

第42期： STARS软件处理变形介质的6种方法

编写人：王建国

变形介质是指在油藏在开发过程中，孔隙压力随流体的注入/采出而升高/下降，使储层内外压差发生变化，孔隙受到压缩/膨胀影响而体积改变，孔隙度和渗透率随之改变，影响油藏的开采效果。例如，在蒸汽吞吐注汽过程中，注入压力过大会导致近井地带的孔隙度和渗透率变大，甚至产生裂缝。如果在模拟过程中不考虑应用变形介质模型，会造成注汽压力高、注不进汽、步长过小和计算失败等一系列问题

在 STARS 软件中，除了用常规的孔隙压缩系数模拟流体孔隙度的变化之外，还有 6 种方法用于模拟孔隙度、渗透率随压力而变化，这些方法包括：

1. 压力相关的传导率倍数法 (*PFRAC)
2. 可变渗透率法 (*PERMCK 等)
3. 膨胀-再压实选项 (*DILATION)
4. 压实反弹模型 (*EPCOMPACT)
5. c_p 和 c_T 可变的压实-反弹模型 (*COMPACT_VAR: c_p 和 c_T)
6. 地质力学模型 (*GEOMECH)

膨胀-再压实选项关键字*DILATION 是为蒸汽吞吐开发的，描述的是在蒸汽吞吐过程中油砂膨胀和再压实的主要特征，但如果有合适的取值，也适用于其他过程和情况。

压实反弹模型关键字*EPCOMPACT 主要是为了模拟在一次采油中由于压力下降地层收缩和随后的注入阶段由于压力上升地层反弹的不可逆过程。

*DILATION 和*EPCOMPACT 模型使用恒定的孔隙体积压缩系数和热膨胀系数，关键字*COMPACT_VAR 与此不同，使用的是与压力历史相关的属性值。这种方法尝试模拟由于压力衰竭产生的砂层压实和之后注蒸汽引起的地层反弹。

目前，在同一个模拟中，这三个经验模型 (*DILATION, *COMPACT_VAR 和*EPCOMPACT) 只能选取其中一个。

下面对这些方法逐一详细介绍。

1. 压力相关的传导率因子方法 (*PFRAC)

1.1 用途

定义压力相关的传导率因子，即定义传导率随压力动态变化。

1.2 关键字

*PFRAC

*PFRACF

*PTRANSI

*PTRANSJ

*PTRANSK

*PTRANSIJ+

*PTRANSIJ-

*PTRANSIK+

*PTRANSIK-

1.3 关键字定义

*PFRAC

参考压力下限，此压力下裂缝关闭。建议范围 0~*PFRACF 值。

*PFRACF

参考压力上限，此压力下裂缝完全开启。建议范围 PFRACF~10MPa。

*PTRANSI

在最大压力效应下，I 方向可变的传导率因子。建议范围为 0~1e5。

*PTRANSJ

在最大压力效应下，J 方向可变的传导率因子。建议范围为 0~1e5。

*PTRANSK

在最大压力效应下，K 方向可变传导率因子。建议范围为 0~1e5。

*PTRANSIJ+

在最大压力效应下，I+J+对角线方向可变传导率因子。建议范围为 0~1e5。

*PTRANSIJ-

在最大压力效应下，I+J-对角线方向可变传导率因子。建议范围为 0~1e5。

*PTRANSIK+

在最大压力效应下，I+K+对角线方向可变传导率因子。建议范围为0~1e5。

*PTRANSIK-

在最大压力效应下，I+K-对角线方向可变传导率因子。建议范围为0~1e5。

1.4 缺省值

缺省条件下，不使用该选项。当该选项可用时，缺省传导率因子为1。

1.5 理论解释

如果参考压力的上下限值相同，则不进行传导率因子计算。传导率计算的可变因子为：

$$F = R + (1-R) * ptrans$$

其中：

ptrans —是根据关键字定义好的一个*PTRANS 值。

$$R = 1 / (1 + \exp(x))$$

$$x = 10 * (P - Pav) / (pfracf - pfrac)$$

其中：

P — 是上游网格的压力值（水相），

Pav — 是相同的上游网格中 pfrac 和 pfracf 的平均值。

当 $P = Pav$ 时， $x = 0$ ， $R = 0.5$ ，对应 ptrans 的中间效应。注意，压力较低时，R 无限接近 1，但不会等于 1。

$$\begin{aligned} \text{当 } P=pfrac \text{ 时, } x &= 10 * (pfrac - Pav) / (pfracf - pfrac) \\ &= 10 * [pfrac - (pfrac + pfracf)/2] / (pfracf - pfrac) \\ &= 10 * [-(pfracf - pfrac) / 2] / (pfracf - pfrac) = -5, \\ \text{则 } R &= 1/[1+\exp(-5)] \\ &= 1/(1+0.006738) \\ &= 0.993。 \end{aligned}$$

可变因子 $F=0.9933 + 0.0067 * ptrans$ 。

$$\begin{aligned} \text{当 } P=pfracf \text{ 时, } x &= 10 * (pfracf - Pav) / (pfracf - pfrac) \\ &= 10 * [pfracf - (pfrac + pfracf)/2] / (pfracf - pfrac) \\ &= 10 * [(pfracf - pfrac) / 2] / (pfracf - pfrac) = 5, \\ \text{则 } R &= 1/[1+\exp(5)] \end{aligned}$$

$$=1/(1+148.4132)$$

$$= 0.0067。$$

可变因子 $F=0.0067 + 0.9933 * p_{trans}$ 。

若 $p_{trans} = 1000$ ，在压力等于 p_{fracf} 时，传导率因子的可变部分即为 993。

压力相关的传导率因子方法不能应用于混合加密网格（hybrid grids），天然裂缝模型及离散井筒模型。

2. 可变渗透率法 (*PERMCK 等)

2.1 用途

定义渗透率随孔隙度变化而变化。

2.2 关键字格式

*PERMCK *ckpower*

*PERMTAB
 { ϕ/ϕ_0 K/K_0 }

*PERMTABLOG
 { ϕ/ϕ_0 $\log\{K/K_0\}$ }

*PERMEXP

*PERMSLD

数组:

*PERMULI

*PERMULJ

*PERMULK

2.3 关键字定义

*PERMCK *ckpower*

通过 Carmen-Kozeny 公式，渗透率为流体孔隙度的一个函数，

$$K(\phi) = K_0 * [\phi/\phi_0]^{**ckpower} [(1-\phi_0)/(1-\phi)]^{**2}$$

Ckpower 的下限是 0，上限是 10。

*PERMTAB

通过查表获得的渗透率倍数，渗透率成为流体孔隙度的一个函数。在网络输入的中间值， K/K_0 随着 ϕ/ϕ_0 线性变化。要求必须有一行为 $\phi/\phi_0 = 1$ 和 $K/K_0 = 1$ 。在此表格中 ϕ/ϕ_0 必须是非负值，并且逐渐增加， K/K_0 也必须是非负值。允许的行数为 2~30，在第一列中的输入必须是平均间隔的，否则需要调整。

*PERMTABLOG

通过查表指数获得的渗透率倍数，渗透率成为流体孔隙度的一个函数。在网络输入的中间值， $\ln(K/K_0)$ 随着 ϕ/ϕ_0 线性变化。要求必须有一行为 $\phi/\phi_0 = 1$ 和 $\ln(K/K_0) = 0$ 。在此表格中 ϕ/ϕ_0 必须是非负值，并且逐渐增加。允许的行数为 2~30，在第一列中的输入必须是平均间隔的，否则需要调整。

***PERMEXP**

渗透率与流体孔隙度的关系，如下面函数所示。

$$k = k_o * \exp \left[k_{mul} * \left(\frac{\phi - \phi_o}{1 - \phi_o} \right) \right]$$

这里， k_o 和 ϕ_o 分别是原始（初始）渗透率和流体孔隙度， k_{mul} 是用户通过*PERMULI, *PERMULJ 或*PERMULK 定义的倍乘系数。这种计算是在每个网格块和每个方向基础上进行的。查看下面的*PERMULI。

***PERMSLD**

该关键字仅应用于离散井模型中，渗透率随固相而发生变化的情况。

渗透率与流体孔隙度的关系，

$$k = k_o * (1 - \text{solid}(\phi))$$

这里， k_o 是初始井筒渗透率。固相分数(solid volume/void volume)是固相浓度、孔隙度和固相压缩系数的函数。在 DW 网格块，不能使用其他可变渗透率关键字。

***PERMULI, *PERMULJ, *PERMULK**

I, J, K 方向渗透率变化参数，用于上面的*PERMEXP 公式中。注意，这些是网格数组，所以对于不同的网格块需要不同的值。允许值范围是 0 ~ 1.0e10，但是因为该因子在指数函数中使用，一般情况下不会超过 100。

允许所有网格数组分配选项，包括*EQUALSI。在三个方向上该值自动初始化为 0，即随着流体孔隙度无渗透率变化。只有在每个方向上分别明确给定非零值的网格块，才会发生渗透率变化。

2.4 缺省值

如果缺少 *PERMCK, *PERMTAB, *PERMTABLOG, *PERMSLD 和 *PERMEXP 其中一个，则相应的模型不能用来模拟渗透率随孔隙度的变化。其他选项可用来改变渗透率（例如，*DILATION 和 *EPCOMPACT）

```
*PERMULI *CON 0
```

```
*PERMULJ *CON 0
```

```
*PERMULK *CON 0
```

2.5 使用条件

关键字 *PERMCK, *PERMTAB, *PERMTABLOG, *PERMSLD 和 *PERMEXP 都被岩石类型收录，其值和标记被指定给当前的岩石类型(查看 *ROCKTYPE)。在同一个模拟中，不同的岩石类型可以有不同的可变渗透率选

项。如果在同一个岩石类型中出现多个这种关键字，则使用最后一组。

*PERMEXP 选项需要关键字*PERMULI, *PERMULJ 和 *PERMULK 来定义随网格变化的渗透率因子。

以下选项对同一个岩石类型是相互排斥的：*PERMCK, *PERMTAB, *PERMTABLOG, *PERMEXP, *COMPACT_VAR, *DILATION 和 *EPCOMPACT。

2.6 理论解释

除了以上描述的选项外，*DILATION 和 *EPCOMPACT 选项的*PERMULI 等可实现改变渗透率。然而，*PERMCK, *PERMTAB, *PERMTABLOG 和 *PERMEXP 选项不能使用*DILATION 和 *EPCOMPACT 选项中复杂的孔隙度模型。孔隙度模型中流体孔隙度的变化以及渗透率的变化，通常主要是由固相/吸附相/捕集相物质的量的改变引起的。

在绝对渗透率变化的选项中使用的孔隙度为流体孔隙度（Fluid Porosity），不是孔洞孔隙度（void volume）。因为流体体积是孔洞体积减去固相体积，固相中物质的量的变化（固相组分或吸附/捕集流体组分）对于计算渗透率有直接的影响。例如，火烧过程中焦炭的出现会降低流体孔隙度和渗透率。

初始流体孔隙度 ϕ_0 与该网格块初始压力、温度和固相数量下计算的值一致。初始渗透率 k_0 等于通过关键字*PERMI, *PERMJ 和*PERMK 输入的网格块参考渗透率。

请看下面的例子。一个网格系统 3 个 K 层分别属于三套岩石类型，两层为膨胀再压实模型，另一层是标准的弹性压缩模型。同时，输入可变渗透率选项。注意，*PERMEXP 使用标准的压缩模型，使得岩石类型 2 的渗透率可变。

```
*ROCKTYPE 1 ** Dilation-recompaction model
  *CPOR 1.8e-5 *DILATION ...
*ROCKTYPE 2 ** Standard compressibility model
  *CPOR 2.5e-5 *PERMEXP ...
*ROCKTYPE 3 ** Dilation-recompaction model
  *CPOR 1.8e-5 *DILATION ...
*PERMULI *KVAR 2.5 3.2 2.8
*PERMULJ *EQUALSI
*PERMULK *KVAR 3.5 3.8 2.9
```

2.7 例子

Carmen-Kozeny 选项需要一个单独的数字，在下面的例子中， $\phi_0 = 0.30$ 且 $\phi = 0.32$ ，得出 $K/K_0 = (0.32/0.3)^{2.5} \cdot [(1-0.3)/(1-0.32)]^2 = 1.245$ 。

*PERMCK 2.5

*PERMTAB 表格选项可线性内部插值。下面的例子中， $\phi/\phi_0 = 0.96$ ，得出 $K/K_0 = 0.08 + (0.96-0.94) \cdot [(0.2-0.08)/(0.97-0.94)] = 0.16$ 。

```
*PERMTAB ** phi/phi0 perm/perm0
      0.91      0.02
      0.94      0.08
      0.97      0.2
      1.00      1.0
      1.03      3.0
```

*PERMTABLOG 表格选项可对数线性内部插值。在下面的例子中， $\phi/\phi_0 = 0.96$ ，得出 $\ln(K/K_0) = -1.5 + (0.96-0.94) \cdot [(-0.8-(-1.5))/(0.97-0.94)] = -1.0333$

$K/K_0 = 0.3558$

```
*PERMTABLOG ** phi/phi0 ln(perm/perm0)
      0.91     -1.8
      0.94     -1.5
      0.97     -0.8
      1.00      0.0
      1.03      0.3
```

*PERMEXP 选项使用*PERMULI, *PERMULJ 和 *PERMULK。在下面的例子中，对于 k=1 小层 $\phi_0 = 0.30$ 和 $\phi = 0.32$ ，得出

I 和 J 方向， $K/K_0 = \exp[2.5 \cdot (0.32-0.3)/(1-0.3)] = 1.074$

K 方向， $K/K_0 = \exp[3.5 \cdot (0.32-0.3)/(1-0.3)] = 1.105$

```
*PERMULI *KVAR 2.5 3.2 2.8
```

```
*PERMULJ *EQUALSI
```

```
*PERMULK *KVAR 3.5 3.8 2.9
```

```
*PERMEXP
```

软件自带算例：stgeo022。

3. 储层孔隙体积膨胀-再压实选项 (*DILATION)

3.1 用途

定义油藏孔隙体积膨胀-再压实模型。

3.2 关键字格式

*DILATION (*PBASE pbase) (*PDILA pdila) (*PPACT ppact) (*CRD crd) (*FR fr) (*PORRATMAX rat) (*CPEPAC cpepac) (*CTD ctd) (*CTPPAC ctppac)

数组：

*PERMULI

*PERMULJ

*PERMULK

I, J 和 K 网格块渗透率倍数。详情查阅 Variable Permeability 部分的描述。

3.3 关键字定义

*DILATION

表明激活油藏膨胀/再压实模型，后面为该组的其他关键字。

pbase

弹性曲线的参考压力(kPa | psi | kPa)。建议范围是 100 kPa (14.504 psi) ~ 1.0e6 kPa (1.45e5 psi)；该值必须是非负的。

pdila

膨胀开始的压力(kPa | psi | kPa)。该值必须是非负的，并且应大于油藏初始压力值。

ppact

再压实开始的压力(kPa | psi | kPa)。该值必须是非负的，并且小于 pdila。

crd

膨胀孔隙体积压缩系数(1/kPa | 1/psi | 1/kPa)。该值必须是非负的，值为 0 时无法启动此功能。

fr

残余膨胀系数，即在再压实过程中不可恢复的部分。允许范围是在 0~1。

rat

允许孔隙按比例增加的最大值，该值独立应用于每个网格初始参考孔隙度。rat 的最小值为 1。推荐 rat 最大值为 1.3，过大的值会导致严重的收敛问题。

cpepac

弹性压实曲线孔隙体积压缩系数(1/kPa | 1/psi | 1/kPa)。该值必须是非负的。

ctd

膨胀曲线的孔隙体积热膨胀系数(1/C | 1/F | 1/C)。该值必须是非负的。

ctppac

再压实曲线的孔隙体积热膨胀系数(1/C | 1/F | 1/C)。该值必须是非负的。

3.4 缺省值

如果没有 *DILATION 关键字，则不能使用膨胀再压实模型，不能有 *DILATION 的子关键字。

如果没有 *PBASE，则假设它等于 *PRPOR 定义的值或其缺省值。

Absent	Action
*PDILA	<i>pdila = 0</i>
*PPACT	<i>ppac = 0</i>
*CRD	<i>crd = 0</i> 这将不使用 dilation-recompaction model.
*FR	<i>fr = 0</i>
*PORRATMAX	<i>rat = 1</i>
*CPEPAC	<i>cpepac = cpor</i> from *CPOR (初始弹性曲线值)
*CTD	<i>ctd = ctpor</i> from *CTPOR.
*CTPPAC	<i>ctppac = ctpor</i> from *CTPOR.
*PERMULI	所有网格 I 方向渗透率倍数为 0，也就是，I 方向渗透率不随孔隙度变化做任何修正。
*PERMULJ	所有网格 J 方向渗透率倍数为 0，也就是，J 方向渗透率不随孔隙度变化做任何修正。
*PERMULK	所有网格 K 方向渗透率倍数为 0，也就是，K 方向渗透率不随孔隙度变化做任何修正。

3.5 使用条件

*PBASE, *PDILA, *PPACT, *CRD, *FR, *PORRATMAX, *CPEPAC, *CTD 和 *CTPPAC 是*DILATION的子关键字, 必须紧随*DILATION之后出现, 但是出现顺序不要求。

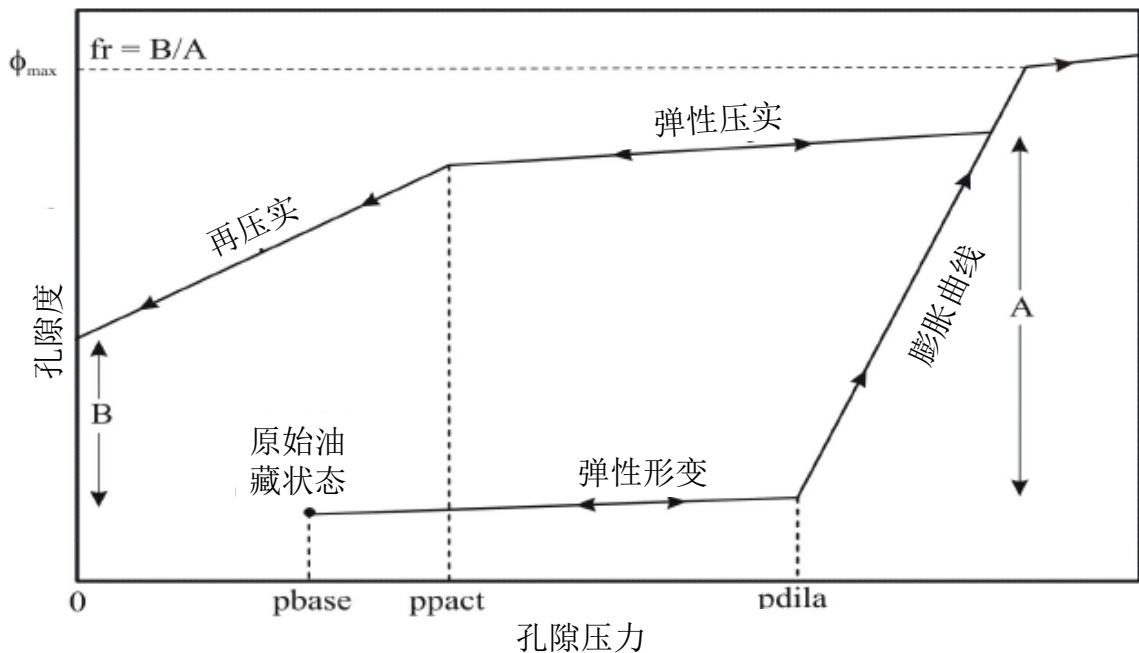
*DILATION的所有子关键字都被岩石类型收录, 他们的值被指定给当前的岩石类型(查看 *ROCKTYPE)。

对于每个岩石类型, 下面这几个选项是相互排斥的: *PERMCK, *PERMTAB, *PERMTABLOG, *PERMEXP, *DILATION, *COMPACTION_VAR 和 *EPCOMPACT。

3.6 解释

(1) Dilation/Recompaction Model

膨胀再压实模型描述的是在蒸汽吞吐过程中油砂膨胀和再压实的主要特征。该模型是在 Beattie, Boberg 和 McNab 在 "Reservoir Simulation of Cyclic Steam Stimulation in the Cold Lake Oil Sands", SPE Reservoir Engineering, May, 1991 的研究成果基础上开发的。在该模型中, 网格块孔隙度 ϕ 和网格块压力 p 之间的关系如下图所示。任意已知压力 p 下的孔隙度 ϕ 可通过公式(D1)计算得到。



蒸汽吞吐模拟过程的膨胀-再压实模型

$$\phi = \phi_{ref} e^{[c_o(p-p_{ref})]} \quad (D1)$$

在公式(D1)中, p_{ref} 是参考压力, ϕ_{ref} 是 p_{ref} 下的孔隙度, c_p 是孔隙体积压缩系数。图中变形曲线的每个分支都有一组关于这三个网格块变量的数据。

随着蒸汽的注入, 地层压力从原始地层压力开始逐渐增大, 岩石发生弹性变形。若压力继续增大, 超过 p_{dila} 以后, 孔隙度沿着不可逆的膨胀曲线增大, 直至压力开始下降或者达到设定的最大孔隙度。如果压力从膨胀曲线上的某一点开始下降, 孔隙度就沿着弹性压实曲线减小。当压力进一步降低至再压实临界压力 p_{pact} 以下后, 就会发生再压实, 再压实曲线的斜率取决于残余膨胀系数 f_r 。当压力从再压实曲线上某一点开始增加时, 就开始新一轮类似的膨胀/再压实的循环, 如图所示。

(2) 温度对 Dilation-Recompaction Model 的影响

为考虑热对网格块孔隙体积的影响, 原始的公式(D1)改进如下:

$$\phi = \phi_{ref} e^{[c_p(p-p_{ref}) - c_T(T-T_{ref})]} \quad (D2)$$

c_T 是热膨胀系数, 假设 $ctpor$, ctd 或 $ctppac$ 依赖于网格压力及历史。假设认为, 温度对网格孔隙度的影响远远小于压力的影响。因此, 孔隙体积膨胀再压实变化主要由压力控制。这里要求 $ctpor$, ctd 和 $ctppac$ 的输入值要远远小于相应的孔隙体积压缩系数值。

3.7 例子

在 Other Reservoir Properties 部分键入以下关键字, 启用膨胀再压实模型, 不考虑温度对网格块孔隙体积的影响。

```
*DILATION *PBASE 75.0 *PDILA 400.0 *PPACT 100.0
      *CRD 7e-6 *FR 0.1 *PORRATMAX 1.3
*PERMULI *CON 4.5
*PERMULJ *CON 4.5
*PERMULK *CON 4.5
```

下面的例子使用膨胀再压实模型, 同时考虑压力和温度对网格块孔隙体积的影响, 但是对绝对渗透率没有影响。

```
*DILATION *PDILA 400.0 *PPACT 100.0
      *CRD 7e-5 *FR 0.5 *PORRATMAX 1.2
      *CTD 7e-6 *CTPPAC 1e-6
```

请注意, 考虑温度对初始弹性曲线和弹性压实曲线的影响时, 需通过 *CTPOR 输入一个非 0 的弹性热膨胀系数。

STARS 软件自带算例有: stsmo053.dat。

4. 储层孔隙体积压实反弹模型 (*EPCOMPACT)

4.1 用途

通过使用恒定的压缩系数和热膨胀系数来定义弹塑性变形的油藏压实反弹模型。

4.2 关键字格式

*EPCOMPACT (*CRP c_{rp}) (*PPLASTIC *pplastic*) (*CTP c_{Tp})

数组:

*PERMULI

*PERMULJ

*PERMULK

I, J 和 K 方向的网格块渗透率倍数。详细请查看 Variable Permeability section 的描述。

4.3 关键字定义

*EPCOMPACT

该关键字表明激活弹塑性压实反弹模型，其他关键字紧随其后。

c_{rp}

弹性压实地层孔隙体积压缩系数(1/kPa | 1/psi | 1/kPa)。该值非负。

c_{Tp}

塑性压实地层孔隙体积热膨胀系数(1/C | 1/F | 1/C)。该值非负。

pplastic

塑性压实开始的临界压力(kPa | psi | kPa)。该值非负，且应小于油藏初始压力值。

4.4 缺省值

如果*EPCOMPACT 没有出现，则不可用弹塑性压实模型，也不可用其子关键字*CRP, *PPLASTIC 和 *CTP。

如果存在*EPCOMPACT，但是没有*CRP 或 *PPLASTIC，相关数据值设为 0。

如果存在*EPCOMPACT，但是没有*CTP，则 $c_{Tp} = ctpor$ (*CTPOR 设定的值) (弹性值)。

如果缺少*PERMULI, PERMULJ 或 PERMULK 中任一值, 就不考虑该方向上由于孔隙度变化产生的渗透率变化。

4.5 使用条件

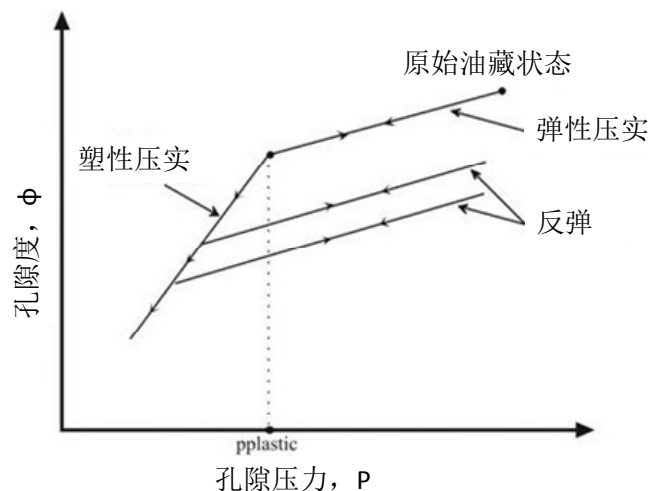
*CRP, *CTP 和 *PPLASTIC 是 *EPCOMPACT 的子关键字, 所以必须紧接着 *EPCOMPACT 出现, 但对顺序没有要求。

所有 *EPCOMPACT 的子关键字都被岩石类型收录, 他们的值被指定给当前的岩石类型(查看 *ROCKTYPE)。

对于每个岩石类型, 下面这几个选项是相互排斥的: *PERMCK, *PERMTAB, *PERMTABLOG, *PERMEXP, *DILATION, *COMPACTION_VAR 和 *EPCOMPACT。

4.6 理论解释

压实反弹模型主要是为了模拟在一次采油中由于压力下降地层收缩和随后的注入阶段由于压力上升地层反弹的不可逆过程。在该选项下, STARS 可通过改变多孔介质的孔隙度模拟压实或反弹对流体流动的影响。下图展示了网格块孔隙度随压力变化的机理过程。当压力从初始油藏条件开始下降, 岩石弹性变形, 孔隙度由于弹性压缩和热膨胀 (*CPOR 和 *CTPOR 的值) 开始下降。如果压力下降至远远低于临界压力($p_{plastic}$), 会发生不可恢复的压实现象, 孔隙度通过塑性值 c_{rp} 和 c_{rp} 发生塑性变化。与弹性阶段不同, 塑性压实是不可逆过程; 也就是说, 当压力上升, 孔隙度会遵循反弹曲线(这是塑性压实的分支), 而不是沿着原压实曲线返回。



岩石压实反弹模型 (*EPCOMPACT)

计算中用于孔隙度-压力/温度关系的函数形式为：

$$\phi = \phi_{\text{ref}} e^{[c_p(p-p_{\text{ref}}) - c_T(T-T_{\text{ref}})]}$$

c_p 代表弹性或塑性压实的压缩系数， c_T 代表弹性或塑性压实的热膨胀系数， p_{ref} 和 T_{ref} 为每条曲线的参考压力和温度， ϕ_{ref} 为 p_{ref} 和 T_{ref} 下的孔隙度。请注意网格块从弹性变到塑性时 p_{ref} 和 T_{ref} 随着发生变化，反之亦然。

地层沉降和孔隙度变化一起计算。沉降的程度可通过*OUTPRN *GRID, OUTSRF *GRID 和*OUTSRF *SPECIAL *BLOCKVAR 的子关键字*SBDZ 输出查看。

(1) 温度对*EPCOMPACT 模型的影响

假设认为，温度对网格孔隙度的影响远远小于压力的影响。因此，孔隙体积压实反弹现象主要由压力控制。这就要求输入的 $ctpor$ 和 c_{Tp} 值要远远小于相应的孔隙体积压缩系数 $cpor$ 和 c_p 值。

(2) 可变渗透率

网格单元每个方向的绝对渗透率取决于孔隙度，以类似上图所示的方式发生变化。关键字*PERMULI, *PERMULJ 和*PERMULK 与*EPCOMPACT 同时用，定义渗透率在每个网格和每个方向的变化。可查看*PERMEXP 的解释。

4.7 例子

在 Other Reservoir Properties 输入以下关键字，则使用压实反弹模型，温度对网格块孔隙体积无影响($c_{Tp}=0$)。

```
*EPCOMPACT *CRP 1.0e-5 *PPLASTIC 1500
*PERMULI *CON 10
*PERMULJ *CON 10
*PERMULK *CON 10
```

下面的例子使用压实反弹模型，压力和温度对网格块孔隙体积均有影响，但是对绝对渗透率无影响。

```
*EPCOMPACT *CRP 1.0e-5 *PPLASTIC 1500 *CTP 1.0e-6
```

请注意，考虑温度对弹性压实和反弹的影响时，需通过关键字*CTPOR 输入非 0 的弹性热膨胀系数。

软件自带算例：stsmo054。

5. cp 和 cT 可变的压实-反弹模型 (*COMPACT_VAR)

5.1 用途

通过基于压力历史的孔隙压缩系数和热膨胀系数来定义孔隙体积。

5.2 关键字格式

```
*COMPACT_VAR      (*CRB crb) (*CRM crm) (*ALFDR adr) (*FONE
                    f1) (*FTWO f2)
                    (*CPERMCOR a0 a1 a2 a3 a4 a5)
```

5.3 关键字定义

***COMPACT_VAR**

该关键字表明使用变化的岩石压缩系数和热膨胀系数的压实-反弹模型可用，该组的其他关键字紧随其后。

c_{rb}

多孔介质的地层体积压缩系数(1/kPa | 1/psi | 1/kPa)。该值非负。

c_{rm}

多孔介质的地层基岩（颗粒）压缩系数(1/kPa | 1/psi | 1/kPa)。该值非负。

a_{dr}

多孔介质的地层体积热膨胀系数(1/C | 1/F | 1/C)。该值非负。

f₁

压实公式中的参数，查看下面 Eq. (G2) and (G3)。

f₂

反弹公式中的参数，查看下面 Eq. (G4) and (G5)

a₀ a₁ a₂ a₃ a₄ a₅

渗透率-孔隙度相关式系数，查看 Eq. (G6)

5.4 缺省值

如果*COMPACT_VAR 没有出现，那么使用变化的岩石压缩系数和热膨胀系数的压实-反弹模型不可用，也不能使用*COMPACT_VAR 的子关键字。

Absent	Action
*CRB	c _{rb} = 0

*CRM	$c_{rm} = 0$
*ALFDR	$a_{dr} = 0$
*FONE	$f_1 = 0$
*FTWO	$f_2 = 0$
*CPERMCO	$a_0 = 1, a_1 = 0, a_2 = 0, a_3 = 0, a_4 = 0, a_5 = 0$

5.5 使用条件

*CRB, *CRM, *ALFDR, *FONE, *FTWO 和 *CPERMCOR 是 *COMPACT_VAR 的子关键字，所以必须紧接着 *COMPACT_VAR 出现，但次序不要求。

所有 *COMPACT_VAR 的子关键字都被岩石类型收录，他们的值被指定给当前的岩石类型(查看 *ROCKTYPE)。

对于每个岩石类型，下面这几个选项是相互排斥的：*PERMCK, *PERMTAB, *PERMTABLOG, *PERMEXP, *DILATION, *COMPACTION_VAR 和 *EPCOMPACT。

5.6 理论解释

使用变化的岩石压缩系数和热膨胀系数的压实-反弹模型是基于 Zhengming Yang et al.的研究成果（详细请查看 SPE 49314 "Method of handling the complexities associated with history matching the performance of a highly stress-sensitive formation", 1998）。这种方法尝试模拟由于压力衰竭产生的砂层压实现象和之后注蒸汽引起的地层反弹。在地质力学应力应变分析基础上，得出对于传统的压缩系数和热膨胀系数的一些简化的关系，因此避免了油藏流动方程和地质力学应力应变方程的全耦合求解。

通常，地层孔隙度方程为：

$$\phi(p, T) = \phi_{ref} \left[1 + c_p * (p - p_{ref}) - c_T (T - T_{ref}) \right] \quad (G1)$$

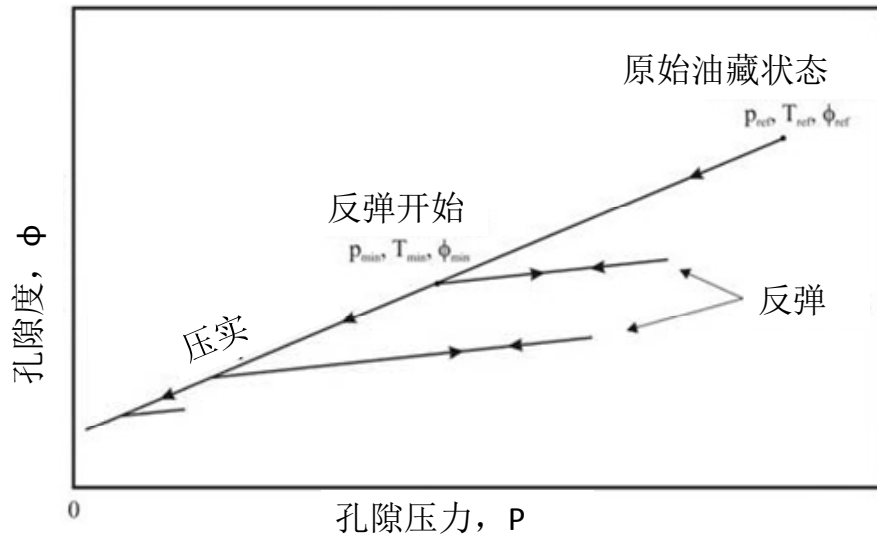
p 和 T 是网格块压力和温度(下标“ref”代表为参考条件下)。 Φ 是网格块孔隙度， c_p 和 c_T 分别为孔隙体积压缩系数和热膨胀系数。油藏压实阶段，Eq. (G1)中最后用于计算 c_p 和 c_T 的方程为

$$c_p = \frac{[c_{rb}(1-\phi_{ref})-c_m](1-f_1)}{\phi_{ref}} + [(1-f_1)c_{rb}-c_m] + \frac{[c_{rb}(1-\phi_{ref})-c_m](1-f_1)}{\phi_{ref}} + [(1-f_1)c_{rb}-c_m](p-p_{ref}) \quad (G2)$$

和

$$c_T = a_{dr} \left\{ 1 + \frac{[c_{rb}(1-\phi_{ref})-c_m](1-f_1)(p-p_{ref})}{\phi_{ref}} \right\} \quad (G3)$$

在 Eq.(G2) and (G3)中，参数 f_1 是与地质力学参数（例如 Poisson's ratio）相关的一个派生变量，对于油砂大致等于-0.44。



cp 和 cT 可变的的压实反弹模型

当网格块压力增加时，地层会发生反弹，如上图所示。假设在压力 p_{min} 和温度 T_{min} （对应孔隙度是 ϕ_{min} ）下开始反弹，在反弹阶段利用下面公式计算 c_p 和 c_T 。

$$c_p = \frac{[c_{rb}(1-\phi_{min})-c_m](1-f_2)}{\phi_{min}} + [(1-f_2)c_{rb}-c_m] + \frac{[c_{rb}(1-\phi_{min})-c_m](1-f_2)}{\phi_{min}} + [(1-f_2)c_{rb}-c_m](p-p_{min}) \quad (G4)$$

和

$$c_T = a_{dr} \left\{ 1 + \frac{[c_{rb}(1-\phi_{min})-c_m](1-f_2)(p-p_{min})}{\phi_{min}} \right\} \quad (G5)$$

与地层压实阶段的 f_1 类似， f_2 是一个与地质力学相关的参数。对于 $C_{rm} \ll C_{rb}$ 时， $f_1 \approx 0.5$ 。网格块绝对渗透率与孔隙度是多项式的关系：

$$K(p, T) = k_{ref} \left[a_0 + a_1 \left(\frac{\phi}{\phi_{ref}} \right) + a_2 \left(\frac{\phi}{\phi_{ref}} \right)^2 + a_3 \left(\frac{\phi}{\phi_{ref}} \right)^3 + a_4 \left(\frac{\phi}{\phi_{ref}} \right)^4 + a_5 \left(\frac{\phi}{\phi_{ref}} \right)^5 \right] \quad (G6)$$

在 Eq. (G6), $a_0 - a_5$ 为用户输入的拟合参数, K_{ref} 为参考条件下网格块渗透率。为满足初始条件, 应该有这样的关系式 $a_0 + a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 = 1.0$ 。

地层沉降和孔隙度变化一起计算。沉淀的程度可通过 *OUTPRN *GRID, OUTSRF *GRID and *OUTSRF *SPECIAL *BLOCKVAR 的子关键字 *SBDZ 输出查看。

5.7 例子

在 Other Reservoir Properties 输入以下的关键字, 可以激活使用变化的岩石压缩系数和热膨胀系数的压实-反弹模型。

```
*COMPACT_VAR *CRB 1.36E-6 *CRM 1e-7 *ALFDR 1e-7
*FONE -0.44 *FTWO 0.5
*CPERM COR 1.0 -0.5 0.5 0.0 0.0 0.0
```

软件自带算例: stsmo055。

6. 地质力学模型 (*GEOMECH)

地质力学模型采用应力-应变关系数据，建立两套网格，利用有限差分和有限元的方法分别计算油藏流动方程和地质力学应力应变方程，实现全耦合求解。根据空隙压力来计算有效应力，进而根据本构方程计算孔隙度和渗透率的变化。因该模型关键字较多，使用较复杂，后续将推出专门的材料介绍地质力学模型的使用。