第 44 期：聚合物驱模拟常用数据换算及方程

编译人：王建国 李罡

目 录

一、 聚合物驱中不同浓度之间的换算关系......2

二、 聚合物驱参数计算方程......3

2.1 聚合物的质量分数......3

2.2 聚合物摩尔分数......3

2.3 化学反应参数......3

2.3.1 体积反应速率......3

2.3.2 配平系数......5

2.4 聚合物吸附表格......6

2.5 朗格缪尔（Langmuir）等温曲线选项......7

2.6 渗透率降低......8

2.7 聚合物溶液粘度......9

2.8 生成非线性粘度计算参数示例......10

2.9 剪切对聚合物粘度的影响......14

2.10 矿化度对聚合物粘度的影响......16

本期讲义提供了第 43 期讲义在过程向导中所涉及方程式的相关信息，包括如何将实验室测量的数据转换成数值模拟数据流中需要的数据，以及一些常量和变量的描述。

注意：为了避免混淆，本文中所有涉及到的单位都是矿场单位。更多关于单位的使用，请参考 STARS 用户手册。

一、 聚合物驱中不同浓度之间的换算关系

聚合物驱数值模拟研究过程中，通常需要进行各种单位之间的换算，下面是常用的浓度单位之间的换算关系。

每百万分之一（ppm）：

$$1\ ppm = 1\ mg/l$$

质量百分比（wt%）：

$$wt\% = \frac{ppm}{1 \times 10^4}$$

质量分数（wt）：

$$wt = \frac{ppm}{1 \times 10^6} = \frac{wt\%}{100}$$

摩尔分数（小数）：

$$x_i = \frac{(wt_i / Mw_i)}{\sum_{i=1}^{n_c} wt_i / Mw_i} \tag{1}$$

其中，

wt_i -组分 i 的质量分数

Mw_i -组分 i 的分子量

n_c -溶液中的组分数

二、 聚合物驱参数计算方程

假定聚合物溶液(水+聚合物)中聚合物浓度 0.1wt%,分子量是 8000lb/lbmol,聚合物质量和摩尔分数计算方程如下:

扩展知识:

此处 lbmol 和 gmol 都是计量物质的量的单位。gmol 就是 mol,标准是使用每摩尔的克数,也就是 g。但是,由于 g 太小了,人们通常更喜欢使用 kg(SI 单位制),或者磅(英制单位),因此就有了相似的 kgmol 和 lbmol,这样更易于使用。换算关系如下:

由于 1kg = 1000g, 所以 1kgmol = 1000gmol,

同样:

1lb = ~453.59237g,所以 1lbmol = ~453.59237gmol

2.1 聚合物的质量分数

$$wt = \frac{0.1}{100} = 0.001$$

2.2 聚合物摩尔分数

$$x_i = \frac{(0.001/8000)}{\frac{0.001}{8000} + \frac{(1-0.001)}{18.015}} = 2.25412 \times 10^{-6}$$

2.3 化学反应参数

为了在 STARS 中模拟聚合物的降解和损耗,使用化学反应选项,输入化学反应速率表达式中所需要的参数。

2.3.1 体积反应速率

化学反应动力学方程提供了反应速率的信息,在 STARS 中的反应速率方程式:

$$rrf \times \prod_{i=1}^{n_c} C_i^{a_i} \times exp\left(-\frac{Ea}{R \times T}\right) \tag{2}$$

液相中组分“i”的浓度主要基于其密度,如下面公式所示:

$$C_i = \phi_f \times S_\alpha \times \rho_\alpha \times x_i \tag{3}$$

$$\phi_f = \phi_v \times \left[1 - \sum_{k=1}^{n} \frac{C_{sk}}{\rho_{sk}(P,T)}\right] \tag{4}$$

在上面的方程中，绝对孔隙度ϕ_v根据孔隙压力和温度进行校正，有效孔隙度ϕ_f根据孔隙空间中固相的体积进行校正。固相中每一个组分“k”的浓度C_{sk}和密度$\rho_{sk}(P,T)$。更多信息，请参考 STARS 手册中的关键字*SOLID_DEN。

如果存在固相，那么固相中组分“i”的浓度：

$$C_i = \phi_v \times C_{s_i} \tag{5}$$

上面公式中所用到的所有常量和变量：

rrf -常数，也叫做“反应动力学常数”

Ea -活化能，表征反应速率受温度影响的参数

T -温度

R -通用气体常数

C_i -反应物组分“i”的浓度

a_i -组分“i”的反应级数

ϕ_f -有效孔隙度

S_α -组分“i”在相“α”中的饱和度

ρ_α -组分“i”在相“α”中的摩尔密度

x_i -组分“i”在相“α”中的摩尔分数

ϕ_v -绝对孔隙度

C_{sk} -在固相组分“k”的浓度

$\rho_{sk}(P,T)$ -在固相组分“k”的密度

C_{si} -在固相组分“i”的浓度

C_i -在多孔介质中固相组分“i”的真实浓度

对于简单的聚合物降解的案例，反应方程式：

$$Sto1\ Polymer_{(w)} \rightarrow Sto2\ Water_{(w)} \tag{6}$$

其中，

$Sto1$ -反应物组分反应配平系数

$Sto2$ -生成物组分反应配平系数

一级反应动力学常数表达式：

$$rrf = \frac{Ln(2)}{t_{1/2}} = \frac{0.69315}{t_{1/2}} \tag{7}$$

其中，

rrf -反应速率常数（day^{-1}）

$t_{1/2}$ -半衰期（day）

如果在过程向导中使用的半衰期是缺省值 180 天，其对应的反应常数为：

$$rrf = \frac{0.69315}{180} = 0.00385\ day^{-1} \tag{8}$$

2.3.2 配平系数

通常，配平系数都是基于 1 摩尔的反应物组分。用户确保输入的配平系数，使得反应前后质量守恒。质量守恒系数需满足：

$$\sum_{i=1}^{n_c} Mw_i \times Sto1_i = \sum_{i=1}^{n_c} Mw_i \times Sto2_i \tag{9}$$

其中，

Mw_i -组分“i”分子量

$Sto1_i$ -反应物组分“i”的反应配平系数

$Sto2_i$ -生成物组分“i”的反应配平系数

假定下面的反应方程：

$$aA + bB \Leftrightarrow cC \tag{10}$$

反应系数的计算方法：

$$\frac{a}{b} = \frac{ma}{Mwa} \times \frac{Mwb}{mb} \tag{11}$$

$$\frac{a}{c} = \frac{ma}{Mwa} \times \frac{Mwc}{mc} \tag{12}$$

其中，

a,b,c 分别表示组分 A，B，C 的摩尔数

ma,mb,mc 分别表示组分 A，B，C 的质量

反应系数：

$$Sto1\ Polymer_{(w)} \rightarrow Sto2\ Water_{(w)} \tag{13}$$

如下：

$$\frac{Sto1}{Sto2} = \frac{m_P}{Mw_p} \times \frac{Mw_W}{m_W} \tag{14}$$

改写：

$$Sto2 = Sto1 \times \left(\frac{Mw_P}{Mw_W}\right) \times \left(\frac{m_W}{m_P}\right) \tag{15}$$

组分的质量分数比组分的质量更常用，因此：

$$\left(\frac{m_W}{m_P}\right) = \left(\frac{wt_W}{wt_P}\right) \tag{16}$$

带入方程（15）：

$$Sto2 = Sto1 \times \left(\frac{Mw_P}{Mw_W}\right) \times \left(\frac{wt_W}{wt_P}\right) \tag{17}$$

通常，将主反应物的系数看作是 1，如下：

$$Sto2 = 1 \times \left(\frac{8000}{18.015}\right) \times \left(\frac{1}{1}\right) = 444.074 \tag{18}$$

最后的表达式为：

$$Polymer_{(w)} \rightarrow 444.074\ Water_{(w)} \tag{19}$$

2.4 聚合物吸附表格

在运动方程中吸附相的表达式：

$$\frac{\partial}{\partial t}\left[\phi Ad_i\right] \tag{20}$$

基于这个原因，模拟器中的吸附量是通过组分“i”吸附在单位孔隙体积中的摩尔数（或质量数）来定义的；然而，也可以使用其他方式测量吸附的大小，这需要转换成模拟器要求输入的参数：

$$Ad_{i_{Stars}} = Ad_{i_{lab}} \times \frac{\rho_r \times (1-\phi)}{\phi} \tag{21}$$

其中，

$Ad_{i_{stars}}$ -组分“i”的吸附量，用于 STARS（gmol/m3，lbmol/ft3，或 gmol/cm3）

Ad_{ilab} -实验室测得的吸附量（mg polymer/100 gr -rock）

ρ_r -岩石密度（gr/cm3）

（注：gr/cm3 其实就是 g/cm³。克的英文是 gram，有时就略写成 gr，因此有

些国家或地区将克的英文符号写为 gr。）

ϕ-孔隙度

过程向导中需要输入实验室测得聚合物在不同浓度下的吸附量，利用下面的方程计算出不同浓度下聚合物吸附在单位体积岩石上的摩尔数：

$$Ad_{i_{Stars}} = 50\frac{mg_{Polymer}}{100gr_{rock}} \times \frac{2.65\frac{g}{cm^3}\times(1-0.2494)}{0.2494} \times Cf \tag{22}$$

其中，

Cf -单位转换因子

在下面的例子中，Cf 用来将 $Ad_{i_{stars}}$ 的单位转换成 lbmol/ft^3：

$$Cf = \left(\frac{1\ lb}{453592.37\ mg}\right)\times\left(\frac{(30.48)^3\ cm^3}{1\ ft^3}\right)\times\left(\frac{1\ lbmol}{8000\ lb}\right) = 7.8\times10^{-6}\ \frac{lbmol\cdot cm^3}{mg\cdot ft^3}$$

代入：

$$Ad_{i_{Stars}} = 3.11184\times10^{-5}\ lbmol/ft^3$$

2.5 朗格缪尔（Langmuir）等温曲线选项

朗格缪尔等温吸附曲线给出单位孔隙体积中组分“i”吸附的摩尔数，如下：

$$Ad_{i_{Stars}} = \frac{(tad1 + tad2\ \times xnacl)\times c_i}{(1+tad3\ \times c_i)} \tag{23}$$

其中，

$tad1$-朗格缪尔表达式中的第一个参数（gmol/m3，lbmol/ft3，或 gmol/cm3）

$tad2$-朗格缪尔表达式中的第二个参数，与矿化度相关（gmol/m3, lbmol/ft3, 或 gmol/cm3）

$tad3$-朗格缪尔表达式中的第三个参数（小数）

$xnacl$-盐的矿化度，质量分数

c_i-组分“i”的摩尔分数

朗格缪尔等温吸附方程可以被改写为：

$$Ad_{i_{Stars}} = \frac{(tad1 + tad2\times xnacl)}{tad3}\frac{tad3\times c_i}{(1+tad3\cdot c_i)} \tag{24}$$

在高浓度下（c_i较大的情况下），使用上面的方程可以得到最大的吸附量：

$$\frac{(tad1 + tad2 \times xnacl)}{tad3} \tag{25}$$

若要回归出 Langmuir 参数$tad1$和$tad3$，除了最大吸附量以外，还需要知道吸附量随流体浓度的增加速率。如果没有这些参数，也经常遇到这种情况，可以根据最大吸附量下的流体组成来间接定义第 2 个参数。

假如忽略$tad2$，方程改写为：

$$Ad_{i_{Stars}} = \left(\frac{tad1}{tad3}\right) \times \frac{tad3 \times c_i}{(1 + tad3 \times c_i)} \tag{26}$$

上面式子中的第一部分是最大吸附量，第二部分当$tad3 \times c_i \geq 10$时大约等于 1。当聚合物的质量分数为 0.1wt%（摩尔浓度c_i=2.25412×10^{-6}）时，吸附达到了最大值。在这个例子中，$tad3$的计算公式：

$$tad3 = \frac{10}{c_i}$$

将c_i=2.25412×10^{-6}代入

$$tad3 = \frac{10}{2.25412 \times 10^{-6}} = 4436321.05$$

确定了$tad3$的值，结合最大吸附量，可以计算$tad1$：

$$tad1 = Ad_{i_{Stars}} \times tad3 = 3.11184 \times 10^{-5} \frac{lbmol}{ft^3} \times 4436321.05 = 138.05 \frac{lbmol}{ft^3}$$

如果 $Ad_{i_{stars}}$ 是最大吸附量，那么被用作*ADMAXT。可以分区给定最大吸附量*ADMAXT 和残余吸附量*ADRT，因此网格之间的这些属性可能是不同的。定义残余量的大小，可以灵活的模拟完全可逆（ADRT=0）和不可逆（ADRT=ADMAXT）以及部分可逆的过程（0＜ADRT＜ADMAXT）。

2.6 渗透率降低

聚合物的吸附尤其是化学或机械（滞留）类型引起的吸附会造成渗透率的变化。模拟器通过残余阻力因子 *RRF* 来模拟这个过程，对于不同的网格可以给定不同的吸附量（Ad_{cell}）与渗透率的关系式。假定只有单一相流动路径发生变化。在这个例子中，对于每一相渗透率的降低可以利用下面的公式进行计算：

$$R_{k\alpha} = 1 + \left(RRF_{\alpha} - 1\right) \times \frac{Ad_{cell}}{ADMAXT} \tag{27}$$

其中，

$R_{k\alpha}$ -α 相渗透率降低因子

RRF_{α} -α 相残余阻力因子

随着吸附的增加，$R_{k\alpha}$ 从 1 变化到 RRF_{α}。堵塞后，每一相的有效渗透率：

$$k_{ef\ \alpha} = \frac{k_{r\alpha} \times k_{abs}}{R_{k\alpha}} \tag{28}$$

k_{efa} -α 相有效渗透率

k_{abs} -岩石绝对渗透率

k_{ra} -α 相相对渗透率

2.7 聚合物溶液粘度

液相粘度的计算是根据下面线性混合公式得到的：

$$Ln\left(\mu_{\alpha}\right) = \sum_{i=1}^{n_c} f_{\alpha_i} \times Ln\left(\mu_{\alpha_i}\right) \tag{29}$$

其中，

μ_{α} -水相（α=w）或油相（α=o）粘度

$f_{\alpha i}$ -水相（α=w）或油相（α=o）组分“i”的权重因子

$\mu_{\alpha i}$ -水相（α=w）或油相（α=o）组分“i”的粘度，是从粘度关系式或粘度表格中得到的，更多信息请参考 STARS 用户手册关键字*AVISC, *BVISC 或*VISCTABLE

n_c -油相或水相中的组分数

线性混合表达式中权重因子 $f_{\alpha i}$ 通常是该组分在对应相中的摩尔（质量）分数，例如，水相中的 w_i 和油相中的 x_i。

在本例子中，相的粘度是非线性的（例如，存在溶解气或聚合物），模拟器使用修正过的线性混合公式表征粘度中的这些变化。所有组分的非线性混合选项分成两组，其中一组是由*VSMIXCOMP 定义的关键组分，另一组是除关键组分的其他组分。两组的摩尔（质量）分数之和为 1：

$$\sum_{i=1}^{n_{c\in S}} x_i + \sum_{i=1}^{n_{c\notin S}} x_i = 1 \quad or \quad \sum_{i=1}^{n_{c\in S}} w_i + \sum_{i=1}^{n_{c\notin S}} w_i = 1 \tag{30}$$

其中：

$n_c \in s$-液相中的关键组分数

$n_c \notin s$-除关键组分外的其他组分数

对于$i=s$的组分（即关键组分）在修改的线性混合公式中的权重因子的线性表达式 $f_{\alpha i}$ 由非线性混合公式 $f(f_{\alpha i})$ 所代替。

对于$i \neq s$的组分（即非关键组分）在修改的线性混合公式中的权重因子的线性表达式 $f_{\alpha i}$ 由 $N \times f_{\alpha i}$ 所代替，其中 N 是一个归一化因子，线性权重因子由非线性权重因子代替后用 N 来确保所有组分的权重因子之和仍旧为 1，如下：

$$\sum_{i=1}^{n_{c\in S}} f(f_{\alpha_i}) + \sum_{i=1}^{n_{c\notin S}} N \times f_{\alpha_i} = 1 \quad \rightarrow \quad \sum_{i=1}^{n_{c\in S}} f(f_{\alpha_i}) + N \times \sum_{i=1}^{n_{c\notin S}} f_{\alpha_i} = 1 \tag{31}$$

$$N = \left(1 - \sum_{i=1}^{n_{c\in S}} f(f_{\alpha_i})\right) \times \left(\sum_{i=1}^{n_{c\notin S}} f_{\alpha_i}\right)^{-1} \tag{32}$$

因此，液相粘度的非线性混合计算公式：

$$Ln(\mu_\alpha) = \sum_{i=1}^{n_{c\in S}} f(f_{\alpha_i}) \times Ln(\mu_{\alpha_i}) + N \times \sum_{i=1}^{n_{c\notin S}} f_{\alpha_i} \times Ln(\mu_{\alpha_i}) \tag{33}$$

其中：

μ_α-水相（α=w）或油相（α=o）混合粘度

$\mu_{\alpha i}$-水相（α=w）或油相（α=o）组分“i”粘度

$f_{\alpha i}$-非线性混合计算中水相（α=w）或油相（α=o）非关键组分“i”的权重因子

$f(f_{\alpha i})$-非线性混合计算中水相（α=w）或油相（α=o）关键组分“i”的权重因子

$n_c \in s$-液相中的关键组分数

$n_c \notin s$-除关键组分外的其他组分数

N-归一化因子

2.8 生成非线性粘度计算参数示例

水相混合粘度计算中让“polymer（P）”作为关键组分，生成函数 $f(f_{wp})$。关键组分的摩尔(或质量)分数 w_p 以及纯组分粘度 μ_p。在当前算例中它是仅有的一个关键组分，因此：

$$\sum_{i=1}^{n_{c\in S}} f\left(f_{\alpha_i}\right) + N \times \sum_{i=1}^{n_{c\notin S}} f_{\alpha_i} = 1 \quad \rightarrow \quad \sum_{i=1}^{n_{c\in S}} f(w_i) + N \times \sum_{i=1}^{n_{c\notin S}} w_i = 1 \tag{34}$$

其中：

$$\sum_{i=1}^{n_{c\in S}} f(w_i) = f\left(w_p\right) \quad and \quad \sum_{i=1}^{n_{c\notin S}} w_i = 1 - w_p \tag{35}$$

因此，归一化因子 N：

$$N = \frac{1 - f\left(w_p\right)}{1 - w_p} \tag{36}$$

将其带入粘度混合公式：

$$Ln\left(\mu_{aq}\right) = f\left(w_p\right) \times Ln\left(\mu_p\right) + \left(\frac{1 - f\left(w_p\right)}{1 - w_p}\right) \times \sum_{i=1}^{n_{c\notin S}} w_i \times Ln(\mu_i) \tag{37}$$

f_{wp} 的解：

$$f\left(w_p\right) = \frac{Ln\left(\mu_w\right) - M}{Ln\left(\mu_p\right) - M} \tag{38}$$

其中：

$$M = \left(\frac{1}{1 - w_p}\right) \times \sum_{i=1}^{n_{c\notin S}} w_i \times Ln(\mu_i) \tag{39}$$

上面公式是根据关键字*VSMIXENDP 定义的 11 个 w_p（x_{low}，x_{hig} 和 9 个插值）来计算的，关键字*VSMIXFUNC 定义了 f_{wp} 的 11 个值 f1….f11。整个过程必须通过*VSMIXCOMP 定义关键组分。

关键字*VSMIXENDP 和*VSMIXFUNC 可以使函数 f_{wp} 在 w_p 取值[0,1]内变成连续的或分段线性的。超出范围的任何函数都可以回归到这 11 个点上。如果 $f_{wp} = w_p$，那么非线性混合选项就简化为线性混合了。

例子：

下面的表格考虑了水相粘度是聚合物浓度的函数，利用线性混合原则来模拟液相粘度的变化显然不太恰当。因此，粘度线性混合准则中的关键组分是聚合物，这需要通过关键字*VSMIXCOMP 来定义。

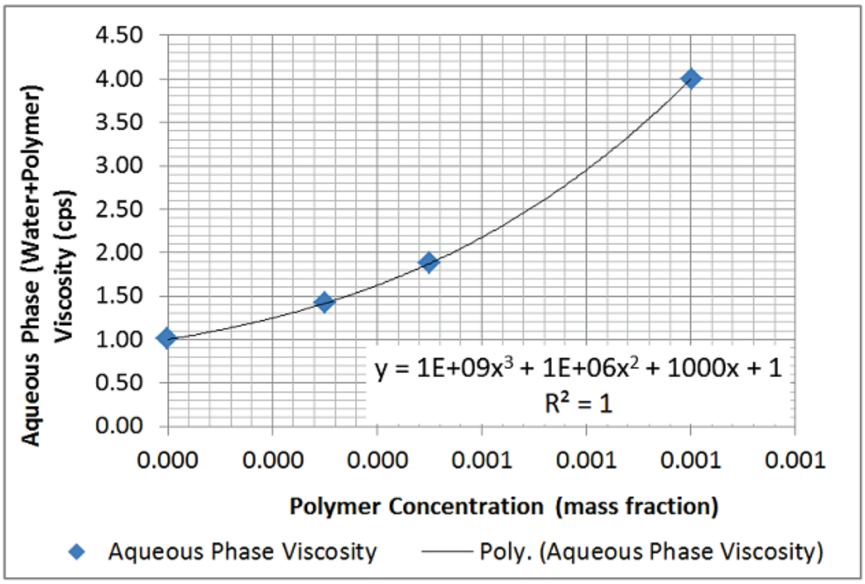
C_p (%)	μ_{aq} (cp)
0.00	1.000
0.03	1.417
0.05	1.875
0.10	4.000

在水相中仅仅存在水和聚合物两个组分。从上面的表格可以推算出水组分的粘度（μ_w）是 1cp，聚合物溶液的最大粘度是 4cp，作为“纯”聚合物的粘度。

粘度的非线性计算公式与聚合物摩尔（或质量）分数有关。下一步就是通过 $w_p = c_p/100$ 将浓度从质量百分数转换成质量分数，如下表：

w_p (mass frac)	μ_{aq} (cp)
0.0000	1.000
0.0003	1.417
0.0005	1.875
0.0010	4.000

假定关键字*MASSBASIS 是激活的（组分属性与质量相关而不是摩尔相关），通过方程式得到的这些数据可以直接在图上标示出来：



例子中水相粘度的方程：

$$\mu_{aq} = \mu_w \times \left(1 + 1 \times 10^3 \times w_p + 1 \times 10^6 \times w_p^2 + 1 \times 10^9 \times w_p^3\right)$$

如果注入的聚合物浓度假定是 1000ppm（0.1%wt），那么对应的 x_{low} 和 x_{high} 分别是 0 和 0.1。在 STARS 中，中间的 9 个数是根据下面的方程计算得到：

$$x_{j+1} = x_j + \left(x_{high} - x_{low}\right)/10 \qquad (for\ j = 2\ to\ 10) \tag{40}$$

其中 $x_1 = x_{low}$， $x_{11} = x_{high}$

对应的粘度是根据中间 9 个点的质量分数带入水相粘度计算公式中得到的：

j	w_p (mass frac)	μ_{aq} (cp)
1	0.0000	1.000
2	0.0001	1.111
3	0.0002	1.248
4	0.0003	1.417
5	0.0004	1.624
6	0.0005	1.875
7	0.0006	2.176
8	0.0007	2.533
9	0.0008	2.952
10	0.0009	3.439
11	0.0010	4.000

最后一步是计算非线性函数的值：

$$f(w_p) = \frac{Ln(\mu_{aq}) - M}{Ln(\mu_p) - M} \quad \rightarrow \quad M = \left(\frac{1}{1 - w_p}\right) \times \sum_{i=1}^{n \notin S} w_i \times Ln(\mu_i) \tag{41}$$

这里水是普通组分，聚合物是关键组分。

以 j=2 为例，所以：

$$M = \left(\frac{1}{1 - 0.001}\right) \times (0.9999) \times Ln(1) = 0 \quad \rightarrow \quad f(w_p) = \frac{Ln(1.111)}{Ln(4)} \tag{42}$$

同样的方法，可以得到：

w_p (mass frac)	μ_{aq} (cp)	$f(w_p)$
0.0000	1.000	0.0000
0.0001	1.111	0.0759
0.0002	1.248	0.1598
0.0003	1.417	0.2514
0.0004	1.624	0.3498
0.0005	1.875	0.4534
0.0006	2.176	0.5608
0.0007	2.533	0.6704
0.0008	2.952	0.7808
0.0009	3.439	0.8910
0.0010	4.000	1.0000

表示非线性混合计算公式的关键字，如下：

*VSMIXCOMP 'Polymer'

*VSMIXENDP 0 0.001

*VSMIXFUNC 0.0 0.0759 0.1598 0.2514 0.3498 0.4534 0.5608 0.6704 0.7808 0.891 1.0

2.9 剪切对聚合物粘度的影响

下图表示是不同剪切速率下聚合物粘度的例子。前面提到过，在 Cannella et al 的文章中利用这幅图提供的数据用来说明达西速率的计算：

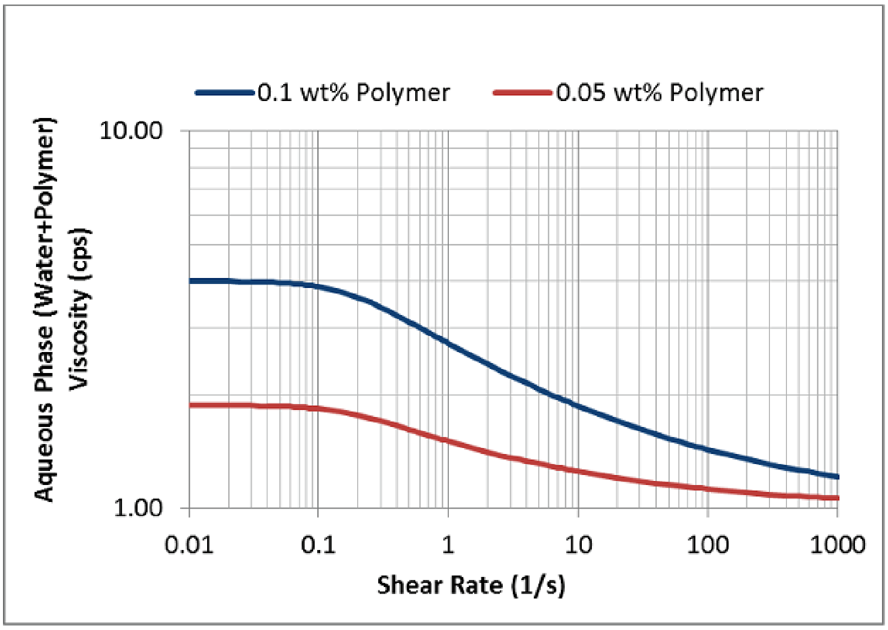


图 1 不同剪切速率下聚合物粘度

对于这个例子，假定岩心驱替实验和流变数据：

k_{abs} = 1 Darcy

k_{rw} = 0.15

S_w = 0.78

ϕ = 0.35

表 1 剪切速率与聚合物粘度的关系

SR (1/sec)	Aqueous Phase Viscosity (cps)	
	0.05 wt% Polymer	0.1 wt% Polymer
0.01	1.875	4.000
0.1	1.836	3.865
1	1.507	2.737
10	1.253	1.868
100	1.126	1.432
1000	1.063	1.215

第一步是利用 Cannella et al 文章中的公式将剪切速率转化为达西速率：

$$u_l = \frac{\dot{\gamma} \times \sqrt{k_{abs} \times k_{rl} \times \phi \times S_l}}{\gamma_{fac}} = \frac{0.01 \times \sqrt{1 \times 0.15 \times 0.35 \times 0.78}}{4.8 \times 10066} = 4.18 \times 10^{-8} cm/sec$$

上式中 4.8 是缺省的剪切速率，10066 是将速率单位转化为$cm/\sec$的转化因子。同样的方法，得到下面的表格：

SR (1/sec)	Darcy velocity (cm/sec)
0.01	4.188E-08
0.1	4.188E-07
1	4.188E-06
10	4.188E-05
100	4.188E-04
1000	4.188E-03

剪切应用于组分而不是相，因此第二步是利用非线性混合计算公式来计算纯组分的粘度。该例中要使用“**2.9 为水相中聚合物算例生成数据**”一节中的数据。假定聚合物注入的浓度是$500pm(wp = 0.0005)$， $f(wp) = 0.4534$，水相粘度为 1.875cp，基于聚合物为纯组分：

$$Ln(\mu_p) = \frac{Ln(\mu_{aq}) - \left(\frac{1 - f(w_p)}{1 - w_p}\right) \times w_w \times Ln(\mu_w)}{f(w_p)} \tag{43}$$

$$\mu_p = exp\left(\frac{Ln(1.875) - \left(\frac{1 - 0.4534}{1 - 0.0005}\right) \times 0.9995 \times Ln(1)}{0.4534}\right) = 4\ cps$$

同样的方法，所有的聚合物浓度都能被计算，*SHEARTAB 的表格如下：

*SHEARTAB

**Darcy Velocity (cm/sec)	Polymer Viscosity (cps)
4.188E-08	4.0000
4.188E-07	3.8172
4.188E-06	2.4695
4.188E-05	1.6455
4.188E-04	1.2998
4.188E-03	1.1441

如果注入的浓度 $f(wp)=1$，那么纯聚合物粘度等于水相粘度。模拟中网格的聚合物浓度要比注入浓度低，SHEARTAB 在对数坐标中按比例缩小。

总结，STARS 执行下面的计算：

1)STARS 计算每一个网格的达西速率。例子中的 4.188E-06 $cm/\sec$。

2)STARS 通过计算的速率查找剪切表格得到“pure”组分的粘度；在这个例子中是 2.4695cps。

3)STARS 替换关键字*AVISC/*BVISC 表格中新的粘度。

4)STARS 利用每一个网格的聚合物摩尔分数计算相的粘度。假定聚合物摩尔分数是 0.0005，水相或聚合物溶液粘度：

$$Ln(\mu_{aq}) = f(w_p) \times Ln(\mu_p) + \left(\frac{1-f(w_p)}{1-w_p}\right) \times Ln(\mu_w) \times w_w \tag{44}$$

$$Ln(\mu_{aq}) = 0.4534 \times Ln(2.4695) + \left(\frac{1-0.4534}{1-0.0005}\right) \times Ln(1) \times (0.9995)$$
$$= 0.40988$$

$$\mu_{aq} = 1.507\ cps$$

最后一个值是方程根据不同流速或剪切速率下的实验值重新生成聚合物溶液的粘度值。

2.10 矿化度对聚合物粘度的影响

图 2 是矿化度对聚合物溶液粘度的影响。表 2 是图 2 对应的数据。

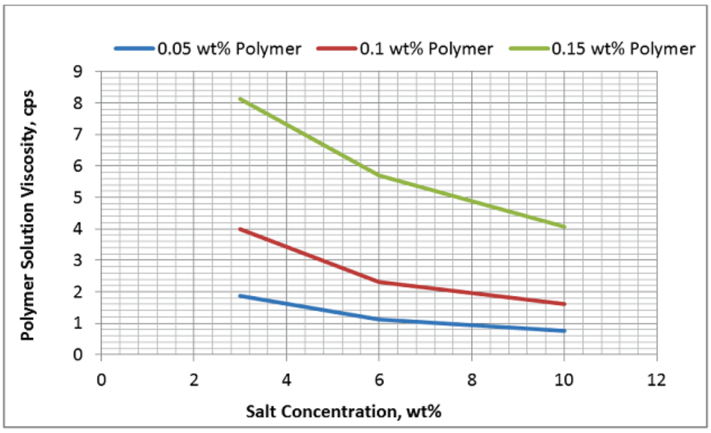


图 2 矿化度对聚合物粘度的影响

表 2 矿化度对聚合物粘度的影响

Salt Concentration wt%	Polymer Solution Viscosity, cps @		
	0.05 wt%	0.1 wt%	0.15 wt%
3	1.875	4	8.125
6	1.125	2.3	5.6875
10	0.75	1.6	4.0625

STARS 中描述矿化度对聚合物粘度影响的关键字格式：

$$*\text{VSSALTCMP}\ comp\_name\ x_{min}\ sp$$

这里，comp_name 是影响非线性混合组分（例如聚合物）粘度的组分（例如盐或碱）。这必须由关键字*COMPNAME 来定义。$x_{\min}$ 是相最小的矿化度，sp 是对数坐标系中聚合物组分的粘度和矿化度的比值$(x_{salt}/x_{\min})$的斜率。

为了创建对数坐标图，首先是将聚合物作为纯组分利用非线性混合准则来计算相的粘度，如 2.8 节所述：

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

水的粘度是 1cp，聚合物在 1wt%下是 4cp，*AVISC = 4, and *BVISC = 0。在上述非线性混合准则中，聚合物溶液的最大浓度 1%时对应的粘度函数 $f(w_p)=1$。在这个点，“纯”聚合物粘度等于相（聚合物溶液）的粘度。例如，我们假定注入浓度是 500ppm（0.05 wt%）。在这个浓度下，$f(w_p)=0.4534$。

利用下面的公式来计算聚合物浓度 0.05wt%下表格 3 中聚合物溶液或水相纯组分的粘度：

$$Ln(\mu_p) = \frac{Ln(\mu_{aq}) - \left(\frac{1 - f(w_p)}{1 - w_p}\right) \times w_w \times Ln(\mu_w)}{f(w_p)} \tag{45}$$

水的粘度是 1cp，所以上面的方程简化为：

$$\mu_p = exp\left(\frac{Ln(\mu_{aq})}{f(w_p)}\right) = exp\left(\frac{Ln(1.125)}{0.4534}\right) = 1.297\ cps \tag{46}$$

重复计算，如表格 3 所示：

表格 3 不同矿化度浓度下聚合物溶液及组成粘度

Salt Conc. (wt%)	Viscosity @ 0.05 wt% (cps)	
	Solution	Component
3	1.875	4.000
6	1.125	1.297
10	0.75	0.530

第二步计算矿化度$(x_{salt}/x_{\min})$的比值。对于这个例子，假定盐矿化度（或最小矿化度）是 30000ppm（3wt%）。结果如下：

(x_{salt}/x_{min})	Component Viscosity (cps), @ 0.05 wt%
1	4.000
2	1.297
3.33	0.530

第三步在对数坐标中组分的粘度和$x_{salt}/x_{\min}$关系图以及计算曲线的斜率，如图 3：

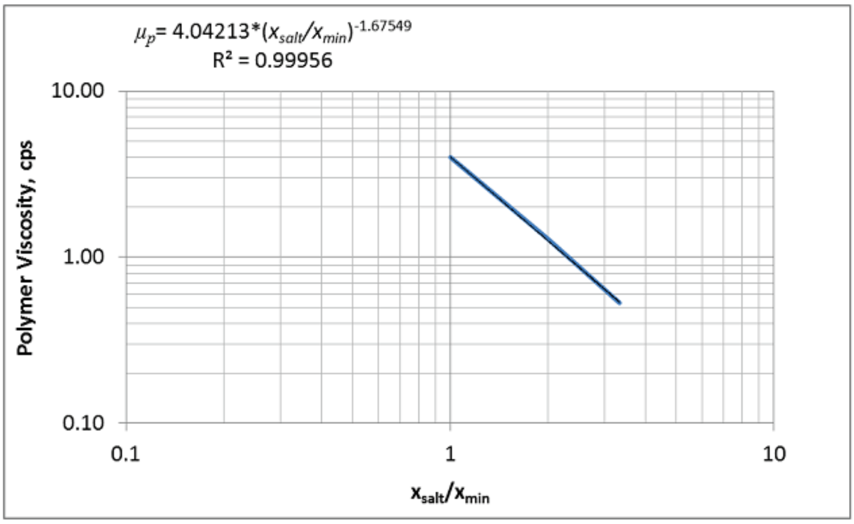


图 3 矿化度比值与聚合物粘度关系

从图 3 可以看出，$sp = -1.6754$，$x_{\min} = 0.03$。

STARS 中的关键字：

*VSSALTCMP 'Salt' 0.03 -1.6754

使用这个方法和 STARS 幂律方程，可以得到盐溶液中聚合物（纯组分）的最终粘度，并与非线性混合方程一起决定相的粘度。

为了验证这一事实，假定矿化度增加了 6 wt%。因此*AVISC=4，$\mu_p{}^0 = 4cps$。因此：

$$\mu_p = \mu_p^0 \times \left(\frac{x_{salt}}{x_{min}}\right)^{sp} = 4 \times \left(\frac{0.06}{0.03}\right)^{-1.6754} = 1.2523\ cps \tag{47}$$

液相粘度：

$$\mu_{aq} = exp\left(f(w_p) \times Ln(\mu_p)\right) = exp(0.4534 \times Ln(1.2523)) = 1.107\ cps \tag{48}$$

对比在矿化度 6wt%下相的粘度 1.107cps 与图 3 中在实验室得到粘度 1.123cps。因此，方程计算的结果可以模拟实验室下矿化度对粘度的影响。

如果在模拟中同时考虑了剪切和矿化度对粘度的影响，首先根据速率（或剪切速率）对聚合物作为纯组分的粘度进行校正，然后通过矿化度浓度，使用 $\mu_p{}^0$ 来更新方程中的矿化度，最后利用非线性混合准则计算相的粘度。