

DFN离散型裂缝网络研发及应用

2019用户大会

孙明月 西安



引言



世界上**裂缝性油气藏储量**约占已探明总储量的一半；

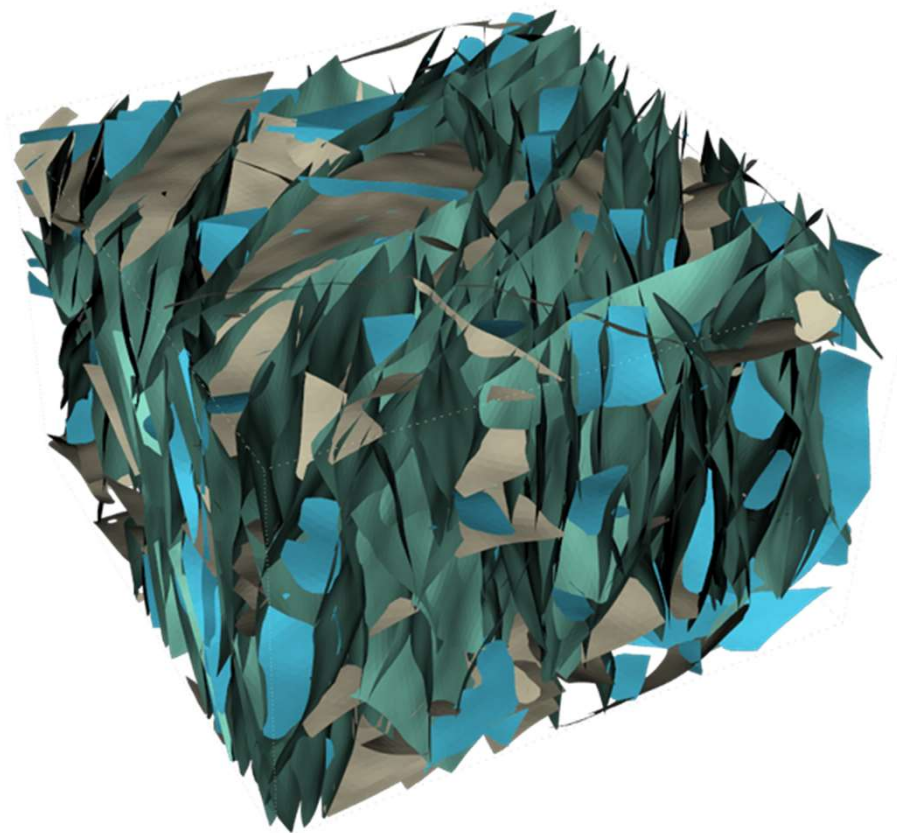
在我国，已探明的裂缝性油藏地质储量超过**40亿吨**，占探明总储量的**28%**以上。

致密油气和页岩气等非常规油气资源，需压裂后方可商业开采，压裂后也为**裂缝性油气藏**。

而裂缝对流动形态有重要的影响，因此裂缝的准确描述直接影响数值模拟的精确性。

大纲

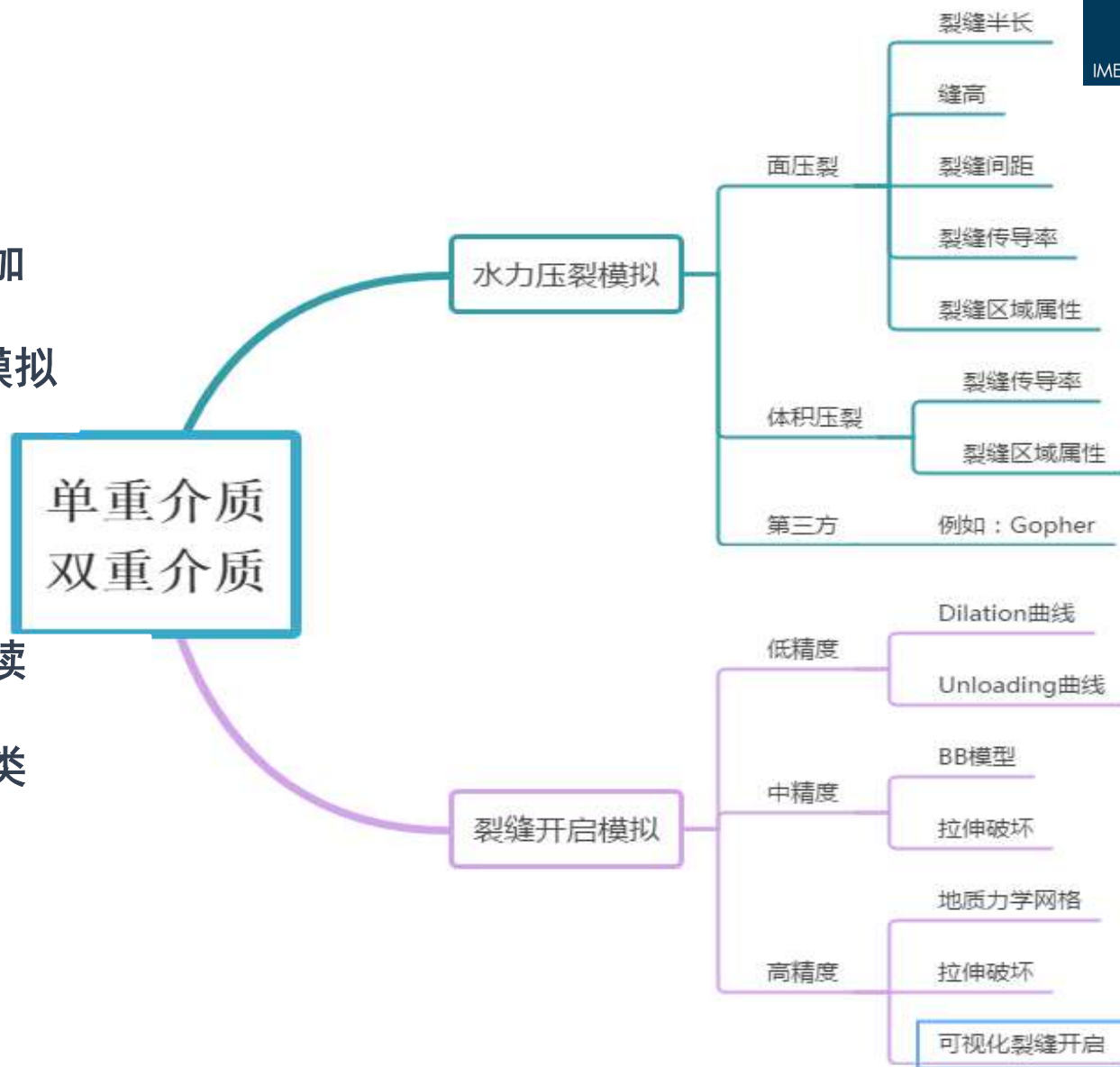
- 传统裂缝模拟方法
- 传统裂缝模拟遇到的挑战
- 离散裂缝模拟发展历程
- 离散裂缝模拟表征方法
- 离散裂缝建模方式
- 离散裂缝模拟案例
- 总结



传统裂缝模拟方法

单重介质：采用局部网格对数加密（LS-LR-DK）方法。近似模拟人工裂缝。

双重介质：模拟分布均匀且连续的裂缝，分类有双孔、双渗等类型。



传统裂缝模拟遇到的挑战

1.独特的、大尺度裂缝：当裂缝系统发育较差时，连续裂缝的双重介质模型与实际不符，尤其存在数条控制着流体流动方向和规模的大裂缝时，该模型更显得无能为力。

- 如：示踪剂测试，有些非常邻近的井没有受到影响，而一些远距离的生产井反倒见了示踪剂。

2.复杂的、非连续的裂缝：非常规储层天然裂缝发育，产状复杂，非均质性和各向异性难以用等效连续模型表征。

离散裂缝模拟发展历程

最早提出离散裂缝。
但只考虑裂缝分布，
没有考虑流体流动
规律

上世纪90年代初

1999

Lee在离散裂缝模型基础上建立数值模型，精度高，但缺少基质-到裂缝窜流的考虑。

Bernard建立了包含多学科的离散裂缝模型，更加符合实际裂缝油藏，但运算时间过长。

2002

2009

随着离散裂缝技术进一步发展，分为了非结构化离散裂缝和嵌入式离散裂缝模型。

CMG软件在IMEX模块中加入了离散型裂缝模型，模拟技术优于其他商业化软件。

2019

离散裂缝模拟表征方法

DFN (Network)

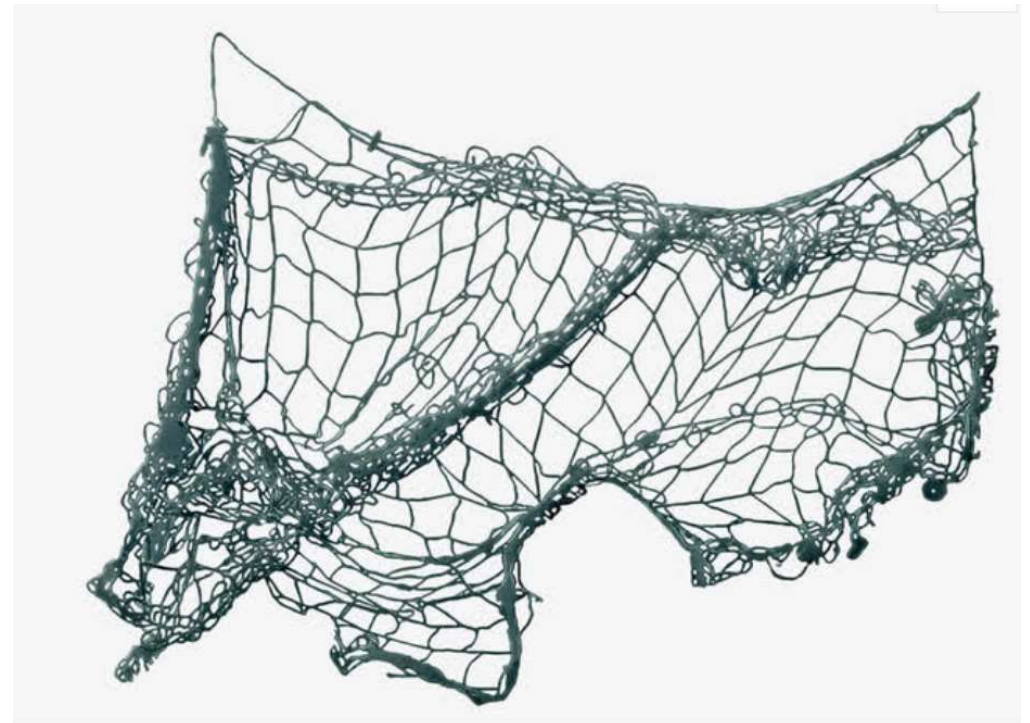
- 离散裂缝网络
- 在天然裂缝或人工裂缝中的流体通道
- 一个或者多个 DFU组成一个 DFN

DFU (Unit)

- 离散裂缝单元
- DFN进一步离散化
- 每个DFU 都可以设置独立渗透率和开度
- 有四个坐标点 (x, y, z)组成的四边形
- 厚度(开度)和渗透率决定了流动能力

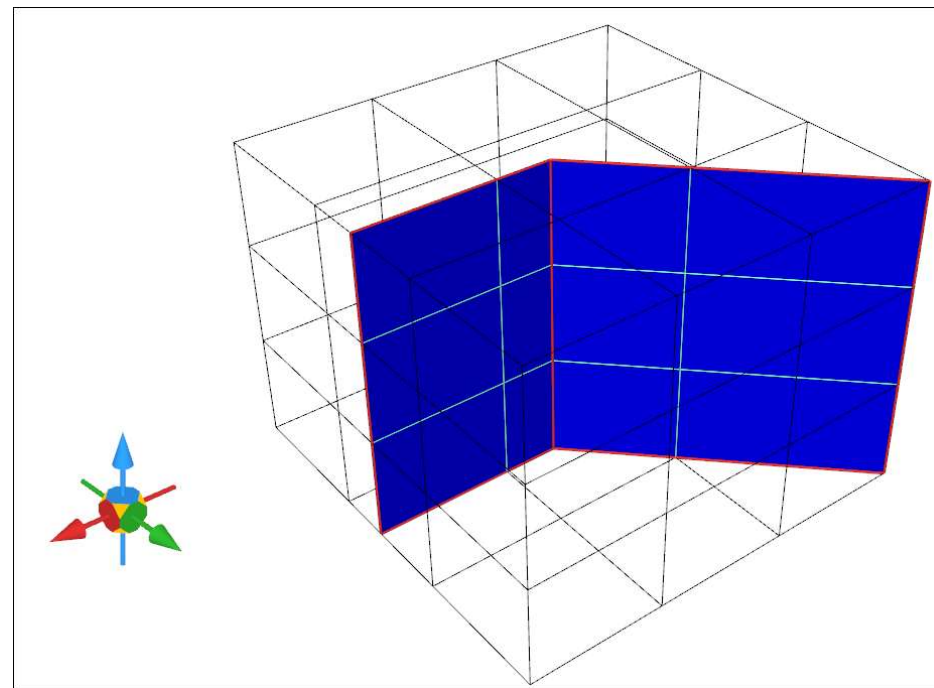
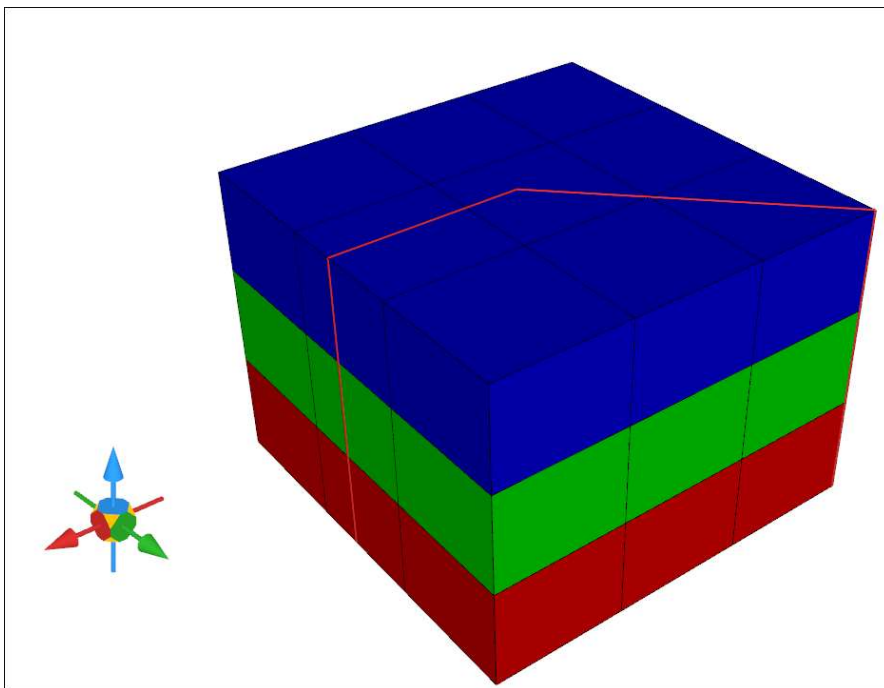
DFS (Segment)

- 离散裂缝段
- DFU进一步离散化
- 每个DFU细分为多个裂缝段
- 裂缝段的尺寸取决于DFU占据网格的大小



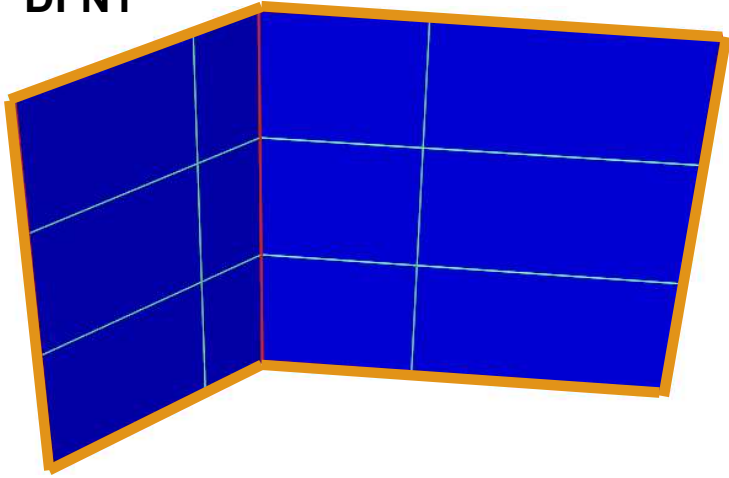
离散裂缝模拟表征方法

DFN vs DFU vs DFS



离散裂缝模拟表征方法

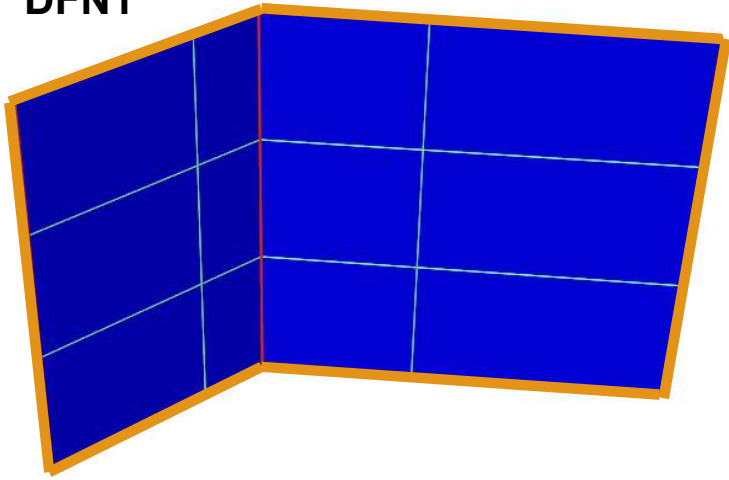
DFN1



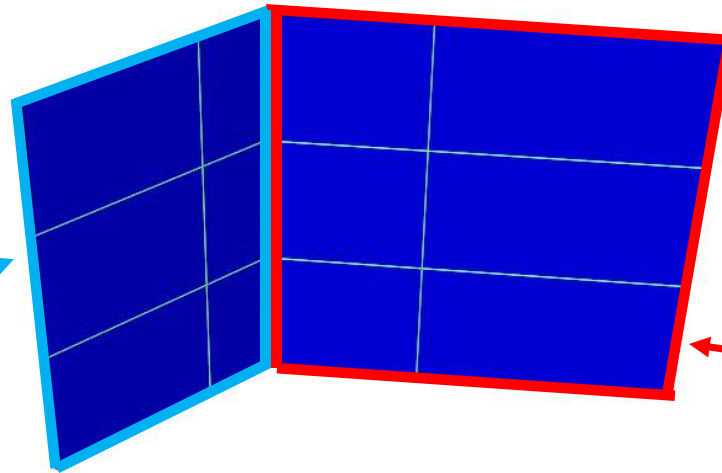
DFU2

离散裂缝模拟表征方法

DFN1



DFU1

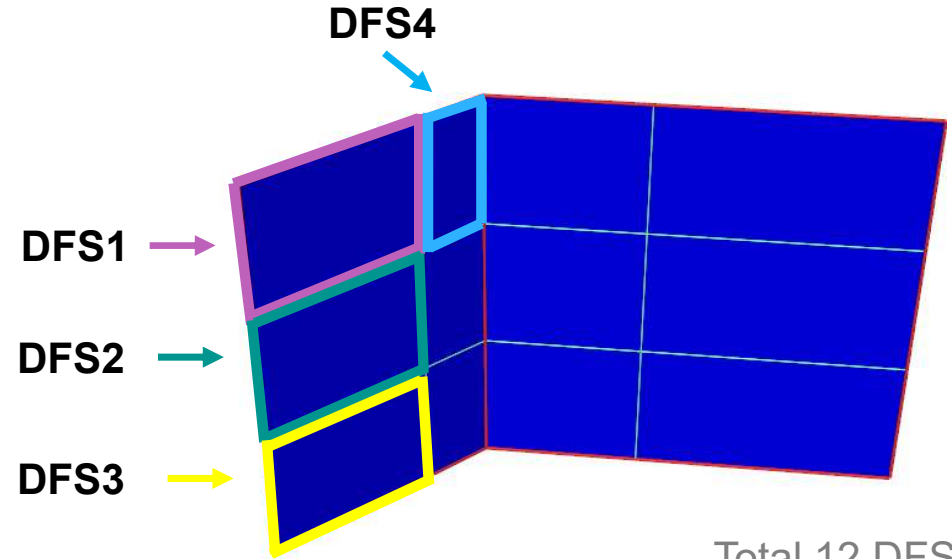
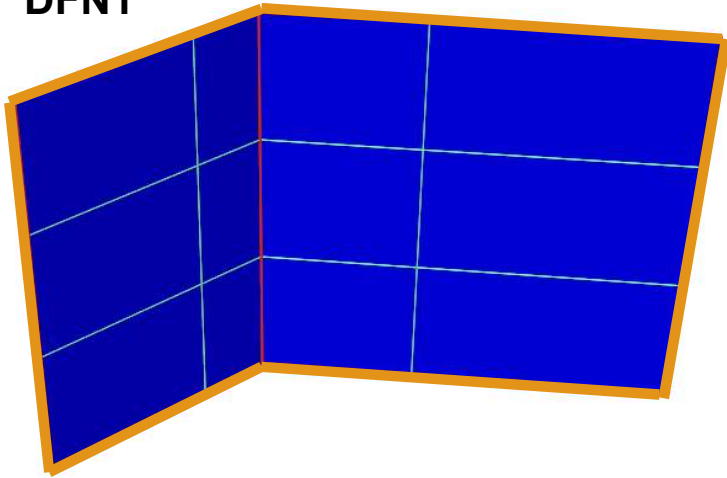


DFU2



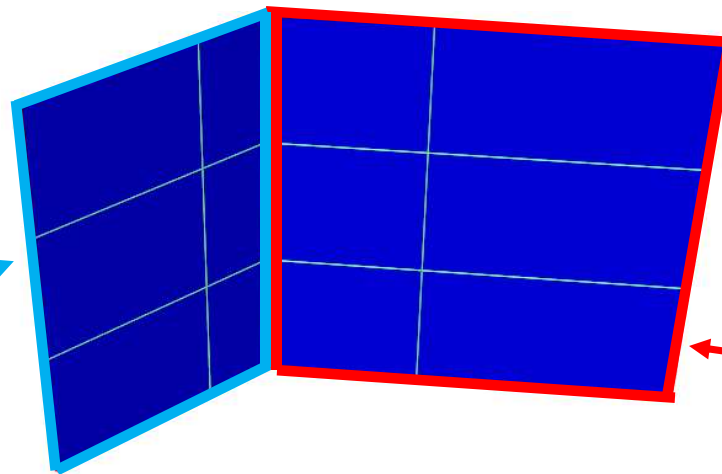
离散裂缝模拟表征方法

DFN1



- Total 12 DFS's
- 6 DFS's/DFU

DFU1



DFU2



离散裂缝建模方式

1. 通过CMG建模

– CMG 格式

- 在CMG数据文件中输入
- 多个 DFN对应多个 DFU

2. 通过第三方软件建模（Petrel、GoCad、RMS）

– CMG软件可以识别的格式：TS 格式 (.ts)、FAB 格式 (.fab)

- 每个DFN一个文件
- 每个DFN 可以有多个 DFU

离散裂缝建模方式--CMG 格式

```
*BEGIN_DFN 'dfn_name' *CMG ndfu
  *PERMEABILITY (*CON | *ALL array)
  *APERTURE (*CON | *ALL array)
  *VERTEX array
*END_DFN
```

其中:

BEGIN_DFN	=	引入 DFN
<i>dfn_name</i>	=	命名 DFN
CMG	=	指定 CMG 格式 (*PERMEABILITY, *APERTURE, 和 *VERTEX 需求)
<i>ndfu</i>	=	离散裂缝单元数 (DFU's) (在当前的 DFN 中)
PERMEABILITY	=	所有离散裂缝单元的渗透率数组 (在当前的 DFN (mD) 中)
APERTURE	=	所有离散裂缝单元的开度数组 (在当前 DFN (m ft) 中)
VERTEX	=	定义四边形定点坐标数组
END_DFN	=	DFN 数据结束用语

离散裂缝建模方式--CMG 格式

```

*BEGIN_DFN 'dfn1' CMG 3
  *PERMEABILITY ALL 10000 10000 5000
  *APERTURE ALL 0.1 0.2 0.03
  *VERTEX

** first fracture
    5.0000000000000000      2.5000000000000000      3200.000000000000
    2695.000000000000      62.5000000000000000      3197.578625000000
    2795.000000000000      4412.500000000000      3175.000000000000
    55.0000000000000000      4312.500000000000      3175.000000000000

** 2nd fracture
    2695.000000000000      62.5000000000000000      3197.578625000000
    2695.000000000000      4312.500000000000      3175.000000000000
    55.0000000000000000      4312.500000000000      3175.000000000000
    55.0000000000000000      62.5000000000000000      3200.000000000000

** 3rd fracture
    2585.000000000000      62.5000000000000000      3172.578625000000
    2585.000000000000      4312.500000000000      3150.000000000000
    2475.000000000000      4312.500000000000      3168.815850000000
    2475.000000000000      62.5000000000000000      3150.000000000000
*END_DFN

```

离散裂缝建模方式--TS 格式

```
*BEGIN_DFN 'dfn_name' *TS ndfu  
    INCLUDE 'file_name.ts'  
*END_DFN
```

其中:

BEGIN_DFN	=	引入 DFN
<i>dfn_name</i>	=	命名 DFN
TS	=	指定使用 TS 格式
<i>ndfu</i>	=	离散裂缝单元数 (DFU's) (在当前的 DFN中)
INCLUDE	=	将读取INCLUDE文件
<i>file_name.ts</i>	=	.ts文件名 (*PERMEABILITY, *APERTURE, 和 *VERTEX 从 .ts 文件中读取)
END_DFN	=	DFN 数据结束用语

离散裂缝建模方式--TS 格式

```

GOCAD TSurf 1
HEADER {
name:SetDefinition_1
*solid*color:0 0.4 0.8 1
}
GOCAD_ORIGINAL_COORDINATE_SYSTEM
NAME Default
AXIS_NAME "X" "Y" "Z"
AXIS_UNITS "m" "m" "m"
ZPOSITIVE Elevation
END_ORIGINAL_COORDINATE_SYSTEM
GEOLOGICAL_TYPE fault
PROPERTIES Aperture Permeability Compressibility Transmissivity Storativity FractureX
ESIZES 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
TFACE
PVRTX 1 71.84844762 79.19253441 10.38157463 4.7132e-005 23.5483 0.001 1.07455e-011 4.6
PVRTX 2 75.97798425 83.09832522 -4.927229877 4.7132e-005 23.5483 0.001 1.07455e-011 4.
PVRTX 3 77.19883615 98.79522416 -0.5930995899 4.7132e-005 23.5483 0.001 1.07455e-011 4
PVRTX 4 73.06929952 94.88943287 14.71570492 4.7132e-005 23.5483 0.001 1.07455e-011 4.6
PVRTX 5 -58.20092982 -4.574906383 -50.64384269 3.19813e-005 19.8758 0.001 6.15421e-012
PVRTX 6 -52.40613765 34.86730477 4.003099923 3.19813e-005 19.8758 0.001 6.15421e-012 3
PVRTX 7 -31.83687037 -18.39928535 40.26784516 3.19813e-005 19.8758 0.001 6.15421e-012
PVRTX 8 -27.63166255 57.84140269 14.37800609 3.19813e-005 19.8758 0.001 6.15421e-012

```

坐标位置

开度、渗透率

开度、渗透率数据

离散裂缝建模方式--FAB 格式

```
*BEGIN_DFN 'dfn_name' *FAB ndfu  
    INCLUDE 'file_name.fab'  
*END_DFN
```

其中:

BEGIN_DFN	=	引入 DFN
dfn_name	=	命名 DFN
FAB	=	指定使用 FAB 格式
ndfu	=	离散裂缝单元数 (DFU's) (在当前的 DFN中)
INCLUDE	=	将读取INCLUDE文件
file_name.ts	=	.fab文件名 (*PERMEABILITY, *APERTURE, 和 *VERTEX 从 .ts 文件中读取)
END_DFN	=	DFN 数据结束用语

离散裂缝建模方式--FAB 格式

Header

```

BEGIN FORMAT
  Format = Ascii
  XAxis = East
  Length Unit = Meter
  Scale = 178.3912468
  No_Fractures = 10
  No_TessFractures = 0
  No_Properties = 3
END FORMAT

BEGIN PROPERTIES
  Prop1 = (Real*4) "Permeability"
  Prop2 = (Real*4) "Compressibility"
  Prop3 = (Real*4) "Aperture"
END PROPERTIES

BEGIN SETS
  Set1 = "SetDefinition_1"
END SETS

```

单位制

0 渗透率、开度

DFU Definitions

渗透率、开度
数据

```

BEGIN FRACTURE
1  4  1  23.5483  0.001  4.7132e-005
1  71.84844762  79.19253441  10.38157463
2  75.97798425  83.09832522  -4.927229877
3  77.19883615  98.79522416  -0.5930995899
4  73.06929952  94.88943287  14.71570492
0  -0.9646045661  0.1372034238  -0.2251960289
2  4  1  19.8758  0.001  3.19813e-005
1  -58.20092982  -4.574906383  -50.64384269
2  -52.40613765  34.86730477  4.003099923
3  -31.83687037  -18.39928535  40.26784516
4  -37.63166255  -57.84149269  -14.37909698
0  0.9487847991  0.1997354914  -0.2447716047
3  4  1  48.6608  0.001  3.92714e-005
1  -140.1212179  -75.35621742  3.769410614
2  -101.5040914  42.7421064  27.96705628

```

射孔与网格连接

- DFN需要的在油藏部分定义，其关键词***BEGIN_DFN**
- 射孔 / 主网格在指定层的位置可以包含一个或者多个DFN面
- DFN平面相对应的附加层自动生成
- 小层的位置标记 '**DF n** '
 - 其中 n 表示离散裂缝相交的单元数，DFU
- 裂缝与井筒之间提供流动连接

修改离散裂缝单元 (DFU)

DFN MOD:

*APERTURE | *PERMEABILITY *DFN '*dfn_name*' (*CON | *ALL *array*)

DFU MOD:

*APERTURE | *PERMEABILITY *DFU '*dfu₁:dfu₂*' (*CON | *ALL *array*)

井指数计算

- DFN层的井指数是内部计算的，公式如下：

$$w_i = 2\pi \cdot ff \cdot kh \cdot w_{frac} / [\ln(r_e/r_w) + skin]$$

其中

k = DFN的渗透率 (mD)

h = DFN 的开度 (m|ft)

有效半径计算

- 有效半径 r_e 是通过 b_{vol} （射孔网格内的DFN的网格体积）， 是由：

$$r_e = geofac \cdot [b_{vol} / (h \cdot \pi \cdot wfrac)]^{1/2}$$

- 缺省值，DFN 所在层的状态与主网格层一致
- *LAYER-CTRL 可用于灵活定义 DFN 和non-DFN 层，用户可以自定义井指数（WI）

特殊面的控制

`*LAYER-CTRL (*DF | *NDF) wn action`
`{ locat. }`

其中

`action = *OPEN | *CLOSE | *SKIN val | *WI val | *WIMULT val | *WIMULTO val`

其中:

`DF | NDF` = 可选层标识符作用应用于DFN或非DFN层
 如果 `*DF` 或者 `*NDF` 不存在,将包含自动生成的 DFN 层

`WI val` = 为当前层直接更改井指数的操作

离散裂缝模拟数学模型

基质系统: $-\nabla \cdot [(\mathbf{K}_m / \mu) \cdot \nabla p_m] = q_m + (q_{mf} / V_m) \delta_{mf}$

裂缝系统: $(k_f / \mu) (\partial^2 p_f / \partial \xi^2) = q_f + (q_{mf} + q_{ff} \delta_{ff}) / V_f$

流体在裂缝

----- K_m 为基岩渗透率张量

----- μ 为流体粘度

和基岩中的

----- p_m 和 p_f 分别为基岩和裂缝的压力

----- k_f 为裂缝渗透率

流动满足

----- V_f 和 V_m 分别为裂缝单元和基岩单元的体积

Darcy定律:

----- q_m 和 q_f 分别为基岩和裂缝的源汇项

----- ξ 沿裂缝方向的局部坐标系

----- 基岩网格有裂缝嵌入时, $\delta_{mf} = 1$, 否则 $\delta_{mf} = 0$

----- 当裂缝单元与另一裂缝单元相交时, $\delta_{ff} = 1$, 否则 $\delta_{ff} = 0$

----- q_{mf} 为基岩与裂缝之间的窜流量

----- q_{ff} 为相交裂缝单元之间的窜流量

离散裂缝模拟注意事项

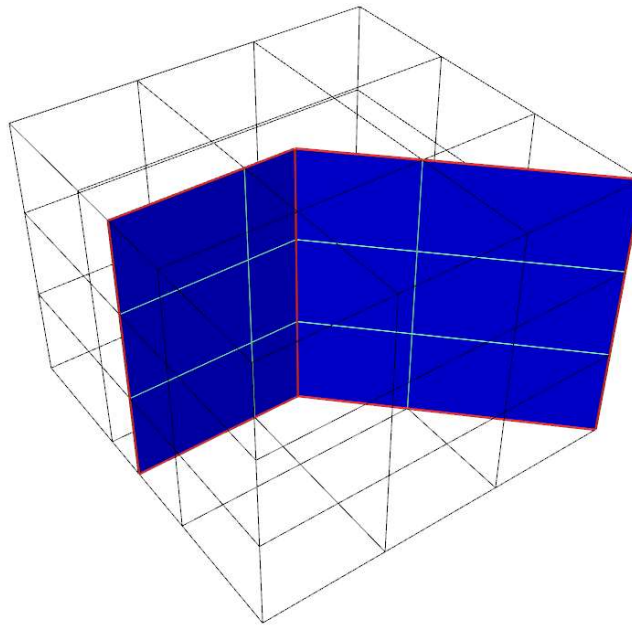
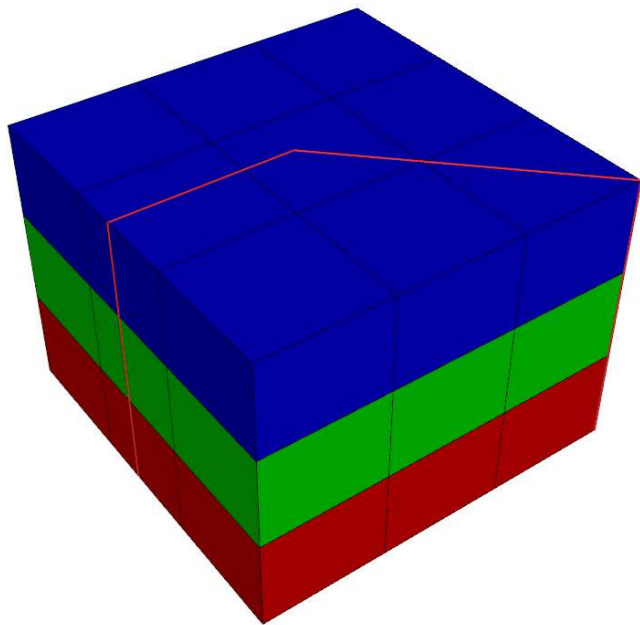
坐标系是 UTM

- 使用Builder与DFN 坐标一定要匹配
- 引起问题的关键词如下：
 - RESULTS XOFFSET
 - RESULTS YOFFSET
 - RESULTS ROTATION
 - RESULTS AXES-DIRECTIONS

离散裂缝模拟可视化技术

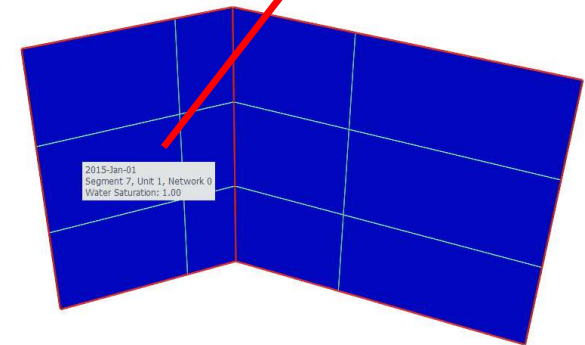
可以在3D 中显示

属性在 DFS 级别上查看 (在探针模式下)



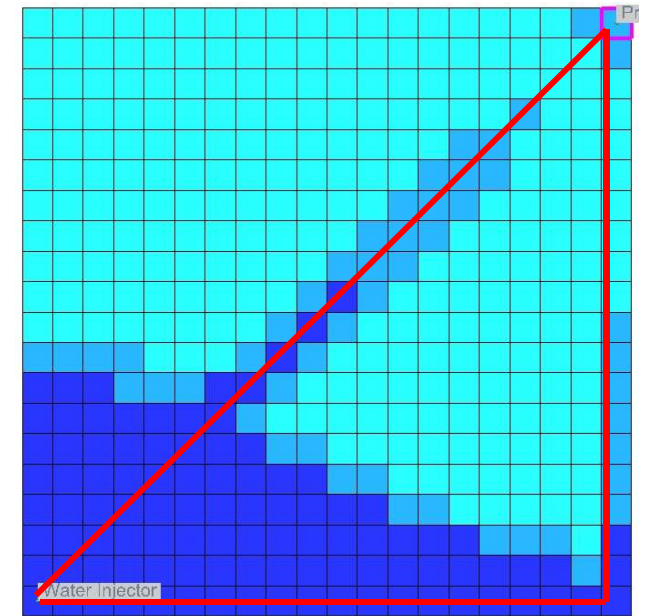
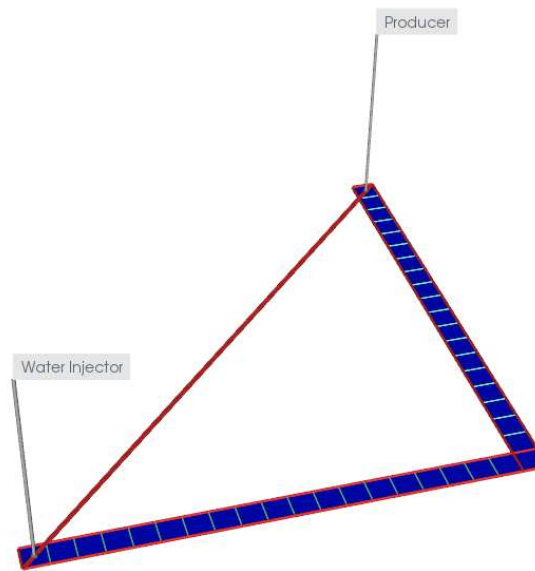
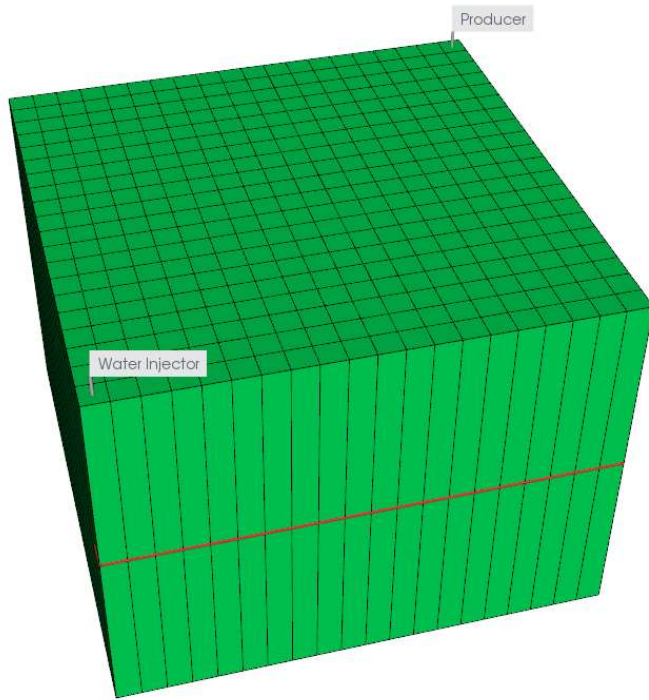
DFN = 0
DFU = 1
DFS = 7

2015-Jan-01
Segment 7, Unit 1, Network 0
Water Saturation: 1.00



离散裂缝模拟案例

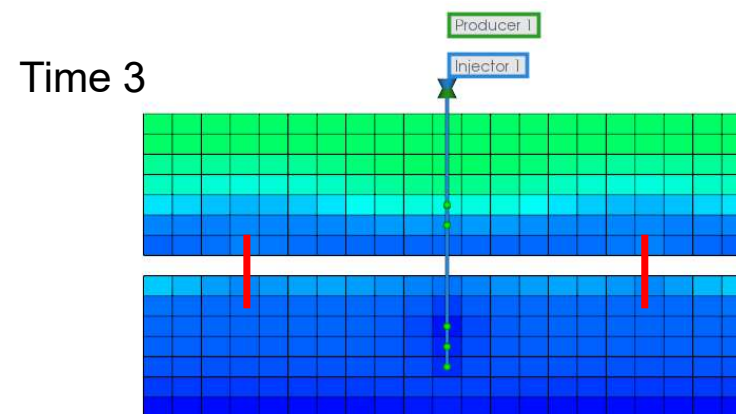
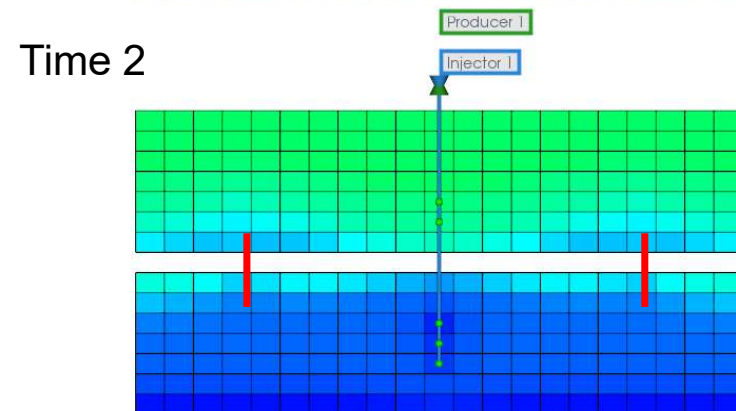
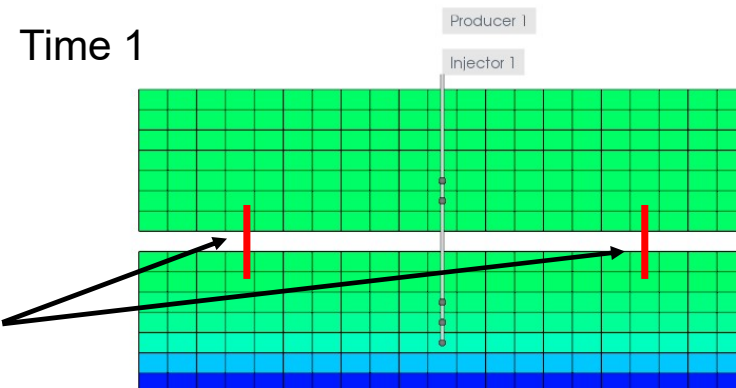
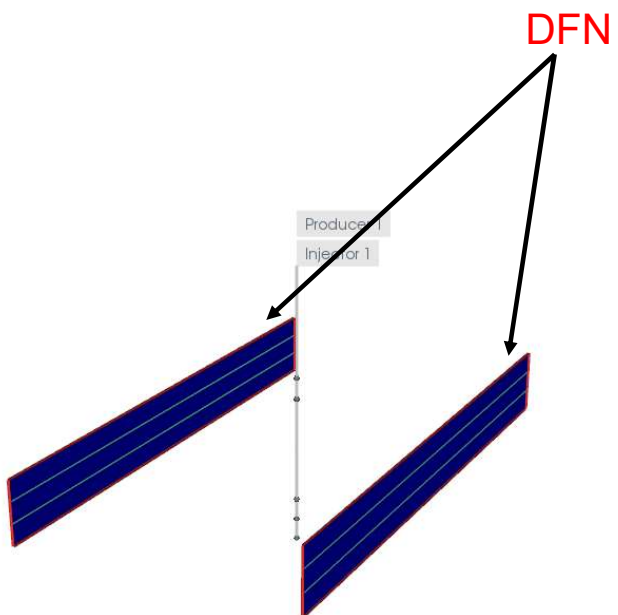
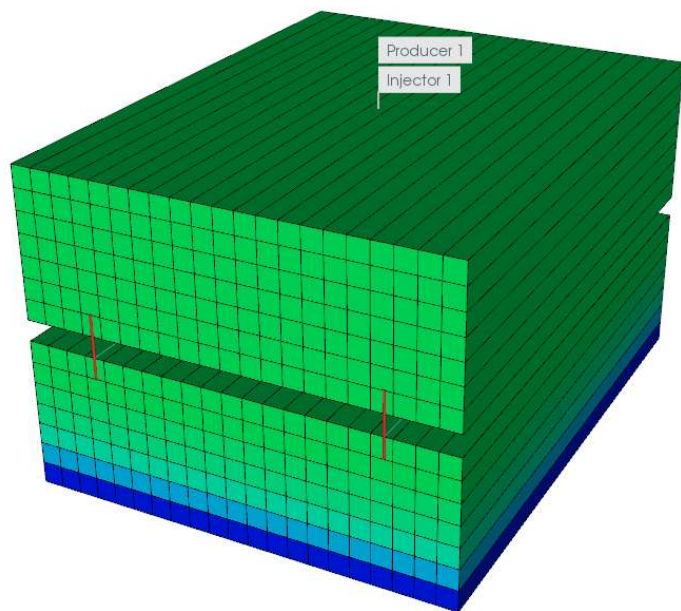
DFN模拟水窜



template: mxfr003_dfn.dat

离散裂缝模拟案例

DFN模拟底水锥进



template: mxfr038_dfn.dat

离散裂缝模拟案例

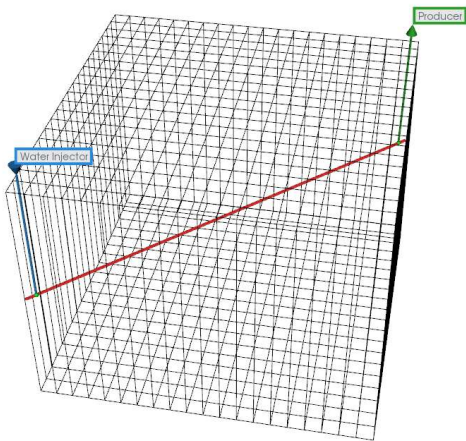
离散裂缝在双重介质中的应用

只在DFN中设置射孔

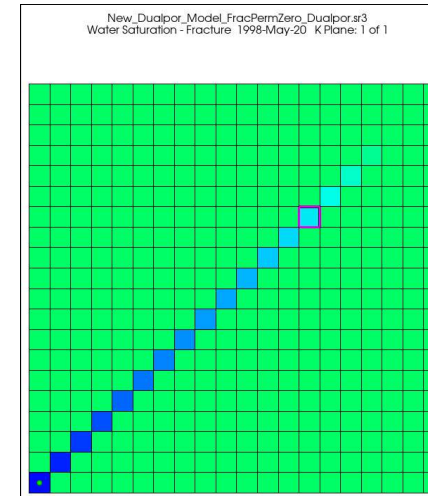
在裂缝网格中含水饱和度增大

- 即使裂缝有效渗透率设置为0

裂缝的含水饱和度场图



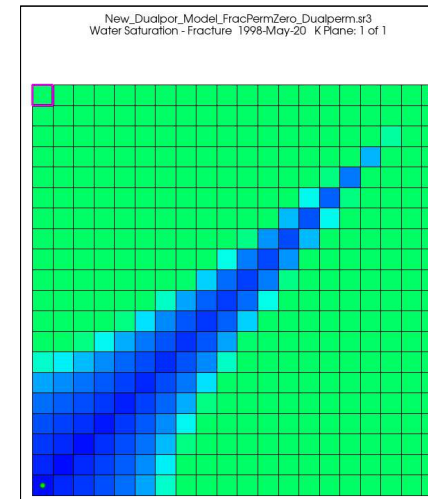
45	PERMI	*FRACTURE CON	0
46	PERMI	*MATRIX CON	1
47	PERMJ	*FRACTURE CON	0
48	PERMJ	*MATRIX CON	1
49	PERMK	*FRACTURE CON	0
50	PERMK	*MATRIX CON	1



- 双孔 ($k_{\text{frac}} = 0$)

DFN \rightarrow m \rightarrow f

- Only in blocks containing the DFN



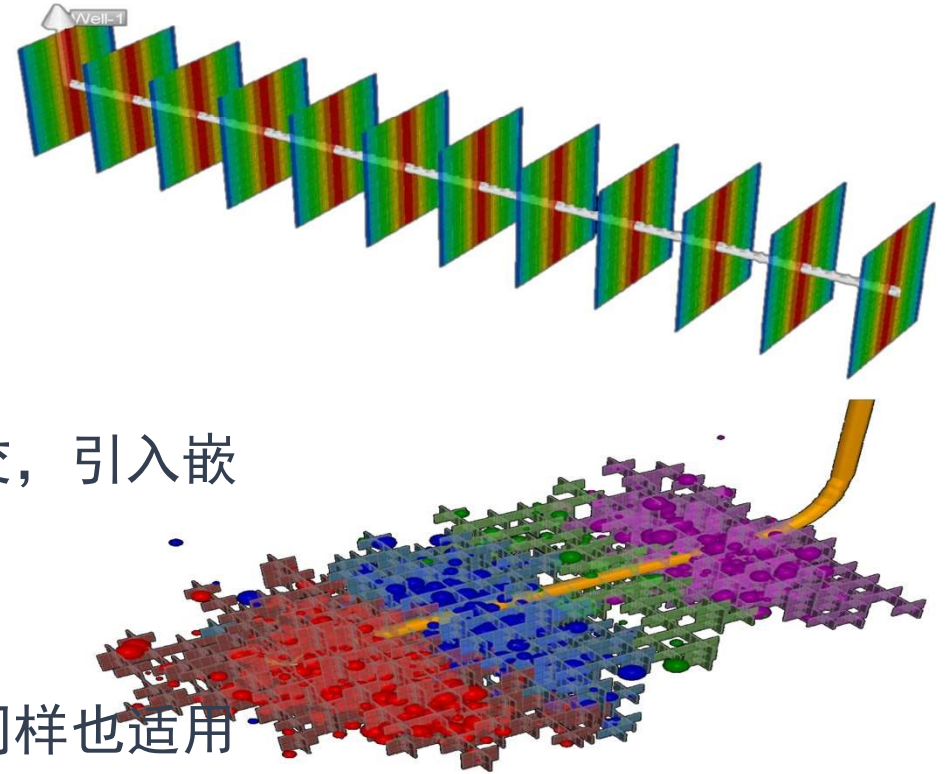
- 双渗 ($k_{\text{frac}} = 0$)

DFN \rightarrow m \rightarrow m
 \downarrow \downarrow
 f f

离散裂缝模拟人工裂缝

DFN可以模拟面裂缝、体积裂缝

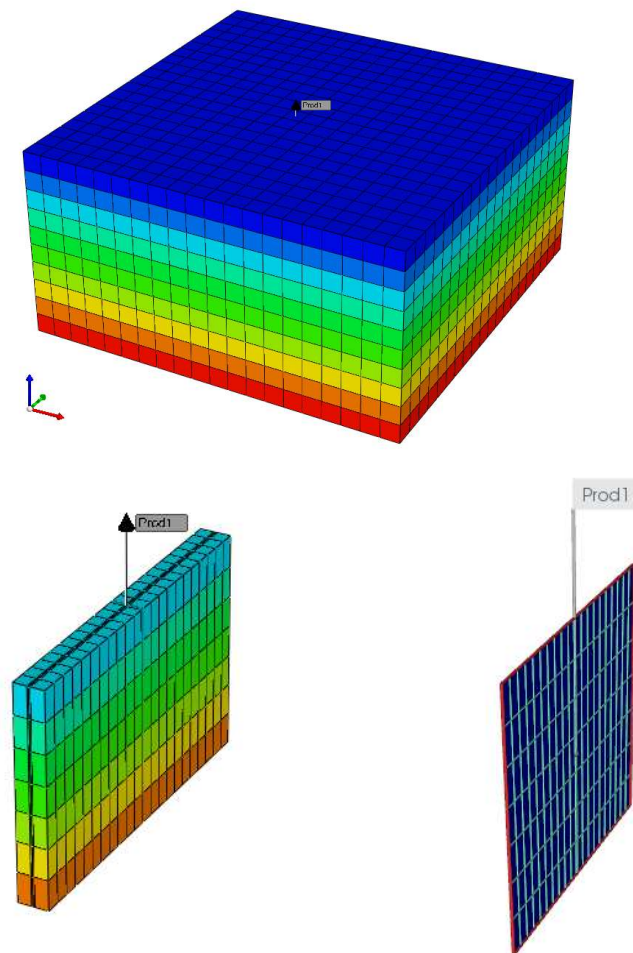
- 任意方向，不受网格方向限制
- DFN 的裂缝面可以与基质网格相交，引入嵌入式DFN 分段控制体。
- DFN 选项也适用于局部加密网格同样也适用于双重连续介质模型。



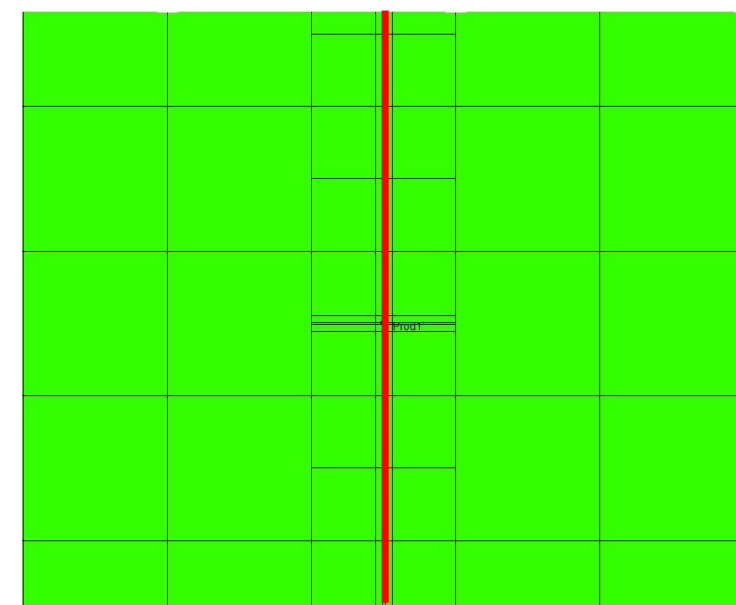
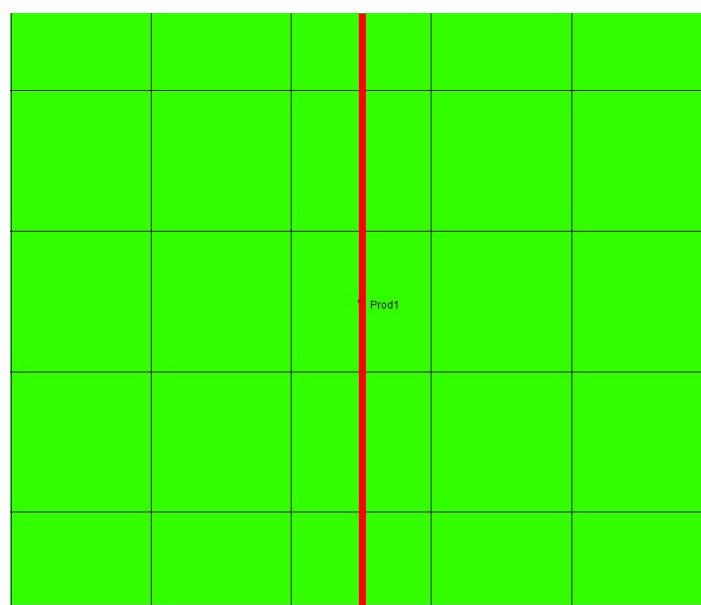
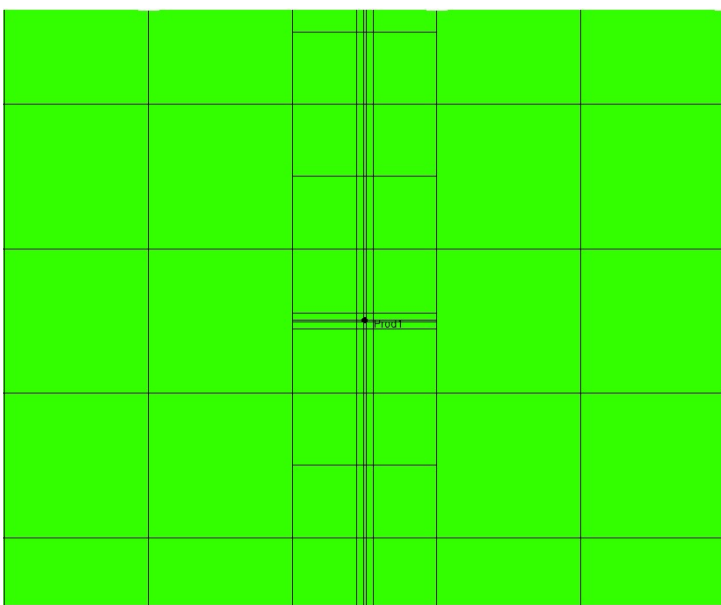
DFN与面裂缝对比

- 1 口生产井
- 1 条面裂缝
- 单孔模型 (50x50x10m)
- 油水模型

Section	Property	Value
Reservoir	Poro (%)	5
	Perm Hz (md)	0.001
	Perm Vert (md)	0.001
	Swcon (%)	20
HF Template	Intrinsic Perm (md)	15000
	Width (aperture) (m)	0.005
	Effective Width (m)	0.6069
DFN	Perm (md)	15000
	Aperture (m)	0.005



DFN与面裂缝对比



Case 1:

- HF Template
- No DFN

Case 2:

- Base Grid
- DFN
- Perf in DFN only

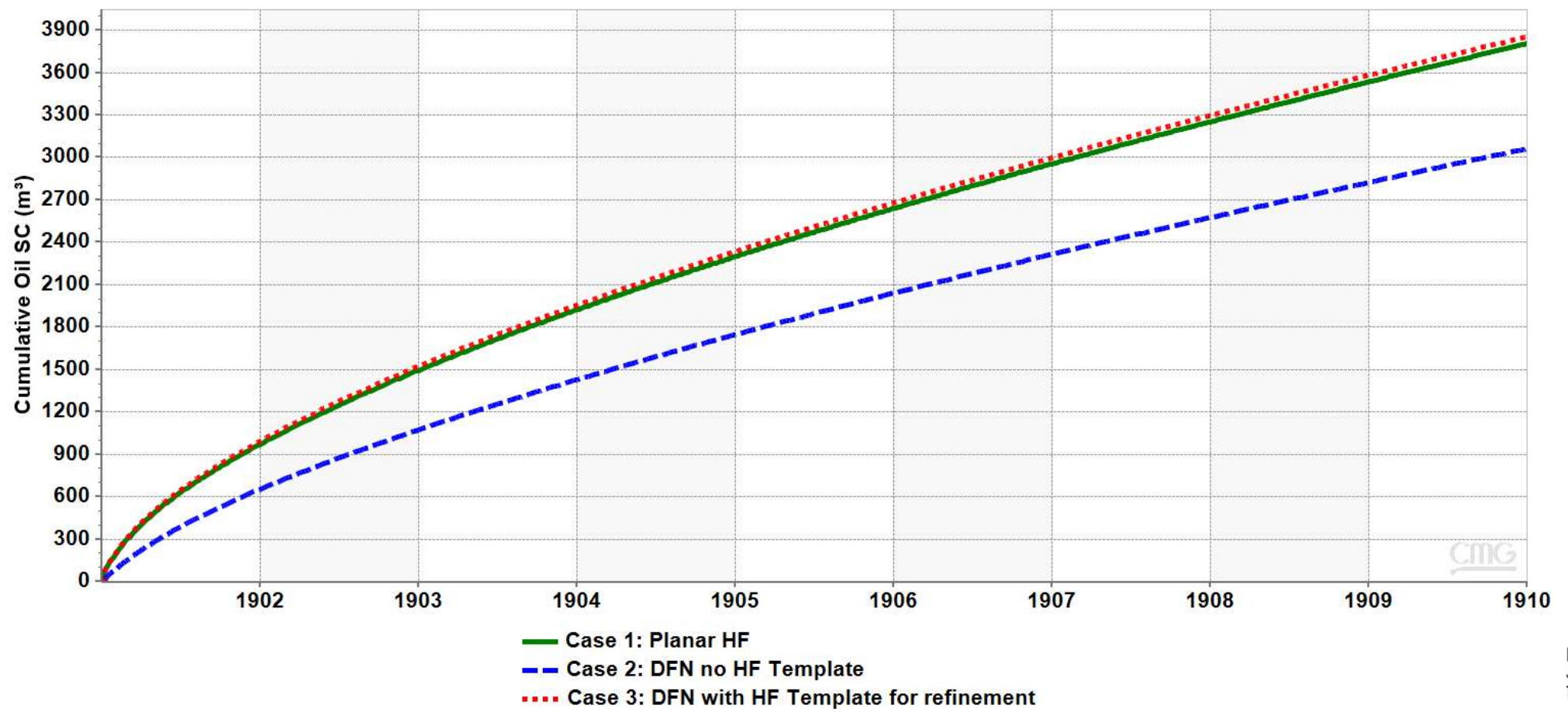
Case 3:

- HF Template for refinement only
- DFN
- Perf in DFN only

DFN与面裂缝对比

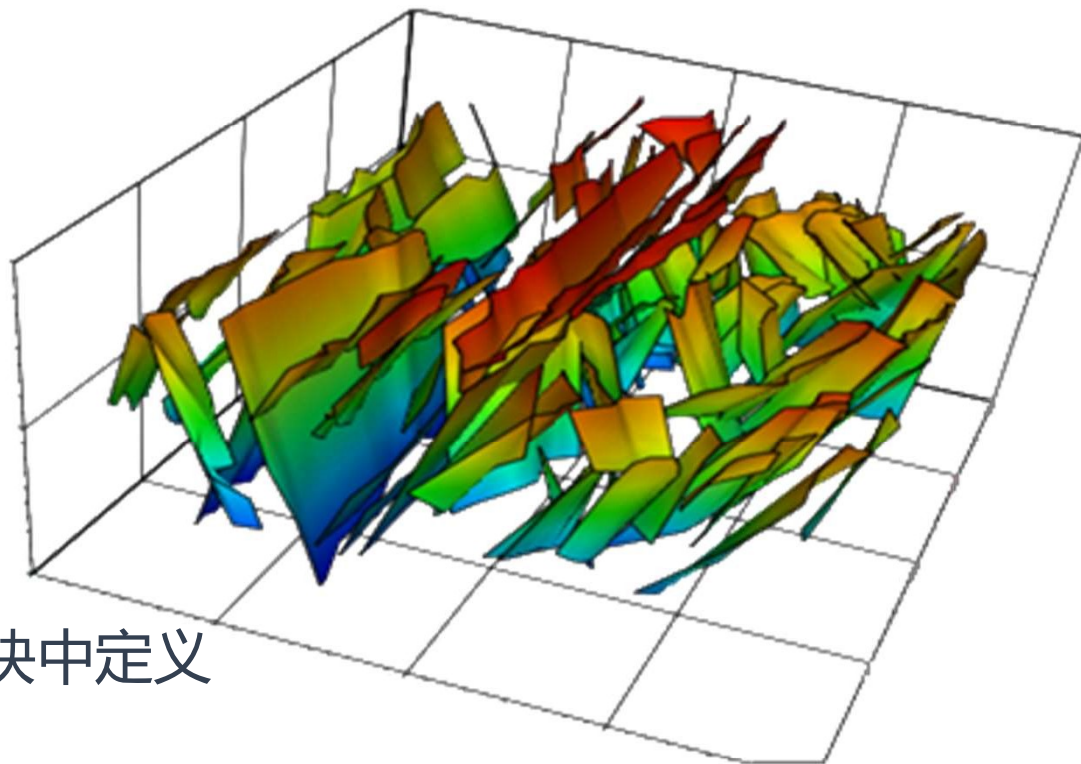


Cumulative Oil SC - Prod1



总结

- 任意方向(没有网格旋转需求)
- 每个网格可以有多条裂缝
- 通过DFN平面连通多个储层
- DFN平面大小没有限制
- 添加流体通道，无需在显示网格块中定义
- 使用实际的裂缝开度和渗透率



谢谢！