

石油科学进展

聚合物驱油

〔美〕W. 利特马恩

石油工业出版社

内 容 提 要

原理,较系统地介绍了用于提高采收率的聚合物化学;聚合物的物理学;适合聚合物驱油藏的筛选方法;油藏工程问题;聚合物的方法,并给出了几个聚合物驱矿场试验的典型实例,并进行了评价和展望。
文,特别是从事提高采收率工作的工程技术人员参考,也可以用工程、油田化学等专业师生的参考书。

W.LITTMANN

Developments in Petroleum Science 24

POLYMER FLOODING

ELSEVIER 1988

*

石油科学进展24

聚合物驱油

〔美〕W.利特马恩

杨普华 杨育森 译

*

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京朝阳区同兴印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米 16开本 7¹/₄印张 167千字印1—3,000

1991年8月北京第1版 1991年8月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0492-5/TE·471

定价:2.25 元

目 录

1. 前言	(1)
2. 聚合物驱的机理	(2)
3. 筛选方法	(6)
3.1 油藏几何情况	(6)
3.2 油藏岩石	(6)
3.3 油藏深度和温度	(7)
3.4 原油	(7)
3.5 地层水	(8)
3.6 聚合物的选择	(8)
3.7 阻力系数	(10)
3.8 注入性试验	(11)
3.9 热稳定性和化学稳定性	(12)
3.10 驱替实验	(12)
3.11 吸附	(12)
4. 用于提高采收率的聚合物化学	(13)
4.1 合成的聚合物	(13)
4.1.1 聚丙烯酰胺	(13)
4.1.2 其它合成聚合物	(14)
4.2 多糖类	(15)
4.2.1 羟乙基纤维素 (HEC)	(15)
4.2.2 黄原胶	(16)
4.2.3 其它的多糖类	(16)
4.3 降解机理	(16)
4.3.1 机械降解	(16)
4.3.2 化学降解	(17)
4.3.3 生物降解	(18)
4.3.4 聚合物溶液的稳定作用	(18)
4.4 聚合物的生产	(18)
4.4.1 合成聚合物	(18)
4.4.2 发酵过程	(19)
5. 用于提高采收率的聚合物物理	(21)
5.1 流变学	(21)
5.1.1 定义	(21)
5.1.2 摩擦定律	(21)
5.2 在圆柱形管道中的流动	(23)

5.2.1 通用流动方程	(23)
5.2.2 牛顿流体在管道中的流动——Hagen-Poiseuille定律	(24)
5.2.3 假塑性液体通过管道的层流流动	(24)
5.2.4 Reynold (雷诺) 准数	(24)
5.3 流动曲线的测定	(25)
5.3.1 毛细管粘度计	(25)
5.3.2 旋转粘度计	(26)
5.3.3 其它粘度计	(28)
5.4 分子尺寸, 结构和粘度	(29)
5.5 弹性粘度	(31)
5.5.1 弹性粘度的测定	(31)
5.6 聚合物溶液在孔隙介质中的流动	(32)
5.6.1 Darcy (达西) 方程	(32)
5.6.2 假塑性液体的流动	(32)
5.6.3 通过孔隙介质流动中的粘弹效应	(34)
5.6.4 驱替实验中压力降的计算	(34)
5.6.5 剪切稳定性	(35)
5.7 不可及孔隙体积	(35)
5.7.1 孔隙大小分布	(35)
5.7.2 弥散作用	(36)
5.8 吸附作用	(37)
5.8.1 吸附等温线	(38)
5.8.2 黄原胶的吸附等温线	(40)
5.8.3 吸附热	(41)
5.8.4 吸附等温线的测定	(42)
5.8.4.1 静态实验	(43)
5.8.4.2 流动实验	(43)
5.8.4.3 量热计方法	(44)
6. 聚合物提高采收率的室内实验	(47)
6.1 聚合物的混配	(47)
6.1.1 聚丙烯酰胺	(47)
6.1.2 黄原胶	(49)
6.1.3 羟乙基纤维素	(49)
6.1.4 聚合物溶液的剪切	(49)
6.2 稳定性试验	(50)
6.2.1 溶液的稳定性	(50)
6.2.2 长期热稳定性	(52)
6.2.3 生物稳定性	(53)
6.3 注入能力试验	(53)
6.3.1 滤过试验	(53)

6.3.2 在岩心柱和填砂柱上的注入能力试验·····	(54)
6.4 驱油试验·····	(57)
6.4.1 原油·····	(57)
6.4.2 孔隙介质·····	(57)
6.4.3 用水饱和·····	(58)
6.4.4 用油饱和·····	(58)
6.4.5 驱替试验·····	(58)
7. 油藏工程方法 ·····	(59)
7.1 油藏特征的评价·····	(59)
7.2 注入井·····	(59)
7.3 油藏中的压力分布·····	(60)
7.3.1 注入压力·····	(60)
7.3.2 压力试验·····	(61)
7.4 驱替井网·····	(62)
7.5 油藏数值模拟·····	(63)
7.6 聚合物的其它应用·····	(64)
7.6.1 剖面调整·····	(64)
7.6.2 聚合物驱和蒸汽驱·····	(65)
8. 地面和地下设备 ·····	(69)
8.1 注入水·····	(69)
8.1.1 注入水的准备·····	(69)
8.1.2 注入水的水质·····	(69)
8.2 聚合物的混配·····	(71)
8.2.1 装运·····	(71)
8.2.2 储存·····	(71)
8.2.3 粉末和胶状物的混配·····	(72)
8.2.4 液体聚合物的混配·····	(72)
8.2.4.1 聚丙烯酰胺乳状液·····	(72)
8.2.4.2 黄原胶发酵液·····	(72)
8.2.5 泵·····	(73)
8.2.6 静态混合器, 喷嘴和剪切装置·····	(73)
8.2.7 过滤器·····	(75)
8.2.8 材料, 控制装置·····	(76)
8.3 注入井·····	(76)
9. 典型例证 ·····	(77)
9.1 Chatea urenard 油田·····	(77)
9.2 北Stanley油田 ·····	(78)
9.3 Hankensbuettel油田·····	(79)
9.4 Eddesse-Nord油田·····	(80)
9.5 剖面调整·····	(80)

9.6 方案设计	(82)
10. 评价和经济	(84)
10.1 五点法井网的数值模拟	(84)
10.2 经济	(85)
10.2.1 产出油的价值	(85)
10.2.2 投资	(86)
10.2.3 举升费用	(86)
10.2.4 化学剂费用	(87)
10.2.5 专门费用	(87)
10.3 展望	(87)
符号和单位表	(89)
附录	(91)
A. 多糖的化学结构	(91)
B. 产出油田水中的聚合物的化学分析	(93)
B.1 聚丙烯酰胺	(93)
B.1.1 浊度法	(93)
B.1.2 碘量法	(93)
B.1.3 氮的检测	(93)
B.2 黄原胶	(94)
C. 流动曲线的测定	(94)
D. 管道中压力降的计算实例	(96)
D.1 对水的压力降	(97)
D.2 对聚合物溶液的压力降	(97)
D.3 对黄原胶发酵液的压力降	(98)
E. 弹性粘度——驱替实验	(98)
F. 炮眼中的剪切应变速率	(99)
G. 孔隙介质中剪切速率的计算精度	(100)
G.1 不同方程的比较	(100)
G.2 与两相流的关系	(102)
H. 弥散作用的计算实例	(102)
I. 实验室内聚合物的混配	(103)
I.1 粉末的混配	(103)
I.2 乳液的混配	(103)
I.2.1 活化剂	(103)
I.2.2 混配水	(103)
I.2.3 罐贮溶液的制备	(103)
I.2.4 最终溶液的制备	(104)
I.3 剪切	(104)
I.3.1 剪切板的设计	(105)
J. 氢氧化铁和氧化铁的化学	(106)

J.1 氢氧化亚铁	(106)
J.2 溶解的氢氧化铁（三价铁）	(106)
J.3 铁的稳定剂	(106)

1. 前 言

可能仅仅是个巧合,《科学的美国人》(Scientific American)在它的1981年1月的出版物上发表了两篇初看起来彼此毫无关系的文章。

其中一篇是Menard (1981年)的文章,这篇文章论及了美国仍可能发现的石油资源,他的结论是发现新的含油超过 10×10^6 t (或1亿桶)的大油田的可能性不是很大的。这个判断很快导致了对新的石油需求不仅靠勘探上做出更大的努力,同时还要依靠提高现有油藏生产能力的结论。

另一篇文章论述的是凝胶及它们的性质。在Tanaka (1981年)的研究中,他选择了聚丙烯酰胺,这是一种在近年来聚合物驱提高石油采收率中越来越重要的水溶性聚合物。

油藏的生产历史可以分为几个不同的阶段。众所周知,第一阶段是原油自由地从油藏流到生产井井底,但多数情况下这一阶段是非常短暂的。通常,在油藏开采年限内很早就必须向含有原油的孔隙介质中提供能量,以使原油能继续流到生产井。通过注水或注气把这个能量带入油藏。用这些二次采油方法大约可能采出30~40%的原始储量,而其余的必然留在地下。同样,为了采出这些留在地下的油,开发了三次采油方法。目前,这些方法仍是研究的课题。

把油留在油藏孔隙物体中的力是孔隙介质中流动着的油、水或气不同相之间的界面张力和原油的粘滞力。界面张力可通过注入表面活性剂(表面活性剂驱),或注入与原油混溶的气体(在高压下用 CO_2 的混相驱)来克服。油的粘度可通过加热油藏而降低,或使驱替相的粘度适应原油粘度,把一种水溶性聚合物加到注入水中就可以实现。这种称作聚合物驱的提高采收率方法正是本书研究的对象。

本书以聚合物驱依据的基本原理开始,包括了提高采收率用的聚合物化学、聚合物溶液在管道和孔隙介质中流动的物理学、实用筛选方法,油藏工程问题的要点以及在实验室和油田处理聚合物的方法。讨论了典型例证,并对这种采油过程的经济效益进行了展望。

参 考 文 献

Menard, H.W., Scientific American, Jan, 1981

Tanaka T., Scientific American, Jan 1981

2. 聚合物驱的机理

用水溶性聚合物驱替油藏可能是最经济的三次采油方法，尽管根据一般概念，聚合物驱并不增加油藏岩石的微观扫及效率，并认为聚合物驱之后残留于孔隙介质中的油的体积与水驱之后相同。因而，由水驱导出的物理定律也可以用于聚合物溶液的注入。原油和聚合物溶液的两相流动可以用相对渗透率概念来描述。Buckley和Leverett (1942年)推导的分流方程也可以用于聚合物溶液驱油的情况。

根据这些概念和Dyes, Caudle和Ericson (1954年)的实验工作，流度比

$$M = (k_w/\mu_w)/(k_o/\mu_o) = (k_{rw}/\mu_w)/(k_{ro}/\mu_o) \quad (2.1)$$

影响着面积扫及效率，如图2.1所示。

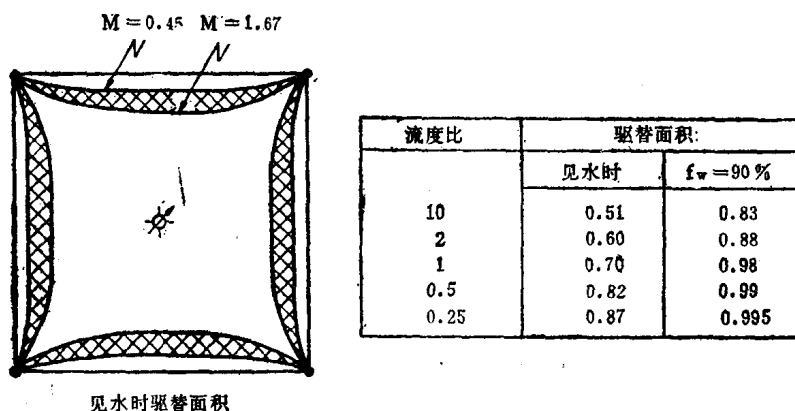


图 2.1 流度比对面积扫及效率的影响

在Dyes, Caudle和Ericson (1954年)进行的实验中，不同的流度比是用不同粘度的互溶油相获得的。在聚合物驱的情况下，流度比是通过稠化驱替水，比如把粘度增加10至50倍改变的。

根据Tunn (1974年)的工作，图2.2示出了粘度比对采收率的影响。图中曲线清楚地说明了采收率的提高与驱替相的粘度相关联。然而，在驱替足够多的孔隙体积倍数之后，束缚油饱和度，或者说残余油饱和度对所有粘度比都是相同的。提高的采收率是在较低的含水，实际上是在较低的举升成本下较早地采出的油量。

粘度和流度比对采收率的影响的上述解释并未考虑到在驱替过程中流度比并不是固定不变的事实，实际上它是随着流动相饱和度而变化的。水湿砂岩典型的相对渗透率曲线示于图2.3中。

粘度为 $1\text{mPa}\cdot\text{s}$ 的水和 $15\text{mPa}\cdot\text{s}$ 的聚合物驱替 $15\text{mPa}\cdot\text{s}$ 油的分流曲线：

$$f_w = 1/(1 + \frac{1}{M}) \quad (2.2)$$

也绘于同一图中。图2.3还给出了水驱和聚合物驱的前沿饱和度（分别用 S_{wi} 和 S_{oi} 表示）以及相应突破时的饱和度 S_{btw} 和 S_{btp} ，这些饱和度值是按Welge (1952年)方法求出的。聚

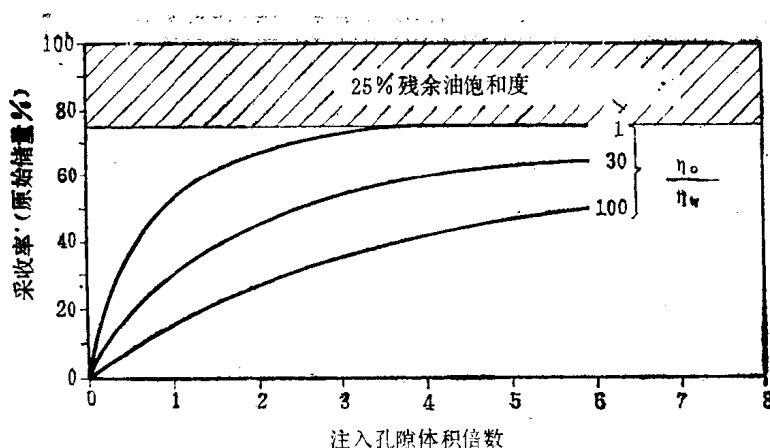


图2.2 根据Tunn的工作, 粘度比对采油过程的影响

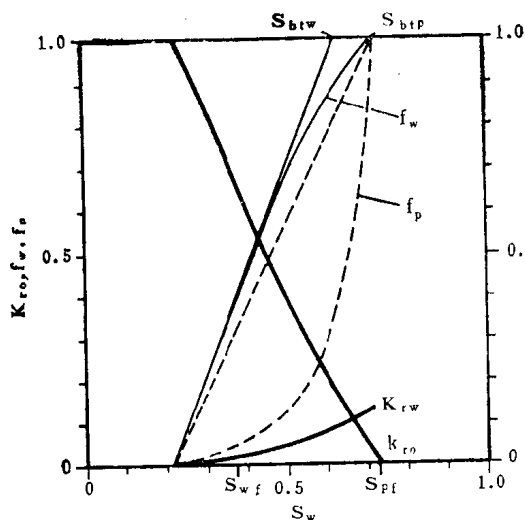


图 2.3 水湿砂岩典型的油、水相对渗透率曲线和水、聚合物溶液驱油的分流曲线(油粘度15mPa·s; 水粘度1mPa·s; 聚合物粘度15mPa·s)

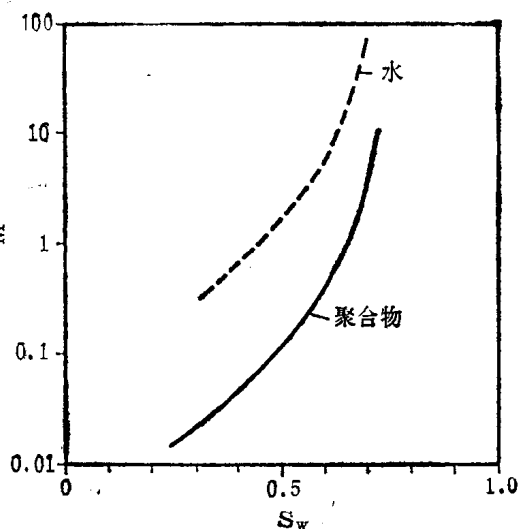


图 2.4 水和聚合物驱油时流度比随驱替相饱和度的变化

合物驱的前沿饱和度和突破时的饱和度都明显地高于水驱。这就反映出聚合物驱比水驱有更好的驱替效果。图2.4示出了相应的流度比。可以看到, 在低的水饱和度下水驱的流度比也可能小于1, 而在高的水饱和度下聚合物驱的流度比也可能变成大于1。

除了微观和面积扫及效率之外, 垂向扫及效率也决定着水驱的特性, 在很多情况下它比任何其它参数尤为重要。在讨论聚合物驱可能改善垂向扫及效率的机理之前, 引入有关准塑性流体流变学的一些概念是必要的。

对于水和油来说, 在多数情况下其粘度是一个固定值, 而聚合物溶液则或多或少不是这种情况。其粘度显然是剪切应变速率的函数。图2.5示出了聚合物驱通常应用的聚合物水溶液的流动曲线。

粘度, 或更准确地说是表观粘度, 在很宽的范围内可以作为剪切应变速率的函数而变化。在一个已确定的范围内, 这种行为可以用一个幂次定律来描述。

$$\mu_a = H\dot{\gamma}^{n-1} \quad (2.3)$$

对于液体的粘滞流动, 剪切应变速率是流动几何形态和流动速度二者的函数。对于在孔

隙介质中的流动，这就意味着在狭窄孔隙中的剪切应变速率高于在较大孔隙中的剪切应变速率；对石油油藏工程而言，在相同的达西速度下，低渗透带的剪切速率高于高渗透带的剪切速率。例如，在孔隙度为25%，渗透率为2000mD●的砂岩中对于0.2m/d的达西速度，对具有 $H=40\text{mPa}\cdot\text{s}$ 和 $n=0.6$ 的聚合物溶液来说，其剪切应变速率为 8.6s^{-1} 。对于相同的聚合物溶液并在相同的运动速度下，对于孔隙度为20%，渗透率为200mD的砂岩其剪切应变速率则为 30s^{-1} 。这就是说，在高渗透砂岩中流动着的聚合物溶液粘度(16.9mPa·s)比低渗透

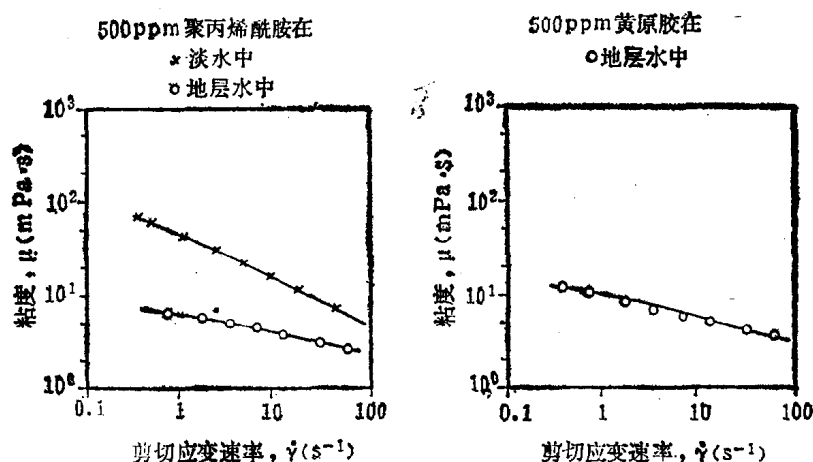


图 2.5 聚合物驱应用的聚合物水溶液的典型流动曲线

砂岩中的粘度(10.2mPa·s)大。

在二次采油或天然水驱时通常高渗透带优先被注入水侵入，低渗透带未被驱替，因而油留在油藏的这些部位中。在聚合物驱替过程中就可能改善这种差的垂向扫油效率，这是因为聚合物溶液自然地要首先流过水已经通过的通道，并且由于聚合物高的粘度趋于“堵塞”油藏的这些部分，这样原来不能流动的 oil 开始流动了。在油藏中，特别是在油未流动的区域内的压力梯度，聚合物驱时会比水驱时高。

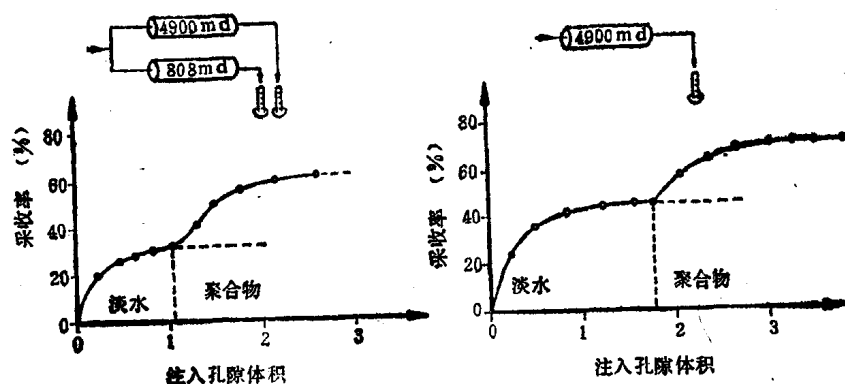


图 2.6 提高垂向扫油效率(根据Sandiford资料(1977年))

图2.6示出了Sandiford的驱替实验结果(1977年)。在两个平行驱替的渗透率不同的岩心体系中聚合物驱提高的采收率要明显地高于一个均匀渗透率岩心的情况。

● $1\text{D}=0.987\mu\text{m}^2$

参考文献

- Buckley, S.E. and Leverett M.C.: "Mechanism of Fluid Displacement in Sands", Trans. AIME (1942) 146 107-116
- Dyes, A.B., Caudle, B.H. and Ericson, R.A.: "Oil Production after Breakthrough - As Influenced by Mobility Ratio" Trans. AIME (1954) 201 81-86
- Sandiford, B.B.: "Improved Oil Recovery by Surfactant and Polymer Flooding", D.O. Shah, R.S. Schechter (editors) Academic Press (1977) 487-510
- Tunn, W.: "Gedanken über Einsatzmöglichkeiten von Tensiden zur Erhöhung der Ausbeute von Erdöllagerstätten", Erdöl - Erdgas - Zeitschrift (1974) 90 50-53
- Welge, H.J.: "A Simplified Method for Computing Oil Recovery by Gas or Water Drive", Trans. AIME (1952) 195 39-46

3. 筛选方法

由于聚合物驱并不是对每个油藏都是适用的，本章概述了最重要的筛选标准。在计划一个聚合物项目之前，详细地筛选油藏参数对于聚合物驱是否真正可行，哪种聚合物最可能成功，以及这个项目在技术效果和经济效益上是否成功可以给出一个初步的指示。

经常会遇到这种情况：一个特定油田的采收率低，生产含水高，因而石油生产的经济效益肯定是差的。在这种情况下，在开始进行耗资巨大的研究之前，急待选定一种适宜的提高采收率方法。

为了在更详细地研究之前，就聚合物驱对一个油藏是否适合做出清晰的判断，本章将提供一些帮助。不言而喻，取决于特定的油藏情况，对其中一点或其它点应给予不同程度的注意，并对其中某些点做进一步的研究可能也是必要的。

3.1 油藏几何情况

在为应用提高采收率方法，特别是化学驱方法筛选油藏时，首先应考察油藏的几何情况。

可能对具有底水的油藏进行化学驱是相当困难的、甚至是不可能的，这是因为在这样的油藏内化学剂的流动是不可能控制的，强烈倾斜的鞋带型油藏，驱动中难于控制化学剂的损失，也难于进行化学驱。如果这样的油藏仅有一个小的含油层，经济地设计一个驱替井网也是不可能的。实际上就是说，为了采出这些油必须设置太多的注入井和生产井。

对于有大的含水带的油藏，为控制流体的流动应该进行一些专门的工作。为了减少化学剂的损失，从注入井（一般都在油水接触带附近）到生产井的压力梯度应该足够大，为保持这样的压力梯度，在含水带可能要钻一些回压井，注一些水到含水带中去。这点对经济效益的影响不应置之不顾，因为化学剂进入到含水带的损失可达注入体积的40%之多。计划和计算流体在油藏中流动的最好方法是数值模拟。以这种方法虽然所用的模拟程序还不能很好地处理聚合物流动的物理学问题，但对这个问题仍然可以提供个回答。

有气顶的油藏控制流体在油藏中的流动也不容易处理。因此对这类油藏数值模拟也是设计注入和开采方案的最好方法。

最适合化学驱的油藏在几何上是那些分开的断块，或大到可以安排井网驱替的油藏。

3.2 油藏岩石

油藏岩石类型在矿物学，孔隙度和渗透率研究方面是重要的。矿物学本身对聚合物溶液的相容性又十分重要。孔隙度，再加上渗透率及其变化对聚合物溶液的注入能力，以及如前面所述的对聚合物驱的动态和效益都有重要作用。

在高含粘土地层如果用淡水作混配水，地层与淡水的相容性就可能是个问题，例如在盐水油藏中应用聚丙烯酰胺就是如此。如果应用淡水会发生粘土膨胀和微粒运移，仅可用于淡水的聚合物就不能应用了。另外，当粘土含量高时聚合物的吸附也比较多，对化学剂的损失也

应给予注意。这一点也适用于碳酸盐含量高的情况。当用淡水在高碳酸盐含量的油藏中驱替时，依赖于温度和pH值，碳酸盐会溶解，注入的淡水可能变硬，因而聚合物性质会发生改变的现象也应注意。这就是说，粘度会明显降低，特别是在淡水中混调聚丙烯酰胺的时候。

渗透率及其分布对一个聚合物驱项目在技术上、经济上是否成功十分重要。显然，渗透率决定着聚合物溶液的注入能力，因而决定着项目所需要的时间。高于 $1\mu\text{m}^2$ 的高渗透率是我们所希望的，不应低于 $0.5\mu\text{m}^2$ 。正如上面所述，这个数值是个标准，在这里是为筛选的目的而提出的。

渗透率低于 $0.1\mu\text{m}^2$ 的油藏，如果能达到足够高的注入速度，能够在一个合理的时间内注入必需量的聚合物溶液，通常也不排除聚合物驱。

正如上一章关于聚合物驱机理所述，渗透率在垂向上高度变化的油藏，可能对聚合物驱最为有利。渗透率级差大，在二次采油时会使水早期突破，在这种情况下，聚合物驱可能在经济上也是有吸引力的，因为有大量的油被驱替水绕过而留在油藏中。

3.3 油藏深度和温度

油藏深度对注入压力来说十分重要。聚合物驱的注入压力明显地比水驱高。注入压力的极限由油藏压裂时所达到的压力决定。因此油藏浅对聚合物驱可能是个限制。对于浅油藏，应该用水做注入和耐压试验来确定破裂梯度。但在许多情况下浅油藏也可能由非胶结砂构成，因此它们比较松软，不出现破裂压力，所以油层浅并不总是严重的问题。

油藏温度与其深度相联系，聚合物驱的油藏温度不应太高。尽管许多厂家对其产品的热稳定性给出了直到 120°C 和更高一些的数值，但为了避免出现问题，其上限应该看做 70°C 。某些产品，特别是合成的聚合物，也可以在高达 90°C 的温度下使用。

应该注意，聚合物溶液的粘度随温度升高而降低，因而高温不仅在技术上提出了限制，同时在经济上也给予了限制。对不同类型的聚合物以及不同的产品，这种温度的依赖性是不同的，因此在筛选聚合物时应该针对预期的目的测量其对温度的依赖性，对每种聚合物都应考虑这种依赖性。多数产品在大约 70°C 时其温度行为会发生变化，比如聚丙烯酰胺在这个温度下就有较强的絮凝趋势。在较高温度下分解反应也要加速，在油藏岩石上的吸附也会增加。

受温度影响的另一个因素是聚合物驱需要使用其它化学剂，如杀菌剂和除氧剂。比如，甲醛只有在高浓度下，在直到大约 50°C 下可用做杀菌剂。低温对聚合物驱也可能有不利的影响，因为在这样的温度下细菌的活动能力通常比较高。

3.4 原油

被采出原油的性质基本上决定了所要用的提高采收率的方法。低的油粘度，因而低的流度比常常使聚合物驱的采收率只比水驱有不大的提高，只有当渗透率变化很大，因而对聚合物驱十分有利的情况例外。油粘度高时聚合物驱使流度降低可能更加明显。油粘度在5和50 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 之间被认为是最有利的。流度比降低到远小于1最为有利，因而在油藏流动条件下聚合物溶液的流度要低于原油的流度。显然，油藏中的油饱和度应该明显地高于残余油饱和

度[●]。聚合物项目开始得愈早,其效果也就愈好。这一点在后面介绍室内驱替实验结果时还要讨论。

3.5 地 层 水

除了油本身之外,饱和油藏孔隙的盐水是选择适宜的聚合物最重要的参数之一。如果油层水的含盐度高,聚合物应该对盐是稳定的,或者油藏必须用淡水冲洗来预处理。用淡水预处理是否可行还取决于油藏岩石的矿物,如前面所述。用淡水预处理油藏的段塞尺寸预想应为0.5~1.0倍孔隙体积。因而从经济原因考虑,可以用Volz (1983年)提出的耐盐聚合物来预处理。其聚合物的段塞尺寸与只用淡水预处理比较相对要小一些(0.05~0.1倍孔隙体积)。

在某些高含盐油藏,由于采出的地层盐水不易处理或者由于没有淡水来源,用淡水预处理可能也不适用。在这种情况下就只能应用耐盐的聚合物。

3.6 聚合物的选择

如果根据上述的原则选定了一个油藏作为聚合物驱的目的油藏,那么就可以开始选择合适的聚合物了。这就是说,应该首先确定需要多少所期望的聚合物溶液。

首先提出的问题是聚合物溶液应该有多大的粘度,给出聚合物溶液一个合适的粘度值并不是很容易的。正如前面所述,流度比决定着一个驱替过程的扫油效率。在图2.3中连同水的分流曲线一起展示了一个典型水湿砂岩的两相流的相对渗透率。水和油的粘度分别为1和15mPa·s。在假设聚合物溶液的粘度也固定为15mPa·s,并且聚合物溶液也适用相同一套相对渗透率曲线后,计算了聚合物溶液的分流曲线。相应的流度比曲线示于图2.4中。

在许多油藏工程书籍中,比如Smith (1966年)和Craig (1971年)所著的书籍中都对非混溶流体驱替的概念进行了详细的讨论。在图2.3中由 $S_w=S_{wr}$ 和 $f_w=0$ 点向分流曲线作切线,在切点处就得到水或聚合物的前沿饱和度;把这些切线外推到 $f_w=1$ 处就得到了突破时相应的数值,这种情况在图3.1中再次得到说明。

正如图2.3所示,水驱时的前沿水饱和度比相应聚合物驱时的低,因此水驱时留在前沿后面的油就比聚合物驱时的多,尽管水驱时的流度比在前沿处也小于1。在突破时水驱的流度比大约为10。由于聚合物驱的分流曲线的形状在前沿和在突破时的饱和度之间没有差别,其前沿饱和度几乎与突破时的相同。突破时聚合物溶液的饱和度是0.72,水驱时为0.62。这意味着,在驱替的早期聚合物驱可以多采出大约10%以上的原始油量。

影响驱替效率的另一个因素是粘性指进。Blackwell等人(1959年)曾研究过流度比的影响,他的实验结果示于图3.2和图3.3中。在Blackwell的实验中应用了两种互溶流体,把其中驱替流体染色以观察粘性指进。

众所周知,假设一个均质油藏,聚合物驱的采收率应与水驱的相同,聚合物驱只起加速采油的作用。如果这是对的,那么这个加速作用是极大的。为使水驱的采收率与聚合物驱的相同,还必须驱替大约10~20倍孔隙体积,如图3.4所示。

● 原文为“显然,油藏中的油饱和度应该明显地低于残余油饱和度”可能排印有误——译者注。

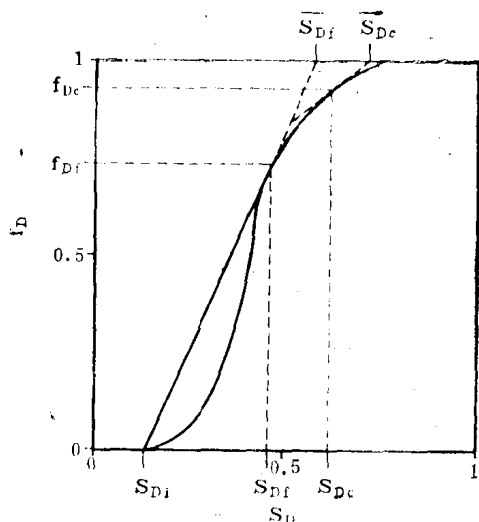


图 3.1 图解说明连续注入下得到突破后平均驱替相饱和度的分流曲线[根据Smith(1966年) 165页的资料]

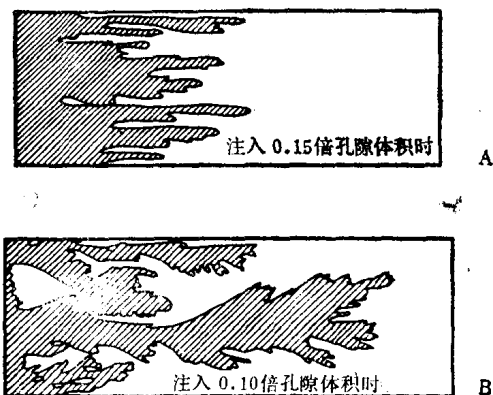


图 3.2 不同流度比的驱替前沿[Blackwell等人 (1959年) 的资料]

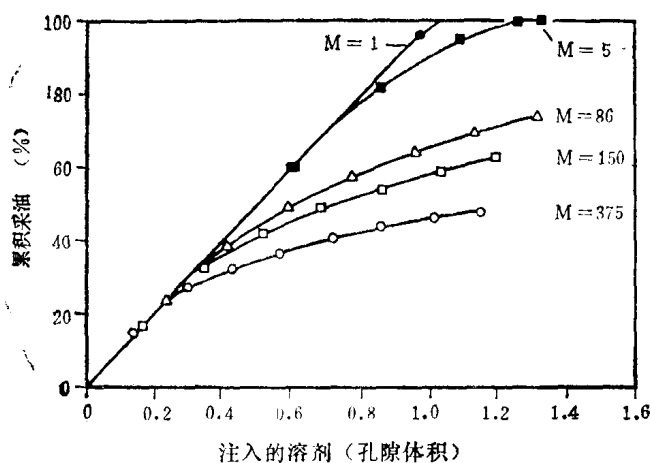


图 3.3 流度比对累积采油量的影响 (Blackwell等人 (1959年) 的资料)

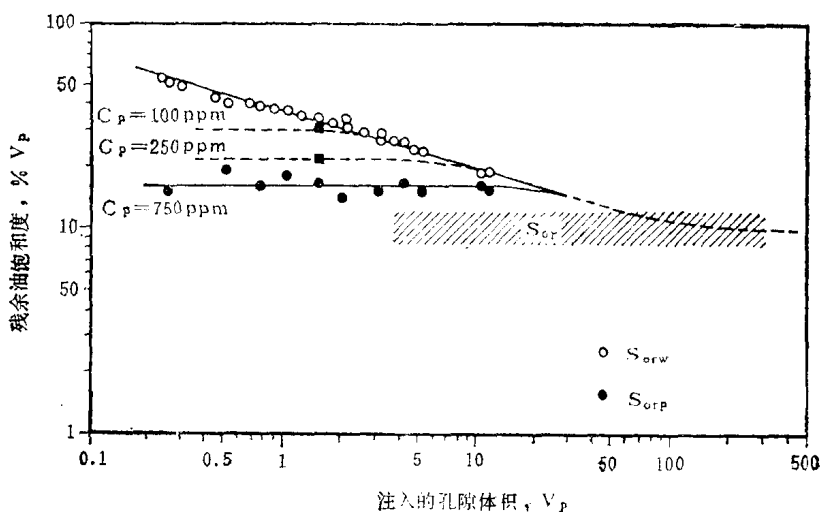


图 3.4 水驱和聚合驱之后的残余油饱和度随注入孔隙体积的变化[Dielzel(1982年) 的资料, 59页]

这个图也说明了聚合物驱的采收率与聚合物浓度或聚合物粘度的关系。在Dietzel(1982年)的实验中还测定了聚合物粘度对增产油量的影响,如图3.5所示。

图3.5说明聚合物粘度有一个初始值,必须超过这个值才能采出增产的油量。Dietzel(1982年)发现不同的聚合物类型-它们的初始值不同。对于聚丙烯酰胺,由图3.5可以明显地读出一个必需的最低聚合物粘度值。这个粘度近似地为油的粘度60mPa·s。对于聚多糖,其初始值和最低需求粘度几乎相同,也在油粘度的范围内。只有羟乙基纤维素才需要其粘度明显高于油粘度^①。

近似取得聚合物溶液必需粘度(在流动条件下)的初步方法是假设其粘度等于油藏条件下油的粘度,正如上面所表明的那样。这意味着对聚合物溶液来说,应该取其在平均油藏流动条件下,即大约10s⁻¹的剪切应变速率下的表观粘度。

聚合物溶液的粘度也是一个经济因素,这一点在室内进一步实验评价中应该充分注意。

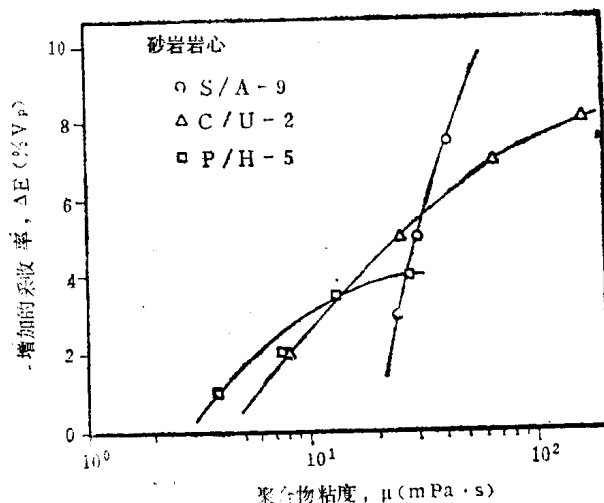


图 3.5 提高的采收率与聚合物粘度的关系, 此结果由砂岩岩心用不同聚合物测得

S/A-9: 聚多糖; C/U-2: 羟乙基纤维素; P/H-5: 聚丙烯酰胺; 油粘度60mPa·s; 在流动条件下聚合物溶液的粘度; 段塞尺寸: 1倍孔隙体积; 流速: 134cm/d; T=50℃; Dietzel(1982年)的资料

3.7 阻力系数

为了表征各种聚合物驱时压力上升的行为,常常应用阻力系数 R_r ,

$$R_r = \frac{k_w}{\mu_w} / \frac{k_p}{\mu_p} \quad (3.1)$$

阻力系数定义为水的流度与聚合物溶液流度之比。残余阻力系数 R_{r1} 是聚合物溶液注入前与注入后水的流度之比。也可以表示为水的初始渗透率与注入聚合物后水渗透率之比,

$$R_{r1} = K_{wi} / K_{wp} \quad (3.2)$$

图3.6示出了由Martischius(1985年)测定的阻力系数与流动速度之间的关系。

在低速下阻力系数为定值,这反映了在这个流速范围内溶液呈现牛顿流动行为。然后在较高的速度下开始了所谓的剪切变稀,此时阻力系数减小;接着在更高的速度下,阻力系数又升高了,这是由于聚合物的弹性行为此时控制了孔隙介质中的流动阻力。这种行为与聚合物的类型和它的分子量密切相关。聚丙烯酰胺分子的弹性显然高于诸如黄原胶分子,这些具有较强刚性聚合链分子的弹性。

残余阻力系数是聚合物吸附,因而部分堵塞孔隙介质趋向的量度,正如图3.7示意的那样。

出现这种现象在某种意义上是我们所希望的,因为它延长了聚合物驱的性能。在水后

① 这一段文字与图3.5的情况不符。Dietzel原文没有。无法查对——译者著。