

现代注水油田 高含水期稳油控水开采技术 与优化措施实用手册

当代中国文化音像出版社

ISBN 988-98225-6-3



9 789889 822569 >

ISBN 988-98225-6-3

定价：998.00 元 (含配套光碟)

第三章 化学驱油藏工程的影响因素分析

在化学驱过程中，影响驱油效果的因素很多，包括储层条件、原油粘度、水驱开发方式和驱油体系等方面。目前，化学驱中的聚合物驱已进入矿场工业化推广应用，规模大，而且室内研究和数值模拟技术也比较完善，因此对聚合物驱的影响因素的研究比较多。其他化学驱方法基本上处于研究驱油体系配方的影响因素方面，而矿场的影响因素研究较少。

第一节 储层性质的影响

一、沉积相

沉积相影响水驱开发的效果，即剩余油的分布，从而影响化学驱效果。矿场聚合物驱统计结果表明（表 10-3-1），从平均单井增油来看：心滩（A1）>河道充填相（A2）>河道边缘相（B）>泛滥平原相（C），而每米增油依次为：河道边缘相（B）>河道充填相（A2）>心滩（A1）>泛滥平原相（C），但 A1、A2、B 相差别不大，C 相明显较差。这主要是因为，心滩部位油层相对均质，水驱开发效果好，剩余油较少；河道充填相和河道边缘相非均质严重，水驱效果差，剩余油饱和度高，有利于聚合物驱扩大波及体积；而泛滥平原相由于油层发育差，注采井间连通性差，影响了聚合物的注入，因而效果较差。这在胜利油区和大港油田的聚合物驱单元都有这样的结论。

表 10-3-1 孤东扩大区不同沉积相对增油的影响

沉积相	平均单井增油/t	增油/ ($t \cdot m^{-1}$)
A1	8942	898
A2	7974	1171
B	6398	1032
C	1191	111
合计	8248	973

二、注采方向

矿场统计结果表明,在同一注聚单元内,聚合物驱注水井的注入方向由高渗透区往低渗透区,其单井增油和每米增油均高于由低渗透区往高渗透区注入的驱油效果,效果较好。这主要是因为近井地带聚合物溶液的渗流速度较快,聚合物分子剪切降解较严重,随着段塞的推进,渗透流速度变慢,剪切降解作用减弱。而高渗透区域更有利于聚合物分子的通过,在井筒附近的剪切降解远小于低渗透区,而有利于增大渗流阻力,扩大波及体积。

孤东扩大区高渗透注、低渗透采井区平均单井增油 12770 t, 平均单井每米增油 1990t, 而低渗透注、高渗透采井区平均单井增油 9806t, 平均单井每米增油为 1162t。

三、油层韵律性

众所周知,在水驱阶段,反韵律油层水洗厚度大,在相同注水倍数条件下,全层水洗程度比正韵律油层高,即剩余油饱和程度低,以致聚合物驱效果很差。

我们研究了平均渗透率为 $2500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、渗透率变异系数为 0.8, $k_z/k_r = 0.1$ 条件下, 正韵律、反韵律、复合韵律三种油层的水驱和聚合物驱的驱油结果。

对于三种韵律的油层, 水驱采收率依次为: 反韵律 > 复合韵律 > 正韵律。在反韵律地层中, 由于高渗透层段位于油层的上面, 而低渗透层段位于油层的下面。在重力作用下, 上面高渗透层段的水会向下部的低渗透层段窜流, 从而改善了中低渗透层段的驱动效果。

实施聚合物驱后, 不同韵律油层的采收率都有不同程度的提高, 其提高采收率幅度为: 正韵律 > 复合韵律 > 反韵律 (表 10-3-2)。但不同韵律油层聚合物驱的采收率差别小于水驱时的采收率 (水驱时采收率最大值与最小值之间的差值为 8.91%, 而聚合物驱采收率最大值与最小值之差为 3.2%)。可见, 聚合物的注入减弱了重力的影响, 从而减小了垂向上的水的窜流。

表 10-3-2 地层的韵律性对提高采收率的影响

对比指标	正韵律	反韵律	复合韵律
水驱采收率/%	21.29	30.20	28.57
聚合物驱采收率/%	33.23	35.95	36.43
提高采收率/%	11.94	5.75	7.86

大庆喇嘛甸油田南块注聚合物试验区全区的分类统计资料也可以看出, 正韵律和复合韵律砂体, 平均每米厚度的累积增油量明显好于反韵律沉积的砂体, 正韵律和复合韵律每米厚度累积增油量是反韵律油层的 1.7 倍 (图 10-3-1)。

四、储层的非均质性

储层非均质是影响聚合物驱油效果的重要因素。水驱和聚合物驱的采出

程度都随着油层渗透率变异系数 v_k 值的增大而降低。聚合物驱相对水驱的增加采收率幅度随 v_k 变化而变化的。大庆油田得出的结论是在 $v_k = 0.72$ 附近将取得增加采收率幅度最大值。虽然这一结论在聚合物驱油技术推广应用中产生了重要影响，然而这一结论是在一定油藏地质条件下得到的。多年来理论研究和矿场实践表明：油层垂向上渗透性不同，聚合物驱油作用机理也不尽相同。油层垂向渗透性的变化对驱油效果变化规律是有影响的。另外，从广义上讲，油层非均质应包含渗透率、孔隙度、厚度及至流体物性的非均质。所以只考虑渗透率的影响，以渗透率变异系数来描述油层非均质性也并非是最完善的描述。因为对一个纵向上各分层段渗透率大小已确定的油层，其非均质变异系数是惟一的。但相同非均质变异系数的油层并非是唯一。它们的平均渗透率可能相差很大，而且其纵向渗透率与平面渗透率的比值 k_z/k_x 的大小也可能差异甚大。

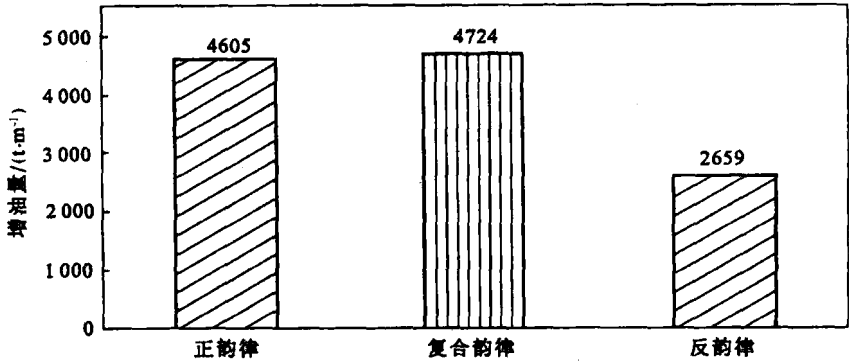


图 10-3-1 不同韵律的油层聚合物驱单位厚度增油对比图

鉴于这种情况，为了进一步提高对聚合物驱油规律的认识，我们在高渗透、高含水、高度非均质、纵向有相当程度连通的油藏条件下，研究纵向非均质和平面非均质对聚合物驱效果的影响。

(一) 基本模型的建立

模拟计算中所用的地质模型是三维非均质模型。渗透率的非均质用渗透率的变异系数来表示。

对于正态分布, 均值为 μ , 方差为 σ^2 的随机变量在区间 $(\mu - \sigma, \mu + \sigma)$ 内的概率为 0.682, 在 $(\mu, \mu + \sigma)$ 内的概率为 0.341。所以累积百分数为 84.1% 处的渗透率值与均值之差正好为一个标准差 σ , 变异系数 v_k 为:

$$v_k = \frac{\sigma}{\mu} \quad (10-3-1)$$

对于对数正态分布, 变异系数为: .

$$v_k = \frac{\lg k_g - \overline{\lg k}}{\lg k} \quad (10-3-2)$$

式中: k_g ——对应累积百分数为 84.1% 的渗透率; $\bar{k}$ ——对应累积百分数为 50% 的渗透率。

而实际使用中多采用如下关系:

$$v_k = \frac{k_{84.1} - k_{50}}{k_{50}} \quad (10-3-3)$$

垂向模型渗透率变异系数的计算: 将渗透率和它对应的累积厚度百分数画在对数正态坐标纸上。设累积厚度百分数为 0.5 和 0.841 时所对应的渗透率分别为 k_{50} 和 $k_{84.1}$, 按 10-2-3 式计算渗透率变异系数。

1. 平面模型渗透率变异系数的计算

将渗透率从大到小排列并分成若干组, 统计每组内落入的样品数及累积样品数, 计算累积百分比, 尔后以累积百分比为横坐标, 相应的各组的渗透率下限值为纵坐标, 在对数正态概率纸上描点, 得一直线。取对应于累积百分数为 0.5 和 0.841 的渗透率 k_{50} 和 $k_{84.1}$ 计算变异系数 v_k 。

研究中, 地质模型的建立是逆向的, 即先确定模型的平均渗透率和渗透率变异系数 v_k , 而后再确定各层的渗透率值。地质模型中六个小层等厚, 因此各样品所占的百分数为 16.667%。由于模型的平均渗透率即为 k_{50} , 若给定模型的变异系数 v_k , 则可根据计算变异系数的公式, 计算出 $k_{84.1}$ 。有了点 (50.0%, k_{50}) 和点 (84.1%, $k_{84.1}$) 之后, 由线性插值即可求出各小层的渗透率值。平均渗透率为 $2000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时, 对应于不同变异系数下的各小层渗透率分布见图 10-3-2。

平面模型中各网格点的渗透率值求法类似。平均渗透率为 2000×10^{-3}

μm^2 时对应于不同变异系数下的平面渗透率见图 10-3-3。

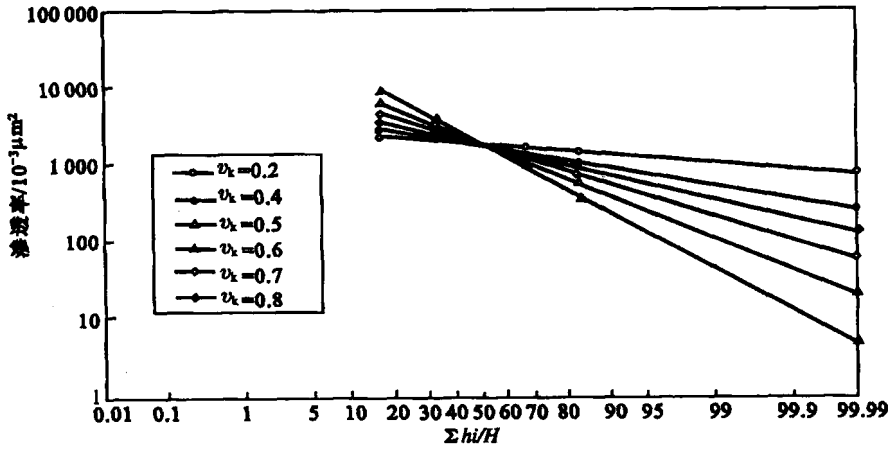


图 10-3-2 不同变异系数下的各小层渗透率分布

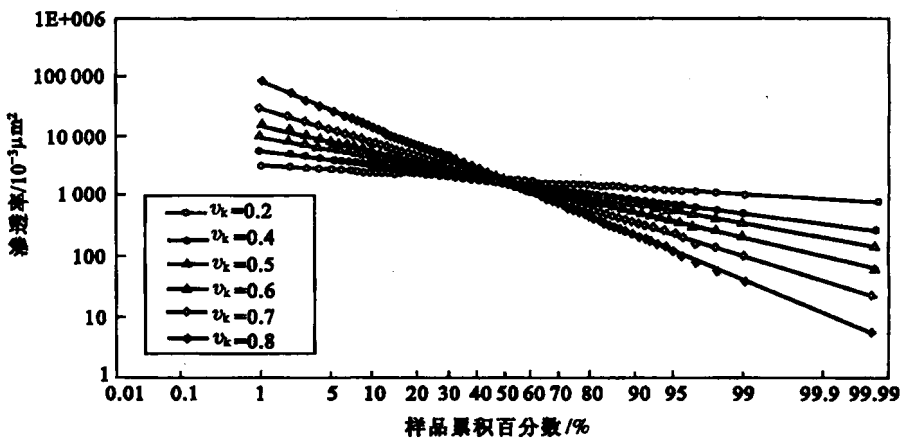


图 10-3-3 不同变异系数下的平面渗透率分布

渗流能力与存储能力的估算：所建的地质模型除了考虑渗透率的非均质外，还考虑了存储能力的非均质性，即同时考虑渗流能力与存储能力的非均质性。

定义 $F_n - C_n$ 曲线和 45° 线段之间的面积为洛伦兹系数 (L_c)， L_c 经规范后在 0~1 之间变化。 L_c 与 v_k 是有相关关系的。为了习惯起见，仍采用变异

系数 v_k 来估计油层非均质性。

$$\text{累积渗流能力: } F_n = \sum_{l=1}^n \frac{(kh)_l}{H_k}$$

$$\text{累积存储能力: } C_n = \sum_{l=1}^n \frac{(\phi h)_l}{H_\phi}$$

根据测井经验, 孔隙度 ϕ 与渗透率 k 之间建立以下关系式:

$$\phi = a \lg k + b$$

根据此关系式, 结合有关资料, 求得各层不同的孔隙度值。

2. 基本地质模型的网格划分

根据所研究问题的性质, 所建立的基本地质模型有两种: 一种是三维模型, 另一种是平面模型。模型的非均质性同时考虑了渗流能力和存储能力的非均质, 即考虑了 k , ϕ , h 。

三维模型在纵向上总厚度为 15m, 平均分为 6 个小层。注采井距为 250m。网格划分为 $19 \times 19 \times 6$ 。该模型平均渗透率取 800、1000、1500、2000 和 $2500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 渗透率变异系数取 0.2、0.4、0.5、0.6、0.7 和 0.8, $k_x/k_y = 0.1$ 。

平面模型中注采井距为 250m。网格划分为 $10 \times 10 \times 1$ (取 1/4 井网)。在平面模型中, 平均渗透率取 800、1000、1500、2000 和 $2500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 渗透率变异系数取 0.2、0.4、0.5、0.6、0.7 和 0.8。

两种模型的示意图见图 10-3-4。

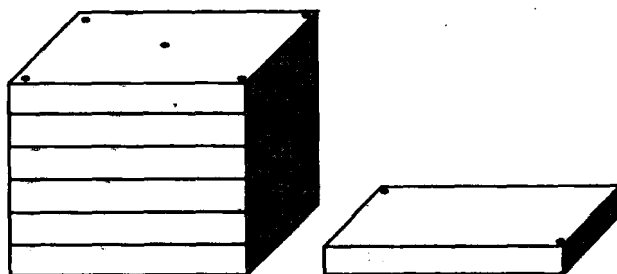


图 10-3-4 模型示意图

3. 其他参数

其他参数取值如下：原油粘度 $60\text{mPa}\cdot\text{s}$ ，聚合物用量 $600\cdot\text{PVmg/L}$ ，聚合物浓度 2000mg/L ，注采速度 0.10PV/a 。

(二) 纵向非均质对聚合物驱效果的影响

在正韵律条件下，我们计算了不同平均渗透率及不同渗透率变异系数下的水驱及聚合物驱方案。从图 10-3-5 中可以看出：同一平均渗透率下，渗透率变异系数增大，聚合物驱的提高采收率幅度增大；同一渗透率变异系数下，随地层的平均渗透率的增大，聚合物驱的增加采收率幅度先是大幅上升，随后，曲线变得比较平缓。说明在渗透率比较高的条件下，地层平均渗透率的变化对聚合物的增加采收率幅度的影响变缓。此时影响聚合物驱效果的主要因素是地层的渗透率变异系数。

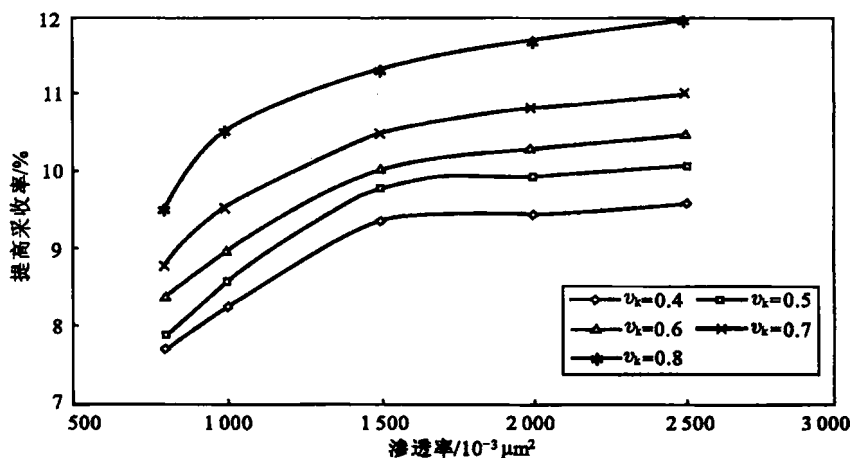


图 10-3-5 纵向不同渗透率不同变异数对聚合物驱油效果的影响

从图 10-3-6 中可以看出：平均渗透率一定时，变异系数增大，水驱采收率下降，聚合物驱的采收率也下降。但聚合物驱采收率下降幅度小于水驱采收率的下降幅度，因此聚合物驱的增加采收率幅度随变异系数的增大呈上升趋势。

从正韵律地层纵向非均质对聚合物驱效果的影响来看，除与地层平均渗透率值有关外，还有一个重要的因素就是层间的连通程度。即 k_z 与 k_x 的比

值大小。在本模型中 $k_z/k_x = 0.1$ ，表明层间的渗透性（或窜流作用）是比较强的，而且随着 v_k 值增大而增大。这种情况对水驱产生的影响很大。由于重力作用和正韵律将助长注入水向油层下部高渗层段窜流，以至随着 v_k 值增加产生暴性水淹，即水驱采收率在 v_k 高值区急剧下降。显然这种重力及正韵律作用的大小与油层中驱替剂与被驱替剂的流度比有直接关系。聚合物驱改善了流度比，降低了重力及正韵律地层造成的不利影响。因此即使在高 v_k 值区，聚合物驱采收率的下降仍是较缓的。由于本模型同时考虑了渗流和存储能力的非均质，因而上述因素的正负作用将更加强。对于高渗透以及 k_z/k_x 较大的情况，随着 v_k 值增加时，对应水驱采收率相对较低，而其聚合物驱采收率相对较高，因此其采收率增幅相对较大。

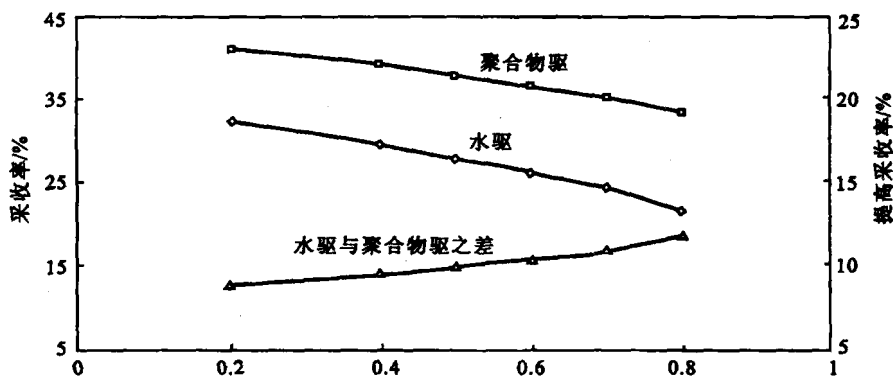


图 10-3-6 纵向非均质对聚合物驱的影响
($k = 2000 \times 10^{-3} \mu m^2$)

对于层间窜流较小或小层之间近似隔绝的情况，对聚合物驱效果起影响的主要是正韵律。如当 $k_z/k_x = 0.001$ 或 0.01 时，层间的渗透性将是很小的。此时 v_k 值的大小对水驱和聚合物驱影响效果与上述高渗透层有窜流的影响效果是不同的。戚连庆等人研究了具有大庆油田地质特点的 k_z/k_x 比值对聚合物驱效果的影响，其结果见表 10-2-3。

表 10-3-3 正韵律地层 v_k 及 k_z/k_x 对聚合物驱增加采收率幅度的影响

k_z/k_x	v_k							
	0	0.248	0.433	0.590	0.720	0.820	0.890	0.968
0.001	9.1722	9.2855	9.8134	10.3241	10.4117	9.5562	8.5788	8.1697
0.01	8.8211	9.1216	9.6345	10.2367	10.5569	10.3298	10.0252	9.1846
0.1	8.5956	9.1243	9.6173	10.2428	10.90	11.2833	11.5823	11.2628

从表中可以看出, 在 $k_z/k_x = 0.01$ 和 0.1 时, 聚合物驱的采收率增加幅度在 $v_k = 0.72$ 附近达到最大值。而当 $k_z/k_x = 0.1$ 时, 这一最大值点向 v_k 高值区移动, 即 $v_k = 0.89$ 处。

另外姜言里用简化模型, 不考虑垂向渗透率, 其预测的结果为 $v_k = 0.72$ 时采收率增值幅度最大。

综上所述, 油层非均质性 (包括渗透能力、储存能力的双重非均质)、垂向渗透率以及油层平均渗透率的大小都是影响聚合物驱效果的重要因素。在垂向渗透率达到一定值时, 即存在一定程度的层间窜流时, 在 v_k 高值区, 聚合物驱采收率增值随 v_k 值增加而增加。这一认识为选择聚合物驱的油层提供了一个依据。

(三) 平面非均质对聚合物驱效果的影响

我们利用平面模型研究了不同渗透率和不同变异系数组合对聚合物驱效果的影响。从图 10-3-7 可以看出: 同一变异系数下, 随平均渗透率的增大, 聚合物驱提高采收率幅度初期增长很大, 但当渗透率达到 $2000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时, 提高幅度的变缓。也就是说, 当地层的平均渗透率达到某一值时, 影响聚合物驱效果的主要因素为变异系数而不是平均渗透率; 同一平均渗透率下, 当变异系数小于 0.6 时, 随变异系数的增大, 聚合物驱提高采收率幅

度下降；当变异系数大于 0.6 时，渗透率变异系数增大，采收率增加幅度上升；当渗透率变异系数为 0.6 时，增加幅度最小。

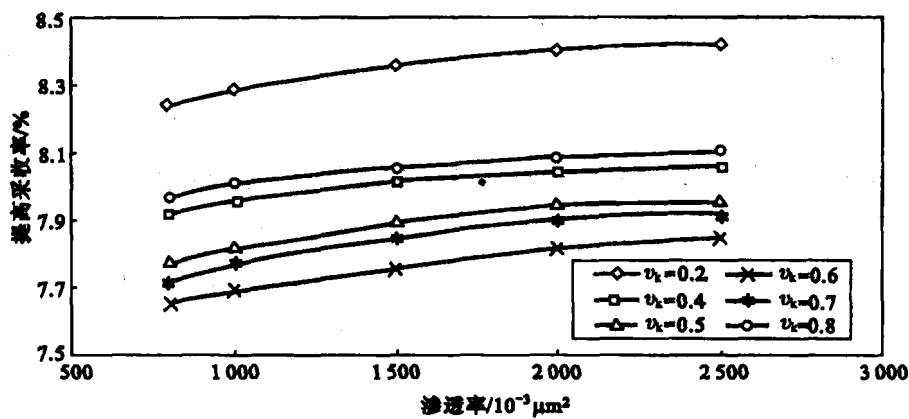


图 10-3-7 平面不同渗透率不同变异系数对聚合物驱效果的影响

图 10-3-8 为平均渗透率为 $2000 \times 10^{-3} \mu m^2$ 时，不同变异系数下的水驱与聚合物驱效果对比图。从图中可以看出，随着变异系数地增加，水驱采收率和聚合物驱的采收率都下降。但提高采收率幅度呈现出先下降后上升的趋势。

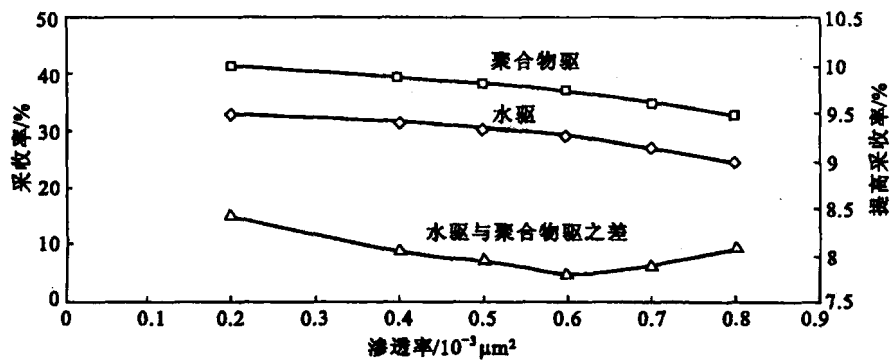


图 10-3-8 平面非均质对聚合物驱的影响

这是由于平面模型主要模拟注水后期情况，所以在设计平面模型时，在主流线上为高渗带，油水井同处于高渗条带上，因而发生注入液沿主流线突进的情况。随着渗透率变异系数的增大，渗透率的级差提高，注入液突进程

度加大，由此水驱和聚合物驱的采出程度都随着渗透率变异系数的增大而减小。当模型的变异系数较小时，水驱及聚合物驱都有较好的波及效果，聚合物的作用主要是改善水油流度比，它有很高的增加采收率幅度。当模型的变异系数较大时，模型渗透率的级差急剧增大。此时水沿主流线突进的现象加剧，主流线两侧低渗区内剩余油增多，水驱采收率急剧降低。而聚合物的注入可以增大主流线的流动阻力，迫使注入水进入低渗区驱油，从而大大地增大波及系数。因此对于平面模型，在 v_k 高值区，变异系数越大，聚合物驱的增加采收率幅度越大。在此地质模型下，增加采收率幅度变化趋势的转折点是在 $v_k = 0.6$ 处。

(四) 大孔道对聚合物驱效果的影响

大孔道是指在长期注水过程中，由于水的冲刷作用，而使原来渗透率很高的油层，渗透率变得越来越高，形成“大孔道”，又称贼层。贼层的存在对开发效果有显著影响，无论是水驱还是聚合物驱最终采收率随贼层渗透率增加而下降，而且贼层厚度越大，下降的速率越大。在贼层厚度不变的条件下，最终采收率随贼层渗透率增加而下降的速率也不相同。

为研究地层存在大孔道时聚合物驱的影响。我们计算了大孔道渗透率的高低和大孔道层的厚度对聚合物驱的影响。

1. 大孔道渗透率高低

模型平均渗透率为 $2500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，渗透率变异数为 0.6。在原有六小层的基础上增加了一个具有大孔道的小薄层，其厚度为 0.05m 并使其渗透率为基本模型高渗层渗透率的 5、10、50 倍，同时孔隙度做相应的变化。

从表 10-3-4 中看出：当地层存在很薄的大孔道层时，大孔道渗透率的增大对聚合物驱是有利的。在这种情况下，聚合物驱能够充分发挥其调剖作用。就聚合物驱采收率来讲，当大孔道渗透率增大到一定值，其采收率开始下降。但由于水驱采收率下降幅度相对更大，所以提高采收率随大孔道渗透率增加而增大。但总的来说渗透率高的大孔道对最终采收率是不利的。

表 10-3-4 大孔道的渗透率对聚合物驱效果的影响

对比指标	50 倍	10 倍	5 倍
水驱采收率/%	18.4	24.54	25.31
聚合物驱采收率/%	34.25	36.47	36.24
提高采收率/%	15.85	11.93	10.93

2. 大孔道厚度的影响

在孔道大小不变的条件下,研究了具有大孔道的厚度对聚合物驱效果的影响。从表 10-3-5 中可以看出:当大孔道层的厚度增大时,水驱和聚合物驱采收率大幅度下降。聚合物段塞的调剖作用已显得微乎其微,甚至起不到调剖作用了。可以看出,大孔道厚度对最终采收率的影响是致命的,此时要发挥聚合物的驱油作用,必须对大孔道进行一定的封堵。否则,聚合物驱采收率会随大孔道的厚度增加而减小,采收率增值也会随之减小。

表 10-3-5 大孔道层的厚度对聚合物驱效果的影响

对比指标	0.05m	1 m	2.5 m
水驱采收率/%	18.4	6.43	8.29
聚合物驱采收率/%	34.25	21.63	21.17
提高采收率/%	15.85	15.2	12.88

3. 平面模型大孔道的影响

为研究平面上存在大孔道时对聚合物驱的影响。我们将平均渗透率为 $2500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 变异系数分别为 0.2 和 0.6 的模型中注采线上的渗透率分别