

第 57 期：STARS 中关于孔隙度及其变化的若干认识

编写人：王建国

用过 STARS 的工程师往往会遇到这样一些问题：

- 1) Result 3D 中显示有多个孔隙度，这些孔隙度之间有什么关系和区别？
- 2) 初始化后在 Result 3D 中显示的初始孔隙度为什么与用*POR 关键字输入的孔隙度值不同？
- 3) 如何模拟孔隙度随时间的变化？

本文就针对这些问题展开讨论。

1 STARS 中各种孔隙度的定义及查看

所谓孔隙度，是指岩石中孔隙体积与岩石总体积的比值。在常规的油藏模拟软件中，一般只有一个孔隙度，但是在 STARS 模拟结果中可以看到多个孔隙度，见图 1。下面我们就来讨论一下各种孔隙度的来历。

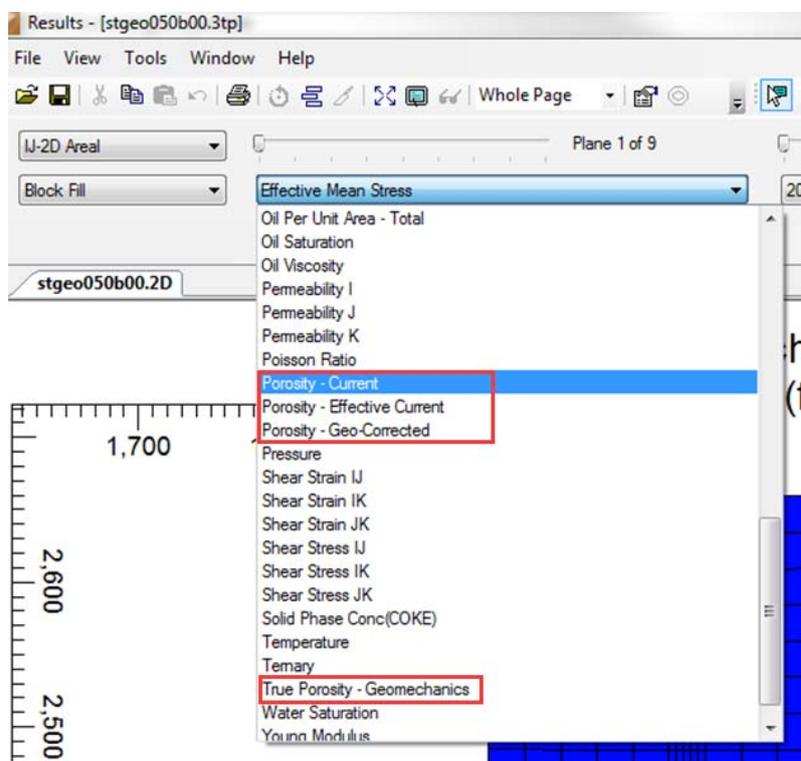


图 1 Result 3D 中显示的多个孔隙度

1.1 总孔隙度和流体孔隙度

在油藏数值模拟中, 网格块的总体积 V_b 由下列这些部分组成:

- 1) 固体岩石基质体积 (V_r)
- 2) 油相组分体积 (V_o)
- 3) 气相组分体积 (V_g)
- 4) 水相组分体积 (V_w)
- 5) 固相吸附组分体积 (V_s)

那么,

$$\text{网格块的总体积 } V_b = V_r + V_o + V_g + V_w + V_s$$

其中,

$$\text{流体的体积 } V_f = V_o + V_g + V_w$$

$$\text{孔隙体积 } V_v = V_b - V_r = V_f + V_s$$

由此可以得到各种级别的孔隙度:

$$\text{总孔隙度: } \phi_v = V_v / V_b$$

$$\begin{aligned} \text{流体孔隙度: } \phi_f &= V_f / V_b = (V_v - V_s) / V_b \\ &= (V_v / V_b) \cdot (1 - V_s / V_v) \end{aligned}$$

流体孔隙度也叫有效孔隙度。由于 V_s / V_v 等于孔隙体积中被固相和吸附组分占用的分数, 因此

$$\phi_f = \phi_v \cdot (1 - c_s / \rho_s)$$

其中

c_s - 固相浓度, 其物理含义是单位孔隙体积中的固相质量, SI 单位制下的单位是 kg/m^3 。STARS 通过关键字*CONC_SLD (SI 单位制下的单位是 mol/m^3 , 即单位孔隙体积的摩尔数) 输入并进行单位换算得到。

ρ_s - 固相密度, 其物理含义是单位体积纯物质的质量, SI 单位制下的单位是 kg/m^3 。STARS 通过关键字*SOLID_DEN (SI 单位制下的单位是 kg/m^3) 输入。

比如, 在火烧油层模拟时, 假如网格的总孔隙度 $\phi_v=0.3$, 其中焦炭占据了部分孔隙空间, 实验测得初始条件下焦炭在单位油藏体积下的浓度是 28.8kg/m^3 , 转换成模拟计算过程中公式使用的单位孔隙体积下的浓度 $c_s = 28.8/0.3=96.0$ (kg/m^3)。如果焦炭的纯密度 $\rho_s=960\text{kg/m}^3$, 那么流体孔隙度

$$\varphi_f = \varphi_v \cdot (1 - c_s / \rho_s) = 0.3 \cdot (1 - 96.0 / 960) = 0.27$$

当然，在模拟过程中，固相的浓度和密度并不是固定不变的，而是随着压力和温度的变化而变化。

如果焦炭的分子量是 0.013kg/mol，那么在 STARS 数据文件中输入的初始焦炭浓度就等于 96.0 / 0.013=7384.6 (mol/m³)，相应的关键字数据行就是：

```
*COMPNAME ... 'Coke'
*CONC_SLD 'Coke' *CON 7384.6
```

固相密度的单位是 kg/m³，物理意义为单位体积纯物质的质量。例如，某固相的密度为 960.0 kg/m³。STARS 输入固相浓度数据的关键字*CONC_SLD。

由于存在实验数据单位、STARS 输入数据单位以及计算公式（手册中用于内部推导的公式）单位等多个单位之间的转换，这里比较容易出错，我们再通过一个表格来梳理一下各个数据之间的换算关系。

表 1 固相浓度在各种情况下的单位和含义

| 数据 | 单位 | 物理意义 | 示例数据 |
|----------|----------------------------|---------------|--------|
| 实验室 | kg/m ³ | 单位油藏岩石体积的固相质量 | 28.8 |
| STARS 输入 | (SI 单位) mol/m ³ | 单位孔隙体积的固相摩尔数 | 7384.6 |
| 计算公式 | kg/m ³ | 单位孔隙体积中的固相质量 | 96.0 |

如果没有固相或者吸附组分，那么 $c_s = 0$ ，则 $\varphi_f = \varphi_v$ ，这就是常规模拟器中用到的孔隙度。在 STARS 中为了模拟固相或吸附组分对流体渗流的影响，引入了总孔隙度 φ_v 和流体孔隙度 φ_f 的概念。

在 Builder 控制参数输出的设置时，总孔隙度 φ_v 和流体孔隙度 φ_f 分别显示为 VPOROS 和 FPOROS，见图 2。

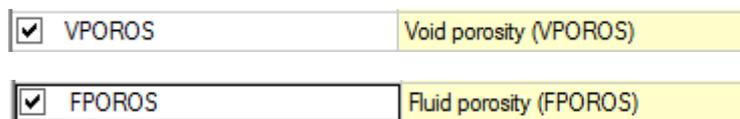


图 2 Builder 中控制总孔隙度和流体孔隙度输出的子关键字

在数据体中对应的关键字是：

OUTSRF GRID VPOROS FPOROS

在 Result 3D 中总孔隙度的属性名称为 Porosity – Current，流体孔隙度的属性名称为 Porosity - Effective Current。

注意，这两个孔隙度不是缺省输出的。也就是说，只有在 Builder 中或者数据体中设置输出以后，才有可能在 Result 3D 中看到变化的总孔隙度和流体孔隙度，否则即使能看到输出，看到的值也是固定不变的。例如，以自带算例 stgeo050.dat 为例，控制输出 VPOROS 后 FPOROS 后，Result 3D 中看到的各参数随时间发生变化，见图 3。

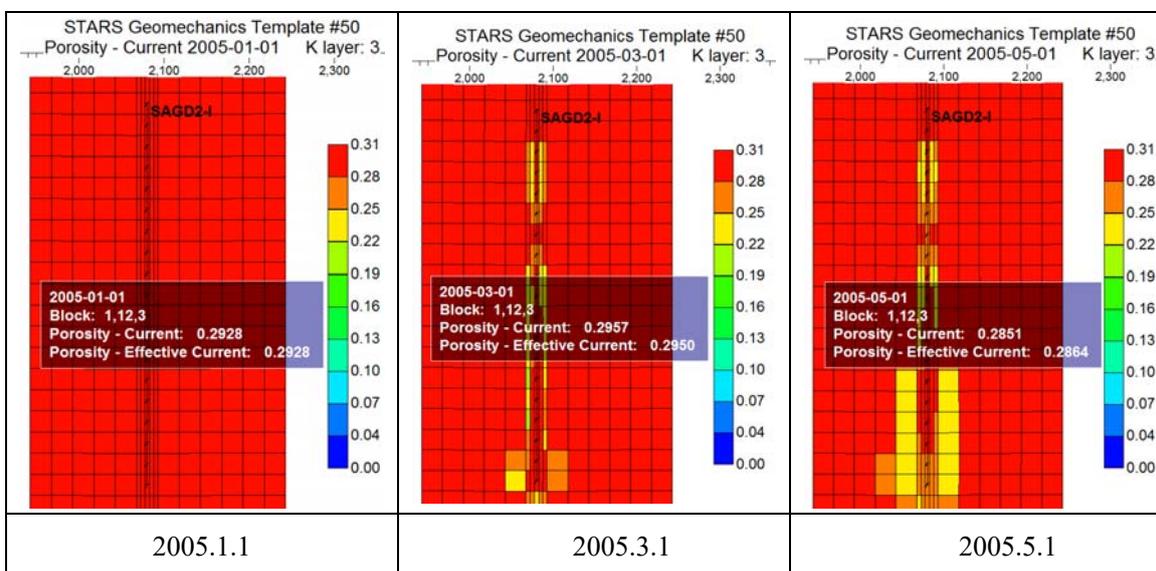


图 3 控制输出后孔隙度随时间发生变化

1.2 地质力学孔隙度

在使用地质力学模块（*GEOMECH）进行地应力模拟计算时，模拟器还会产生两个跟地质力学有关的孔隙度。这两个孔隙度是对总孔隙度和流体孔隙度分别进行流固耦合计算后得到的经过校正的地质力学总孔隙度和地质力学流体孔隙度。简单来说，就是因为地质力学计算造成了网格体积发生变化，因此需要对原来计算的孔隙度进行校正。

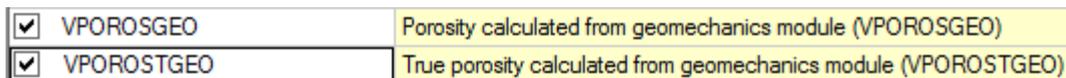


图 4 控制输出地质力学相关的孔隙度

这两个孔隙度是通过 VPOROSGEO 和 VPOROSTGEO 控制输出的，见图 4。

在 Result 3D 中地质力学总孔隙度的属性名称为 Porosity – Geo-Corrected, 地质力学流体孔隙度的属性名称为 True Porosity - Geomechanics。

1.3 裂缝孔隙度

在双重介质模型中, 如果定义了 POR FRACTURE 的值, 模拟计算后却发现 Result 3D 中显示的裂缝孔隙度与在 Builder 中设置的不一样, 甚至差别很大。比如软件自带算例 stfrr002.dat 中, 模型里定义 *POR *FRACTURE 0.1, 但是 Result 3D 中显示的 Porosity - Current – Fracture (裂缝总孔隙度) 或者 Porosity - Effective Current - Fracture (裂缝有效孔隙度) 却是 0.865, 这是为什么呢? 下面以一个示意图 (见图 5) 来解释 STARS 中的裂缝孔隙度是如何定义和计算的。

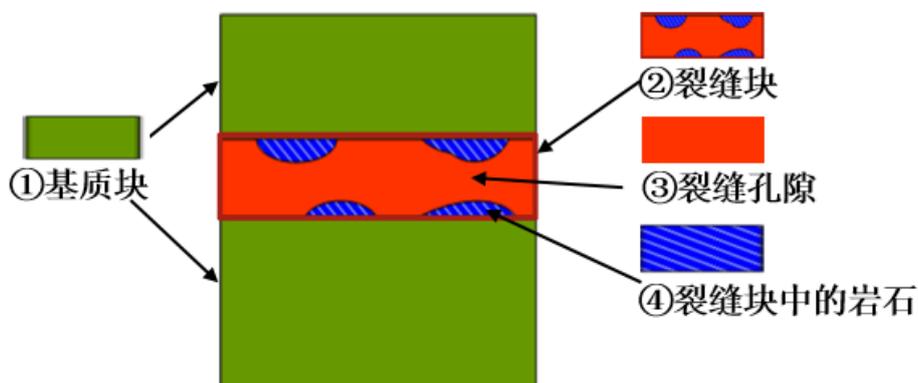


图 5 基质-裂缝系统组成示意图

图 5 是一个双孔隙度网格的示意图, 网格中有①基质块 (绿色) 和②裂缝块 (红色), 即网格的总体积 $V_b = ① + ②$ 。在②裂缝块中, 有可能有一部分④岩石 (蓝色部分)。对于这个基质-裂缝系统, 可以用多个关键字来设置。

- 1) 使用 *FRFRAC 关键字来定义裂缝块体积与基质块+裂缝块总体积之比, 即 $② / (① + ②)$ 。
- 2) 使用 *FORMINFRAC 关键字来定义裂缝块中的岩石体积与裂缝块体积之比, 即 $④ / ②$ 。

注意, Result 3D 中显示的裂缝孔隙度是固有值, 也就是 $(③ + POR * ④) / ②$ 。在自带算例 stfrr001 中, 输入了 *FRFRAC 0.01, 但是没有输入 *FORMINFRAC, 采用缺省值, 表示裂缝块是空的, 也就是 $④ = 0$, $③ = ②$, 因此 $(③ + POR * ④) / ② = 1.0$, 即固有孔隙度就是 1.0。

在自带算例 stfrr002 中, 输入了 *FRFRAC 0.01, 同时也输入了



*FORMINFRAC 0.15 和 *POR *FRACTURE 0.1。注意，这里的 0.1 定义的是④裂缝块中岩石部分的孔隙度。所以裂缝块的固有孔隙度可以这样来计算：

首先，FORMINFRAC=0.15=④/②，所以④=0.15*②。同时③=②-④=②-0.15*②=②*(1-0.15)=0.85*②。因此，

$$\begin{aligned} \text{裂缝块的固有孔隙度} &= (\text{③} + \text{POR} * \text{④}) / \text{②} \\ &= (0.85 * \text{②} + 0.1 * 0.15 * \text{②}) / \text{②} \\ &= 0.85 + 0.015 = 0.865 \end{aligned}$$

1.4 小结

以上介绍了 STARS 中各种孔隙度的含义及区别，为了方便用户更清楚的将各个参数进行关联和对应，下面通过一个表格来总结一下。

表 2 STARS 各种孔隙度的输入输出名称对应表

| 参数 | 物理含义 | *.dat 中数据输入的关键字 | 控制输出的关键字 | 后处理参数名称 |
|-------------------|---|-------------------|---------------------------------|---|
| 总孔隙度 ϕ_v | $\phi_v = V_v / V_b$ | *POR | OUTSRF GRID VPOROS | Porosity - Current |
| 流体孔隙度 ϕ_f | $\phi_f = V_f / V_b$ $= (V_v - V_s) / V_b$ | 不输入 | OUTSRF GRID FPOROS | Porosity - Effective Current |
| 地质力学总孔隙度 | | 不输入 | OUTSRF GRID VPOROSGEO | Porosity - Geo-Corrected |
| 地质力学流体孔隙度 | | 不输入 | OUTSRF GRID VPOROSTGEO | True Porosity - Geomechanics |
| 裂缝孔隙度 (输入) | 裂缝块中岩石部分的孔隙度 | *POR *FRACTURE | OUTSRF GRID VPOROS FPOROS | Porosity - Current - Fracture |
| 裂缝孔隙度 (输出) | 裂缝块的固有孔隙度 | 不输入 | | 或者 Porosity - Effective Current - Fracture |

2 输入的孔隙度*POR 在模拟器中如何解释？

除了上面介绍的裂缝孔隙度之外，在单重介质模型中，也会出现初始化后在 Result 3D 中显示的初始孔隙度与用*POR 关键字输入的孔隙度值不同的问题，这又是为什么呢？让我们先来认识一个关键字*PORINTERP。

2.1 关键字*PORINTERP 的介绍

关键字*PORINTERP 在*.dat 文件中位于*END-GRID 之后，在 Builder 中位于其他油藏属性界面中（见图 6），用于设置输入的孔隙度解释方法。也就是说，通过关键字*POR 定义的网格孔隙度，在 STARS 中可以通过该关键字进行解读。解读的结果分为下面两种情况：

1) 使用*PORINTERP 的缺省选项*REF 时：通过*POR 定义的网格孔隙度值被 STARS 解释为在参考压力*PRPOR 和温度*TEMR（若考虑热）下的参考孔隙度 ϕ_{vr} 。使用该选项时，报告输出的初始条件下的孔隙度与*POR 定义的孔隙度值可能不一样。

2) 使用*PORINTERP 的*INIT 选项时，通过*POR 定义的网格孔隙度值被 STARS 解释为在由*PRES 或*VERTICAL 设置的初始压力 p_i 和由*TEMP（若是热采）设置的初始温度 T_i 条件下的初始孔隙度 $\phi_v(p_i, T_i)$ 。使用该选项时，报告输出的初始条件下的孔隙度就是*POR 定义的孔隙度值。

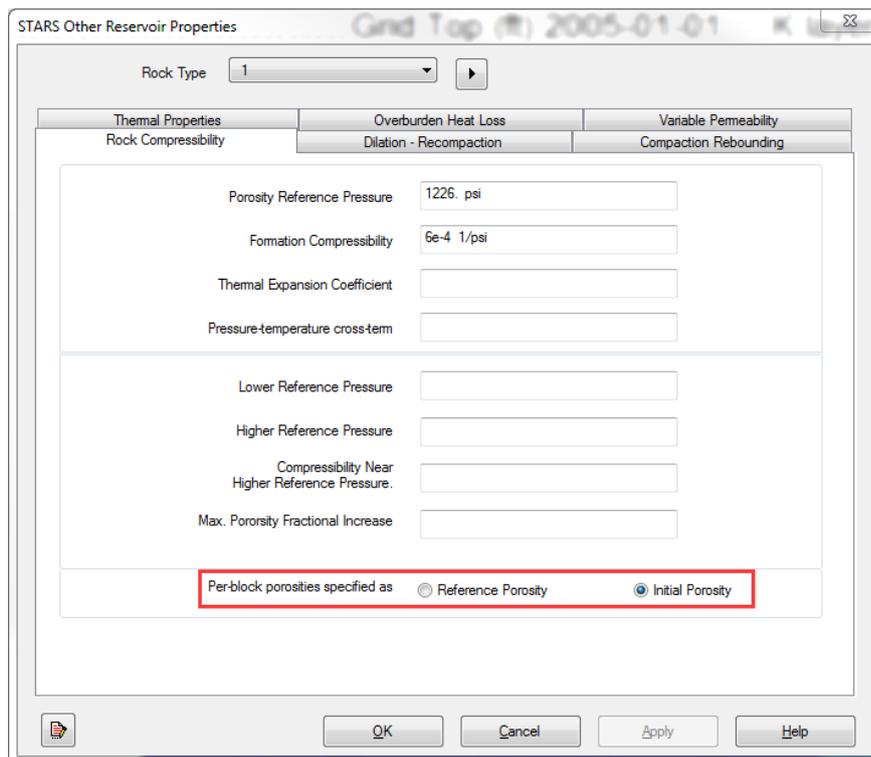


图 6 关键字*PORINTERP 在 Builder 界面中的位置

看到这里，可能有人问：“为什么输入的孔隙度会有这两种解释方法呢？我们实际应用时到底应该选哪个？”要回答这个问题，我们需要从孔隙度的数据来源着手。孔隙度数据一般来自测井解释和室内岩心实验。测井解释的孔隙度一般是在油藏实际压力和温度下得到的，能反映出油藏实际的孔隙度值，因此需要选择*INIT 选项。室内岩心实验测得的孔隙度一般是在实验压力和温度条件下得到的，跟油藏实际压力和温度往往相差比较大，这时就应该选择*REF 选项，并给出实验条件的参考压力*PRPOR 和参考温度*TEMR。

但是需要注意的是，这里的参考压力和参考温度不仅仅是测量孔隙度时的参考条件。参考压力*PRPOR 还是岩石压缩系数的参考条件，参考温度*TEMR 还是液体密度、气液热焓、地层热容、反应热焓、井筒热损失计算等的参考条件，因此使用这两个参考条件时要注意兼顾其他参数的取值是否与这两个参考条件对应。

2.2 算例展示

以软件自带算例 stsmo039.dat 为例，通过*POR 定义的第一层的网格孔隙度为 0.26。

```

POR KVAR
    0.26 0.27 2*0.29 2*0.3 2*0.31 2*0.3 2*0.29 0.27 0.26
...
PRPOR 1226.

```

初始化后，第一个时间步第一层的孔隙度场是均质的，并且数值与输入的 0.26 完全相同，见图 7。究其原因，就是该模型使用了 *PORINTERP *INIT 关键字（第 8353 行）。

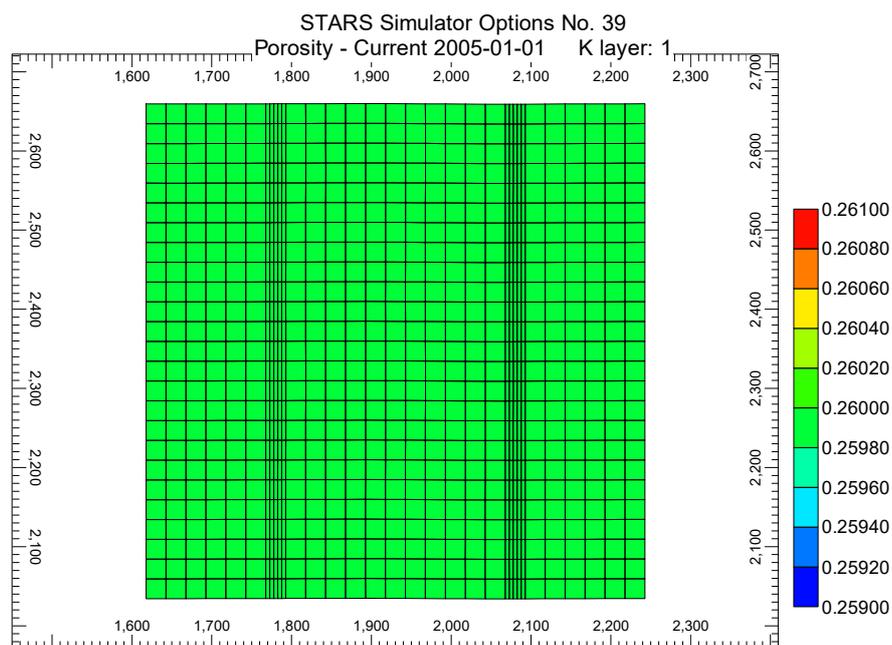


图 7 算例 stsmo039.dat 初始化后第一层的孔隙度场

再看软件自带算例 stsmo038.dat。该算例与 stsmo039.dat 的主要区别就是 *PORINTERP *INIT 改成了 *PORINTERP *REF，但是造成初始化后孔隙度的不同。使用 *PORINTERP *REF 初始化后第一层的孔隙度场是非均质的，见图 8。孔隙度 0.26 只是其参考压力 1226psi 下对应的值，其他压力下的孔隙度就不是 0.26 了。至于其他压力的孔隙度是怎么计算出来的，我们下面再做详细介绍。

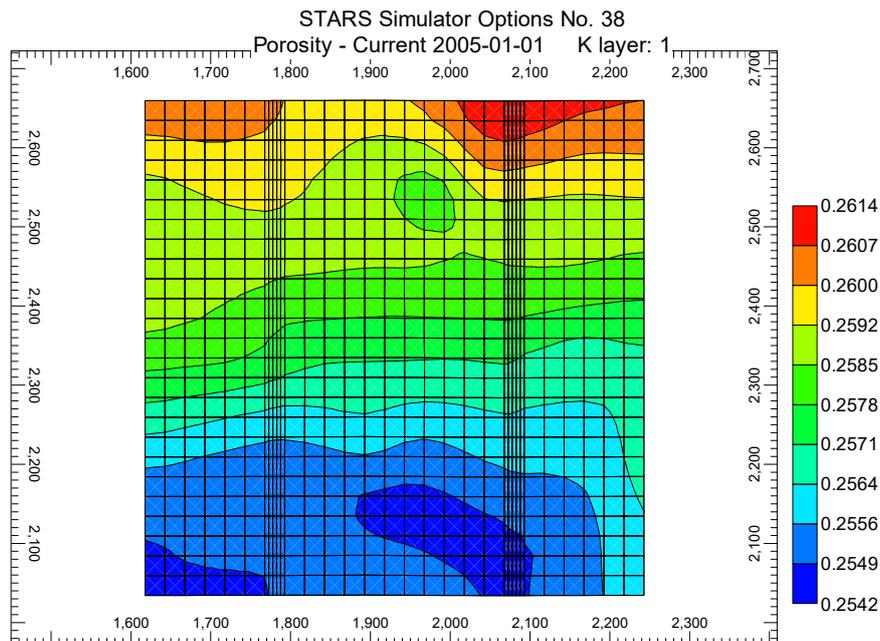


图 8 算例 stsmo038.dat 初始化后第一层的孔隙度场

3 孔隙度如何随时间发生变化？

通过上面的介绍，我们弄清了 STARS 中孔隙度的一些基本概念，下面再来看看孔隙度随时间发生变化的具体计算方法。

3.1 影响孔隙度变化的因素

一般影响孔隙度变化的因素有以下几种：

- 1) 压力或压缩系数。这是最常见的因素，在常规的黑油模型中，孔隙度一般只受压力影响，也就是压缩系数控制孔隙度的变化。
- 2) 温度或热膨胀系数。在热采模拟中，加入了热的计算，孔隙度可以同时受压力和温度影响，也就是压缩系数和热膨胀系数同时控制孔隙度的变化。
- 3) 压力相关的膨胀或压实过程的影响。在 STARS 软件中，可以考虑不同压实或反弹过程的影响，也就是说压缩系数不是固定不变的，而是在不同的压力区间取不同的值。
- 4) 地应力的影响。在流固耦合模拟过程中，地应力的变化引起网格体积的变化，从而造成孔隙体积也因应力而变化。

3.2 模拟孔隙度变化的关键字介绍

STARS 中有一系列关键字用于设置影响孔隙度变化的因素，这些关键字包括*PRPOR, *CPOR, *CTPOR,*CPTPOR, *CPORPD, *PORMAX, *PORINTERP, *PORFORM, *VOLCONST 等。下面就来详细介绍这些关键字的含义及使用方法。这部分内容主要是从手册中拷贝过来的，内容有点枯燥，需要点耐心。

3.2.1 目的：

- *PRPOR 表示输入岩石压缩系数对应的参考压力。
- *CPOR 表示输入岩石压缩系数。
- *CTPOR 表示输入岩石热膨胀系数。
- *CPORPD 表示输入岩石压缩系数对压力的变化率。
- *PORINTERP 设置输入的孔隙度解释方法。
- *PORFORM 设置压力 p 和温度 T 相关的孔隙度。
- *VOLCONST 设置体积约束类型。

3.2.2 格式：

| | |
|------------|--------------------------|
| *PRPOR | <i>prpor</i> |
| *CPOR | <i>cpor</i> |
| *CTPOR | <i>ctpor</i> |
| *CPTPOR | <i>cptpor</i> |
| *CPORPD | <i>cpor_p2 ppr1 ppr2</i> |
| *PORMAX | <i>pormax</i> |
| *PORINTERP | (*REF *INIT) |
| *PORFORM | (*EXP *LINEAR) |
| *VOLCONST | (*ROCK *BULK) |

3.2.3 定义：

prpor

参考压力 (kPa | psi | kPa)。建议范围从 100 kPa (14.504 psi) 到 1.0e6 kPa (1.45e5 psi)，*prpor* 必须是非负的。

cpor

有效地层压缩系数, 也就是地层孔隙空间的压缩系数 (1/kPa | 1/psi | 1/kPa)。下限是 0, 建议上限为 0.01 1/kPa (0.069 1/psi)。

ctpor

地层的有效热膨胀系数 (1/C | 1/F | 1/C)。下限是 0, 建议上限是 0.011/C (0.0056 1/F)。

cptpor

地层有效孔隙度的压力-温度交叉项系数 (1/kPa-C | 1/psi-F | 1/kPa-C)。

cpor_p2

ppr2 附近的有效地层压缩系数 (1/kPa | 1/psi | 1/kPa)。下限是 0, 建议上限是 0.01 1/kPa (0.069 1/psi)。

ppr1, ppr2

用于压缩系数对压力变化率的参考压力下限值 (ppr1) 和上限值 (ppr2) (kPa | psi | kPa)。在 ppr1 处压缩系数接近 cpor。在 ppr2 处压缩系数接近 cpor_p2。ppr1 必须非负, 并且 ppr2 必须大于 ppr1。建议下限值 ppr1 为 100kPa (14.504 psi), 建议上限值 ppr2 为 1.0e6 kPa (1.45e5 psi)。

pormax

由压力引起的孔隙度最大增加分数。可以简单地使用大的压缩系数模拟砂体的膨胀, 例如大于 0.0001 1/psi。但为避免孔隙度大到不真实的程度, 应强制给定最大孔隙度增加分数 pormax, pormax 的允许范围是 0 到 1, 典型值为 0.1~0.2。缺省值为 0.10。该选项已经被删除, 用 *DILATION 代替。关于 *DILATION 的详细用法, 可以参考第 42 期讲义。

***PORINTERP** (*REF | *INIT)

通过关键字 *POR 定义的网格孔隙度可以解释为下面两种情况:

*REF: 参考孔隙度, 在参考压力 *PRPOR 和温度 *TEMR (若考虑热) 下, 或者

*INIT: 在由 *PRES 或 *VERTICAL 设置的初始压力和由 *TEMP (若是热采) 设置的初始温度条件下的初始孔隙度。查看前面关于初始孔隙度的解释。

***PORFORM** (*EXP | *LINEAR)

设置压力 p 和温度 T 相关的孔隙度。设孔隙度是压力 p 和温度 T 的函数, c

(p, T) 为孔隙度的变化率。比如, 对线弹性模型,

$$c(p, T) = \min[p_{\text{ormax}}, c_{\text{por}} \cdot (p - p_{\text{rpor}})] - c_{\text{tpor}} \cdot (T - T_{\text{emr}}).$$

孔隙度方程为:

$$\text{*EXP: } \varphi_v(p, T) = \varphi_{vr} \cdot \exp\{c(p, T)\}$$

$$\text{*LINEAR: } \varphi_v(p, T) = \varphi_{vr} \cdot \{1 + c(p, T)\}$$

推荐使用*EXP 选项, 因为不会算出负的孔隙度, 并且更加准确。历史上使用的*LINEAR 选项只有在 $c(p, T)$ 很小时才接近*EXP 选项。

VOLCONST** (ROCK** | ***BULK**)

设置网格体积约束类型。每个网格的总体积 V_b 是岩石 (颗粒) 体积 V_r 与孔隙体积 V_p 的和。由于 V_p 变化 (压力, 温度, 膨胀), V_b 和 V_r 只有一个可以保持不变。

***ROCK:** 岩石体积 V_r 不变, 总体积变化, 遵循公式 $V_b = V_p + V_r$ 。在给定的温度下, 确保了网格的岩石质量和岩石热容不变。

***BULK:** 总体积 V_b 不变, 岩石体积变化, 遵循公式 $V_r = V_b - V_p$ 。改变了岩石质量和岩石热容。这样, 外力的一点变化 (比如膨胀) 就可能会导致温度发生变化。

3.2.4 缺省:

如果所有岩石类型都没有定义*PRPOR, 则每个岩石类型的参考压力 $prpor$ 等于该岩石类型的第一个 (自然排序) 有效网格的初始压力。如果至少有一个岩石类型定义了*PRPOR, 则第一个 $prpor$ 指定给所有岩石类型, 随后出现 $prpor$ 指定给对应的岩石类型 (覆盖第一个 $prpor$)。比如, 如果一个模型通过*ROCKTYPE 定义了多个岩石类型, 但是*PRPOR 只出现一次, 则所有岩石类型都使用*PRPOR 设置的 $prpor$ 值。

如果没有出现*CPOR, 则地层压缩系数为 0。

如果没有出现*CTPOR, 则地层热膨胀系数是 0。

如果没有出现*CPTPOR, 则 $c_{\text{tpor}} = 0$ 。

如果没有出现*PORMAX, 则对应的选项不可用。

如果没有出现*CPORPD, 则对应的选项不可用。

如果没有出现*PORINTERP, 则使用*REF 选项。

如果没有出现*PORFORM, 则使用*LINEAR。

如果没有出现*VOLCONST, 则使用*ROCK。

3.2.5 条件:

这些关键字必须位于其他油藏性质 (Other Reservoir Properties) 数据段。

关键字*CPTPOR 和*CPORPD 不能同时使用。

3.2.6 说明:

流体孔隙度 ϕ_f 包含流体相, 但不包含固相, 计算公式为

$$\phi_f(p, T, C_i) = \phi_v(p, T) * (1 - \sum C_i / \rho_{si})$$

ϕ_v - 压力 p 和温度 T 下的总孔隙度,

p - 流体压力,

T - 温度,

C_i - 孔隙空间中的组分固相浓度,

ρ_{si} - 通过*SOLID_DEN 定义的组分固相密度。

有多种方法通过压力和温度计算总孔隙度 ϕ_v 。该孔隙度*PORFORM *EXP 和*PORFORM *LINEAR 都适用。

1) 线弹性:

使用*CPOR 计算压力的影响:

$$\phi_v(p, T) = \phi_{vr} \cdot \exp\{\min[p_{ormax}, cpor \cdot (p - prpor)] - ctpor \cdot (T - Temr)\}$$

ϕ_{vr} - 在参考条件 $prpor$ 和 $Temr$ (查看*POR) 下的总孔隙度

P - 流体压力,

T - 温度,

$Temr$ - 通过*TEMR 定义的参考温度。

2) 非线性弹性:

使用*CPOR 和*CPORPD 计算压力的影响:

$$\phi_v(p, T) = \phi_{vr} \cdot \exp\{\min[p_{ormax}, cpor \cdot (p - prpor) + cporpd] - ctpor \cdot (T - Temr)\}$$

ϕ_{vr} - 在参考条件 $prpor$ 和 $Temr$ (查看*POR) 下的总孔隙度

p - 流体压力,

T - 温度,

$Temr$ - 通过*TEMR 定义的参考温度。

$$\begin{aligned}
 \text{cporpd} &= -A * [D * (p - prpor) + \ln (B / C)] \\
 A &= (cpor_p2 - cpor) / D \\
 B &= 1 + \exp [D * (pav - p)] \\
 C &= 1 + \exp [D * (pav - prpor)] \\
 D &= 10 / (ppr2 - ppr1) \\
 pav &= (ppr1 + ppr2) / 2
 \end{aligned}$$

举例：*CPOR 0 *PRPOR 5000 *CPORPD 1.0e-5 5000 9000

该数据给出了 cporpd，孔隙度 ϕ_v 和有效压缩系数 $d\phi_v/dp$ ，如下所示。压缩系数取值从接近 0 到接近 cpor_p2。

| p | cporpd | ϕ_v/ϕ_{vr} | $d\phi_v/dp$ | 注意 |
|-------|-----------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|
| 1000 | $-2.68 \cdot 10^{-5}$ | 0.99997 | $3.06 \cdot 10^{-12}$ | 低压力 |
| 5000 | 0 | 1.00000 | $6.68 \cdot 10^{-8}$ | $p = prorp = ppr1$ |
| 7000 | $2.75 \cdot 10^{-3}$ | 1.00275 | $5.01 \cdot 10^{-6}$ | $p = Pav$ |
| 9000 | $2.00 \cdot 10^{-2}$ | 1.02020 | $1.01 \cdot 10^{-5}$ | $p = ppr2$ |
| 15000 | $8.00 \cdot 10^{-2}$ | 1.08326 | $1.08 \cdot 10^{-5}$ | 高压力 |

3) P-T 交叉项:

使用*CPOR, *CTPOR 和*CPTPOR。

$$\phi_v(p,T) = \phi_{vr} \cdot \exp \{ \min [pormax, cpor \cdot (p - prpor) + cptpor \cdot (p - prpor) \cdot (T - Temr)] - ctpor \cdot (T - Temr) \}$$

4) 膨胀-再压实:

使用关键字组*DILATION, 详细参考第 42 期讲义。

5) 使用恒定的孔隙压缩系数和热膨胀系数的压实-反弹模型:

使用关键字组*EPCOMPACT, 详细参考第 42 期讲义。

6) 使用压力相关的孔隙压缩系数和热膨胀系数的压实-反弹模型:

使用关键字组*COMPACT_VAR, 详细参考第 42 期讲义。

7) 本构地质力学:

使用关键字组*GEOMECH 进行高级的地质力学计算, 详细参考第 51 期讲义。

【完】