

第 43 期：STARS 模拟聚合物驱精讲

编译人：王建国 李罡

目 录

一、聚合物驱过程简介.....	2
二、聚合物驱机理模拟详述.....	4
2.1 聚合物吸附.....	4
2.2 渗透率降低.....	5
2.3 不可及孔隙体积.....	8
2.4 相渗/润湿性改变的影响.....	9
2.5 聚合物降解.....	11
2.6 组成对粘度的影响.....	14
2.7 剪切对粘度的影响.....	18
2.7.1 剪切变稀或假塑性流体的幂律表达式.....	21
2.7.2 剪切增稠或膨胀性流体的幂律表达式.....	22
2.7.3 速率/剪切速率与粘度的表格输入选项.....	24
2.7.4 表皮因子对流速的影响.....	25
2.7.5 将剪切速率转化为达西流速.....	26
2.8 矿化度对粘度的影响.....	27
三、实验室和矿场数据.....	28
四、使用 Builder 的过程向导（Process Wizard）来建立聚合物驱模型.....	29
五、查看并调整过程向导的结果.....	33
5.1 组分的生成.....	33
5.2 聚合物降解反应.....	33
5.3 聚合物的吸附.....	33
5.4 聚合物粘度.....	34
六、其他需要考虑和解决的问题.....	35
6.1 高分子量（或低摩尔分数）.....	35
6.2 非平衡渗透率降低效应.....	36
6.3 聚合物模型输出结果的说明.....	37

STARS 模拟聚合物驱精讲

在 CMG 的三个模拟器中, IMEX 和 STARS 都可以用于模拟聚合物驱。IMEX 聚合物模型是以黑油模型为基础开发的, 描述的物化现象较为简单。STARS 聚合物模型是以基于相平衡常数的组分模型为基础演变而来的, 能够模拟多种聚合物, 及各种聚合驱的机理。STARS 更适用于聚合物驱小尺度的室内实验数值模拟及矿场规模的实际油藏精细模拟。编写本讲义的目的是为用户利用 STARS 模拟器模拟聚合物驱过程提供指导。主要包括以下几方面内容:

- 机理及其在模型中的表征
- 模拟中需要的实验室和矿场数据
- 使用 Builder Process Wizard 输入数据流程
- 查看和调整数据的流程
- 在 Results 3D 中查看结果

一、聚合物驱过程简介

聚合物驱(如下图所示)这项“EOR”技术, 是在注入流体中添加水溶性的聚合物, 增加注入水/或者地层水的粘度, 控制流体流度, 提高体积波及系数, 减小水的指进和水的突破, 进而增加原油采收率。

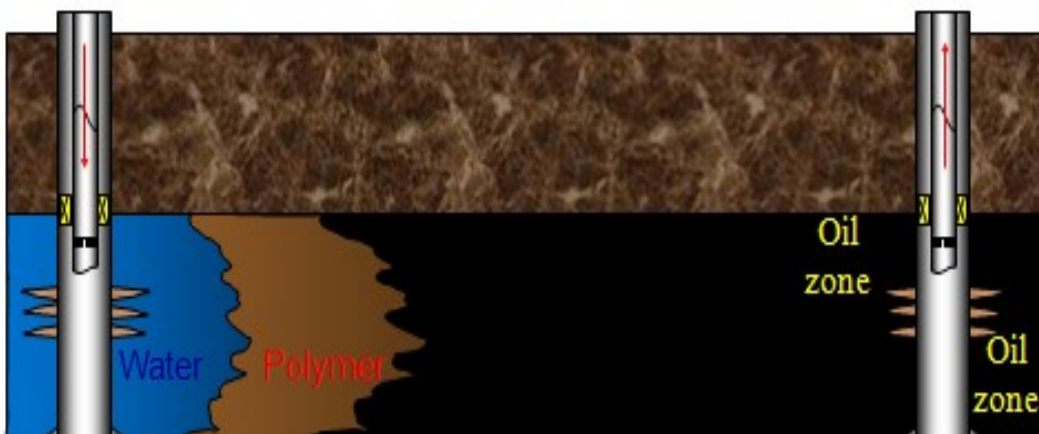


图 1 展示的是水驱、聚合物驱、碱/聚合物驱和三元复合驱（ASP）机理模型累产油的对比。

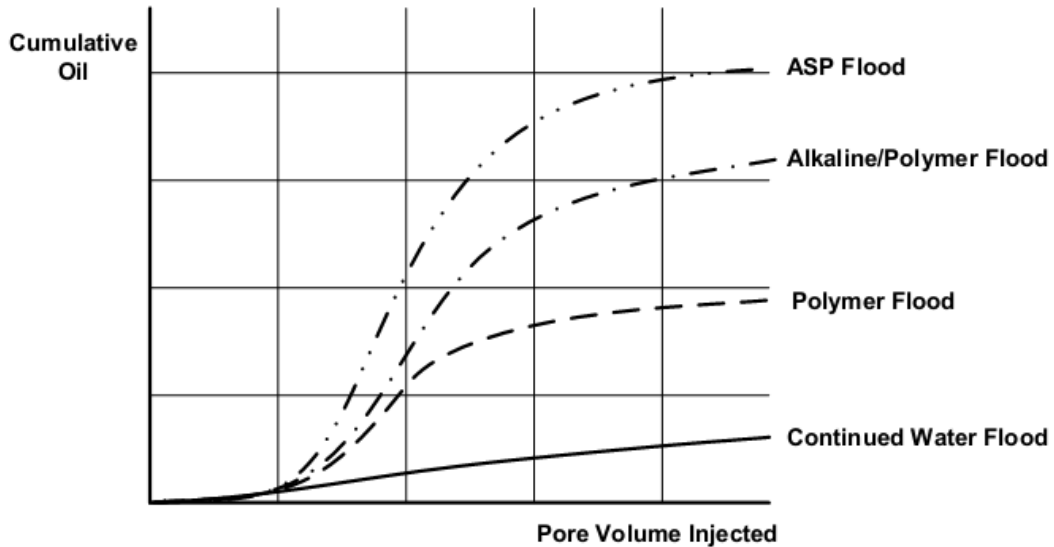


图 1 不同驱替方式下累产油对比

图 2 表示的是化学驱 EOR 过程提高原油开采程度的效果对比。

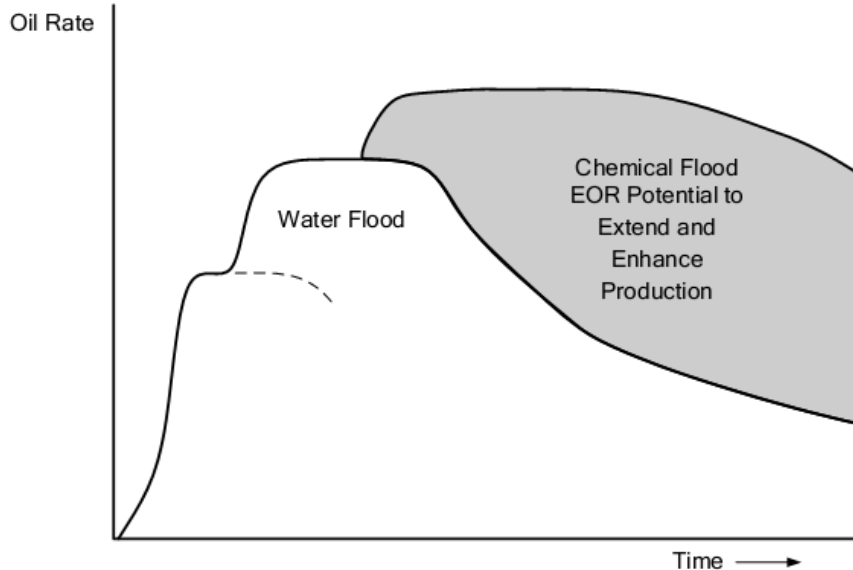


图 2 化学驱提高产油速率

聚合物驱，在注入流体（普通水）中添加增稠剂（聚合物），使得在注入流体和地层油之间产生有利的流度比。聚合物是高分子化学溶剂，由大量的结构单元（单体）组成。常用的聚合物有水解聚丙烯酰胺（HPAM），丙烯酰胺共聚物（AMPS， NVP）和黄原胶（生物聚合物）。

STARS 可以模拟的聚合物机理包括但不限于以下几个方面：

- 注入流体粘度和流度的变化
- 聚合物吸附
- 降低渗透率
- 不可及孔隙体积
- 相渗/润湿性改变的影响
- 聚合物降解
- 组成对粘度的影响
- 剪切对粘度的影响
- 矿化度对粘度的影响

二、聚合物驱机理模拟详述

下面将描述聚合物驱的机理，进一步分析如何在 STARS 中模拟这些机理。更多信息可参考 STARS 用户手册。

2.1 聚合物吸附

吸附是离子或分子粘附在另一相的表面。它是一个物理和/或化学过程，例如当流体与多孔介质（在微观层面）接触时，多孔介质有能力在它的表面保留流体的微粒。在提高采收率的过程中，聚合物的吸附表示的是聚合物会保留在多孔介质或岩石表面（聚合物水溶液通过的地方）。吸附的强弱主要与流体类型、饱和度、分子量、流速、温度、矿化度、硬度和岩石类型（例如岩石矿物性质和渗透率）。

对于聚合物驱技术，较少的聚合物滞留在油藏中是其成功的一个必要条件。大量的聚物流失是不利因素，因为聚合物浓度的降低会影响它的粘度，进而失去对流度的控制，最终导致驱替效率较低。基于这个原因，吸附通常是在实验室利用岩心驱替实验尽可能模拟矿场情况来得到的。

STARS 可以通过输入一组等温吸附曲线来表征这些现象（吸附的强弱是流体组成的函数）。这些等温曲线以表格的形式输入或者使用朗格缪尔曲线关系式：

$$Ad = \frac{A \times c_i}{(1 + B \times c_i)} \quad (1)$$

其中， C_i 是流体组分组成， A 和 B 是与温度相关的常数。值得注意的是，最大的吸附量是 A/B ，系数 B 控制等温线的曲率，上面提到的 A/B 决定了稳定时期的吸附量，见图 3。

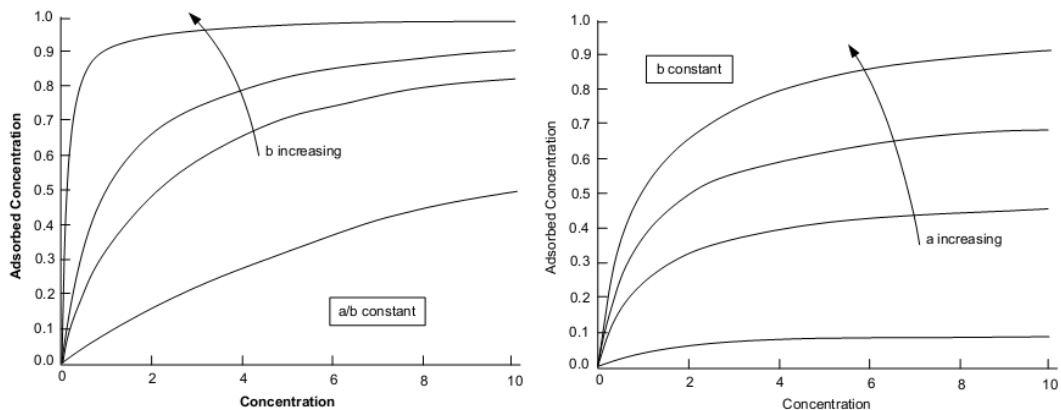


图 3 典型朗格缪尔曲线形状

模拟聚合物吸附的关键字：

使用*ADSCOMP 来定义组分和流体相。

使用*ADSLANG 或*ADSTABLE 来定义吸附的输入选项，如下所示：

*ADSLANG 表示的是组分浓度的影响通过朗格缪尔曲线系数定义。

*ADSTABLE 表示的是组分浓度的影响通过输入吸附量-组分浓度值的表格定义。

针对*ADSCOMP 定义的组分或相，为了定义岩石类型（渗透率）对吸附数据的影响，使用以下关键字：

*ADMAX：定义最大吸附量

*ADRT：定义残余吸附量

*ADSROCK：定义当前岩石类型

*ADSTYPE：用来指定网格属于哪种岩石类型。

2.2 渗透率降低

多篇论文指出聚合物通过多孔介质后，其流度会降低。这种现象主要是由于水粘度的增加和渗透率的降低引起的，在某种程度上聚合物的吸附也会造成影响，特别是化学或机械（滞留）类型引起的吸附。由于这种原因造成岩石渗透率的变化，可以通过以下公式进行计算：

$$\bar{K} = \frac{k}{R_k} \quad (2)$$

其中，K 表示聚合物驱前岩石绝对渗透率

Rk 表示渗透率降低因子

R_k 是聚合物吸附和残余阻力因子的函数，

$$R_k = 1 + (RRF - 1) \times \frac{AD}{ADMAXT} \quad (3)$$

其中，AD-单位体积岩石中聚合物的累计吸附量

ADMAXT-单位体积岩石中聚合物的最大吸附量

随着吸附量的增加， R_k 变化范围从 1.0 到 RRF 的最大值。

残余阻力因子 RRF 可以从岩心驱替实验中得到，它的表达式是聚合物驱前后水（或盐）流度比。

$$RRF = \frac{\lambda_{w,before\ treatment}}{\lambda_{w,after\ treatment}} = \frac{(k_w/\mu_w)_{before\ treatment}}{(k_w/\mu_w)_{after\ treatment}} \quad (4)$$

其中，

λ_w -水的流度

k_w -水的有效渗透率

μ_w -水的粘度

若聚合物驱实施前后水的粘度没有改变，方程（4）可以简化为：

$$RRF = \frac{k_{w,before\ treatment}}{k_{w,after\ treatment}} \quad (5)$$

如果岩心驱替实验是线性的，那么有效渗透率可以通过线性的达西方程计算：

$$k_w = \frac{Q_w \times L \times \mu_w}{A \times \Delta P} \quad (6)$$

如果岩心驱替实验是径向的，那么有效渗透率通过以下方程计算：

$$k_w = \frac{Q_w \times \ln(r_e/r_w) \times \mu_w}{2\pi \times h \times \Delta P} \quad (7)$$

若利用上面的表达式来计算岩心驱替实验中聚合物驱前后水的有效渗透率，假如注入速度是一样的话，残余阻力因子 RRF 的表达式简化为如下所示：

$$RRF = \frac{\Delta P_{after\ treatment}}{\Delta P_{before\ treatment}} \quad (8)$$

假设聚合物仅仅改变了单相流动；因此，每一相渗透率降低因子的表达式：

$$R_{k_\alpha} = 1 + (RRF - 1) \times \frac{AD}{ADMAXT} \quad (9)$$

\bar{k}_α 是影响相 α 的有效渗透率，表达式如下：

$$\bar{k}_\alpha = \bar{k} \times k_{r\alpha} = \frac{k \times k_{r\alpha}}{R_{k\alpha}} = \frac{k_\alpha}{R_{k\alpha}} \quad (10)$$

其中， α 表示水，油或气相

K, \bar{K} 分别表示聚合物驱替前、后岩石绝对渗透率

在聚合物驱或其它 EOR 中，组分的吸附起了很重要的作用，因此有必要输入残余阻力因子以及该残余阻力因子作用的相，以此来表征渗透率降低。

使用下面的关键字来模拟渗透率的降低：

*ADMAXT 定义最大吸附量

*RRFT 表示 *ADSCOMP 定义的吸附组分“i”的残余阻力因子。*RRFT 的值必须大于等于 1。缺省值是 1。

*ADSPHBLK 连同子关键字 phase_des，覆盖缺省值，改为应用阻力因子计算值，如下：

*W 水（水态的）相

*O 油（油态的）相

*G 气（气态的）相

*ALL 所有相

缺省值

*RRFT 1（没有阻力影响）

*ADSPHBLK 如果没有定义，阻力因子应用于吸附组分（由关键字 *ADSCOMP 定义）的相。

注意：一些聚合物对水相渗透率的降低要大于对烃类渗透率的降低。这就导致了对所有相而言，残余阻力因子既不一样也不是个常数（参考非平衡渗透率降低 (DPR)）。因此，必须通过岩心驱替实验来计算每一相的残余阻力因子，如下所示：

油水两相实验：

$$RRF_w = \frac{k_w(at S_{or}; pre - treatment)}{k_w(at S_{or}; post - treatment)} \quad (11)$$

$$RRF_o = \frac{k_o(at S_{wirr}; pre - treatment)}{k_o(at S_{wirr}; post - treatment)} \quad (12)$$

水气两相实验：

$$RRF_w = \frac{k_w(at S_{gr}; pre - treatment)}{k_w(at S_{gr}; post - treatment)} \quad (13)$$

$$RRF_g = \frac{k_g(at S_{wirr}; pre - treatment)}{k_g(at S_{wirr}; post - treatment)} \quad (14)$$

其中，

k_α ：相 α 的有效渗透率， $\alpha=w, o$ 或 g

Sor：残余油饱和度（水-油实验）

Sgr：残余气饱和度（水-气实验）

Swirr：束缚水饱和度（水-油和水-气实验）

在当前的 STARS 版本，对于残余阻力因子仅仅能指定一个值。如何模拟渗透率非平衡降低（DPR）的影响，建议参考 **6.2 非平衡渗透率降低效应** 的论述。

2.3 不可及孔隙体积

当大分子聚物流过多孔介质时会被限制在细小孔隙中，仅仅水或盐可能会通过。当这些孔隙没有接触到流动的大分子聚合物时，他们被称为不可及孔隙体积（IPV）。这个现象是由 Daws on and Lutz (1972) 首先提出来的，他们指出一些孔隙可能接触不到聚合物分子，这就会使得注入聚合物和驱替原油的速度要比预期的快一些，因为预期的速度是以总的孔隙度为基础来计算的。他们计算出大约 30% 的孔隙体积是聚合物没法接触到的，这在 PancharoenThiele and Kovsky (2010) 的实验中得到了证实。因此，聚合物溶液的有效孔隙度小于实际油藏的孔隙度。降低的聚合物孔隙度 ϕ_p 用来表示聚合物水溶液可以达到的孔隙体积，如下：

$$\phi_p = (1 - IPV) \times \phi \quad (15)$$

其中， ϕ 是原始孔隙度，网格压力和温度校正过的。

IPV 对油田的生产有利。接触到聚合物溶液的岩石表面小于总的孔隙体积，因此降低了聚合物的吸附。更为重要的是，如果在聚合物很难进入的较小的孔隙中存在原生水，则不可及孔隙体积的存在减小了原生水和聚合物溶液之间的过渡带。不过，缺点是较小孔隙中的原油也会接触不到聚合物，因此也不能被驱替出来。

在 STARS 中，在更新吸附组分“i”和吸附岩石类型的孔隙度时，要求直接输入的是差值（1-IPV）。在模拟器中，它表示可以进入的孔隙体积，或是聚合物以及其他类似组分可以进入的孔隙体积分数，由关键字 *PORFT 定义。*PORFT 缺

省值时 1，意味着所有的孔隙体积都能进入。

2.4 相渗/润湿性改变的影响

过去很多学者就聚合物吸附对相渗曲线修正的影响做了大量的研究，虽然他们找到了一些证据，证明相比油相而言，聚合物驱更能降低水相相对渗透率，但传统的观点认为从微观角度上看，聚合物驱不能降低残余油饱和度，而是使得没有被驱替出来的原油快速达到最低水平，在这个过程中产出更少的水。然而，在最近的研究中发现，在粘-弹性聚合物驱替后，所有类型的微观残余油均有所降低，岩心微观驱油效率增加。图 4 和图 5 展示了研究中获得的典型的水驱和聚合物驱相渗曲线(Wang et al):

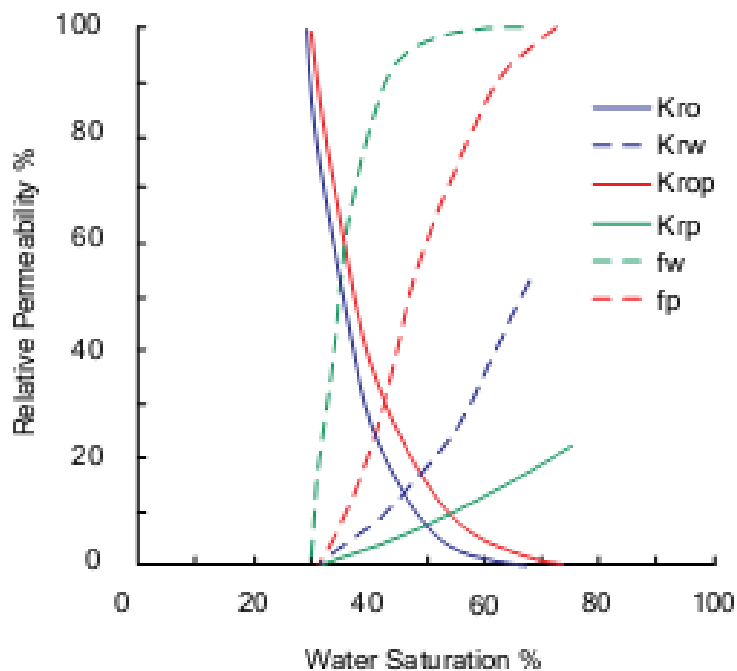


图 4 水驱和聚合物驱相渗曲线对比

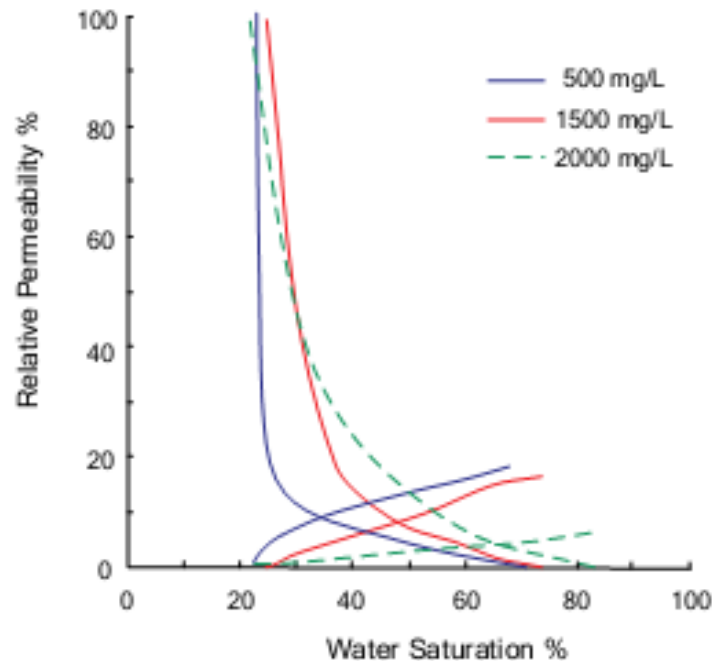


图 5 不同聚合物浓度下相渗曲线

为了模拟对相渗曲线的修正，STARS 可以通过相渗曲线的内插选项来实现，依据聚合物浓度的不同来实现对基础相对渗透率和毛管压力的插值。利用 STARS 插值选项可以依据室内实验数据修正相渗曲线的曲率和相渗端点值，并根据聚合物吸附情况和浓度水平应用于不同的网格。STARS 选项中，需要以下关键字：

*INTCOMP 子关键字 comp_name 和 phase，分别表示插值组分名称和组分所存在的相：

- *WATER 水（水态）的摩尔分数
- *OIL 油（油态）的摩尔分数
- *GAS 气（气态）的摩尔分数
- *GLOBAL 总摩尔分数
- *MAX 水、油和气相中最大摩尔分数
- *ADS 吸附相，最大的摩尔分数

*KRINTRP 插值数，内部岩石类型。对于每一个新的岩石类型的起始值是 1，增加一个插值就加 1。例如，rock type#1 可能包含内部插值数 1 和 2，而 rock type#2 可能包含内部插值数 1、2 和 3。

*DTRAPW 表示对于当前的岩石-流体数据设置，润湿相插值参数（摩尔分数）的值。

*DTRAPN 表示对于当前的岩石-流体数据设置，非润湿相插值参数（摩尔

分数) 的值。

- *WCRV 表示水相渗透率曲率变化参数
- *OCRV 表示油相渗透率曲率变化参数
- *GCRV 表示气相渗透率曲率变化参数
- *SCRV 表示液相渗透率曲率变化参数

缺省值

- 如果*INTCOMP 缺省，表示没有内插
 - 对岩石类型，如果*KRINTRP 缺省，表示没有岩石流体类型插值。
 - *DTRAPW 和*DTRAPN 必须至少有一个存在才能实现内插。如果仅出现一个，那么它的值应用于缺省关键字
 - 每一个*WCRV、*OCRV、*GCRV 和*SCRV 的缺省值是 1
- 更多信息，请参考 STARS 用户手册。

2.5 聚合物降解

聚合物的降解涉及多个过程，从聚合物高分子分解为结构单元（单体）。在提高采收率的过程中，主要关注的降解机理包括化学降解、热降解、生物降解和机械降解。

● **化学降解：**聚合物的化学降解，或者说是聚合物的稳定性，主要与氧化还原反应和水解作用有关，由于水中存在二价阳离子，如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Fe^{2+} ，和氧气分解聚合物分子共价键。

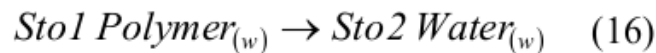
● **热降解：**聚合物热降解通常与化学降解有关，在过热的条件下，分子发生质变。高温条件下，聚合物的长链被破坏，并相互发生反应，进而改变聚物流变性和相性质。热降解通常包括分子量的改变，而且在很低的温度下也能发生。

● **生物降解：**生物降解在生物聚合物中比在合成聚合物中更为普遍，然而，这两种聚合物都会发生生物降解。油藏中存在细菌，由细菌引起的聚合物大分子的分解，在低温和低矿化度下发生的频率要高一些。

● **机械降解：**聚合物水溶液处于高速剪切条件下，聚合物分子共价键被折断，以致失去了对粘度和流度的控制。当聚合物水溶液被强制以较高的速率通过一个多孔介质时或在注入井附近有较高的注入速率的情况下容易发生机械降解。聚合物通常在较高的速率、较远的运移距离和渗透率较低的多孔介质中容易发生机械降解。聚合物在剪切条件下表现为非牛顿流体，STARS 可以模拟剪切变稀和剪切增稠，2.7 剪切对粘度的影响中有详细的解释。

上面所有关于降解的机理都应该在 EOR 过程中考虑。若想使聚合物驱更有效，聚合物应在油藏中保留较长的时间。在模拟过程，通常我们没有考虑聚合物的降解，原因是降解过程非常复杂。可以通过一个简单近似的方法，使用一个一级化学反应-聚合物降解为水来模拟这些现象。在这种情况下，每个网格的聚合物浓度随着时间逐渐降低，进而粘度降低，粘度是根据体现聚合物浓度-水相粘度关系的非线性混合准则计算得来。

对于聚合物降解的简单情况，一级反应的方程式：



其中，Sto1 反应物反应配平系数

Sto2 生成物反应配平系数

表 1 和图 6 是聚合物粘度随时间变化的典型数据。

表 1 聚合物粘度随时间变化的典型值

Time (Days)	Viscosity (cps)		
	Polymer 1	Polymer 2	Polymer 3
0	6.17	7.15	8.02
5	2.84	3.65	5.00
10	1.91	2.97	3.50
15	1.47	2.42	3.00
30	0.92	1.65	2.30
45	0.91	1.47	2.00
60	0.84	1.25	1.80

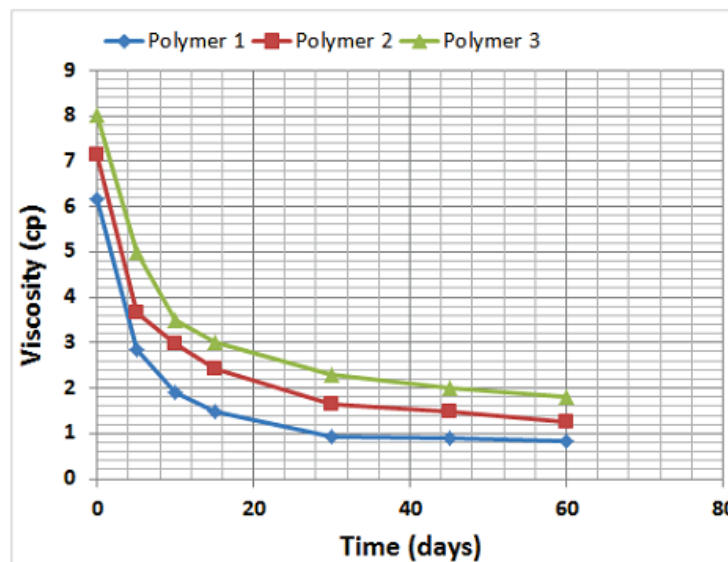


图 6 聚合物粘度随时间变化的典型曲线

STARS 化学反应模拟功能非常强大，如果有必要，可以模拟非常复杂的化学反应。用户通过 STARS 模拟器，模拟地层中的热力学反应，以及任意组分随

着流体流动速率、温度、浓度和类型等因素的反应。

化学反应数据中必须的关键字：

*STOREAC 用来定义反应物组分的反应配平系数

*STOPROD 用来定义生成物组分的反应配平系数

*FREQFAC 用来定义反应动力学速率常数

如果化学反应不属于一级反应，组分在多个相中发生化学反应，那么需要定义*PHASE和*RORDER：

*PHASE 用来指定一个标志来判定反应组分所在的相。

标志值如下所示：

0=没有参加反应的组分

1=水相（仅限流体组分）

2=油相（仅限流体组分）

3=气相（仅限流体组分）

4=固相（仅限固体组分）

注意：吸附组分在吸附相可不发生化学反应

*RORDER 用来定义每一个反应组分浓度因子的反应级别。必须是非负数。如果没有反应组分，输入 0。通常，你需要输入一个值（1）；然而，如果你输入的是（0），那么反应速率和组分的浓度没有关系。

缺省值

如果*RPHASE 缺省，假定：

iphas =0 没有参加反应的组分

iphas =1 水相组分，从 1 到 numw

iphas =2 油相组分，从 numw+1 到 numx

iphas =3 非凝析组分，从 numx+1 到 numy

iphas =4 固相组分，从 numy+1 到 ncomp

如果*RORDER 缺省，假定：

enrr= 0 没有参加反应的组分

enrr=1 反应组分

如果进行热采模拟（例如，聚合物降解速率与温度以及活化能有关），根据阿尔纽斯方程，依据网格的绝对温度来改写一级化学反应。在这个例子中，需要新的关键字*RENTH和*EACT：

*RENTH 用来定义反应焓（J/gmol|Btu/lbmol）。正值表示放热反应，负值表示吸热反应。缺省值是 0。

*EACT 用来定义单一活化能 (J/gmol|Btu/lbmol)。定义反应速率与网格温度的关系。如果使用缺省值，反应和温度没有关系 (Ea=0)。

用于判定体积反应速率的公式信息，以及关于计算反应系数公式的信息，请参考 STARS 用户手册。

2.6 组成对粘度的影响

聚合物驱的主要目的是得到一个有利的流度比。水驱的效率在很大程度上与驱替和被驱替流体的流度比有关系。流度比的定义：

$$M = \frac{\text{Displacing phase mobility}}{\text{Displaced phase mobility}} = \frac{k_w/\mu_w}{k_o/\mu_o} = \frac{k_w}{k_o} \times \frac{\mu_o}{\mu_w} \quad (17)$$

其中， K_w ——水的相对渗透率

μ_w ——水的粘度

K_o ——油的相对渗透率

μ_o ——油的粘度

流度比较高，驱替相流体比被驱替相流体移动速度快，结果产生了指进现象，驱替流体绕过被驱替流体朝生产井方向运移。图 7 就是指进现象。由于受到指进现象的影响，油的大部分区域都没有被水波及到。水形成通道朝生产井流动。一旦形成窜流通道，水将绕过油藏中的残余油，直接从注入井流向生产井。



图 7 指进现象

如果在注入的水中加入聚合物，那么流度比就会降低（有利）。聚合物增加了注入水的粘度，因此降低了水的流度。驱替前缘比较均匀，指进现象不太明显。类似于活塞式驱油，留下较少的残余油。图 8 说明了这一现象。

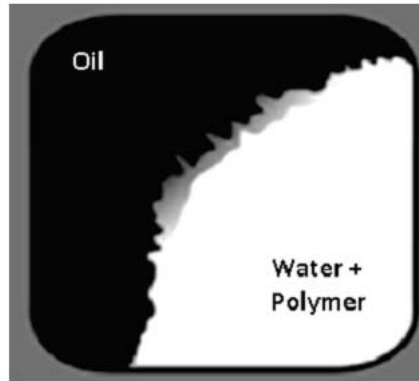


图 8 聚合物驱改善指进现象

组分粘度有两种输入方法。

第一种方法：使用关键字*VISCTABLE 输入粘温表。例如，假设考虑的流体模型包含水、油、气和聚合物，粘温表如下所示：

VISCTABLE				
T1	$\mu_{w,T1}$	$\mu_{o,T1}$	$\mu_{g,T1}$	$\mu_{p,T1}$
T2	$\mu_{w,T2}$	$\mu_{o,T2}$	$\mu_{g,T2}$	$\mu_{p,T2}$
T3	$\mu_{w,T3}$	$\mu_{o,T3}$	$\mu_{g,T3}$	$\mu_{p,T3}$
...				
Tn	$\mu_{w,Tn}$	$\mu_{o,Tn}$	$\mu_{g,Tn}$	$\mu_{p,Tn}$

可以定义不同压力下的粘温表，考虑温度和压力的关系。使用*ATPRES 关键字来定义不同压力下的粘温表，如下：

```
ATPRES pres_1
VISCTABLE
ATPRES pres_2
VISCTABLE
ATPRES pres_n
VISCTABLE
```

第二种方法：输入相关系数，使用一个关系式来计算不同温度下的粘度。关系式如下：

$$\mu_i = avisc_i \times \exp(bvisc_i/T_{abs}) \quad (18)$$

其中， $avisc_i, bvisc_i$ ——温度与液相组分粘度关系的系数

T_{abs} ——绝对温度

在 STARS 中，计算液相粘度可选择线性混合准则和非线性混合准则。STARS 缺省方法是线性混合准则计算，即用下面的关系式来计算：

$$\ln(\mu_a) = \sum_{i=1}^{n_c} f_{\alpha_i} \times \ln(\mu_{\alpha_i}) \quad (19)$$

其中，

μ_a ——混合粘度

f_{α_i} ——水相组分（ $a=w$ ）或油相组分（ $a=o$ ）“ i ”在线性混合计算中的权重因子

μ_{α_i} ——组分“ i ”在水相（ $a=w$ ）或油相（ $a=o$ ）中的粘度

n_c ——油相或水相组分的个数

粘度线性混合要用到 $f_{oi}=x_i$ (组分 i 在油相中的摩尔分数) 和 $f_{wi}=w_i$ (组分 i 在水相中的摩尔分数)。若定义非线性混合（例如，油相中存在溶解气或水相中存在聚合物），使用关键字 *VSMIXCOMP, *VSMIXENDP 和 *VSMIXFUNC（每个组分分别定义），这里， f_{oi} 和 f_{wi} 不同于摩尔分数 x_i 和 w_i 。

非线性混合计算时，对于组分 $i \in S$ ，用非线性混合函数 $f(f_{\alpha_i})$ 替换 f_{α_i} ，对于组分 $i \notin S$ ，用 $N \times f_{\alpha_i}$ 替换 f_{α_i} ，这里 S 表示关键组分。液相粘度的非线性混合准则计算公式：

$$\ln(\mu_a) = \sum_{i=1}^{n_{c \in S}} f(f_{\alpha_i}) \times \ln(\mu_{\alpha_i}) + N \times \sum_{i=1}^{n_{c \notin S}} f_{\alpha_i} \times \ln(\mu_{\alpha_i}) \quad (20)$$

其中，

μ_a ——水相（ $\alpha=w$ ）或油相（ $\alpha=o$ ）混合粘度

μ_{α_i} ——水相（ $\alpha=w$ ）或油相（ $\alpha=o$ ）组分“ i ”的粘度

f_{α_i} ——非线性混合计算时，非关键组分“ i ”在水相（ $\alpha=w$ ）或油相（ $\alpha=o$ ）中的权重因子

$f(f_{\alpha_i})$ ——非线性混合计算时，关键组分“ i ”在水相（ $\alpha=w$ ）或油相（ $\alpha=o$ ）中的权重因子

$n_{c \in S}$ ——液相中关键组分的个数

$n_{c \notin S}$ ——液相中非关键组分的个数

对于非线性混合权重因子的判定，每一个关键组分都独立于其他关键组分，实际上非线性混合函数 $f(f_{\alpha_i})$ 仅与其质量或摩尔分数（ x_i 或 w_i ）有关。这说明关键组分非线性混合函数都是假定其他关键组分不存在的情况下得来的。

定义液相粘度非线性混合准则的格式如下：

VSMIXCOMP comp_name 定义非线性粘度混合的组分

VSMIXENDP xlow xhigh 定义 comp_name 组分组成的最大值和最小值

VSMIXFUNC f1...f11 非线性混合函数，对应 xlow 和 xhigh 之间的 11 个

值。

缺省值：

如果*VSMIXCOMP 是缺省值，假定所有组分是线性混合

如果*VSMIXENDP 是缺省值，假定 $x_{low}=0$ 和 $x_{high}=1$

如果*VSMIXFUNC 是缺省值， $f_i=(i-1)/10$ ， $i=1$ 到 11，对应 0 到 1 之间的均值间隔。

条件：

非线性混合准则应用于哪一相，取决于*LIQPHASE，*WATPHASE 和 *OILPHASE 的定义。

在水和油相中，一个非线性函数可能会指定给多个组分。算法中包括调节非关键组分的权重因子，因此液相中至少有一个组分不是关键组分。

关键字*VSMIXENDP 和*VSMIXFUNC 应用到通过关键字*VSMIXCOMP 定义的最后一个关键组分。液相中的每个关键组分不能多次被定义。

下面的例子展示了如何将这些关键字输入到模型中，利用非线性准则来计算水相中存在聚合物的混合粘度。

```
VSMIXCOMP 'Polymer'
VSMIXENDP 0 0.001
VSMIXFUNC 0 0.0 0.0759 0.1598 0.2514 0.3498 0.4534 0.5608 0.6704 0.7808
0.891 1.0
```

STARS 将其组成 ($X_{high}-X_{low}$) 11 等分，对应于 $f_1...f_{11}$ 这 11 个值。在 STARS 内部，出现如下面表格：

Composition (w_p)	Mixing Function $f(w_p)$
0.0000	0.0000
0.0001	0.0759
0.0002	0.1598
0.0003	0.2514
0.0004	0.3498
0.0005	0.4534
0.0006	0.5608
0.0007	0.6704
0.0008	0.7808
0.0009	0.8910
0.0010	1.0000

任一组成 w_p 都对应一个混合函数 $f(w_p)$ ，这个混合函数可从表格直接得到或从内插中得到，用来计算溶液的粘度。由于溶剂的注入、降解或吸附等，混合物组成发生变化，混合函数也跟随发生变化，最终使得水相粘度发生变化。

更多的信息和计算例子，请参考 STARS 和 CMG 自带算例。

2.7 剪切对粘度的影响

多孔介质中的流动要受到介质形态学和流体流变学的影响。多孔介质中牛顿流体的流动，其粘度和剪切速率是没有关系的。其他一些不遵守牛顿定律的流体称为非牛顿流体。

一般情况下，流体根据它的流动特性分为牛顿流体和非牛顿流体；也就是说，若应用剪切应力和剪切速率，它的粘度也会发生变化。在恒定温度和压力下，剪切应力和剪切速率是一条通过原点的直线，其斜率是粘度 μ ，这就是所谓的“流动曲线”或“流变图”（牛顿流体的响应曲线）。按照定义，比例常数 μ ，与剪切应力和剪切速率没有关系，仅仅和流体自身属性及其对应的温度和压力有关。

另一方面，对非牛顿流体来讲，流动曲线不通过原点，并且剪切应力和剪切速率之间不是线性关系。粘度系数不是一个常数，它是剪切应力和剪切速率的函数。

剪切应力和剪切速率的关系式：

$$\tau = \mu \times \dot{\gamma} \quad (21)$$

其中， τ ——剪切应力

$\dot{\gamma}$ ——剪切速率

μ ——流体粘度

典型非牛顿流体剪切应力和剪切速率的关系曲线如图 9 所示：

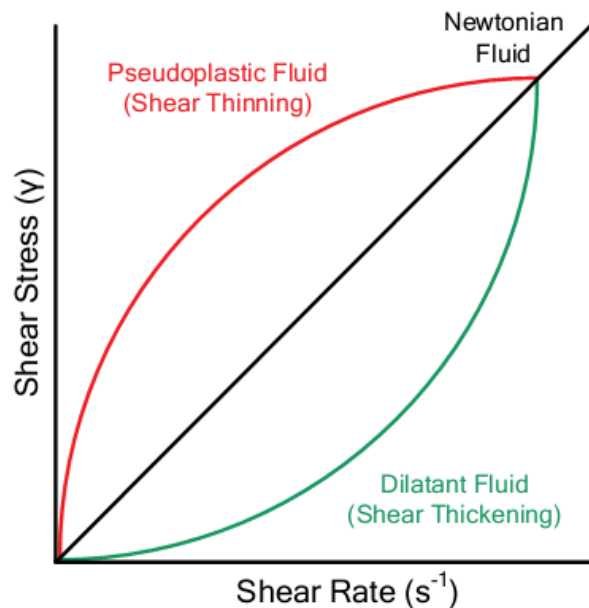


图 9 典型非牛顿流体剪切应力和剪切速率的关系曲线

通常，将剪切应力和剪切速率的关系曲线描绘在对数坐标系中，在有限的范

围内，其关系曲线接近于一条直线，关系式如下：

$$\tau = K \times \dot{\gamma}^n \quad (22)$$

其中， τ ——剪切应力

$\dot{\gamma}$ ——剪切速率

K ——流体稠度系数或指数

n ——流动特性指数或幂律指数

粘度随着剪切速率的增加而降低时，称为剪切变稀。相反，粘度随着剪切速率的增加而升高时，称为剪切增稠。剪切变稀比剪切增稠更常见。剪切变稀的流体被称为假塑性流体，而剪切增稠的流体被称为膨胀性流体。下面的图详细说明了这些流体的特性。

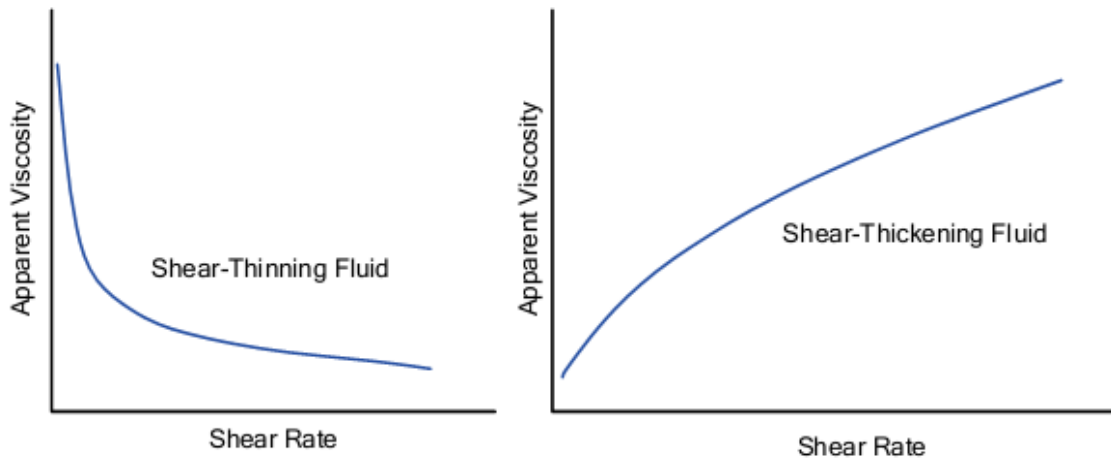


图 10 剪切变稀及剪切增稠下剪切速率与表观粘度的关系

很多剪切变稀和剪切增稠的流体，在极高或极低流速下表现出牛顿流体的性质。对于这些流体，描绘在对数坐标系中，如下图所示：

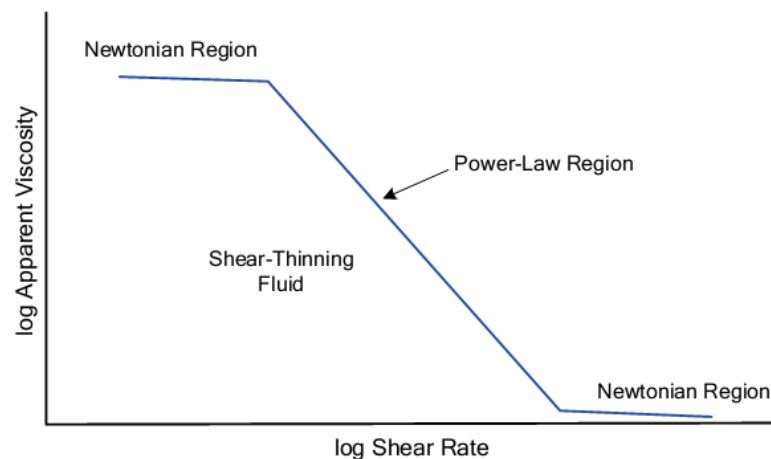


图 11 对数坐标系中剪切变稀流体剪切速率与表观粘度的关系

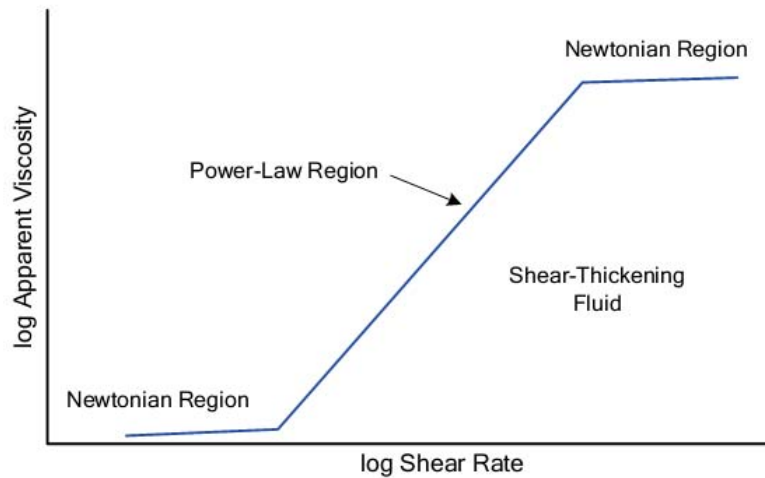


图 12 对数坐标系中剪切增稠流体剪切速率与表观粘度的关系

表观粘度接近于一个常数的区域称为牛顿区域。这些区域的中间是一条近似的直线。这些区域是幂律区域，可以用下面的关系式近似表达：

$$\ln(\mu_{app}) = a + b \times \ln(\dot{\gamma}) \quad (23)$$

可改写为：

$$\mu_{app} = \exp(a) \times \dot{\gamma}^b \quad (24)$$

方程（24）在很多文献中被下面的方程（25）替代，来自方程（21）和（22）

$$\mu_{app} = K \times \dot{\gamma}^{n-1} \quad (25)$$

K 表示流体稠度指数因子，等于方程（24）中的“exp（a）”。n 表示幂律指数，表达式（n-1）等于方程（24）中的“b”。注意：

- 当 $n < 1$ ，流体表现剪切变稀的性质
- 当 $n = 1$ ，流体表现牛顿流体的性质
- 当 $n > 1$ ，流体表现剪切增稠的性质

从上面内容可以看出，多孔介质中的流变学对使用聚合物来提高原油采收率起了很大的作用，因为注入井附近聚合物溶液在高速注入情况下粘度会很高，所以聚合物注入速率或产油速率（生产井）可能会减少。另一方面，远离注入井或油藏深处，聚合物溶液流速较低，粘度会很低，驱油效率会降低。

为了在提高采收率中模拟假塑性流体或膨胀性流体的性质（泡沫、高分子量流体包括聚合物溶液和液相中悬浮的微细颗粒），STARS 使用幂律或 Ostwaldde Waele 模型，如下所述：

2.7.1 剪切变稀或假塑性流体的幂律表达式

关键字*SHEARTHIN 用来表示假塑性流体或剪切变稀的影响，如下：

*SHEARTHIN $n_{thin}\mu_{l,lower}$

定义：

n_{thin} 剪切变稀方程中幂律指数（无量纲）。允许的取值范围 0.1 到 0.99。小于 0.3 导致不可接受的数值计算稳定性，所以不推荐使用。接近于 1 时表示近似牛顿流体的性能。

$\mu_{l,lower}$ 的意义主要与*SHEAREFFEC（*SHV|*SHR）有关。

*SHV：粘度剪切变稀方程中的参考达西流速（m/day | ft/day | cm/min），允许的变化范围 10^{-10} 到 10^{10} m/day(3.28×10^{-10} ft/day 到 3.28×10^{10} ft/day | 6.94×10^{-12} 到 6.94×10^8 cm/min)。

*SHR：粘度剪切变稀方程中的参考剪切速率（1/day | 1/day | 1/min），允许的变化范围 10^{-10} 到 10^{10} 1/day（ 6.94×10^{-14} 到 6.94×10^6 1/min）。

流体表观粘度 μ_{app} 和达西流速 u_l 之间的有界幂律关系式：

$$\mu_{app} = \begin{cases} \mu_{l,p} & \text{for } u_l \leq u_{l,lower} \\ \mu_{l,p} \times \left[\frac{u_l}{u_{l,lower}} \right]^{n_{thin}-1} & \text{for } u_{l,lower} < u_l < u_{l,upper} \\ \mu_{l,o} & \text{for } u_l \geq u_{l,upper} \end{cases} \quad (26)$$

剪切变稀体系中速率的上边界 $u_{l, upper}$ 是由幂律曲线上的点定义的，表观粘度 μ_{app} 等于没有聚合物溶液存在时流体的粘度 ($u_{l, o}$)。剪切变稀体系中速率的下边界 $u_{l, lower}$ 是由幂律曲线上的点定义的，表观粘度 μ_{app} 等于不存在剪切变稀时流体的粘度 ($u_{l, p}$)。更多讨论关于计算牛顿流体的粘度，参考 STARS 用户手册 *AVISC 和 *BVISC 的相关信息。

图 13 是对数坐标系，它描述的是在有界限的幂律关系式中表观粘度与剪切速率的关系。剪切变稀通过线性方程的斜率 ($n_{thin}-1$) 表示。

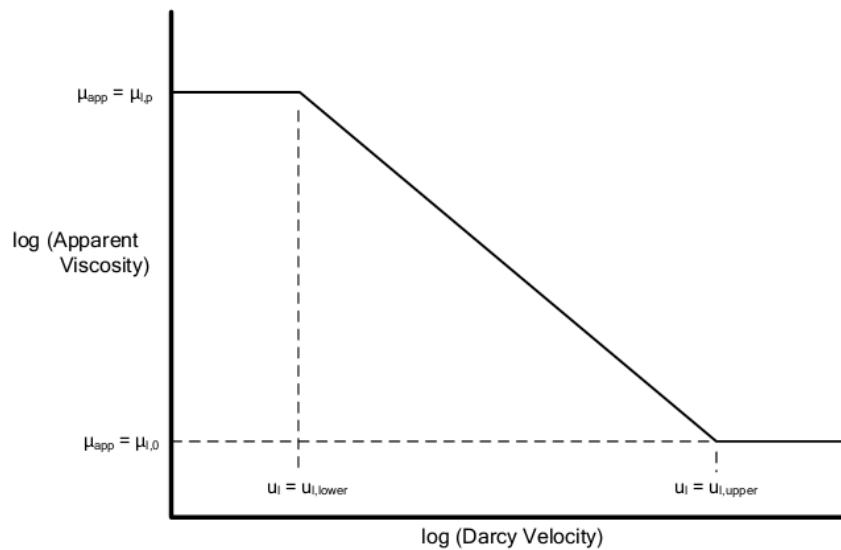


图 13 对数坐标系中剪切变稀流体达西流速与表观粘度的幂律关系

2.7.2 剪切增稠或膨胀性流体的幂律表达式

关键字*SHEARTHICK 用来表示膨胀的性质或剪切增稠的影响，如下：

*SHEARTHICK n_{thick} u_{l,max} μ_{l,max}

定义

n_{thick}——剪切增稠方程中幂律指数（无量纲）。允许的取值范围 1.01 到 5。大于 2.5 导致不可接受的数值结果，所以不推荐使用。接近于 1 时表示近似牛顿流体的性能。

u_{l,max}——u_{l,maxr} 的意义主要与*SHEAREFFEC（*SHV|*SHR）有关。

*SHV——粘度剪切变稀方程中参考的达西流速（m/day | ft/day | cm/min），允许的变化范围 10⁻¹⁰ 到 10¹⁰m/day(3.28×10⁻¹⁰ ft/day 到 3.28 ×10¹⁰ft/day | 6.94 ×10⁻¹² 到 6.94 × 10⁸cm/min)。

*SHR——粘度剪切变稀方程中参考的剪切速率（1/day | 1/day | 1/min），允许的变化范围 10⁻¹⁰ 到 10¹⁰1/day（6.94×10⁻¹⁴ 到 6.94×10⁶1/min）。

μ_{l,max}——在粘度的剪切增稠方程中最大的粘度（cp），允许的范围是 10⁻⁵ 到 10⁶cp。

流体表观粘度 μ_{app} 和流体达西流速 u_i 之间的幂律关系式：

$$\mu_{app} = \begin{cases} \mu_{l,p} & \text{for } u_l \leq u_{l,lower} \\ \mu_{l,max} \times \left[\frac{u_l}{u_{l,max}} \right]^{n_{thick}-1} & \text{for } u_{l,lower} < u_l < u_{l,max} \\ \mu_{l,max} & \text{for } u_l \geq u_{l,max} \end{cases} \quad (27)$$

剪切速率的下限， $u_{l,lower}$ 是由幂律曲线来定义的，表观粘度 μ_{app} 等于不存在剪切增稠时的流体粘度。更多讨论关于计算牛顿流体的粘度，参考 STARS 用户手册*AVISC 和*BVIS 的相关信息。

剪切速率的上限， $u_{l,max}$ 是由幂律曲线来定义的，表观粘度 μ_{app} 等于用户定义的最大粘度 ($\mu_{l,max}$)。

图 14 是对数坐标系，它描述的是在有界限的幂律关系式中表观粘度与剪切速率的关系。剪切增稠通过线性方程的斜率 ($n_{thick}-1$) 表示。

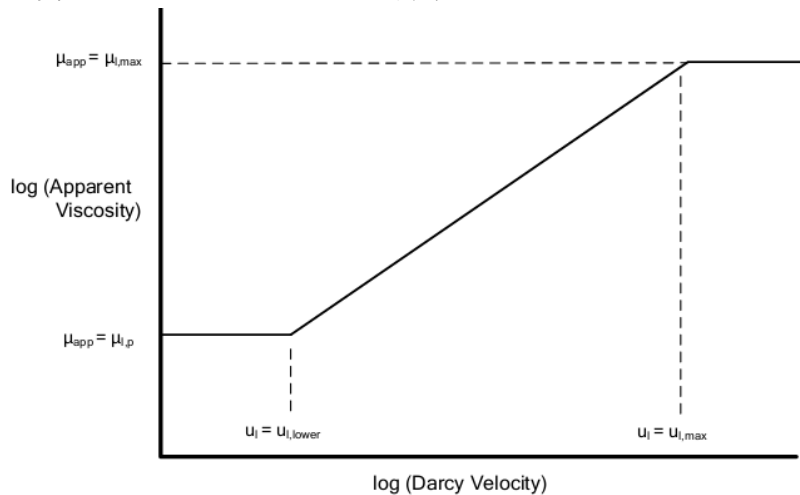


图 14 对数坐标系中剪切增稠流体达西流速与表观粘度的幂律关系

假如流体既存在剪切变稀也存在剪切增稠两方面的性质，那么这些关键字可以一起使用。流体表观粘度是上述剪切变稀和剪切增稠的表观粘度之和。

$$\mu_{app} = \mu_{app,thin} + \mu_{app,thick} \quad (28)$$

流体表观粘度 μ_{app} 和流体达西流速 u_l 之间的幂律关系式：

$$\mu_{app} = \begin{cases} \mu_{l,p} & \text{for } u_l \leq u_{l,lower} \\ \mu_{app,thin} + \mu_{app,thick} & \text{for } u_{l,lower} < u_l < u_{l,max} \\ \mu_{l,max} & \text{for } u_l \geq u_{l,max} \end{cases} \quad (29)$$

剪切变稀和增稠体系中低速边界 $u_{l,lower}$ 是由幂律关系曲线定义的，表观粘度 μ_{app} 等于不存在剪切变稀时流体的粘度。剪切变稀和增稠体系中高速边界 $u_{l,max}$ 是由幂律关系曲线定义的，表观粘度 μ_{app} 等于用户定义的最大粘度。

图 15 是对数坐标系，它描述的是在有界限的幂律关系式中表观粘度与剪切速率的关系。

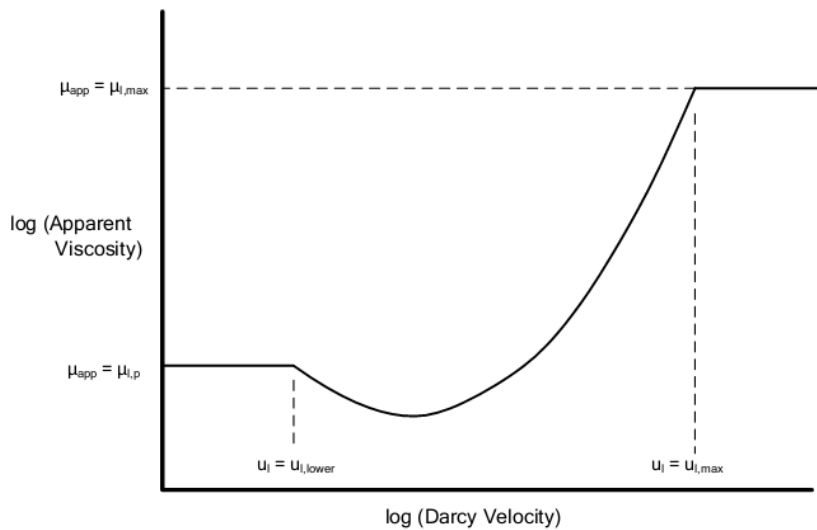


图 15 对数坐标系中剪切变稀和增稠达西流速与表观粘度的幂律关系

上面解释了粘度与速率的关系，在 STARS 中缺省的选项是没有考虑剪切的影响。对于粘度和剪切速率的选项，同样的逻辑，可以用“shear rate”代替“velocity”。

如果你需要用粘度和剪切速率的选项替代缺省选项（粘度和剪切速率的关系），那么必须使用关键字*SHEAREFFEC。关键字的格式如下：

***SHEAREFFEC (*SHV|*SHR)**

定义：

*SHV 剪切粘度与达西流速的关系

*SHR 剪切粘度与剪切速率的关系

缺省值：

如果*SHEAREFFEC 缺省，假定使用*SHEAREFFEC *SHV。

2.7.3 速率/剪切速率与粘度的表格输入选项

除上面的关键字外，STARS 有一个关于速率-粘度或剪切速率-粘度表格输入选项，当使用实验数据或简单的幂律关系式不是特别充分的时候，定义速率-粘度或剪切速率-粘度的关系式，非常有用。格式如下：

格式：

***SHEARTAB**

{velocity viscosity}

or

***SHEARTAB**

{shear-rate viscosity}

定义：

SHEARTAB**——粘度-速率关系表格。允许的最大表格行数是 40 行。第一列是速率或是剪切速率，主要是由SHEAREFFEC** 决定。

Velocity——***SHEAREFFEC 0**：第一列是相的达西流速（m/day | ft/day | cm/min）。允许的取值范围是 10^{-10} 到 10^{10} m/day (3.28×10^{-10} 到 3.28×10^{10} ft/day | 6.94×10^{-12} 到 6.94×10^8 cm/min)

Shear-rate——***SHEAREFFEC 1**：第一列是相的剪切速率（1/day | 1/day | 1/min）。允许的范围是 10^{-10} 到 10^{10} 1/day (6.94×10^{-14} 到 6.94×10^6 1/min)。

Viscosity——对应速率下的组分粘度（cp）。允许的取值范围 10^{-5} 到 10^6 cp。

这些关键字需遵循下面的使用条件：

a) ***SHEARTAB** 应用于***VSMIXCOMP** 定义的组分和相，因此***VSMIXCOMP** 必须在 ***SHEARTAB** 前面出现。

b) ***SHEARTAB** 不能和***SHEARTHICK** 和***SHEARTHIN** 一起使用。

c) 第一列是达西流速或是剪切速率，主要是由***SHEAREFFEC** 决定。

d) 对于相的达西流速/剪切速率不在粘度与达西流速/剪切速率表格范围内，那么使用与相的达西流速/剪切速率最近的粘度。

2.7.4 表皮因子对流速的影响

在很多情况下，剪切变稀或增稠发生在注入井所在网格。模拟井所在网格内的非牛顿流体流动需要用户输入表皮因子。接下来讨论，基于牛顿流体流动的标准径向井模型，和通过使用表皮因子来校正井所在网格内真实的非牛顿流体流动。

对于井的表皮因子详细信息，请参考用户手册“**Well and Recurrent Data**”部分的“**Well Element Geometry (Conditional)**” 和“**Appendix A: Well Model Details**”部分的“**Radial Inflow Well Model**”。

径向井模型是稳态的牛顿流体流动，它包含了一个无量纲压力降表皮因子。这个方程使用同样的井半径 r_e ，实际井的稳态流动压力等于井网格数值计算上的压力。井底流压和网格压力之间的压差 P_k 的关系式：

$$P_{wf_k} - P_k = \left(\frac{\mu}{k}\right) \times \left(\frac{q_{jk}}{2\pi \cdot h}\right) \times \left[Ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) + S\right] \quad (30)$$

类似的可改写为速度和粘度的非牛顿流体流动的方程。

$$P_{wf_k} - P_k = \left(\frac{\mu_{ref}}{k \cdot u_{ref}^{n-1}} \right) \times \left(\frac{q_{jk}}{2\pi \cdot h} \right) \times \left(\frac{1}{1-n} \right) \times [r_e^{1-n} - r_w^{1-n}] \quad (31)$$

其中， n 、 μ_{ref} 和 u_{ref} 分别是指数因子、参考粘度和参考速度。

用户必须指定井网格中剪切变稀和增稠哪一个起主导作用，以便在幂律关系式中使用合理的指数因子和参考参数。例如，如果剪切变稀起主导作用（或仅仅存在剪切变稀），那么 $n=n_{thin}$ ， $u_{ref}=u_{l,lower}$ ，和 $\mu_{ref}=\mu_{l,p}$ 。

表皮因子是牛顿和非牛顿流动之间的压降差，由下面的方程决定：

$$S = \left(\frac{1}{1-n} \right) \times \left[1 - \left(\frac{r_w}{r_e} \right)^{1-n} \right] + \text{Ln} \left(\frac{r_w}{r_e} \right) \quad (32)$$

其中，

$$\mu = \mu_{ref} \times \left[\frac{u_l}{u_{ref}} \right]^{n-1} \quad (33)$$

$$u_l = \frac{q_{jk}}{2\pi \times h \times r_e} \quad (34)$$

表皮因子需对牛顿径向流入井模型提供必要的修正，以计算井所在网格内的非牛顿流动。这个方程可以通过假定牛顿流动和非牛顿流动使用相同的半径来解答。然而，技术上看这些值是不一样的，对于非牛顿流动来说，一个判定井网格半径较为准确的方法，可以使用幂律关系式中速率-粘度的关系和与 Peaceman 相似的微分项。

2.7.5 将剪切速率转化为达西流速

将实验测得的剪切速率转化为达西流速的相关信息是从 Cannella et al 的研究中得来的。有效的多孔介质剪切速率和流体达西流速的关系方程如下：

$$\dot{\gamma} = \frac{\gamma_{fac} \times |u_l|}{\sqrt{k_{abs} \times k_{rl} \times \phi \times S_l}} \quad (35)$$

其中， K_{abs} 和 ϕ 表示绝对渗透率和孔隙度， u_l ， K_{rl} 和 S_l 分别是相的达西流速，相对渗透率和饱和度。

剪切速率因子：

$$\gamma_{fac} = C \times \left[\frac{3n+1}{4n} \right]^{\frac{n}{n-1}} \quad (36)$$

其中， n 是剪切变稀指数因子， C 是常数，通常等于 6，它主要和多孔介质的弯曲程度有关。缺省的剪切速率因子是 4.8，对应 $C=6$ 和 $n=0.5$ ；用户可以通过

过关键字*SHEAR_FAC 调整，如下：

格式：

*SHEAR_FAC factor

定义：

Factor 在上面提到的剪切速率方程中的因子 γ_{fac}

缺省值：

如果*SHEAR_FAC 是缺省值，那么假定 $\gamma_{fac}=4.8$ 。

如果使用速率和粘度的关系，那么参考速率对应一个参考渗透率。因此，油藏的相关部分应该用一个平均渗透率来表征。如果油藏的渗透率是不均匀的，那么推荐使用剪切速率和粘度的模型。

2.8 矿化度对粘度的影响

考虑矿化度对聚合物的影响是非常重要的，例如，水解聚丙烯酰胺（HPAM）对矿化度和硬度非常敏感，因此当聚合物溶于矿化度或硬度较高的水中，其粘度改善的性能大幅减弱。这一特性表明了使用聚合物不利的一面。相反，生物聚合物黄原胶比聚丙烯酰胺抗矿化度或硬度要强，这是它的一个主要优点。如果地层水矿化度较高，那么聚合物应该具有抗盐性或注入淡水前置液对油藏进行预处理，防止聚合物粘度的降低。

为了模拟这一影响，STARS 模拟器通过幂律方程使用非线性混合准则中关键组分的粘度（*AVISC, *BVISC 或*VISCTABLE）。

矿化度浓度的比值如下：

$$\mu_p = \begin{cases} \mu_p^0 & \text{for } x_{salt} \leq x_{min} \\ \mu_p^0 \times \left(\frac{x_{salt}}{x_{min}}\right)^{sp} & \text{for } x_{salt} > x_{min} \end{cases} \quad (37)$$

其中：

x_{min} ——不考虑非线性混合组分粘度与矿化度的关系的情况下矿化度组分摩尔/质量分数的下限。换句话说， x_{min} 是强制给定的相最低矿化度。允许的取值范围是 10^{-5} 到 10^{-1} 。

x_{salt} ——矿化度组分摩尔/质量分数

μ_p^0 ——纯组分的聚合物粘度

μ_p ——在盐溶液中聚合物组分的粘度，这个新的聚合物组分的粘度用于非线性混合函数来判定相的粘度。

sp——在对数坐标系中聚合物粘度与矿化度比值的斜率。允许的取值范围是-100 到 100。

更多信息参考 STARS 用户手册关键字*VSSALTCMP。

三、实验室和矿场数据

在对一口井或油藏实施提高采收率的方法之前，首先通过实验室和矿场测得的数据找出最优的生产方式。例如，对聚合物驱来说，实验室测得的数据主要有聚合物注入量、滞留、稳定性、流体相容性以及有效粘度的测量，同时矿场实验主要包括注入量、生物稳定性以及对层内粘度的测量。

聚合物驱的主要目标是选择适合油藏条件的聚合物，主要基于抗温性、抗盐性、混合水溶液的质量以及经济条件。为了选择恰当的聚合物，需要进行一个详细的筛选流程来评价基础流体的流变性和质量，例如，筛选因子测试、过滤比和粘度测量。

一旦选择需要的聚合物后，接下来执行第二阶段的实验项目-岩心驱替实验。基于对聚合物吸附、阻力因子和残余阻力因子的测量，用来描述岩石-聚合物的相互作用。利用这些信息，来判定聚合物浓度以及产出水和油的体积。

最后，需要做热老化的研究，来证实选择的聚合物在油藏温度下随着时间的进行没有大幅度的降解。

总之，在实验室或矿场级别下，聚合物驱需要模拟的参数包括：

聚合物筛选

- 粘度（与剪切速率和浓度相关）
- 分子量
- 聚合物稳定性（热、生物、机械和化学降解）

聚合物的筛选用来判定聚合物的半衰期。

岩心驱替

- SCAL（特殊岩心分析）了解岩石和流体属性
- 孔隙度
- 渗透率
- 相对渗透率曲线（初始和残余油饱和度）
- 油和水性质（密度、粘度等等）
- 岩心围压
- 聚合物浓度和段塞尺寸
- 流速

- 聚合物吸附（静止或动态）
- 产出流体中聚合物浓度
- 注入速率（剪切速率）范围以外产出物的粘度

为了比较和拟合在流变仪中测量的这些数据

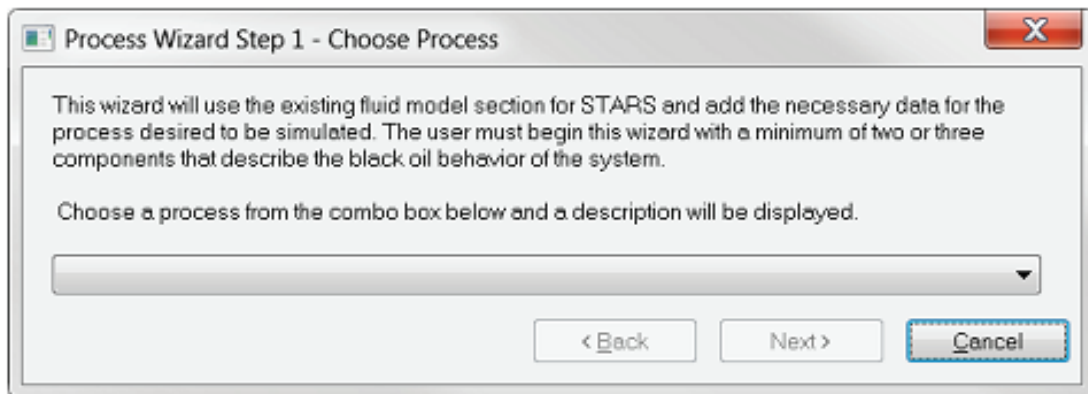
- 残余油阻力因子和降低的渗透率
- 产出油和水的体积

四、使用 **Builder** 的过程向导（**Process Wizard**）来建立聚合物驱模型

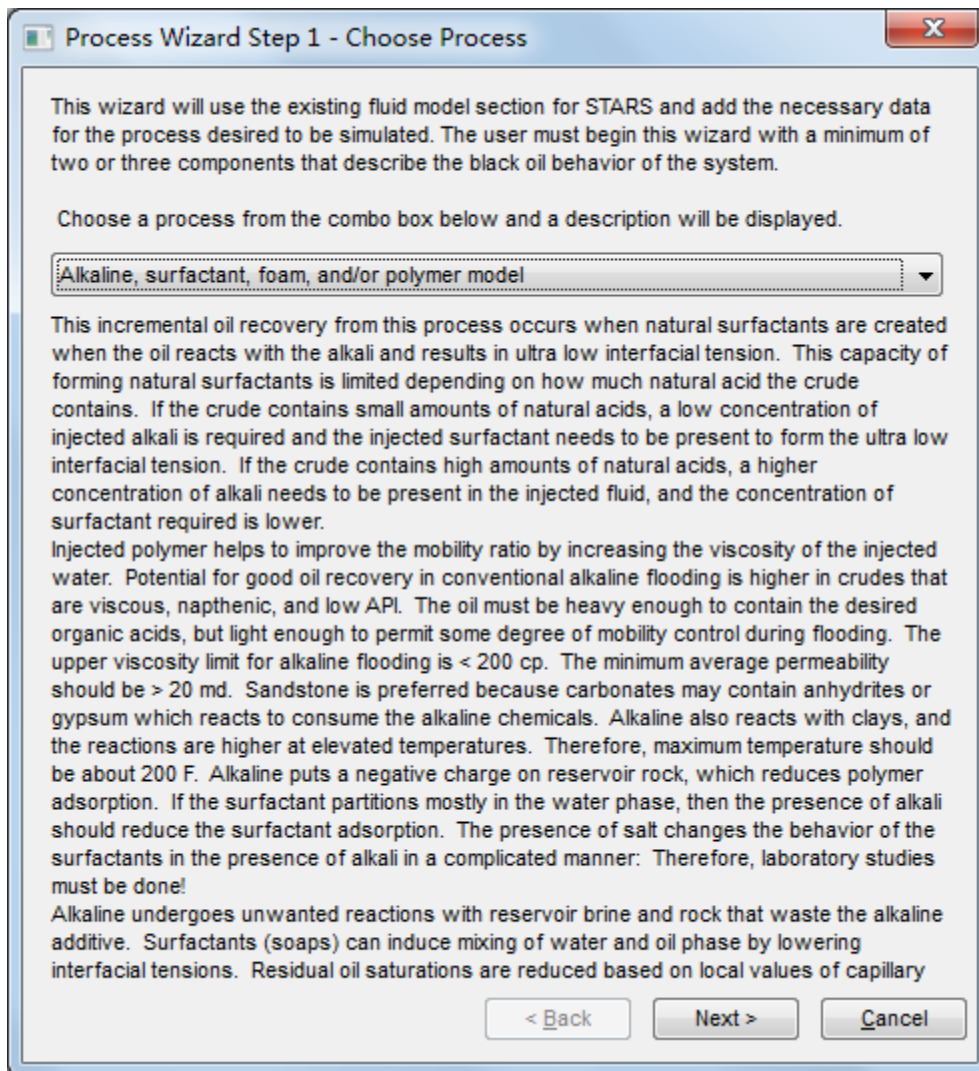
下面介绍使用过程向导来建立一个聚合物驱模型

1. 用 **builder** 打开主文件。
2. 在菜单栏点击 **Components**，然后选择 **Process Wizard**。显示对话框

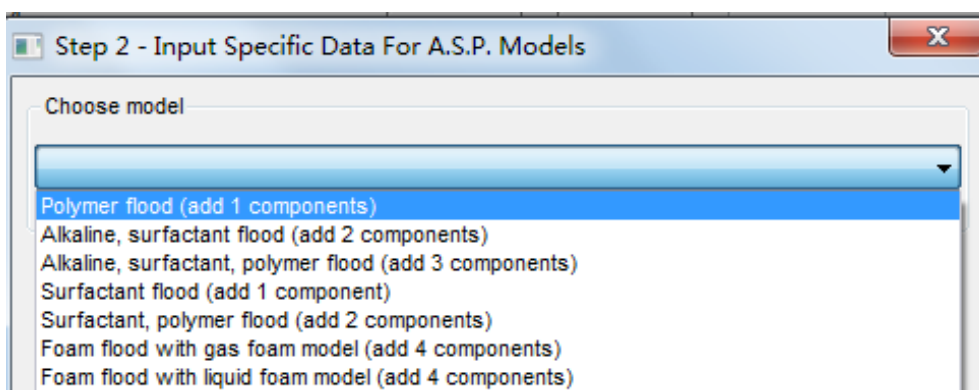
Process Wizard Step 1- Choose Process:



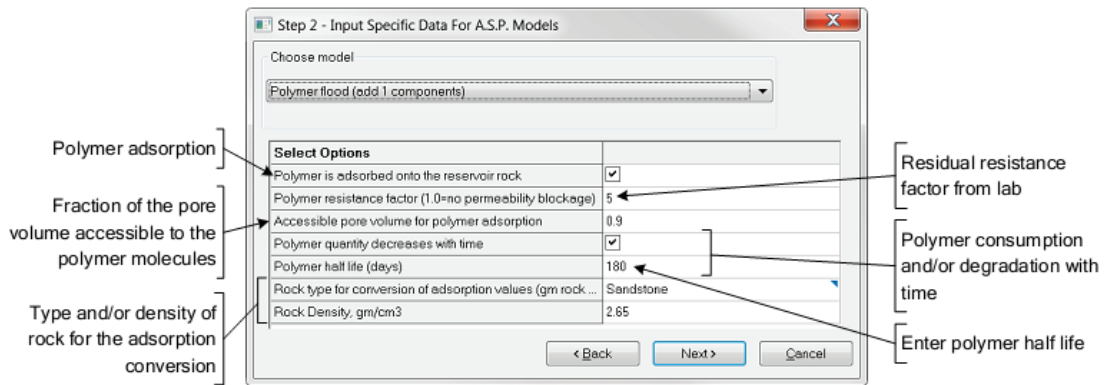
3. 选择 Alkaline, surfactant, foam and/or polymer model:



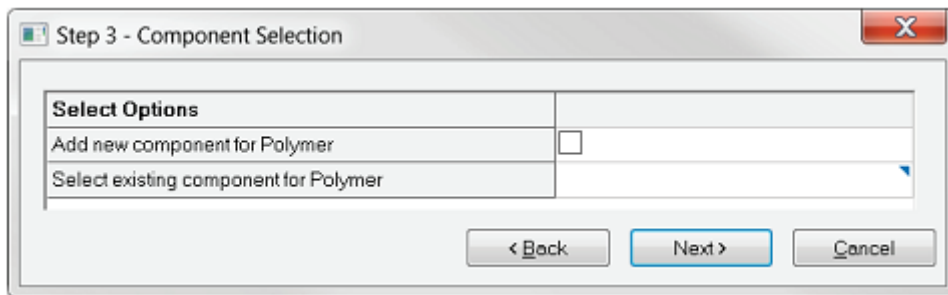
4. 点击 Next。对话框显示 Step 2-Input Specific Data For A.S.P.:



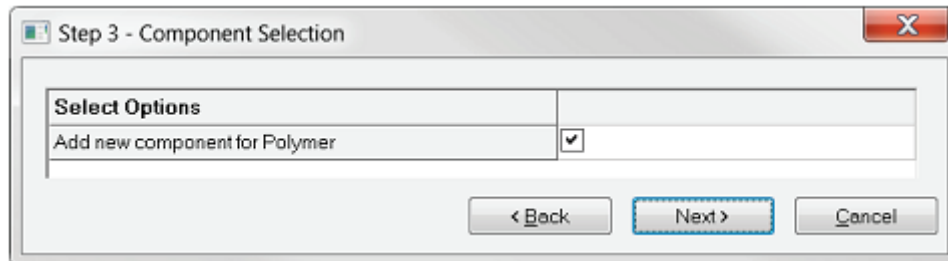
5. 选择 the polymer flood(add 1 component)model:



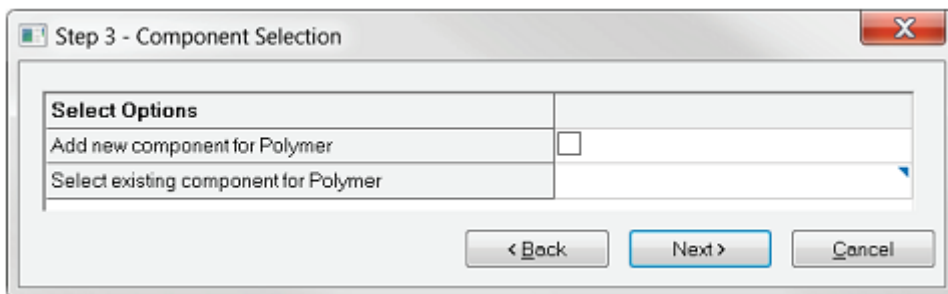
6. 如上图所示配置模型选项，然后点击 **Next**。显示对话框 **Step3-Component Selection**：



假如先前没有定义聚合物组分，那么过程向导-Step3 允许添加一个新的聚合物组分，如下所示：

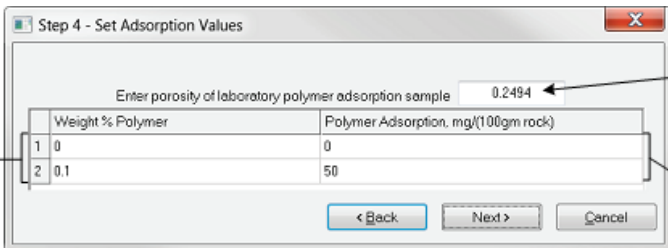


选择或更新已经定义的聚合物组分，如下所示：



如果你选择复选框，那么会添加一个新的组分。如果不选复选框，你可以点击下拉菜单选择要更新属性的组分。

7. 如果有必要，添加组分，然后点击 **Next**。显示对话框 **Step4-Set Adsorption**

Values:


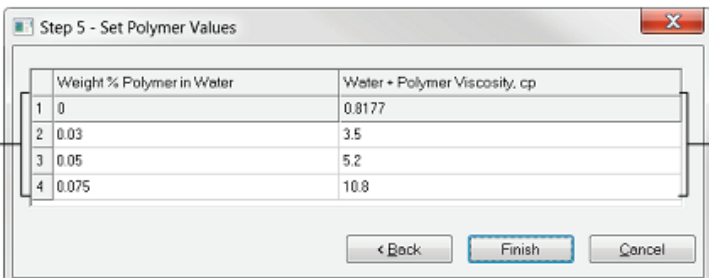
Enter porosity of laboratory polymer adsorption sample: 0.2494

Weight % Polymer	Polymer Adsorption, mg/(100gm rock)
1 0	0
2 0.1	50

Buttons: < Back, Next >, Cancel

Annotations:
 - Porosity used in the adsorption lab experiment (points to 0.2494)
 - Polymer concentration in weight % (points to the table)
 - Polymer adsorption reported by lab (mg / 100g of rock) (points to the table)

8. 如果有必要注入聚合物吸附量，如上图所示，然后点击 Next。显示对话框

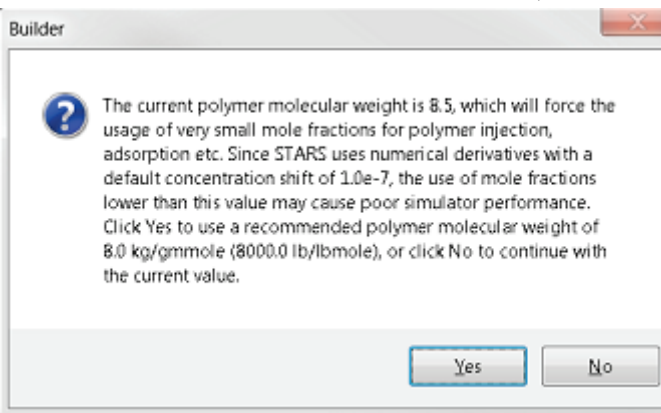
Step5-Set Polymer Values:


Weight % Polymer in Water	Water + Polymer Viscosity, cp
1 0	0.8177
2 0.03	3.5
3 0.05	5.2
4 0.075	10.8

Buttons: < Back, Finish, Cancel

Annotations:
 - Polymer concentration in weight % (points to the table)
 - Polymer solution viscosity (cps) (points to the table)

9. 如上图所示，输入聚合物粘度，点击 Finish。如果在 **Step3-Component Selection**，改变或更新了已经定义的聚合物组分，那么现在聚合物的分子量大于 8kg/gmmole (or 8000lb/lbmole)，显示下面的信息：



Builder

?

The current polymer molecular weight is 8.5, which will force the usage of very small mole fractions for polymer injection, adsorption etc. Since STARS uses numerical derivatives with a default concentration shift of $1.0e-7$, the use of mole fractions lower than this value may cause poor simulator performance. Click Yes to use a recommended polymer molecular weight of 8.0 kg/gmmole (8000.0 lb/lbmole), or click No to continue with the current value.

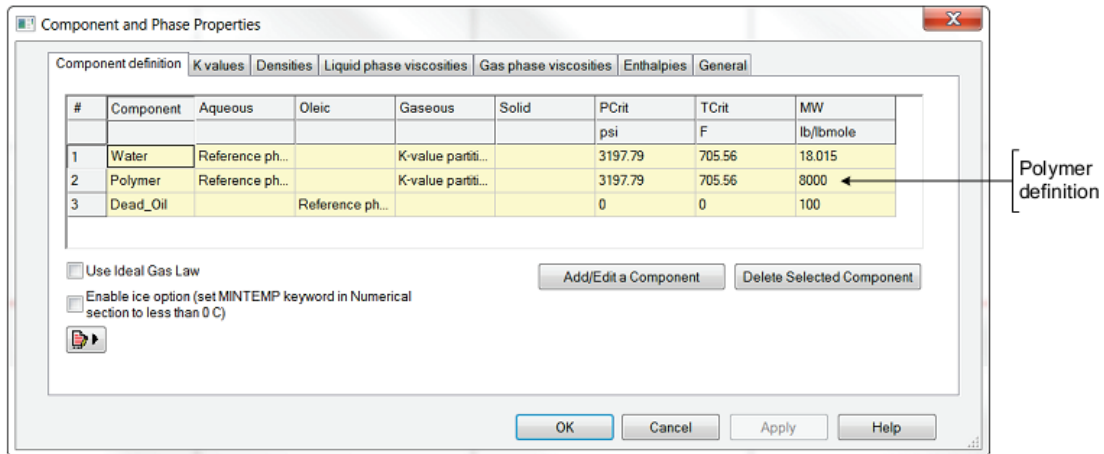
Buttons: Yes, No

10、如上面呈现的信息，点击 **Yes** 使用推荐的聚合物分子量 8kg/gmmole (or 8000lb/lbmole) 或点击 **No** 继续使用当前值。过程向导执行计算，更新主文件，激活 Builder 主窗口。

五、查看并调整过程向导的结果

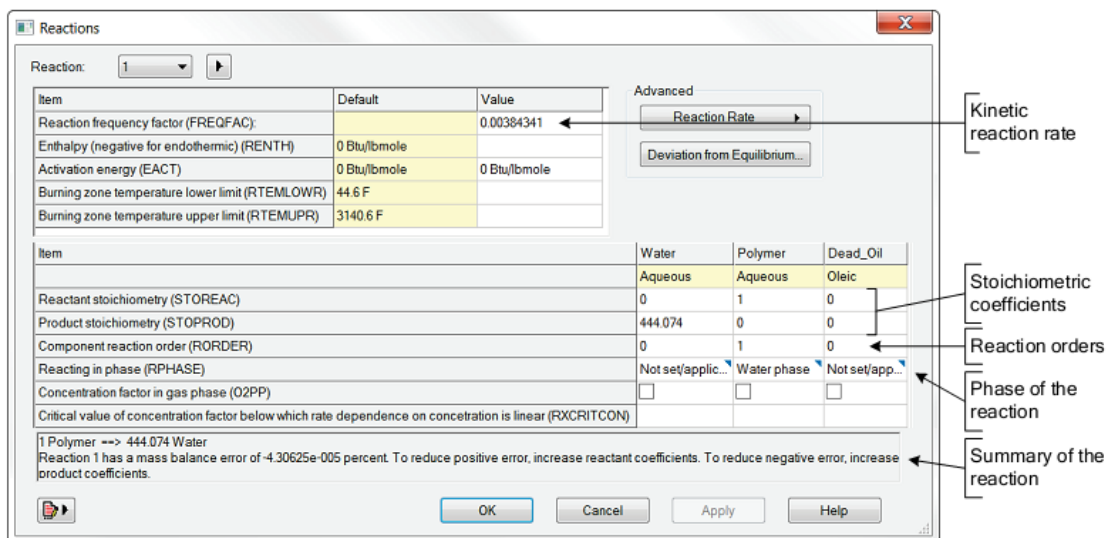
5.1 组分的生成

检查通过过程向导产生的聚合物的组分（如果有必要可以进行编辑），点击菜单栏 **Component| Add/EditComponents**。显示 **Components and Phase Properties** 对话框：



5.2 聚合物降解反应

为了查看聚合物降解反应的详细信息，点击菜单栏 **Component |Reactions**。显示 **Reactions** 对话框，如下面例子所示：

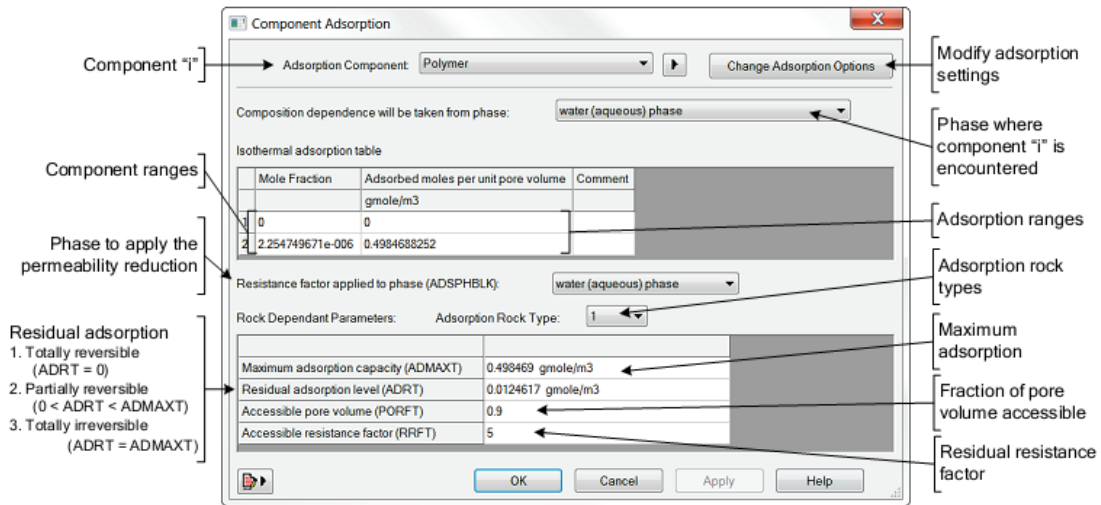


5.3 聚合物的吸附

聚合物吸附表格

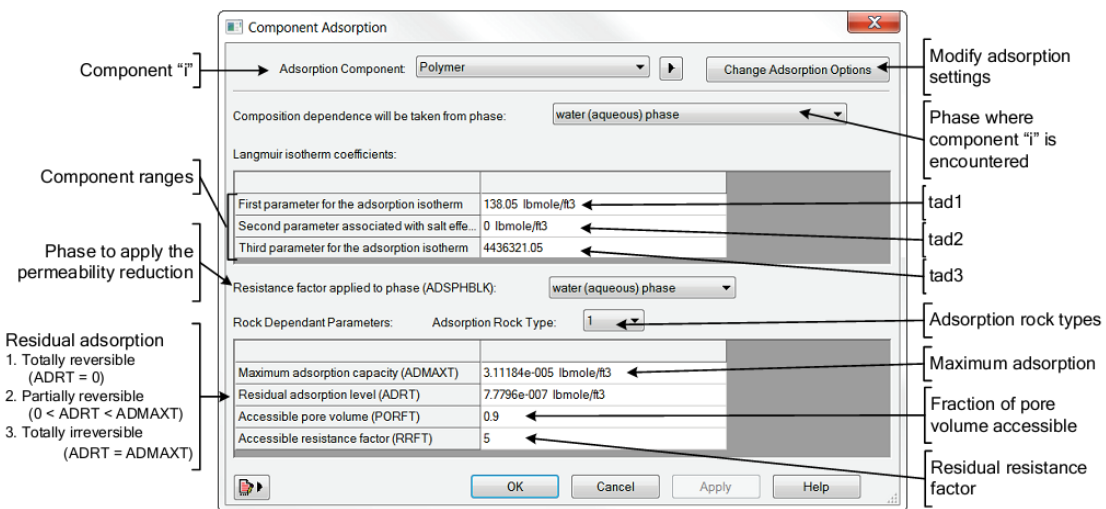
为了查看聚合物吸附表格，点击菜单栏 **Rock- Fluid|Components**。显示

Component Adsorption 对话框:



朗格缪尔等温曲线选项

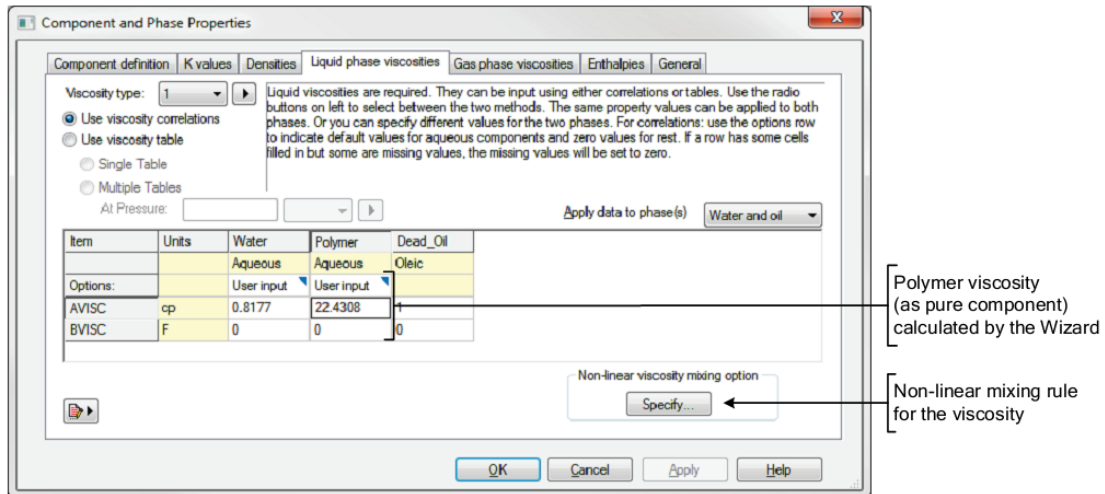
点击 **Change Adsorption Options** 按钮，使吸附依赖与朗格缪尔等温系数。显示 **Component Adsorption** 对话框，输入朗格缪尔等温系数表格，如下所示:



请注意，当使用一个吸附值时，Builder 计算中间浓度值的吸附值时使用线性插值计算，这将不遵循朗格缪尔曲线形状。

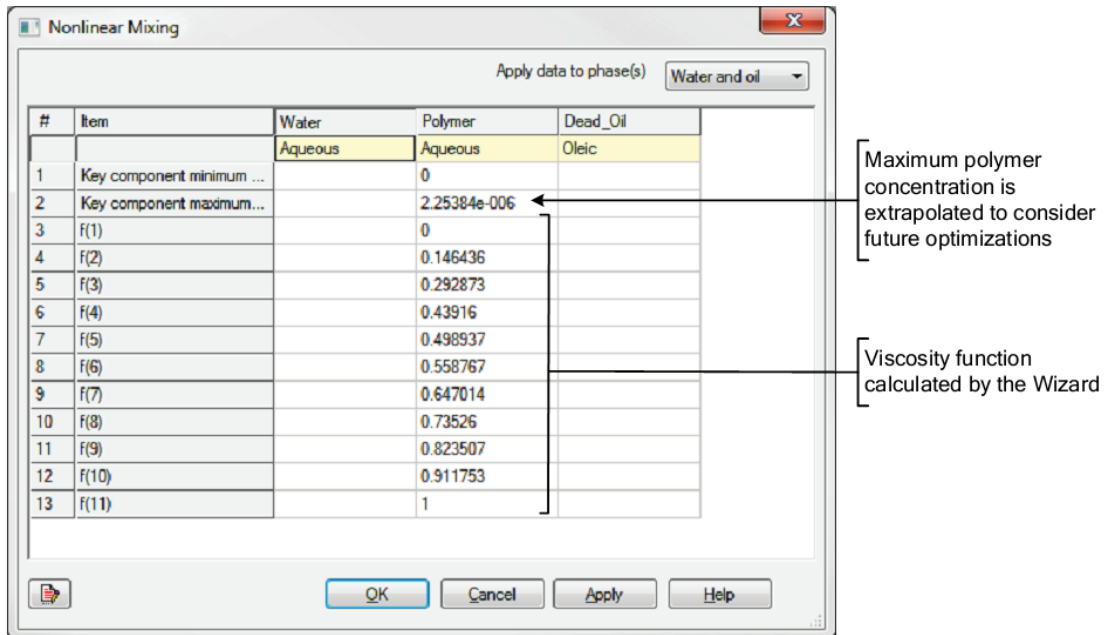
5.4 聚合物粘度

为了查看聚合物粘度的结果，点击菜单栏 **Component | Add/Edit Components**，然后选择 **Liquid phase viscosities**:



注意：BVISC 等于 0，表示组分的粘度与温度没有关系。

为了定义粘度非线性混合，点击 Specify。非线性混合对话框如下：



六、其他需要考虑和解决的问题

该部分介绍在聚合物驱过程中你可能需要解决的一些问题及方法。

6.1 高分子量（或低摩尔分数）

STARS 使用一个缺省值为 $10E-7$ 的浓度偏移的数值微分，而不是代数微分来形成流动方程。结果，使用高分子量的聚合物（例如， $10e+6$ ）可能会降低模拟器的数值稳定性。这是，因为在基于摩尔分数的模型中，该聚合物的浓度值是非常低的（例如 $10e-9$ ）。

如果数值变化大于注入的摩尔分数，可能会产生不精确的微分，这将影响收敛。同时，在模拟结束时注入水将聚合物驱替出油藏，数值稳定性可能会降低，而聚合物浓度进一步降低，导致更差的微分计算。

有四种方法来解决这个问题。第一种方式是改变（减少）默认情况下收敛公差*ZAQ，该关键字将数值偏移水平与收敛公差关联起来，因此，减小一个就减小了另一个。通过数值部分的这种修改，加上减少最大时间步长*DTMAX 以及通过设置*NEWTONCYC<默认值来限制多余的牛顿迭代的次数，能够提高运行效率。通过使用下面的数值控制参数，可以得到一个好的结果：

```
*NUMERICAL
*NORM *ZAQ 0.075
*CONVERGE *ZAQ 5.0e-4
*DTMAX 15.0
*NEWTONCYC 8
```

第二种方法是定义一个较小分子量的“拟聚合物”，与高分子量的聚合物具有相同的粘度和吸附效果。这种“拟聚合物”摩尔分数的方法将保留真正的聚合物摩尔分数模型所使用的质量分数。

解决这个问题的第三种方式是通过使用*MASSBASIS 选项，用质量分数浓度来运行模型。如果实验室模拟用这种方式运行，我们建议，矿场模型也可以用这种方式运行，特别是如果没有气相生成和矿场GOR 保持在其初始值，在这种情况下，几乎不需要用摩尔分数表示。请注意，使用*MASSBASIS 需要将溶解气在油相中的摩尔分数转换成质量分数，并且需要转换溶解气的k-值。

第四种方式是使用*SHIFT MWT 关键字（参阅最新的STARS 手册中有关这个关键字的信息）。

6.2 非平衡渗透率降低效应

如先前部分内容所述，一些聚合物降低水相相对渗透率的能力要强于降低烃类的相对渗透率，这一现象被称为非平衡渗透率降低或DPR 效应。

STARS 没有对每一相都通过使用残余阻力因子来明确的处理这一现象。这一部分对模拟相渗透率的降低提供了选项和工具，主要是通过使用不同的堵塞方案来实现。下面介绍四个选项。

第一个选项是通过岩心驱替实验，每一相都获得一个“拟”残余阻力因子，通

常他们其中的一相作为一个参考的残余阻力因子。一般情况下，参考残余阻力因子选油相的，因为油相不像水相那样容易变化。

$$RRF_w' = \frac{RRF_w}{RRF_o} > 1 \rightarrow \text{because normally } RRF_w > RRF_o \quad (38)$$

$$RRF_o' = \frac{RRF_o}{RRF_o} = 1 \quad (39)$$

→ no resistance effect, and it is not necessary to assign it to the simulator

第二个选项是 STARS 使用第一个变渗透率选项来降低所有相的渗透率，然后进一步利用残余阻力因子修改水相流度。这里，绝对渗透率是孔隙度的函数。随着聚合物的吸附，孔隙度降低，渗透率也应该降低，如下：

- 通过关键字*PERMCK 使用 Carmen-Kozeny 公式。
- 通过关键字*PERMTAB 查表得到渗透率倍乘因子。
- *PERMULI、 *PERMULJ 或*PERMULK 用户自定义渗透率倍乘因子

第三个选项用相渗曲线内插的方法来修改油相相渗曲线，考虑油相对相渗的影响。然后，水相残余阻力因子用作修改水相流度的缺省值。

第四个选项包括一级反应的产物，主要是聚合物被分成两个新组分或“拟-聚合物”。这些组分中的一个组分将降低水相流度（通过水相残余阻力因子），其他组分降低油相流度（通过油相残余阻力因子）。

$$Polymer \rightarrow aPolymer_w + bPolymer_o \quad (40)$$

化学反应系数的配平是通过残余阻力因子使用下面的方程得到：

$$RRF_T = RRF_w + RRF_o \quad (41)$$

$$a = \frac{RRF_w}{RRF_T} < 1 \quad (42)$$

$$b = \frac{RRF_o}{RRF_T} < 1 \quad (43)$$

校正吸附，并且在计算水相粘度时应该考虑聚合物浓度。

6.3 聚合物模型输出结果的说明

在 Results 3D 中查看化学驱的结果，首先要在模型 IO Control| Simulation Results Output 中添加下面网格输出结果关键字：

- ADSORP: 组分吸附
- ADSPCMP: 用于计算吸附组分中关键组分的组成
- KRINTER: 相渗曲线插值
- SHEARO: 油相剪切速率
- SHEARW: 水相剪切速率
- SHEARG: 气相剪切速率
- SHEARSTRG: 气相剪切应力
- SHEARSTRW: 水相剪切应力
- SHEARSTRO: 油相剪切应力
- VISCVELW: 水相达西流速的大小
- VISCVELO: 油相达西流速的大小
- VISCVELG: 气相达西流速的大小
- VISWCOM: 通过关键字*VSMIXCOMP 定义的非线性混合水相粘度计算中关键组分组成

所有的网格参数输出后，接下来要输出图，以一个网格为基础，对于分析化学驱的结果，化学剂的浓度都是非常重要的。

- **ADSORP vs. time:** 吸附在岩石上的组分摩尔分数和时间的函数
- **KRINTERP vs. time:** 用来分析相渗插值是如何随时间变化的，设置STARS所涉及到的相对渗透率。
- **Output Mole Fraction vs.time:** 用于展示油藏内部的情况。
- **VISCVELW vs. SHEARW:** 用来分析在各自达西流速下水相的剪切。