藏流体和岩石的性质等因素。因此,通常提出筛选标准,用以鉴别好的有潜力的选择对象。参考国内外已发表的有关聚合物驱的资料,提出了表 1—2 中所描述的筛选标准。应该认识到这些筛选参数仅仅作为近似的准则,人们对此还有些细微的分歧。如果一个油藏似乎是可能的选择对象时,就应该进行更广泛的研究。

表 1—2 聚合物驱油藏筛选标准

油层温度(℃)	
聚丙烯酰胺	<93
黄胞胶	<71
原油粘度(mPa·s)	20~100
水油流量比	>1
可动油饱和度(%PV)	>10
水油比	<50
油层平均渗透率($10^{-3}\mu\text{m}^2$)	>20
油层变异系数	0.52~0.84

1. 流量比

具有相当高(超过 50)或相当低(小于 1.0)水油流量比的油藏,应该避免使用聚合物,因为它们都需要特殊的考虑。流量比范围介于 0.1~42 之间已进行了成功的试验。如果没有可用的流量比,原油粘度可以作为筛选的依据。被推荐的原油粘度范围为 5~125mPa·s,如果其它参数是有利的,粘度范围可以考虑为 125~200mPa·s。对于高粘度原油需要过多的聚合物来改善流量控制,高浓度聚合物影响总的经济性和注入能力。

2. 油藏温度

聚丙烯酰胺在超过 121.11℃时降解,黄胞胶在超过 79.44℃时降解。这些最大温度极限是对氧、微生物、变价金属离子以及多价阳离子自由存在的体系而言的。

聚丙烯酰胺和黄胞胶现场试验的温度分别超过了 100.44℃和 76.67℃。使用聚丙烯酰胺时温度达到 93.33℃和使用黄胞胶时温度达到 71.11℃,现场应用是安全的。

3. 可动油饱和度

由于聚合物驱不能明显改善驱替效率,因此,可动油饱和度高的油藏(超过 10%PV)更适合聚合物驱。然而,某些特殊情况(如裂缝油藏,选择性堵剂可以有效地进行处理)也能使用聚合物驱,但所承担的风险要大。

4. 油藏渗透率

由于聚合物溶液的流动性比水或盐水的要低,因此,低渗透油层应避免使用聚合物驱。当向低渗透层注入聚合物时,会出现两个问题:1)降低注入速度会延长设计开采期限,超出了经济的限度;2)对于聚丙烯酰胺类聚合物,井底周围高的剪切速率会引起剪切降解。因此,渗透率低于 $20 \times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 的油藏应该避免使用。尽管在某些情况下,当控制聚合物质量和油井完井状况时,渗透率介于 $10 \times 10^{-3} \sim 20 \times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 的油藏也可以考虑,但使用时要小心。

5. 油藏类型

虽然大多数聚合物驱在砂岩油层中得到了矿场应用,但少数碳酸岩油层的注入情况也见到了鼓舞人心的结果,因此,聚合物驱的应用不应该只局限于砂岩油层。然而,当评价碳酸岩油藏时,由于它的不均质性和高的碳酸钙镁含量,应特别小心。全部为洞穴和裂缝严重的

油藏应该避免使用。

6. 油藏深度

应避免浅的和深的油藏。对于浅油藏,注入压力有一个限度。当遇到低渗透性时,压力限制特别重要。油层深度小于 152m 和渗透率低于 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,在聚合物注入之前,需要专门做注入试验。首要的是应避开深的地层,因为这些油藏通常油藏温度和水的矿化度高。由于不同地区地温梯度的差别,人们还不能建立关于深度的具体筛选标准。

7. 其它类型的限制

总之,导致聚合物段塞进入广阔的气顶、含水层、渗透率极高的贼层、水道或裂缝使聚合物过多损失的油层条件对作业是不利的,应避免使用。这些筛选指标不能定量表示,然而,它们提醒人们有必要做补充评价。值得注意的是,这些限制没有排除油藏由于渗透率的分层性而引起的不良的注入剖面 and/或过早的水突破。

第四节 国内外聚合物驱发展概况

一、国外聚合物驱的发展概况

聚合物驱在美国开始于 50 年代末和 60 年代初期,1964 年进行了现场试验。杰威特(Jewett)及斯卡兹(Schurtz)描述了在 1964~1969 年间开始的 61 个聚合物驱油藏的基本参数和试验条件,以及对这些试验成功与失败的评价。其中 16 个重要的聚合物驱矿场试验列于表 1—3。表中包括一些砂岩油藏的聚合物驱和一个碳酸盐岩油藏聚合物驱,深度变化范围 305~2207m,油层有效厚度变化范围 2.4~49m,渗透率最低的为 $23 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, Dykstra-Parsons 渗透率变异系数最高的达到 0.87,温度最高达到 109.4℃,原油粘度最高达到 120mPa·s,聚合物浓度变化范围 200~1000mg/L,段塞大小为 0.034~0.33PV。

在表 1—3 所列的 16 个例子中有 10 个的结果是鼓舞人心的或者是成功的。采收率增值最高的达到 8.6%。这些结果表明,聚合物驱可以成功地应用于油藏特性和流体性质范围很广的油田,但是也有几个失败的例子。矿场试验不成功的可能原因有:可动油饱和度低,原油粘度高,聚合物用量不足,盐水矿化度高,底水难以控制或窜槽严重,以及地面处理及注入能力有问题。根据室内试验和对油藏的分析恰当选择和设计聚合物驱,是现场试验成功的关键。

从 70 年代到 1985 年,美国共进行聚合物驱矿场试验 183 次。试验区内原油粘度的变化范围 0.3~160mPa·s,评价结果(表 1—4)表明,聚合物驱一般都取得了经济效益。有的项目虽然采收率没有提高,但仍有经济效益,这主要是经济刺激政策造成的。

从统计的 101 次采收率资料的矿场试验项目中发现,水驱后聚合物驱采收率提高值一般小于 5%。其主要原因是美国聚合物驱聚合物用量小,平均用量为 $46(\text{mg/L}) \cdot \text{PV}$ 。5% 的原油采收率增值是适当优选的结果,20 世纪 70 年代末期美国的税收政策以及直到 1986 年才出现的高油价,对美国的聚合物驱有重大的影响,他们并不想采出大量的原油,许多聚合物驱是利用税收政策而最大获益。

除此之外,聚合物驱在前苏联的奥尔良油田和阿尔兰油田,加拿大的 Horsefly Lake 油田和 Rapdan 油田,法国的 Chatearenard 油田和 Courtenay 试验区及德国、阿曼等都进行了工业性试验。原油采收率增值范围是 6%~17%,开始注聚合物时含油饱和度范围是 43.9%

表 1-3 聚合物驱矿场试验

油 田	开始时间	岩 性	孔隙度 (%)	渗透率 ($10^{-3}\mu\text{m}^2$)	变异系数	温 度 ($^{\circ}\text{C}$)	原油粘度 ($\text{mPa}\cdot\text{s}$)	水 油 流度比	聚合物浓度 (mg/L)	段塞大小 (PV)	结 果 评 价
N.E. Hallsville Crane	1963年5月	石灰岩	17	50		109	0.07~0.09	0.1	250	0.08	采收率提高 3.3%
Vernon	1963年10月	砂 岩	20.4	23~29	0.5	24	75	8.12	454	0.33	采收率提高 8.6%
Huntington Beach	1964年6月	Turb	34	2300	0.72	52	76	35	500	0.30	采收率提高 4.1%
Brea-Olinda	1967年以前	砂 岩	29	750		57	25~100	18	800	0.25	改善了波及效率
Taber South	早于 1967 年	砂 岩	26.3	2100		35	58.0		360~250	0.20	没有得出最终结论
Skull Creek	1967年9月	砂 岩	14.4	70		51	3.2		240	0.034	采收率提高 8.2%
Belum	1969年4月	砂 岩	29.3	399		44	9.8	5.4	389~375	0.25	采收率提高 8.6%
Wilmington	1969年7月	砂 岩	37.5	高	0.64	57	30.8	14.2	213	0.23	失败
North Burbank	1970年10月	砂 岩	11~32	1000~2000	0.87	47	3.0	2.5	250~25	0.18	采收率提高 1.6%
Taber Mannville D	早于 1971 年	砂 岩	23.2	1920		33	120		250	0.20	采油量增加
North Alma	1971年8月	砂 岩	18.1	110		52	29.5	10.8	304~500	0.19	降低了含水
Pembina	1971年11月	砂 岩	7~13	45		52	1.1		1000~100	0.04	高渗透率情失败
West Semlek	1973年9月	砂 岩	20.0	647	0.8	62	12.3	8.5	200	0.15	采收率提高 4.4%
North Stanley	1976年6月	砂 岩	18.0	300	0.75	41	2.2		285	0.17	失败
W Yellow Creek	1976年9月	砂 岩	26.7	167		52	18~20	10	600	0.18	一口井采油量增加
East Coolinga	1978年5月	砂 岩	26.5	50~480		38	25.0	14	500		采收率提高 2.8%

~57.5%，聚合物用量范围是123~729(mg/L)·PV。由于聚合物驱既一定程度克服了油藏非均质性造成的影响，又克服了不利的水油流度比，目前在世界范围内普遍受到重视。

表 1-4 183 次矿场试验评价结果

	成功的	有希望的	失败的	不能评价的	有经济效益的	没有利润的	不能评价的
次数	57	34	16	76	102	14	67
%	31	19	9	41	56	8	36

二、国内聚合物驱的发展概况

经过“七五”、“八五”国家攻关及与国外石油公司合作，三次采油技术在国内发展很快，并且受到各油田的普遍重视。特别是经过对我国注水开发油田提高采收率的潜力分析，对今后三次采油发展方向更加明确，已确定把聚合物驱做为我国近期内三次采油的主攻方向。目前聚合物驱已形成了较为完善的配套工艺技术，矿场先导性试验已普遍获得成功，工业性试验已取得了明显的效果。

继大庆油田矿场先导性试验取得成功以后，胜利油田、大港油田、河南双河油田、辽河油田也都进行了先导性试验，并普遍取得了成功，增油降水效果明显。由于大庆油田开展聚合物驱矿场试验最早，并且目前已进行了工业化推广应用，取得的经验最多，本文主要介绍大庆油田聚合物矿场试验的情况。

影响聚合物驱油效果的主要因素是地层水矿化度、油层温度以及油层的非均质性。地层水矿化度越高，聚合物增粘效果越差；油层温度高(>70℃)，聚合物将会发生热氧降解和进一步水解；油层越均质或非均质特别严重，聚合物驱油效果都会变差。大庆油田是陆相沉积大型砂岩油田，油层埋藏深度为1000m左右，油层温度为45℃左右，原始地层水矿化度只有7000mg/L，注入水矿化度只有400~1000mg/L，油层渗透率变异系数在0.5~0.8之间，因而，大庆油田采用聚合物驱油与国外一些油田相比具有得天独厚的优越条件。

大庆油田自1972年以来，已先后开展了小井距南井组S₁₇₊₈层特高含水期注聚合物试验、厚层试验区特高含水期(中心井含水99%)聚合物驱油试验、中区西部单层和双层聚合物驱油试验，以及北一区断西和喇嘛甸油田南块的工业性聚合物试验。所有矿场试验都取得了比较好的效果。这里重点介绍小井距、中区西部和北一区断西聚合物矿场试验的情况。

1. 小井距特高含水期注聚合物矿场试验

大庆油田的正韵律厚油层，是油田开发的主力油层。由于油、水粘度的差异及层内非均质的影响，注入水主要沿油层底部高渗透部位突进，使油井过早水淹，中、低渗透部位的作用得不到发挥，导致了注入水的波及体积小，水驱采收率低。为了扩大这类油层注入水的波及体积，改善开发效果，1972年9月在大庆油田小井距501井组，开展了注聚合物提高采收率的矿场试验。试验区采用反四点法面积注水井网，井距75m。注聚合物时，试验区的综合含水已达98%，水油比高达49。

试验所采用的聚合物是大连同德化工厂生产的部分水解聚丙烯酰胺胶体，这是一种阴离子型的高分子聚合物，有较好的水溶性和增粘性，其相对分子质量在300万~500万之间，浓度8%，水解度30%~40%。

(1) 试验区地质概况

萨₁₇₊₈油层是典型的正韵律厚油层，油层厚度大，井组平均有效厚度5.2m；渗透率高，

平均有效渗透率 $0.631\mu\text{m}^2$; 油层内部非均质严重, 上部为低渗透和砂泥薄互层, 中、下部为中、高渗透率砂岩, 平面上连通性好, 油层数据见表 1—5。

表 1—5 主要油层数据表

井 号	有效厚度(m)	有效渗透率(μm^2)	地层系数($\mu\text{m}^2 \cdot \text{m}$)
501	5.3	0.550	2.910
北 2—6—503	3.7	0.880	2.960
503	6.4	0.880	5.120
505	4.3	0.503	2.164
井 组	5.2	0.631	3.289

(2) 试验区开采概况

萨 I_{7+8} 层注聚合物前大体可分为三个开采阶段。

1) 强注强采提高采油速度试验阶段(1970. 11. 23~1971. 5. 19)。此阶段采用四点法加平衡井面积井网, 井距 75m, 采油井为 501, 503, 505, 北 2—6—50 井, 注水井为 502, 504, 506 井。历时 178d, 试验结束时, 采油井已处于特高含水期, 综合含水达 97% 以上, 其中 501 井已高达 99%。

2) 含水太高关井(1971. 5. 19~1972. 4. 21)。

3) 注聚合物前的试采阶段(1972. 4. 22~8. 30)。

注聚合物前, 对原井网进行了调整, 关闭了原来 502, 504, 506 三口注水井, 改 501 采油井为注水井, 503, 505, 北 2—6—50 井仍为采油井, 形成一注三采的反四点法井网(图 1—7)。

(3) 聚合物注入简介

在聚合物注入期间, 试验区压力略高于周围地区压力, 以排除试验区外的干扰。根据油层非均质严重, 聚合物段塞前缘采用较高的浓度, 使其起到调整剖面的作用。段塞前缘加入 0.41% 的甲醛溶液作为指示剂, 以观察聚合物突破时间, 聚合物注入过程中还加 0.06% 的甲醛以保证聚合物的稳定性。从 1972 年 8 月 30 日到 9 月 24 日, 历时 26d, 共用含量为 8% 的胶体聚合物 49.63t, 注入量为 3637.8m^3 , 占油层孔隙体积(按图 1—7 六边形面积计算)的 16.3%。注入数据详见表 1—6。

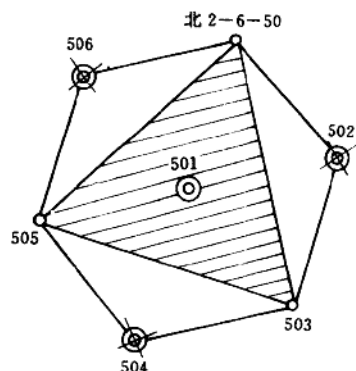


图 1—7 小井距 501 井组井位示意图

表 1—6 聚合物注入数据表

注入时间(d)	7	4	12	3	26
聚合物浓度 ^① (%)	1.5	1.0	162	1.5~1.8	1636
注入粘度(mPa·s, 45℃)	10	5	4~7	28	7.5
注入液量(m^3)	947.1	645.1	1720.4	316.2	3627.8
甲醛含量(%)	0.08	0.06	0.06	0.06	0.065

①表内聚合物浓度以商品浓度(8%)作为 100% 计算。