

第三十二期：如何用 STARS 经验法模拟泡沫驱——插值参数详解

目前在CMG数值模拟软件中有经验法和机理法这两种方法用于模拟泡沫(氮气泡沫、空气泡沫及蒸汽泡沫等)对开采效果的影响。

机理法能够详细模拟泡沫的产生、发展、破灭等具体过程，涉及多个化学反应，比较复杂，适用于机理研究。具体操作可参考第三期讲义《Builder-Process Wizard（过程向导）》。

经验法主要是通过泡沫选项对相对渗透率曲线进行插值来模拟流度的降低，不需模拟实际泡沫的产生和破灭过程，涉及参数较少，使用方便，适用于矿场规模的模拟。

虽然经验法的泡沫选项比单独使用毛管数插值显得更为灵活，但是这些输入的值只能用于相对渗透率插值，不用其他地方，因此所有流动特征变化都可以用相应的相对渗透率曲线进行插值。

经验法的注意事项：

- ① 不能通过泡沫质量来模拟流度的减少；
- ② 不能通过泡沫质量来模拟泡沫密度；
- ③ 在厚的储层中，不能模拟原地泡沫生长和衰竭；
- ④ 不能模拟界面张力的减少效果。

如果上述情况在特定油藏中很重要，则不能使用经验方法。

一、泡沫参数的含义及取值范围

STARS 经验法模拟泡沫通过插值参数对设定的相对渗透率曲线进行插值，使用关键字*INTCOMP 'surfact'和 FM 对相对渗透率进行插值。FM 值计算公式如下：

$$FM = \frac{1}{1 + FMMOB * F1 * F2 * F3 * F4 * F5 * F6}$$

其中：

$$F1 = (\text{MOLE FRACTION (ICPREL)} / \text{FMSURF}) ^ \text{EPSURF}$$

$$F2 = ((\text{FMOIL} - \text{OIL SATURATION}) / (\text{FMOIL} - \text{FLOIL})) ^ \text{EPOIL}$$

$$F3 = (FMCAP / \text{CAPILLARY NUMBER}) ^ EPCAP$$

$$F4 = ((FMGCP - \text{CAPILLARY NUMBER}) / FMGCP) ^ EPGCP$$

$$F5 = ((FMOMF - \text{OIL MOLE FR. (NUMX)}) / FMOMF) ^ EPOMF$$

$$F6 = ((\text{MOLE FRACTION (NUMW)} - \text{FLSALT}) / (\text{FMSALT} - \text{FLSALT})) ^ \text{EPSALT}$$

FM 是流度降低因子的倒数，取值范围是 $\lim(FM \rightarrow 0)$ (强泡沫) ~ 1 (无泡沫)。

FMMOB 是流度降低因子参考值，取值范围是 0~100000。

FMSURF 是无因次泡沫插值计算时表面活性剂摩尔分数临界值，取值范围是 0~1。网格中表活剂浓度与 FMSURF 的比值越小泡沫越弱。

EPSURF 是表征表面活性剂摩尔分数对无因次泡沫插值计算贡献程度的指数，取值范围是为-4~4。默认值为 0，表示泡沫插值计算与表面活性剂浓度无关。

FMOIL 是无因次泡沫插值计算时含油饱和度临界值，取值范围是 0~1。FLOIL 是无因次泡沫插值计算时含油饱和度下限值，取值范围是 0~1。网格中含油饱和度越小泡沫越强，含油饱和度越接近 FMOIL 泡沫越弱，含油饱和度等于或大于 FMOIL 时泡沫破灭。

EPOIL 是控制含油饱和度对无因次泡沫插值计算影响程度的指数，取值范围是 0~5。默认值为 0，表示泡沫插值计算与含油饱和度无关。

FMCAP 是无因次泡沫插值计算时毛管数（与流动速度有关）参考值，取值范围是 0~1。FMCAP 与网格中的毛管数（与流体流动速度有关）的比值越小泡沫越弱，也就是说网格中流体流速越大泡沫越弱。

EPCAP 是控制毛管数对无因次泡沫插值计算影响程度的指数，取值范围是 -10~10。默认值为 0，表示泡沫插值计算与毛管数或流体流速无关。

FMGCP 是无因次泡沫插值计算时毛管数临界值，取值范围是 0~1。模型中实际毛管数通常小于 FMGCP，网格中毛管数越大泡沫越弱。

EPGCP 是控制毛管数对无因次泡沫插值计算影响程度的指数，取值范围是 -10~10。默认值为 0，表示泡沫插值计算与毛管数或流体流速无关。

FMOMF 是无因次泡沫插值计算时油的摩尔分数临界值，取值范围是 0~1。模型中实际油的摩尔分数通常小于 FMOMF，网格中油的摩尔分数越大泡沫越弱。

EPOMF 是控制油的摩尔分数对无因次泡沫插值计算影响程度的指数，取值范围是 0~5。默认值为 0，表示泡沫插值计算与油的摩尔分数无关。

FMSALT 是无因次泡沫插值计算时盐的摩尔分数临界值，取值范围是 0~1。FLSALT 是无因次泡沫插值计算时盐的摩尔分数下限值，取值范围是 0~1。网格中盐的摩尔分数越大泡沫越强。

EPSALT 是控制盐的摩尔分数对无因次泡沫插值计算影响程度的指数，取值范围是 -4~4。默认值为 0，表示泡沫插值计算与盐的摩尔分数无关。

泡沫流度降低因子的参考值 FMMOB 是基于以下参数的测量值得到的：表面活性剂浓度的 FMSURF，两倍于 FMGCP 以上的毛管数（流动速度）FMCAP，零含油饱和度和零油的摩尔分数。FMMOB 的取值取决于泡沫的强度，通常范围是 5~100。

根据经验，其他影响因素，也就是表活剂浓度、矿化度（正向影响）、含油饱和度和油的摩尔分数（反向影响）、流动速度（正向和反向）对泡沫流动的影响都会影响 FMMOB 的取值。这些参数的经典数值一般是 FMSURF=0.00001、FMCAP=0.0001、FMOIL=0.2，对应的指数是 EPSURF=1、EPCAP=0.5、EPOIL=1；另外 FMGCP=0.00001、FMOMF=0.2 对应的幂指数是 EPGCP=1、EPOMF=1。如果幂指数设为 0 就不能发挥各自相应的作用。

泡沫内插选项最简单的应用是气相相对渗透率的标定，就是从 k_{rg} 到 $FM \times k_{rg}$ 。在气相相对渗透率曲线中使用较大的临界气饱和度，来模拟泡沫存在时不可动气体的增加。

二、泡沫插值选项中临界值的选取

在使用泡沫插值选项模拟泡沫对生产的影响时，在给定的油藏体系中，临界值（FMSURF、FMOIL、FLOIL、FMCAP、FMGCP、FMOMF、FMSALT、FLSALT）的选取直接影响泡沫强度的模拟效果。下面分析每个临界值的大小对泡沫强度的影响。

1. FMSURF

$$F1 = (\text{MOLE FRACTION (ICPREL)} / \text{FMSURF})$$

当油藏体系一定时，即在表面活性剂摩尔分数不变的情况下，FMSURF 取值越大，F1 值则越小，越不容易产生泡沫。

当 FMSURF 为一定值，EPSURF=1 时 如图 1 所示，随着表面活性剂的浓度增大，F1 增大，泡沫强度不断增强。

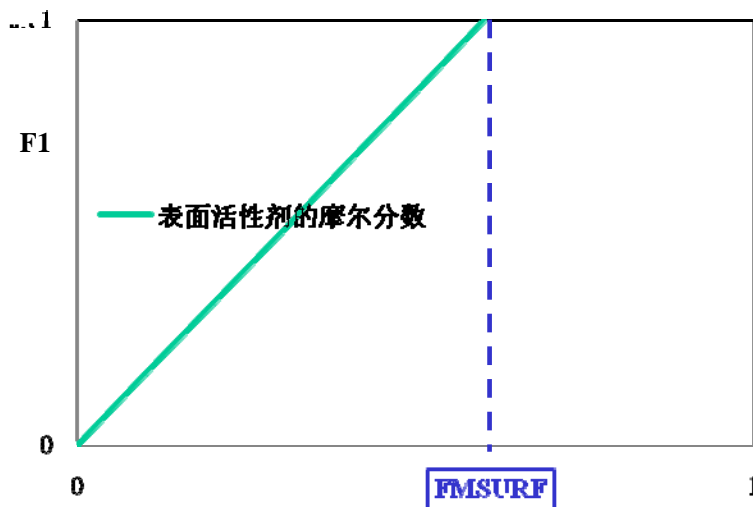


图 1 表面活性剂摩尔分数与泡沫强度的关系曲线

2. FMOIL 和 FLOIL

$$F2 = ((FMOIL - OIL SATURATION) / (FMOIL - FLOIL))$$

当油藏体系一定时，FMOIL 和 FLOIL 都是取值越大，F2 越大，越容易产生泡沫。

当 FMOIL 为一定值，FLOIL=0，EPOIL=1 时，如图 2 所示，随着含油饱和度的增大，F2 减小，泡沫强度不断减弱。需要注意的是：FLOIL=0 时， $F2 \leq 1$ ；FLOIL>0 时， $F2 < 1$ 。

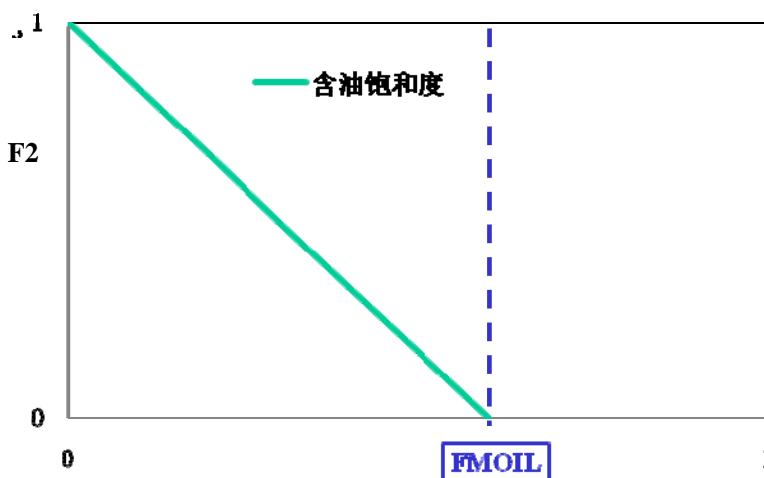


图 2 含油饱和度与泡沫强度的关系曲线

3. FMCAP

$$F3 = (\text{FMCAP} / \text{CAPILLARY NUMBER})$$

当油藏体系一定时，FMCAP 取值越大，F3 越大，越容易产生泡沫。

当 FMCAP 为一定值，EPCAP=1 时，如图 3 所示，随着毛细管数的增大，F3 减小，泡沫强度逐渐减弱。

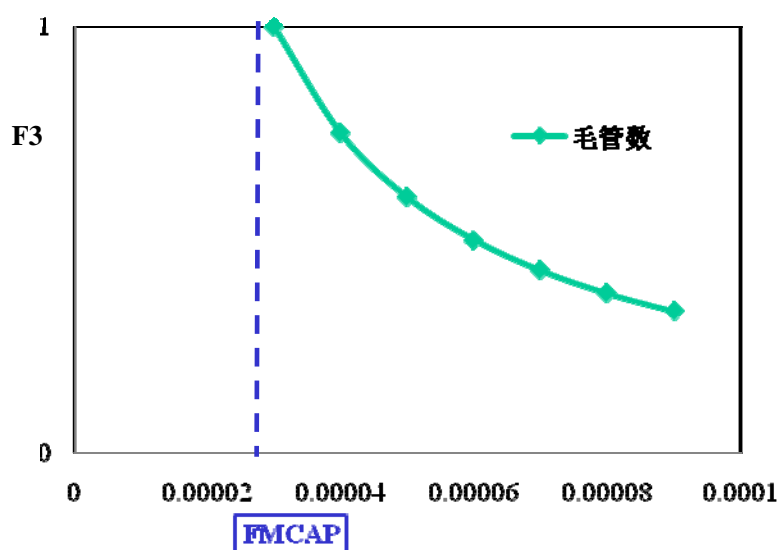


图 3 毛细管数与泡沫强度的关系曲线

4. FMGCP

$$F4 = ((\text{FMGCP} - \text{CAPILLARY NUMBER}) / \text{FMGCP})$$

当油藏体系一定时，FMGCP 取值越大，F4 越大，越容易产生泡沫。

当 FMGCP 为一定值，EPGCP=1 时，如图 4 所示，随着毛细管数的增大，F4 减小，泡沫强度逐渐减弱。

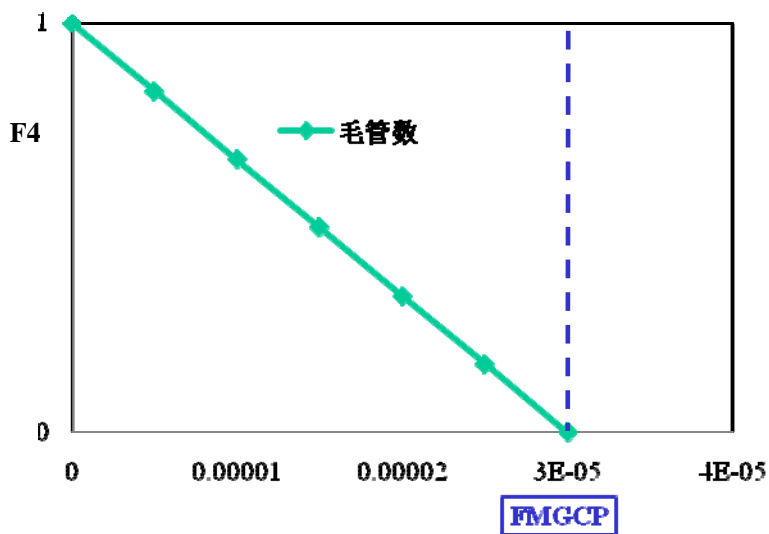


图 4 毛管数与泡沫强度的关系曲线

5. FMOMF

$$F5 = ((FMOMF - OIL MOLE FR.(NUMX)) / FMOMF)$$

当油藏体系一定时，FMOMF 值越大，F5 越大，越容易产生泡沫。

当 FMOMF 为一定值，EPOMF=1 时，如图 5 所示，随着油的摩尔分数的增大，F5 减小，泡沫强度不断减弱。

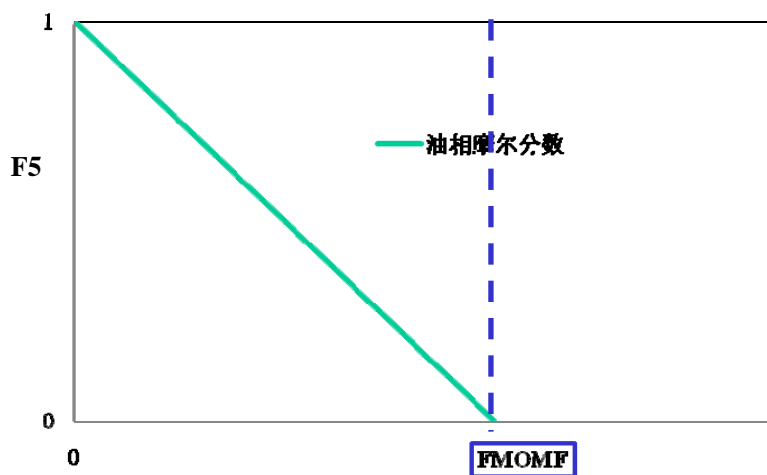


图 5 油的摩尔分数与泡沫强度的关系曲线

6. FMSALT 和 FLSALT

$$F6 = ((\text{MOLE FRACTION (NUMW)} - \text{FLSALT}) / (\text{FMSALT} - \text{FLSALT}))$$

当油藏体系一定时，FMSALT 和 FLSALT 都是取值越大，F6 越小，越不容易产生泡沫。

当 FMSALT 为一定值，FLSALT=0，EPSALT=1 时，如图 6 所示，随着水相中盐的摩尔分数的增大，泡沫强度,不断增强。

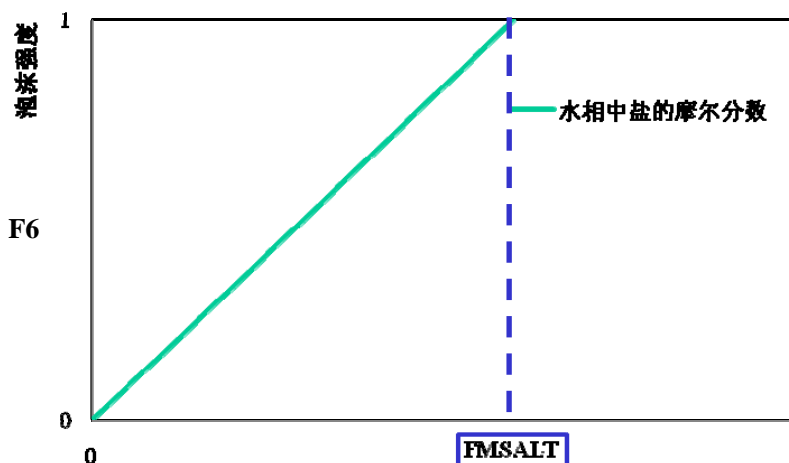


图 6 水相中盐的摩尔分数与泡沫强度的关系曲线

三、氮气泡沫驱模拟效果分析

建立泡沫驱模型“foam.dat”，采用反九点井网的八分之一，作为机理模型。前期是水驱，注入井注水速度是 $12.5\text{m}^3/\text{d}$ 。2012 年 11 月 1 日注水突破，含水率达到 60%。改成氮气泡沫驱，注水速度为 $12.5\text{m}^3/\text{d}$ ，注气速度是 $1250\text{m}^3/\text{d}$ ，2014 年 10 月 1 日含水降到约 40%，恢复水驱。如图 8 和图 9，与水驱开发模型“water.dat”相比，8 年后含水率降低近 10 个百分点，原油增产约 6000m^3 。

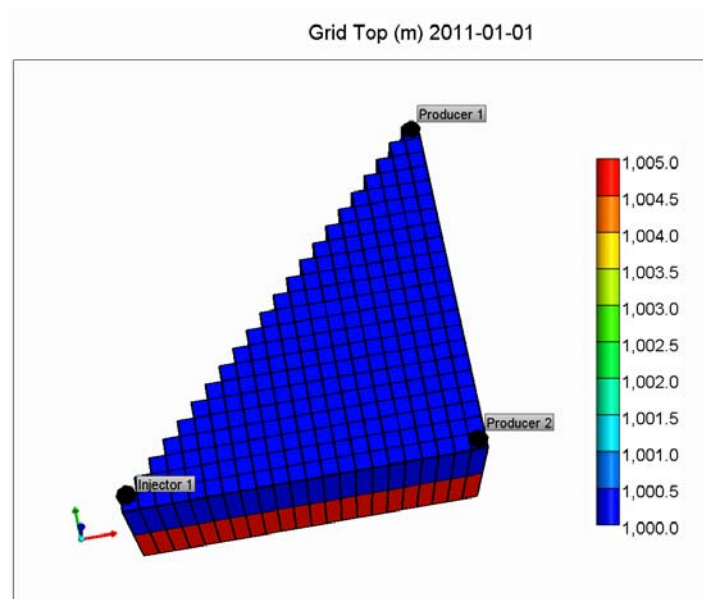


图 7 机理模型示意图

表 1 氮气泡沫驱模型参数表

参数	取值
孔隙体积, m^3	56250
单个网格孔隙体积, m^3	125
含油饱和度, f	0.8
渗透率第 1 层, $10^{-3}\mu\text{m}^2$	500
渗透率第 2 层, $10^{-3}\mu\text{m}^2$	100
孔隙度, f	0.25
水的粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$	0.87
气的粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$	0.01

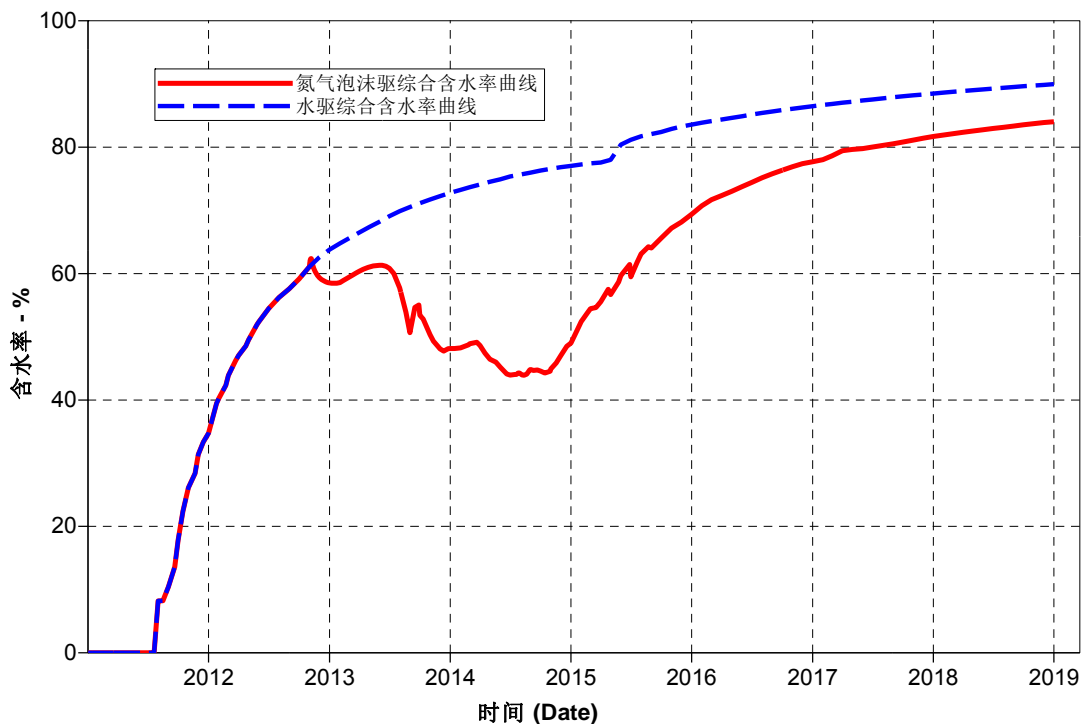


图 8 氮气泡沫驱与水驱综合含水率对比曲线

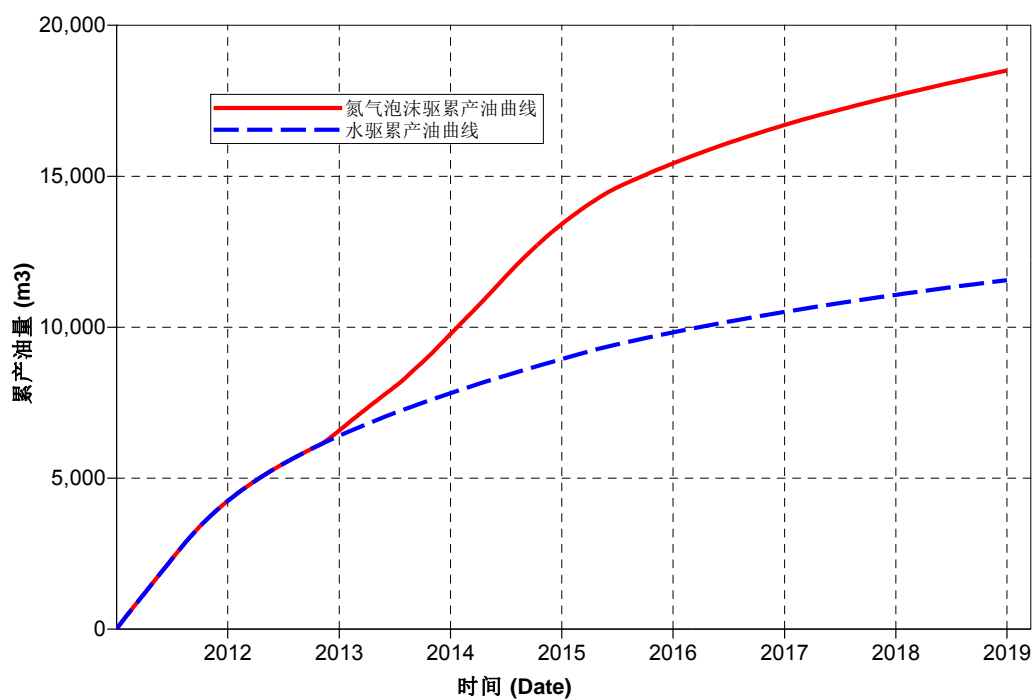


图 9 氮气泡沫驱与水驱累产油量对比曲线