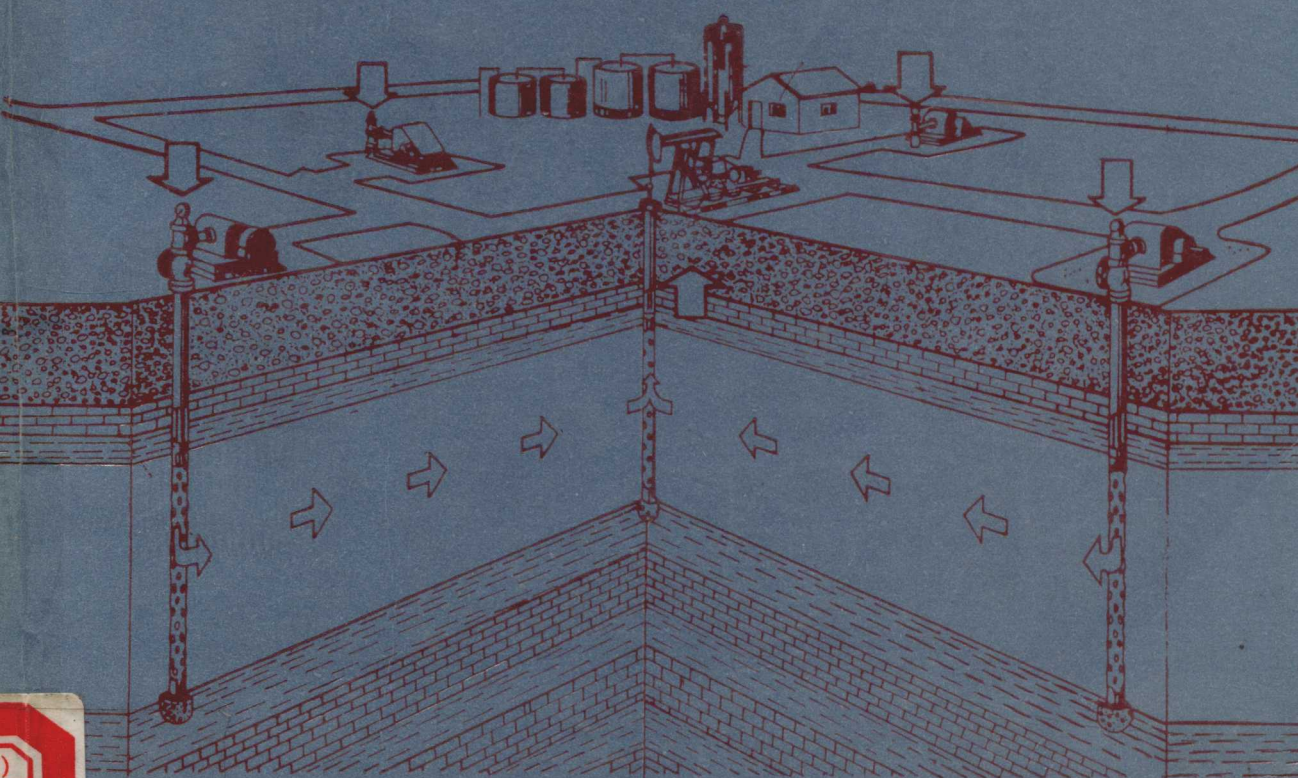


聚合物驱油

最佳技术条件优选

姜言里 纪 平 韩培慧 杨景纯 张立学 著



石油工业出版社



登录号	120976
分类号	TE357.46
种次号	009

号 580 字登第 (京)

要 录 容 内

聚合物驱油最佳技术条件优选

姜言里 纪 平 韩培慧 杨景纯 张立学 著
张振华 程杰成 审校



石油0111502



石油工业出版社

(京) 新登字 082 号

内 容 提 要

本书是作者近几年来所取得的最新科研成果的系统总结。书中不仅具体地介绍了作者为优选聚合物驱油的最佳技术条件而建立起来的聚合物驱油和注入压力预测两个机理模型,更主要的是以数千个算例结果为依据,以优选步骤为顺序,广泛而系统地讨论了聚合物分子量、注入浓度、注入量、单井注入速度、井距、乃至油层条件等各种因素对聚合物的驱油效果及注入能力的影响,对从事聚合物驱油的现场工程技术人员、科研人员以及高校师生都具有重大的参考价值。

图书在版编目 (CIP) 数据

聚合物驱油最佳技术条件优选/姜言里 等著

—北京:石油工业出版社,1994.7

ISBN 7-5021-1314-2

I. 聚…

II. 姜…

III. 化学驱油, 高聚物—技术—最优化

IV. TE357.46

石油工业出版社出版发行

(100011 北京安定门外安华里 2 区 1 号楼)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

*

787×1092 毫米 16 开 7 $\frac{3}{4}$ 印张 189 千字 印 1—1500

1994 年 9 月北京第 1 版 1994 年 9 月北京第 1 次印刷

定价: 8.50 元

序 言

聚合物驱油研究起始于 50 年代,至今已有大约 40 年的历史。40 年来,研究工作发展很快,无论在室内实验、数值模拟、乃至矿场试验等各个方面,都已为我们积累了十分宝贵的经验,将聚合物驱油的理论和实践推进到了日趋成熟的阶段。

但是,聚合物驱油最佳技术条件的优选问题依然是我们所面临的一个十分重要的课题。例如,针对一个具体的油藏区块,为要推广聚合物驱油,所选用的井距应是多大,注入聚合物的分子量、浓度及用量如何等等。显然,没有必要的技术手段,这些问题的解决是困难的。因为所有这些技术条件的确定必须满足两项基本要求:首先应能保证在保持原有采液速度并且低于油层破裂压力的前提条件下将聚合物溶液注入油层;另一方面,注入的聚合物溶液应能取得最佳的技术-经济效果。

为此,近几年来,我们首先依据聚合物驱油的基本作用机理,建立了一套简化的聚合物驱油模型,目的是能在短时间内获取到大量的试验结果,进而使用该模型计算了数千种聚合物驱油方案,以便系统地研究聚合物分子量、注入浓度、用量以及油层性质对聚合物驱油效果及注入能力的影响。

依据这些试验结果我们看到,该模型可用于聚合物的注入浓度及用量的优选。但由于模型求解过程中没有使用压力,给出的注入能力大小只是相对的,因此在依据注入能力及驱油效果优选聚合物分子量时,给出的结果也只是定性的。

为了进一步给出聚合物分子量乃至井距的定量优选结果,我们又建立了单井注入压力的预测模型,由此完整地给出了聚合物驱油最佳技术条件优选的方法和步骤。

当然,目前我们所进行的工作还只是初步的,特别是由于我们个人能力所限,难免存在很多缺点或错误,望广大读者及时给予批评、指正,以便在使用中逐步发展和完善。

作 者

1993 年 10 月

目 录

第一节 聚合物驱油的基本作用机理	1
一、概述	1
二、聚合物的流度控制作用	3
三、聚合物的调剖作用	5
第二节 聚合物驱油过程描述方法	9
一、基本假定	9
二、注水采油过程	11
三、聚合物注入过程	13
四、再注水过程	15
第三节 残余阻力系数预测方法	19
一、残余阻力系数预测模型	19
二、 b_p 、 α 和 β 的实验标定	20
三、预测程序及结果	22
第四节 模型计算结果的验证	24
一、均质油层水驱油动态	25
二、均质及非均质油层聚合物驱油动态	27
三、聚合物驱采收率与用量间的关系	31
四、聚合物采收率提高值与非均质变异系数的关系	32
五、注入时机与采收率提高值的关系	33
第五节 聚合物分子量、用量及浓度对驱油效果及注入能力的影响	35
一、聚合物采收率提高值与注入浓度的关系	35
二、聚合物分子量及用量的影响	39
三、聚合物溶液的相对注入能力	58
第六节 聚合物最佳用量及注入浓度的优选	64
一、最佳用量的优选	64
二、最佳注入浓度的优选	70
第七节 油层非均质性对聚合物驱油的影响	73
一、油层非均质变异系数与聚合物最佳用量的关系	73
二、油层非均质变异系数与聚合物驱油技术-经济指标的关系	77
三、非均质变异系数与注入能力关系	79
第八节 贼层对聚合物驱油的影响	83
一、油层模型设计	83
二、贼层对水驱采收率的影响	85
三、贼层对聚合物驱采收率的影响	88
四、封堵贼层对聚合物驱效果的影响	89

第九节	聚合物注入压力的预测	92
一、	预测方法	92
二、	预测压力与矿场试验结果的比较	95
三、	注入条件对注入压力的影响	98
第十节	聚合物最佳分子量的优选	109
一、	优选条件的确定	109
二、	优选方法及结果	110
三、	推广方案的确定	113
四、	经济评价	114

第一节 聚合物驱油的基本作用机理

一、概 述

众所周知,一个油田的采收率取决于驱油效率和波及系数两者的乘积。驱油效率指的是油田开发结束时由水淹油层部位中采出原油的数量占该部位中原始原油储量的百分数;而波及系数指的是水淹油层体积占油层总体积的百分数,在注水开采油田条件下,由于这两个系数都不很高,因此获得的采收率很低,通常只有 30%~45%。

首先来看驱油效率。对于一个均质油层,若不考虑其面积上的波及系数问题,那么,它在垂向上的波及系数将是 100%,就是说对于这类油层的采收率就是驱油效率。为什么均质油层的驱油效率不会很高,其中的一个重要原因,就是因油、水界面张力很大,一般为 30~40mN/m 左右,而油、水流通的孔道又是由孔喉半径不等的微毛细孔隙所构成,在毛管压力的作用下,注入水前缘推进不均匀,导致被注入水不断分割而断裂的油柱长度小到一定程度时,作用在其上的毛管压力梯度将大过通常注水时所能达到的压力梯度。因而,这些原油在通常注水条件下将始终不能被注入水所采出,这部分原油的饱和度即是残余油饱和度。可见,在通常注水开采油田条件下,驱油效率不可能达到 100%。若油层原始含油饱和度为 80%,残余油饱和度为 30%,其最大可能达到的驱油效率是 62.5%。为了后面讨论的方便,我们将这一最大可能达到的驱油效率称为极限驱油效率。

注水开发油田驱油效率不能达至很高的另一个重要原因是因为多数油田原油的粘度往往很高,远远超过了注入水的粘度。因此,大多数注水开发的油田都是在水、油粘度比不利的条件下开发的。由于注入水在油层中的流动速度远远大于原油在油层中的流动速度,导致注入水将过早的突破油层,并在突破油层后使采出液中含水率迅速上升。可见,为要获得极限驱油效率,油田开采期限将无限延长,而且相当大数量的原油将是在特高含水率阶段采出的,必然影响采油经济效益。例如,在含水率 98%阶段采油时,则需要注入 49m^3 水才能采出 1m^3 原油。所以,从采油经济效益角度出发,实际油田只能在一定含水率阶段就停止开采,此时所能获得的实际驱油效率,显然将低于极限驱油效率。

现在来看波及系数。在油层厚度稍大时,往往油层剖面上会出现非均质状态,即油层垂向上不同层段间渗透率大小出现差异,有时这种差异甚至很悬殊。在这种情况下,向油田注水时,将出现注入水前缘沿高渗透率层段比沿低渗透率层段推进快的现象。特别在注入水的粘度远小于油层中原油粘度的条件下,将导致这种注入水前缘沿不同渗透率层段推进不均匀的现象加剧。因为注水过程是个高粘度流体替换低粘度流体过程,高渗透率层段中一旦比低渗透率层段中吸入更多数量的水,从它里面流过流体的总流量势必比从低渗透率层段里流过流体的总流量变得越来越大,即注入水沿高渗透率层段推进的距离将比沿低渗透率层段推进的距离相差越来越大。与前同理,如果不考虑采油经济效益问题,将注水过程无限制地持续下去,低渗透率层段迟早也会见水,即波及系数最终也可以达到 100%。但实际上,一旦高渗透率层段被注入水突破之后,全油层采出液中含水率很快会上升到采油经济所能允许的极

限含水率阶段，此后不得不关井停止采油。这时，低渗透率层段中注入水的推进距离可能还仍然很小，波及系数达不到 100%。

由上面的讨论中不难得出，对于注水开发的油田，水淹油层中驱油效率不能达至极限驱油效率，波及系数不能达至 100%，其主要原因都与注入水的粘度远低于原油的粘度有关，它是采用聚合物提高油田采收率的理论基础。

聚合物注入油层后，将会产生两项重要作用：一是增加水相粘度，一是因聚合物的滞留引起油层渗透率下降。两项作用的共同结果，是引起聚合物水溶液在油层中的流度明显降低。因此，聚合物注入油层后，将产生两项基本作用机理：一是控制水淹层段中水相流度，改善水油流度比，提高水淹层段的实际驱油效率；一是降低高渗透率的水淹层段中流体总流度，缩小高、低渗透率层段间水线推进速度差，调整吸水剖面，提高实际波及系数。

例如，对于一个已注水开发的非均质油层，当聚合物段塞注入时，由于高渗透率的水淹层段中水的推进速度远远高于低渗透率层段中水的推进速度，聚合物段塞将绝大部分进入高渗透率的水淹层段。它的一个直接结果，就是改善了高渗透率水淹层段中的水、油流度比，增加了油流分数，加速了对原油的开采，增加了高渗透率水淹层段中的实际驱油效率。当然，驱油效率的提高将是有限的，因为聚合物不能降低油、水界面张力，它的注入不可能降低残余油饱和度，而只能将驱油效率提高到接近或达到极限驱油效率，绝不可能超过极限驱油效率。聚合物注入的另一个重要结果是随着高渗透率水淹层段中流体总流度的降低，因低渗透率层段中聚合物注入的数量很少，对其中流体总流度不致产生实质性的影响，因而低渗透率层段中的相对吸液量将逐渐增加。特别是在转注清水时，高渗透率层段中流体总流度已下降至最低值，低渗透率层段的相对吸液量也将达至最大值。由于这时由低渗透率层段中采出的是无水原油，因而将导致油层采出液中含水率大幅度下降，使油层采收率急剧增加。随着清水的不断注入，高渗透率水淹层段中流体总流度又不断升高，低渗透率层段中的采油速度又不断减缓，采出液中含水率重新上升，直至采油经济所允许的极限含水率阶段。

当然，在聚合物注入过程中，会伴随发生聚合物的分散、吸附、机械捕集、剪切降粘、机械降解以及岩石中出现聚合物不可及孔隙体积等各种物化现象。我们认为，所有这些物化现象，都只可能对聚合物驱油过程动态产生影响，而对聚合物驱油效果不致于产生重大影响。因此，为了尽量减少计算，在我们建立的数学模型中对这些物化现象将不予考虑。

为尽量消除读者对我们的模型中没有考虑这些物化现象而可能产生的疑虑，在结束本节内容之前，再将这些物化现象的实质以及它们对聚合物驱油过程可能产生的影响分别简述如下。

1. 分散

分散是聚合物溶液段塞注入油层后，聚合物段塞前、后缘处发生的聚合物溶液与清水间的相互浸透现象，即聚合物溶液由高浓度方向向低浓度方向的传质过程，其结果是导致聚合物溶液段塞前后缘浓度的逐渐稀释。它只改变聚合物溶液的浓度剖面，影响聚合物的产出动态，对聚合物注入后降低水相流度作用，即聚合物提高采收率的作用效果不会产生重大影响。因为在聚合物溶液前后缘的稀释带中，聚合物溶液的粘度损失会由溶液体积的增大得到补偿。

2. 吸附与机械捕集

吸附是聚合物溶液通过岩石时在聚合物与岩石的电性作用下发生的聚合物在岩石表面相中浓度富集的现象，而机械捕集则是聚合物溶液通过岩石时一些大分子聚合物因不能通过岩石孔隙而被截留的现象。这两种物理现象的发生，都将引起聚合物溶液前缘浓度的损失，同

时引起岩石渗透率的降低。聚合物溶液前缘浓度的损失,将主要引起聚合物采出时间滞后,聚合物溶液段塞体积变小。只要在实际注入中,将按简化模型求得的用量根据聚合物的滞留量适当加大,就可以获得与简化模型计算的相同的驱油效果,因而模拟计算中可不必考虑。至于岩石渗透率下降,可以用残余阻力系数模拟出来。

3. 剪切降粘与机械降解

剪切降粘是在聚合物溶液流动速度很高时,因聚合物分子顺流定向而发生的溶液粘度降低的现象。在现场注入时,这种现象只发生在注入井附近,在远井地带,随着聚合物溶液流动速度的降低,其粘度将逐渐恢复。因而,它对聚合物的驱油效果将不致产生重大影响。机械降解是聚合物溶液在高流速下发生的聚合物大分子断链现象,它与剪切降粘不同,这种大分子断链现象在速度变缓后也不会恢复。机械降解主要在地面注入流程发生截流处及注入井井壁附近发生,其直接结果是引起聚合物分子量变小,溶液粘度变低。它当然会对聚合物驱油效果产生重大影响。但它不影响我们简化模型的使用价值,因为我们的模型求解的结果可视为是经机械降解后的聚合物的效果,只要机械降解状况清楚,就不难推断出为获得这样的驱油效果而应注入多大分子量的聚合物。

4. 不可及孔隙体积

不可及孔隙体积指的是岩石中不允许聚合物通过的那部分小孔隙的孔隙体积。显然,不可及孔隙体积的存在,将引起聚合物传递速度加快,过早突破油层出口端,不会对驱油效果产生重大影响。

二、聚合物的流度控制作用

如前所述,对于均质油层,在通常水驱油条件下,由于注入水的粘度往往低于原油粘度,驱油过程中水、油流度比不合理,导致采出液中含水率上升很快。过早地达到采油经济所允许的极限含水率的结果,使得实际获得的驱油效率远远小于极限驱油效率。向油层注入聚合物的结果,可使驱油过程的水、油流度比大大改善,从而延缓了采出液中的含水率上升速度,使实际驱油效率更加接近极限驱油效率,甚至达到极限驱油效率。

由于聚合物的流度控制作用是聚合物驱油的两大重要机理之一,为便于加深理解,现在我们结合实例进一步从理论上来讨论这一问题。

我们知道,在水驱油条件下,水突破油层后采出液中油的分流量为:

$$f_o = \frac{\lambda_o}{\lambda_w + \lambda_o} = \frac{\frac{KK_{ro}}{\mu_o}}{\frac{KK_{rw}}{\mu_w} + \frac{KK_{ro}}{\mu_o}} \quad (1.1)$$

式中 f_o ——采出液中油分流量;

λ_o ——原油流度;

λ_w ——水流度;

K ——岩石绝对渗透率;

K_{rw} ——水相相对渗透率;

K_{ro} ——油相相对渗透率;

μ_w ——水相粘度;

μ_o ——油相粘度。

该式经简化得出

$$f_o = \frac{1}{1 + \frac{\mu_o}{\mu_w} \cdot \frac{K_{rw}}{K_{ro}}} \quad (1.2)$$

众所周知，油、水两相的相对渗透率 K_{rw} 和 K_{ro} 是含水饱和度的函数， K_{rw} 随含水饱和度增加而增加， K_{ro} 则随含水饱和度增加而降低。因为在向油层中注水的整个过程中，含水饱和度始终是增加的，最终趋向极限值。因而，均质油层注水采油过程中，比值 K_{rw}/K_{ro} 随注水时间的延续始终是增大的，最终趋于无限大（因 K_{ro} 将趋于零）。可见，采出液中油流分数始终是减少的，最终趋于零。换言之，采出液中含水率始终是上升的，最终趋向 100%。

该式表明，油、水粘度比 μ_o/μ_w 的大小是控制采出液中含水率上升速度的重要参数。当油、水粘度比很大时，采出液中含水率上升速度快，就是说，还在油层中含水饱和度并不很高的情况下，就不得不因采出液中含水率已达至采油经济允许的极限含水率而终止开采，因而实际获得的驱油效率远未达至油层的极限驱油效率。相反，在油、水粘度比很小时，采出液中含水率上升速度将大大减缓，当它达至采油经济允许的极限含水率时，油层中的含水饱和度可能已经很高，因而获得的实际驱油效率高。

例如，油层原始含油饱和度为 0.8，束缚水饱和度为 0.2 的均质油层，若其残余油饱和度为 0.3，可知其极限驱油效率为 62.5%。假若平均含水饱和度为 0.52 时开始见水，并且油、水两相相对渗透率可分别按下式给出：

$$K_{rw} = 1.6 (S_w - 0.2)^2 \quad (1.3)$$

$$K_{ro} = 0.8 - 1.132 (0.8 - S_o)^{0.5} \quad (1.4)$$

那么，我们可以在平均含水饱和度为 0.52~0.7 之间对含水饱和度任意给值，用相对渗透率公式求解指定含水饱和度下的相对渗透率，进而求解在油、水粘度比分别为 15 和 1 两种假定条件下的油分流量，获得的结果如表 1.1。

表 1.1 不同油、水粘度比时油分流量随含水饱和度的变化关系

S_w	0.52	0.55	0.58	0.60	0.62	0.65	0.68	0.70
K_{rw}	0.164	0.196	0.231	0.256	0.282	0.324	0.369	0.400
K_{ro}	0.160	0.130	0.100	0.084	0.066	0.041	0.016	0
$(\mu_o/\mu_w=15)f_o$	0.061	0.042	0.028	0.021	0.015	0.008	0.003	0
$(\mu_o/\mu_w=1)f_o$	0.494	0.399	0.302	0.247	0.190	0.112	0.042	0

图 1.1 给出了按表 1.1 计算结果绘制的不同油、水粘度比时，采出液中含水率随油层平均含水饱和度的变化关系曲线。图中虚线为假定的采油经济允许的极限含水率（98%）。由该图看到，在油、水粘度比为 15 的条件下，油层刚一见水，含水率就已达至 93.9%；而含水率达至采油经济允许的极限含水率 98% 时，油层平均含水饱和度也只上升至大约 0.6，实际获得的驱油效率只有 50%，较该油层的极限驱油效率低 12.5%。而在油、水粘度比为 1 的条件，油层刚见水时的含水率只有 50.6%（见表 1.1），当油层含水饱和度为 0.6 时，含水率也只有大约 75%；达到经济允许的极限含水率 98% 时，油层平均含水饱和度已上升至 0.69，实际驱

油效率高达 61%，比极限驱油效率只低 1.5%，而比油、水粘度比为 15 时的实际驱油效率却高出 11%。

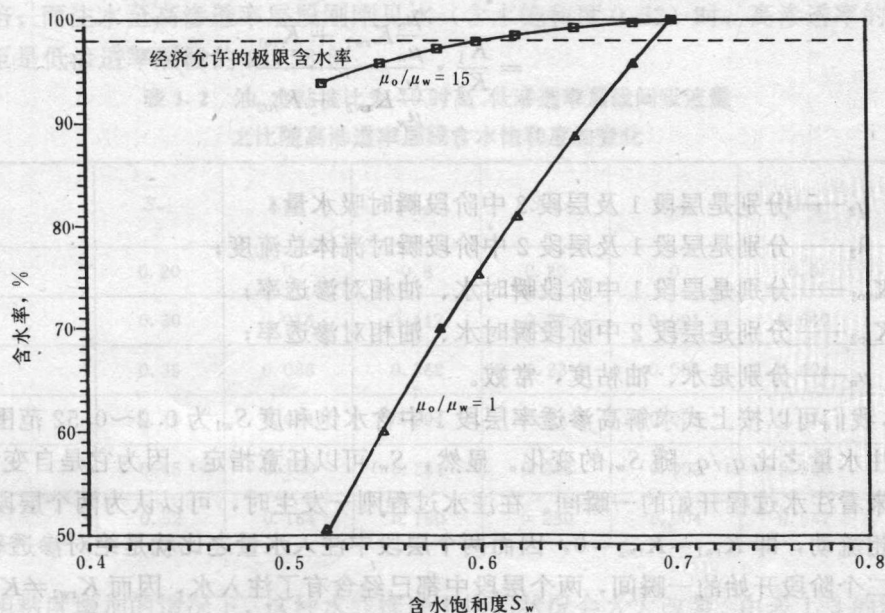


图 1.1 不同油、水粘度比时采出液含水率随水饱和度变化关系曲线

三、聚合物的调剖作用

调整吸水剖面，扩大水淹体积，是聚合物提高采收率的一项主要机理。因为在聚合物的调剖作用下，油层水淹体积的扩大，将在油层的未见水层段中采出无水原油。这就是说，油层水淹体积扩大多少，采出油的体积也就增加多少。

聚合物的调剖作用只有在油层剖面上存在渗透率的非均质状态时才能发生。如前所述，对于这类油层，在通常水驱条件下往往发生注入水沿不同渗透率层段推进不均匀现象。高渗透率层段注入水推进快，低渗透率层段注入水推进慢。加上注入水的粘度往往低于原油粘度，水驱油过程中高流量流体取代低流量流体的结果，导致注入水推进不均匀的程度加剧，甚至在很多情况下会出现高渗透率层段早已被注入水所突破，而低渗透率层段注入水推进距离仍然很小的情况，致使低渗透率层段原油不能得到有效的开采。

在注入聚合物的情况下，由于注入水的粘度增加，油、水粘度比得到了改善，不同渗透率层段间水线推进的不均匀程度缩小。因此，向油层中注入高粘度的聚合物溶液时，可以加大高渗透率层段水突破时低渗透率层段的水线推进距离，调整吸水剖面，扩大油层的水淹体积，提高油层的采收率。

假设油层含有渗透率分别为 K_1 和 K_2 的两个层段，并且 $K_1/K_2=5$ 。其余条件与本节前面例子相同，即初始含油饱和度为 0.8，束缚水饱和度为 0.2，每一层段中水突破时的含水饱和度和为 0.52。油、水相对渗透率仍按前面给出的公式计算，那么，在不考虑重力影响的前提下，我们可以给出高渗透率层段水突破之前任一注水阶段时两层段间吸水量之比：

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{\frac{K_1 K_{rw1}}{\mu_w} + \frac{K_1 K_{ro1}}{\mu_o}}{\frac{K_2 K_{rw2}}{\mu_w} + \frac{K_2 K_{ro2}}{\mu_o}} \quad (1.5)$$

$$= \frac{K_1}{K_2} \cdot \frac{\frac{\mu_o}{\mu_w} K_{rw1} + K_{ro1}}{\frac{\mu_o}{\mu_w} K_{rw2} + K_{ro2}}$$

式中 q_1, q_2 ——分别是层段 1 及层段 2 中阶段瞬时吸水量；

λ_1, λ_2 ——分别是层段 1 及层段 2 中阶段瞬时流体总流度；

K_{rw1}, K_{ro1} ——分别是层段 1 中阶段瞬时水、油相对渗透率；

K_{rw2}, K_{ro2} ——分别是层段 2 中阶段瞬时水、油相对渗透率；

μ_w, μ_o ——分别是水、油粘度，常数。

现在，我们可以按上式求解高渗透率层段 1 中含水饱和度 S_{w1} 为 0.2~0.52 范围内任一注水阶段中注水量之比 q_1/q_2 随 S_{w1} 的变化。显然， S_{w1} 可以任意指定，因为它是自变量。

首先来看注水过程开始的一瞬间。在注水过程刚一发生时，可以认为两个层段中都只是原油的单相流动，即 $K_{rw1} = K_{rw2} = 0$ ，因而两个层段中注入水量之比就是绝对渗透率之比。

在第二个阶段开始的一瞬间，两个层段中都已经含有注入水，因而 $K_{rw1} \neq K_{rw2} \neq 0$ 。为了求解 q_1/q_2 ，首先必须给出 K_{rw1} 及 K_{rw2} 。因第二阶段开始时的 S_{w1} 是指定的， K_{rw1} 容易求出。但是，为了求解 K_{rw2} ，首先必须按 S_{w1} 合理地求解出 S_{w2} 。当然， K_{ro1} 及 K_{ro2} 也应根据已变化了的饱和度重新求解，不过知道了 S_{w1} 及 S_{w2} 后，这是容易做到的。

在任意注水阶段的 S_{w1} 指定后， S_{w2} 可按式求解：

$$(S_{w2})_t = [(S_{w1})_t - (S_{w1})_{t-1}] \left(\frac{q_2}{q_1} \right)_{t-1} + (S_{w2})_{t-1} \quad (1.6)$$

其中 $(S_{w2})_t$ 是任意注水阶段时待求解的层段 2 中含水饱和度； $(S_{w1})_t$ 是任意注水阶段时指定的层段 1 中含水饱和度； $(S_{w1})_{t-1}$ 是前一阶段时指定的层段 1 中含水饱和度； $\left(\frac{q_2}{q_1} \right)_{t-1}$ 是前一阶段层段 2 与层段 1 中吸水量之比，即前一阶段求解的 $\frac{q_1}{q_2}$ 的倒数； $(S_{w2})_{t-1}$ 是前一阶段层段 2 中已有的含水饱和度。可见， $[(S_{w1})_t - (S_{w1})_{t-1}]$ 给出的是由任意求解阶段的前一阶段到求解这一注入时间间隔内层段 1 中含水饱和度的增量。而 $\left(\frac{q_2}{q_1} \right)_{t-1}$ 则是这一注入时间间隔内层段 2 中吸水量占层段 1 中吸水量的分数，因而它们的乘积给出了该注入时间间隔内层段 2 中含水饱和度的增量，再加上该层段中前一注水阶段开始时已有的含水饱和度 $(S_{w2})_{t-1}$ ，即是任意求解阶段开始时层段 2 中的含水饱和度。

由此，我们可以根据第二阶段开始时指定的 S_{w1} 及第一阶段求解的 $\frac{q_1}{q_2}$ 求解出 S_{w2} ，然后求解 K_{rw1} 、 K_{rw2} 、 K_{ro1} 和 K_{ro2} ，再求解出第二阶段时的 $\frac{q_1}{q_2}$ 。按此依次类推，直求解至层段 1 中含水饱和度为 0.52 时为止。对于 $\frac{\mu_o}{\mu_w} = 15$ 及 $\frac{\mu_o}{\mu_w} = 1$ 的两种情况下计算的结果分别如表 1.2 及表 1.3 所示。

由表 1.2 的结果看到, 在油、水粘度比为 15 的不利条件下, 向油层注水过程中, 高渗透率层段中水线推进速度越来越快。例如, 注水刚开始时, 高渗透率层段的吸水量只是低渗透率层段的 5 倍; 当注水至高渗透率层段含水饱和度为 0.4 时, 其吸水量已是低渗透率层段的 10.13 倍; 而注水至高渗透率层段刚刚见水 (含水饱和度 0.52) 时, 高渗透率的吸水量进一步升高至是低渗透率层段的 21.58 倍。

表 1.2 油、水粘度比为 15 时高、低渗透率层段间吸液量之比随高渗透率层段含水饱和度的变化

t	S_{w1}	K_{rw1}	K_{ro1}	S_{w2}	K_{rw2}	K_{ro2}	$\frac{q_1}{q_2}$
0	0.20	0	0.8	0.20	0	0.8	5.00
1	0.30	0.016	0.442	0.22	0.001	0.640	5.22
2	0.35	0.036	0.362	0.23	0.001	0.604	7.29
3	0.40	0.064	0.294	0.24	0.003	0.574	10.13
4	0.45	0.100	0.234	0.245	0.003	0.560	14.33
5	0.52	0.164	0.160	0.250	0.004	0.547	21.58

在水相粘度增加的情况下, 这种水线推进不均匀状况会大大改善。由表 1.3 的结果看到, 当油、水粘度比减小为 1 时, 高、低渗透率层段间吸水量差异大大缩小, 只有在注水过程开始时高渗透率层段与低渗透率层段间吸水量比值最大, 为 5, 此后的任何注水阶段上, 这一比值保持在只有 3.25~3.57 之间。

表 1.3 油、水粘度比为 1 时高、低渗透率层段间吸液量之比随高渗透率层段含水饱和度的变化

t	S_{w1}	K_{rw1}	K_{ro1}	S_{w2}	K_{rw2}	K_{ro2}	$\frac{q_1}{q_2}$
0	0.20	0	0.8	0.2	0	0.8	5.00
1	0.30	0.016	0.442	0.22	0.001	0.64	3.57
2	0.35	0.036	0.362	0.23	0.001	0.604	3.29
3	0.40	0.064	0.294	0.25	0.004	0.574	3.25
4	0.45	0.100	0.234	0.27	0.008	0.500	3.29
5	0.52	0.164	0.160	0.29	0.013	0.460	3.42

图 1.2 给出了依据表 1.2 及表 1.3 资料绘制的低渗透率层段含水饱和度随高渗透率层段含水饱和度变化关系曲线。由该图可以清楚地看出, 当油、水粘度比由 15 调整到 1 时, 低渗透率层段的吸水量将明显增加, 因而获得的采收率将更高。参见表 1.2 及表 1.3 的结果看到, 当高渗透率层段已被注入水突破时 (含水饱和度 0.52), 油、水粘度比为 1 时的低渗透率层段含水饱和度比油、水粘度比为 15 时的高 0.04, 相当于采收率升高了 5%。

第二节 聚合物驱油过程描述方法

前一节着重讨论了聚合物在驱油过程中的两项基本作用机理。在我们建立简化的聚合物驱油数学模型时,将只突出这两项与驱油效果直接相关的基本作用机理,而对于那些聚合物驱油效果无直接影响的其它任何物化作用都不予考虑,以便尽量压缩计算程序。

本节将分基本假定、水驱油过程、注聚合物过程及再注水四个部分,具体介绍聚合物驱油过程的描述方法。

一、基本假定

基本假定如下:

(1) 油层是由厚度相同,孔隙度及饱和度相同,但绝对渗透率不同的三个层段构成的正韵律厚油层。

这一假定完全是为我们将要研究的问题而限定的。因为我们研究的目的主要是搞清在相同性质的油层上,聚合物注入条件不同对其驱油效果的影响及在相同注入条件下油层各层段渗透率组合关系对驱油效果的影响,因此,油层模型设计可以尽量简化。实际上,对于厚度、饱和度、孔隙度都不同的油层,甚至对于非正韵律,多于三个层段的多层段油层,只要研究的是剖面上的问题,使用我们的模型也可以计算,只是在分层段的注采液量的分配关系上,针对具体油层应作出相应的调整。

(2) 以分配系数 C_{ij} 控制每一阶段注液量 ΔP_{vj} 向各层段的分配量:

$$q_{ij} = \Delta P_{vj} C_{ij} \quad (2.1)$$

式中 q_{ij} —— i 层段 j 阶段时的阶段吸液量 (孔隙体积倍数);

ΔP_{vj} —— j 阶段向全油层注入的总液量 (孔隙体积倍数);

C_{ij} —— j 阶段向全油层注入的总液量中进入 i 层段中的分数 ($\sum_i C_i = 1$)。

显然,驱油过程开始的一瞬间,各层段中都只是原油的单相流动,这时的分配系数应是分层段渗透率与全油层渗透率总和的比值:

$$C_{ij} = K_i / \sum_i K_i, \quad j=1 \quad (2.2)$$

式中 K_i —— i 层段岩石渗透率, μm^2 。

从第二个注入阶段之后,因为油层中已经注入了水,甚至注入了聚合物溶液,油层中已不再是原油的单相流动,这时的分配系数将不仅是岩石渗透率的函数,而且与流体饱和度及粘度紧密相关。为了给出分配系数,我们取前一注入阶段结束时各层段中各流体流量之和与全油层流体流量总和的比值:

$$C_{ij} = \lambda_{j-1} / \sum_i \lambda_{j-1}, \quad j > 1 \quad (2.3)$$

式中 λ_{j-1} ——第 j 个注入阶段开始时 i 层段中油、水、聚合物溶液流量之和, $\mu\text{m}^2 / (\text{mPa} \cdot \text{s})$;

$\sum_i \lambda_{ij-1}$ ——第 j 个注入阶段开始时各层段流体流度之总和。

(3) 若考虑流体重力的影响, 则假定上一层段中阶段注液量的十分之一窜入相邻的下一层:

$$q_{1jg} = 0.9q_{1j} \quad (2.4)$$

$$q_{2jg} = 0.9(q_{2j} + 0.1q_{1j}) \quad (2.5)$$

$$q_{3jg} = q_{3j} + 0.1(q_{2j} + 0.1q_{1j}) \quad (2.6)$$

式中 q_{ijg} —— j 阶段 i 层段考虑重力影响时的阶段吸液量。

(4) 每一阶段注液量向各分层段分配后, 若各分层段中各流体饱和度 S_{oij} 、 S_{wij} 、 S_{pij} , 相对渗透率 K_{roi} 、 K_{rwi} 、 K_{rpi} , 及流度 λ_{oij} 、 λ_{wij} 、 λ_{pij} 可以求解, 那么, 根据注、采平衡关系, 不难求解以下各项阶段开采指标及累积开采指标:

1) 累积注液量

$$PV_{1j} = \sum_i \Delta P_{vj} \quad (2.7)$$

$$PV_{lij} = \sum_j q_{lij} \quad (2.8)$$

式中 PV_{1j} ——全油层累积注液量 (孔隙体积倍数);

PV_{lij} —— i 层段累积吸液量。

2) 分层段阶段采油量及采出程度

$$\Delta PV_{oij} = \frac{1}{3}(S_{oij-1} - S_{oij}) \quad (2.9)$$

$$\Delta \eta_{ij} = \Delta PV_{oij} / S_{omax}^* \quad (2.10)$$

式中 ΔPV_{oij} —— i 层段 j 阶段阶段产油量 (孔隙体积倍数);

$\Delta \eta_{ij}$ —— i 层段 j 阶段的采出程度 (由 i 分层中采出油量占全油层原始总含油量的百分数)。

$\frac{1}{3}$ 是换算系数, 因为 $(S_{oij-1} - S_{oij})$ 给出的是 j 阶段由 i 层段中采出的油量占分层孔隙体积的百分数, 而我们要求解的是 i 层段中采油量占全油层总孔隙体积的倍数, 根据假定 1, i 分层孔隙体积只有全油层孔隙体积的 $\frac{1}{3}$, 因此必须作出这样的换算 (可见, 若给出的油层模型不符合假定 1 时, 这一换算系数应作出相应的调整。后面将看到, 在模型中出现 $\frac{1}{3}$ 或 3 的情况很多, 原因都与此相似, 我们将不再解释)。

3) 分层段累积采出程度

$$\eta_{ij} = \sum_j \Delta \eta_{ij} \quad (2.11)$$

4) 全油层累积采出程度

$$\eta_j = \sum_i \eta_{ij} \quad (2.12)$$

5) 全油层阶段含水率

$$f_{wj} = (\Delta PV_j - \sum_i \Delta PV_{oij}) / \Delta PV_j \quad (2.13)$$

6) 聚合物的利用效率

$$\frac{W_o}{W_p} = \frac{S_{\text{omax}}^* \Delta \eta^* d_o}{b_o C_p \sum_i Q_{pi}^*} \times 10^6 \quad (2.14)$$

式中 $\Delta \eta^*$ ——聚合物较水驱采收率提高值, %;

d_o ——地面原油密度, g/cm³;

b_o ——原油体积系数;

C_p ——聚合物注入浓度, mg/L;

$\sum_i Q_{pi}^*$ ——注入聚合物段塞的总体积 (孔隙体积倍数);

10^6 ——单位换算系数;

$\frac{W_o}{W_p}$ ——平均注 1t 聚合物的增采油量, t/t。

二、注水采油过程

前面已经给出了基本假定。这些假定表明,在整个水驱或聚合物驱油过程的各个环节上,于每一阶段注液量注完后,只要能够给出油层的各层段中流体的平均饱和度、相对渗透率及流度的求解方法,就可以求解出驱油过程的各项开采指标。

首先对水驱过程作出描述。

1. 饱和度

显然,油、水饱和度与注水过程中采油量的变化密切相关,而无水采油期与油、水同产期的采油量变化特点不同,因此饱和度的描述方法亦应分别给出。

(1) 无水采油期的含油饱和度

众所周知,无水采油期间,平均含油饱和度是累积注液量的线性函数,因此,在累积注液量已知的前提下不难求解,但必须合理地给出限定条件。根据大庆油田大量天然岩心的水驱油实验结果,我们假定,无水采收率为 40%。于是可以给出:

$$\begin{aligned} S_{oi j} &= S_{\text{omax}}^* - 3PV_{lij} \\ 3PV_{lij} &\leq 0.4S_{\text{omax}}^* \end{aligned} \quad (2.15)$$

式中 $S_{oi j}$ —— i 层段 j 阶段平均含油饱和度;

S_{omax}^* ——油层原始含油饱和度。

(2) 油、水同产期的含油饱和度

如同第一节中讨论的那样,油层一旦见水后,采出液中油分流将随注液量的增加而急剧下降,而油分流的大小可由油流度与流体总流度之比给出。于是,油层见水后的含油饱和度可由下式给出:

$$S_{oi j} = S_{oi j-1} - 3q_{ij} \frac{\lambda_{oi j-1}}{\lambda_{ij-1}}$$