



# 裂缝铺砂参数对压裂开发 有效缝长的影响分析

汇报人：李剑辉

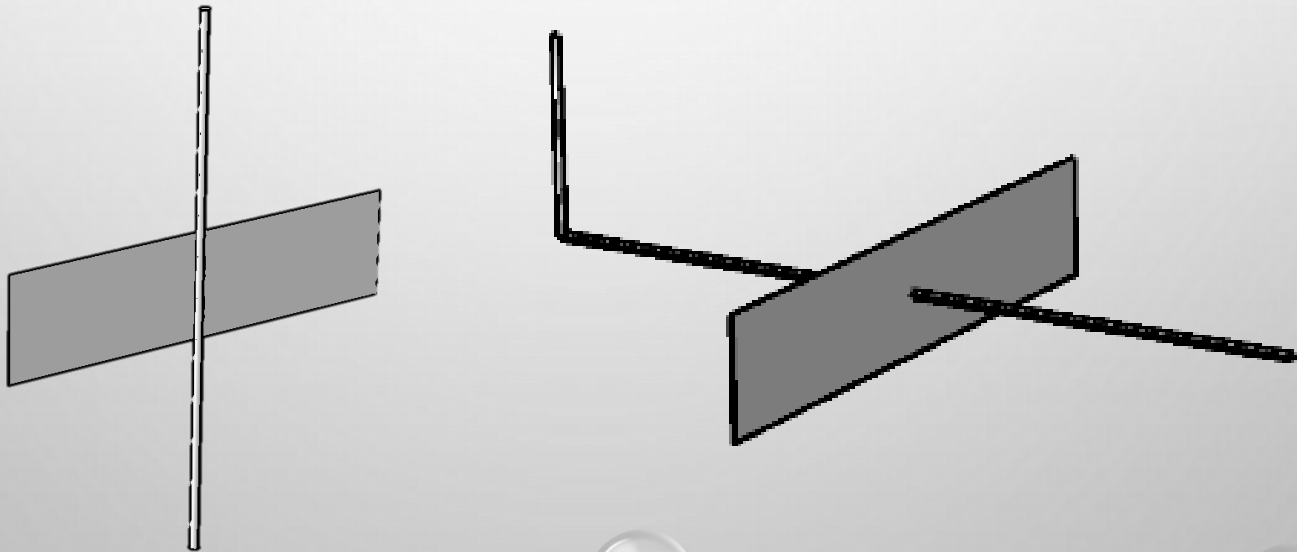
作者：李剑辉、岳明、朱维耀

王九龙、刘昀枫、王亚震

**COMSOL**  
**CONFERENCE**  
2017 BEIJING

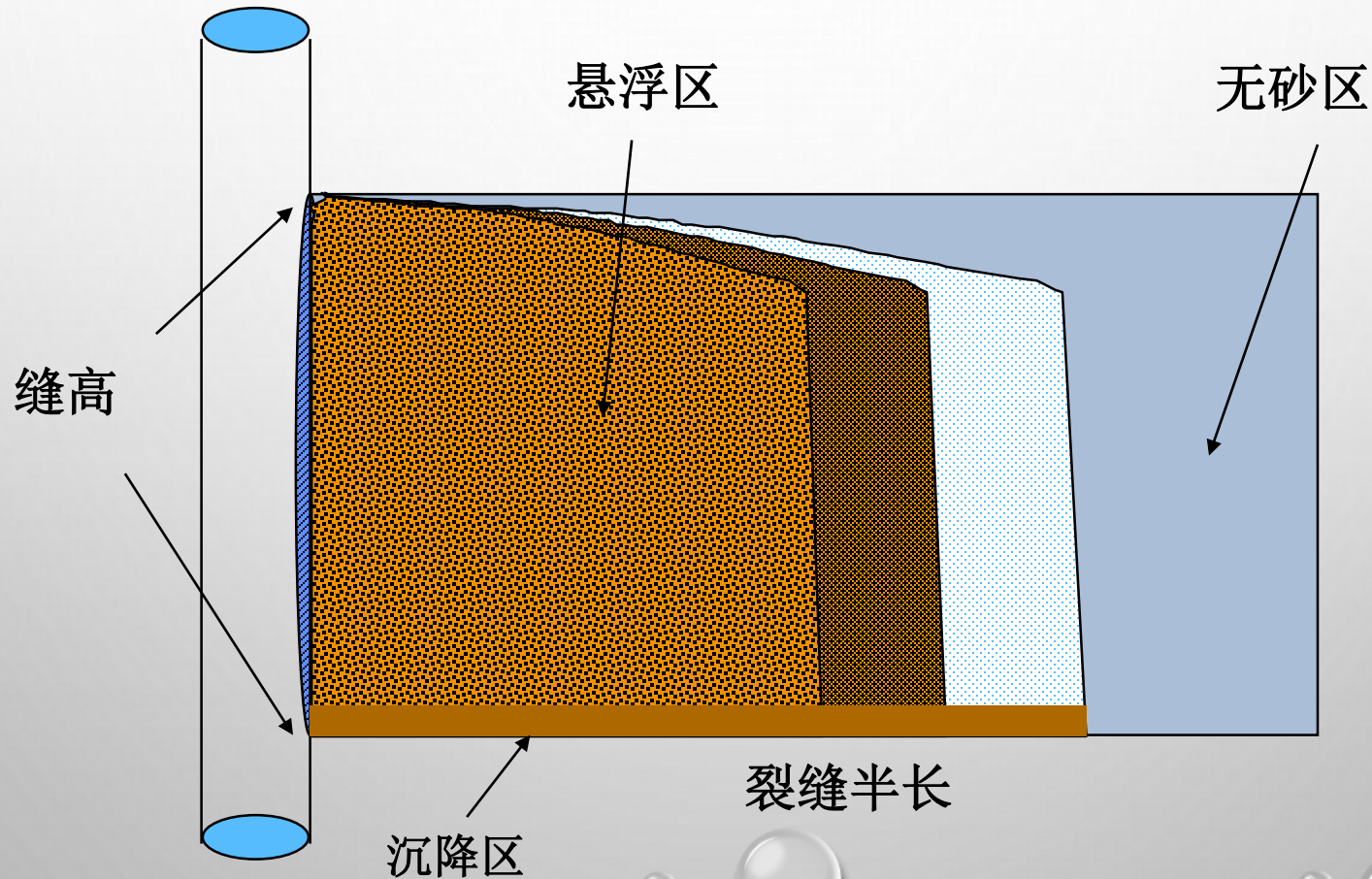
# 前言

- 水力压裂是目前低渗透致密油气田开发的关键技术，水力压裂裂缝的铺砂浓度、导流能力、有效缝长和改造体积等参数是影响开采效果的重要因素。本研究着重考虑水平井单裂缝内铺砂参数的变化对开采过程中渗流规律的影响。



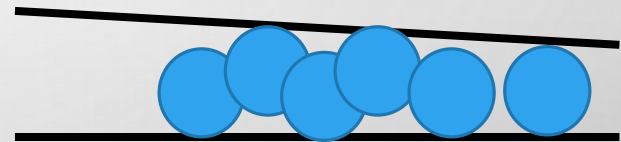
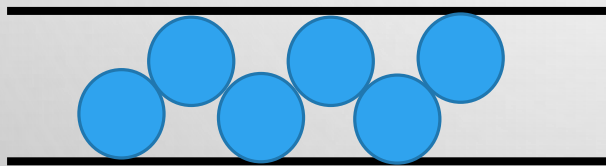
# 前言

水平井裂缝比垂直井裂缝中的铺砂过程有明显不同的边界条件。



# 前言

- 一般在考虑裂缝对渗流场影响时将裂缝渗透率设为定值，其产生一个椭圆影响范围。然而在致密或低渗透地层中，由于其地应力较大，会将没有铺砂或铺砂较少的裂缝重新压合，导致裂缝导流能力不均，进而偏离经典的椭圆模型。



# 内容

水平井裂缝铺砂过程模拟



铺砂与裂缝导流能力关系



裂缝对渗流的影响

# 裂缝铺砂过程模拟

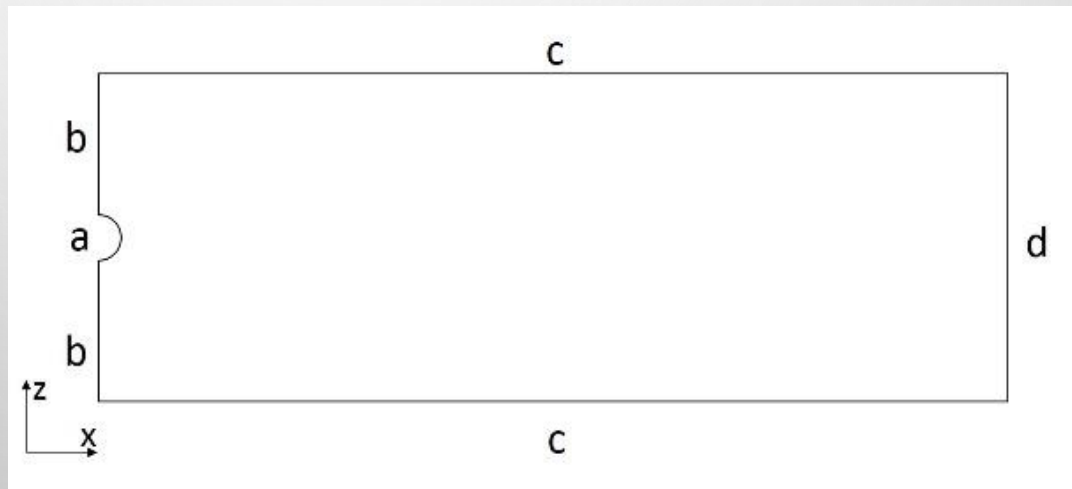
- 压裂过程中携砂液的注入是为了防止地应力将已压裂出的裂缝重新闭合。裂缝中携砂液的流动是典型的固液两相流。本研究采用MIXTURE层流模型，对携砂液在水平井裂缝中的流动进行模拟计算。划分网格时对入口和底部的网格进行加密。

a 速度入口

b 对称边界

c 墙壁边界

d 压力出口



# 裂缝铺砂过程模拟

- 基本方程

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \cdot [-\rho \mathbf{I} + \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T - \frac{2}{3}(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I})] - \nabla \cdot [\rho c_d(1 - c_d)\mathbf{u}_{slip}\mathbf{u}_{slip}^T] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}$$

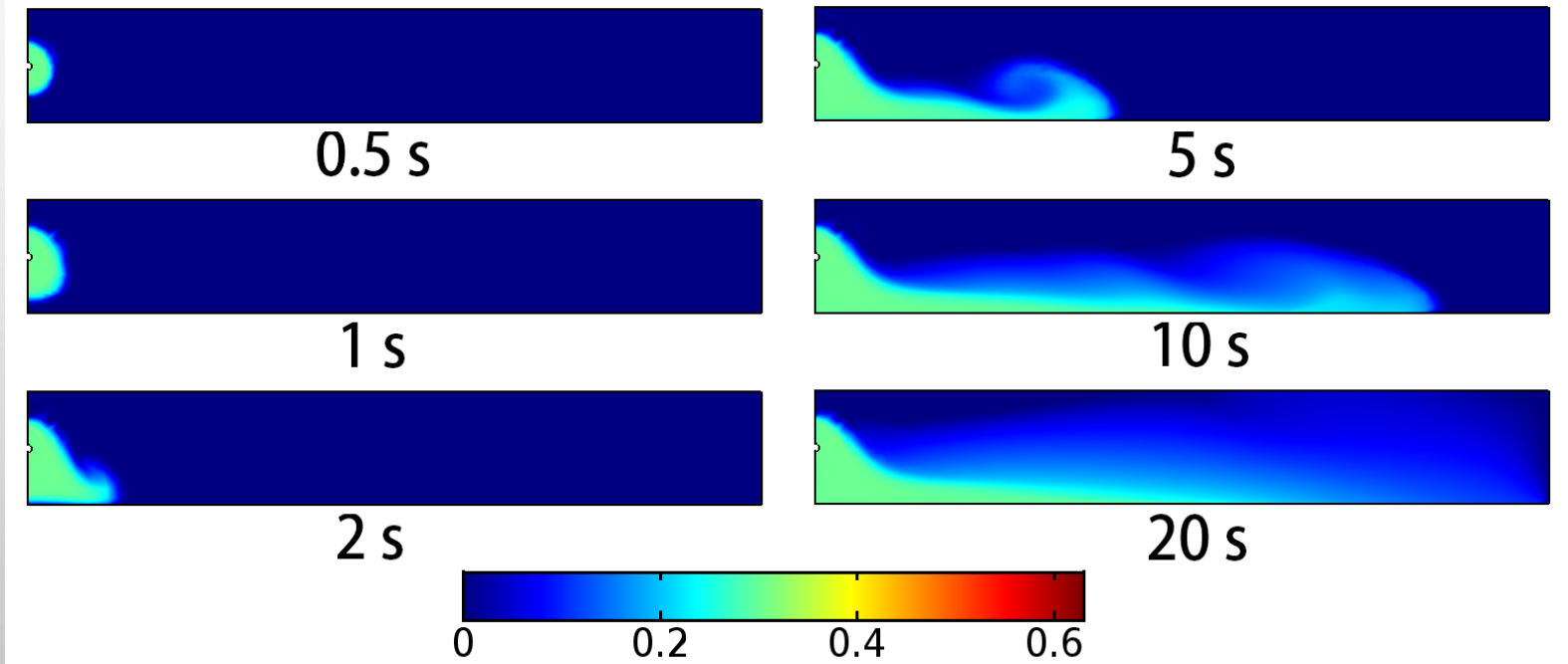
$$(\rho_c - \rho_d) \left\{ \nabla \cdot [\phi_d(1 - c_d)\mathbf{u}_{slip}] + \frac{m_{dc}}{\rho_d} \right\} + \rho_c(\nabla \cdot \mathbf{u}) = 0$$

$$\frac{\partial \phi_d}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{N}_{f_d} = -\frac{m_{dc}}{\rho_d}, \mathbf{N}_{f_d} = \phi_d \mathbf{u}_d, \mathbf{u}_d = \mathbf{u} + (1 - c_d)\mathbf{u}_{slip}$$

$$\rho = \phi_c \rho_c + \phi_d \rho_d, c_d = \frac{\phi_d \rho_d}{\rho}$$

# 裂缝铺砂过程模拟

- 各阶段铺砂形态



在铺砂过程中，前缘会形成一个“砂包”向前推进，但是稳定后依然会形成明显的悬浮区和沉降区。



# 裂缝铺砂过程模拟

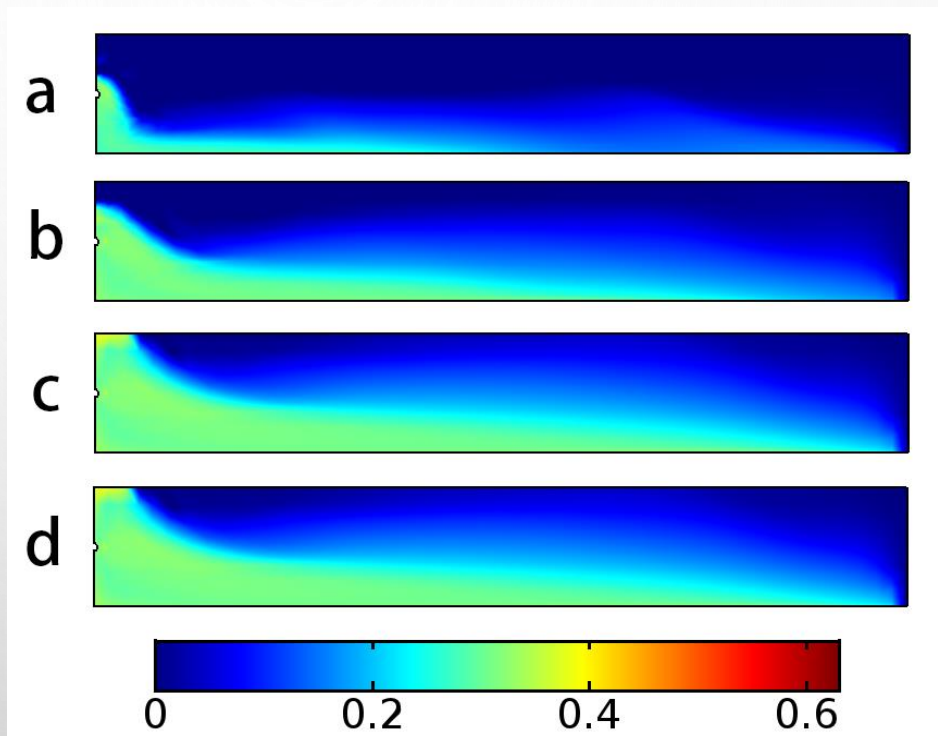
- 不同入口速度

$2 \text{ m/s}$

$5 \text{ m/s}$

$8 \text{ m/s}$

$11 \text{ m/s}$



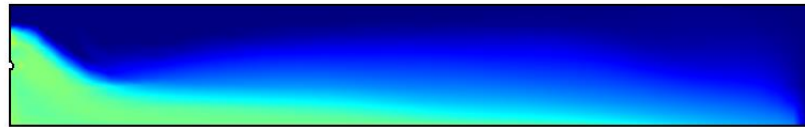
随着入口速度的增大，铺砂高度逐渐增大。入口上部会形成一个浓度较高的区域，当入口速度越大时，此区域越明显。

# 裂缝铺砂过程模拟

- 不同入口浓度

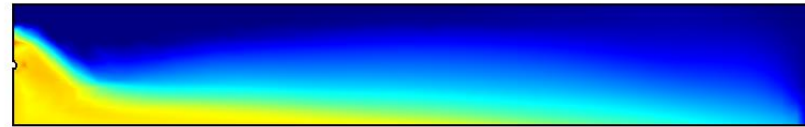
0.3

a



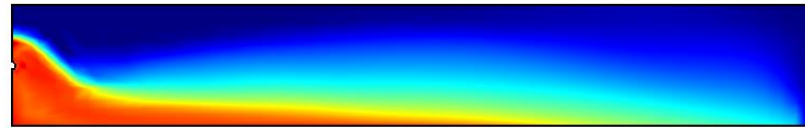
0.4

b



0.5

c



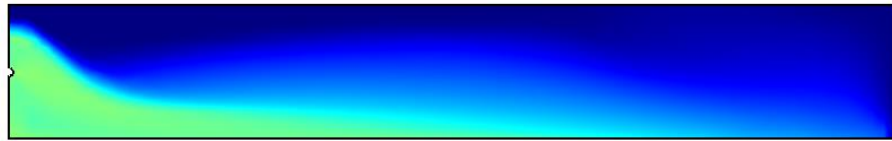
入口颗粒浓度越大其他位置的铺砂浓度也越大，而铺砂浓度分布形态没有较大变化。

# 裂缝铺砂过程模拟

- 不同颗粒密度

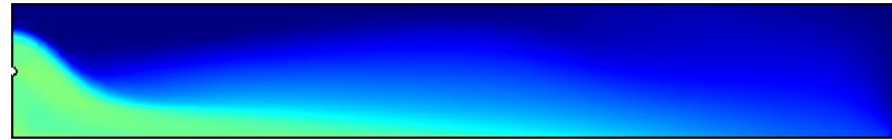
2100  $kg / m^3$

a



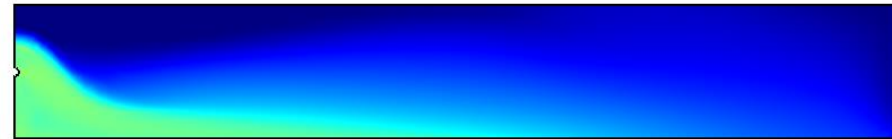
2500  $kg / m^3$

b



2900  $kg / m^3$

c



颗粒密度越大导致颗粒沉降越快，铺砂分布范围越小，而铺砂浓度大小基本相同。

# 铺砂与裂缝导流能力关系

- 裂缝导流能力是指在储层地应力的作用下，充填支撑剂的裂缝可以通过流体的能力。裂缝导流能力半经验公式<sup>[1]</sup>：

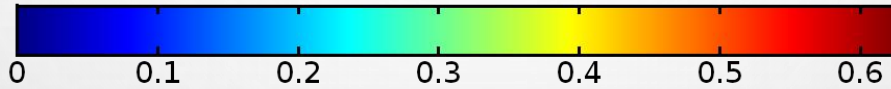
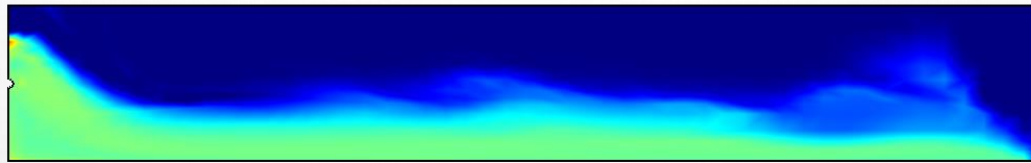
$$(Kb)_f = 6.246\bar{C}Z \left( \frac{17500}{142p_c + \alpha} \right)^8 \left[ 1 + \frac{\beta}{\exp(Z-1)} \ln(0.1B) \right]$$

当其他参数给定时，裂缝渗透率K和铺砂浓度 $\bar{C}$ 成正比关系。

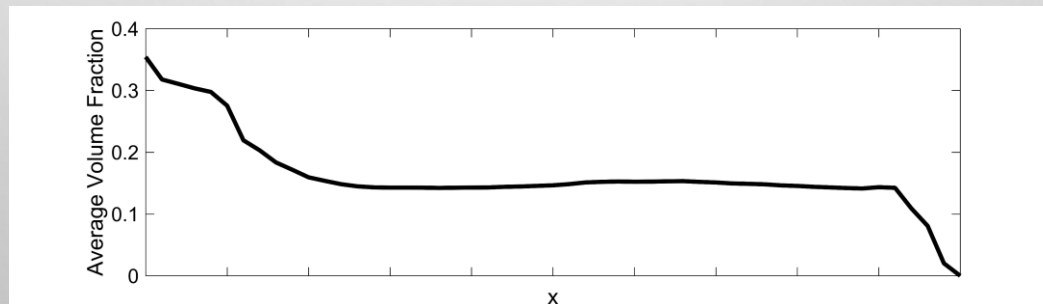
[1] 陈涛平, 胡靖邦. 石油工程[M]. 石油工业出版社, 北京, 2000, 386

# 铺砂与裂缝导流能力关系

Surface: Dispersed phase volume fraction



$$\bar{f} = \frac{\int_a^b f(y) dy}{b-a}$$



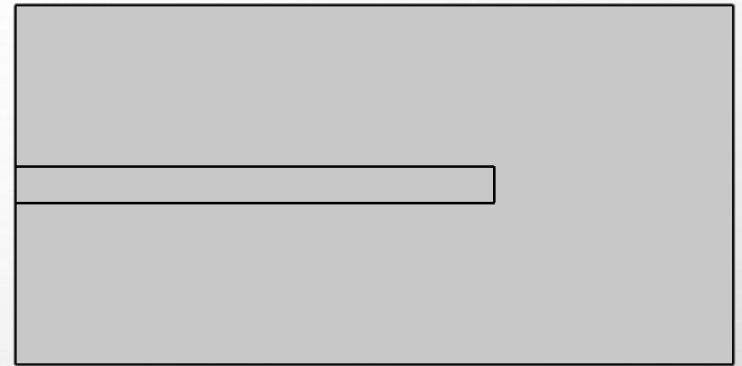
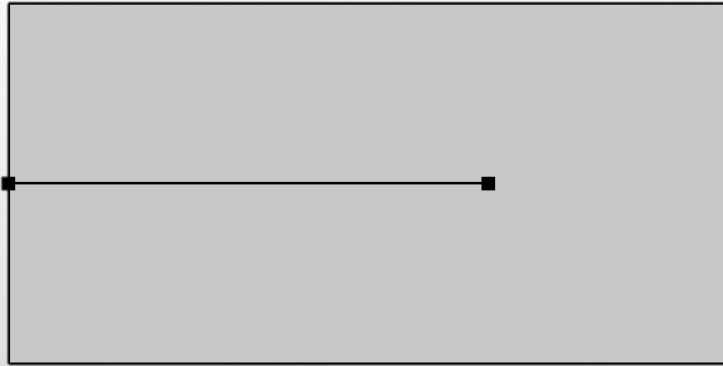
# 裂缝对渗流的影响

由于裂缝的渗透率远大于多孔介质渗透率，因此多孔介质中的流体会优先选择裂缝流动。在此假设裂缝中的流动仍符合达西定律。基本方程为：

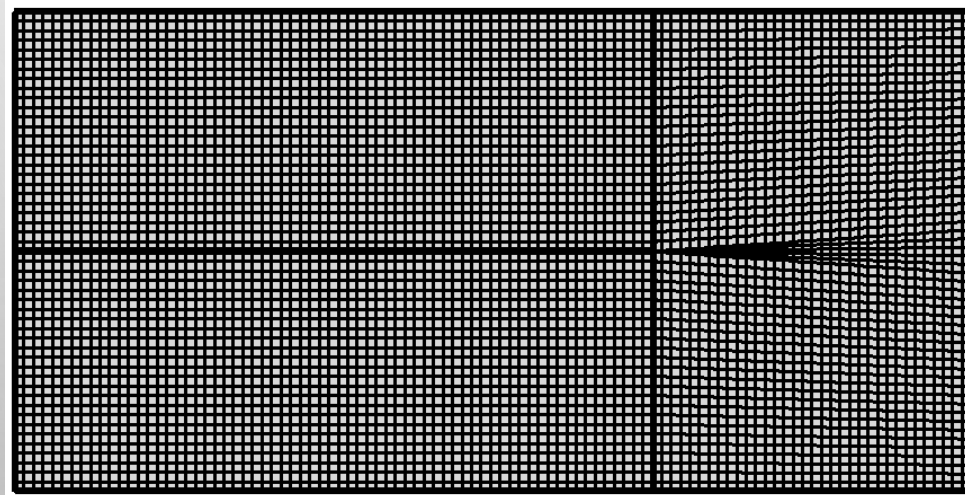
$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_p \rho) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = Q_m, \quad \mathbf{u} = -\frac{k}{\mu} \nabla p$$

在常规模拟中裂缝的渗透率在缝长方向是一个不变的值，由此影响所产生的流动区域和压力分布呈椭圆状。而变渗透率裂缝影响有所不同。

# 裂缝对渗流的影响



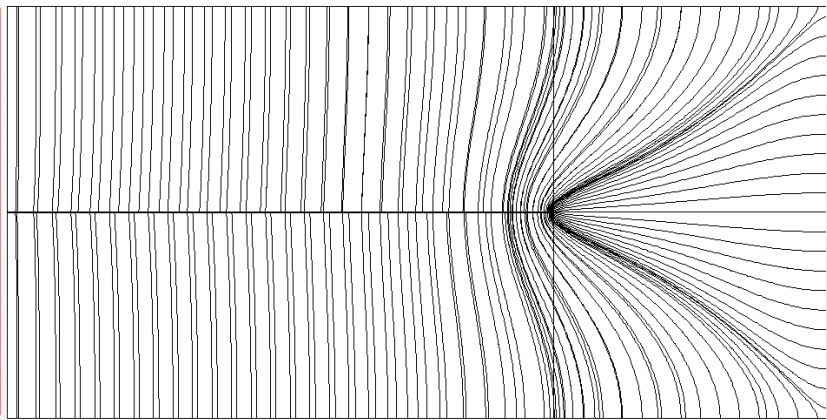
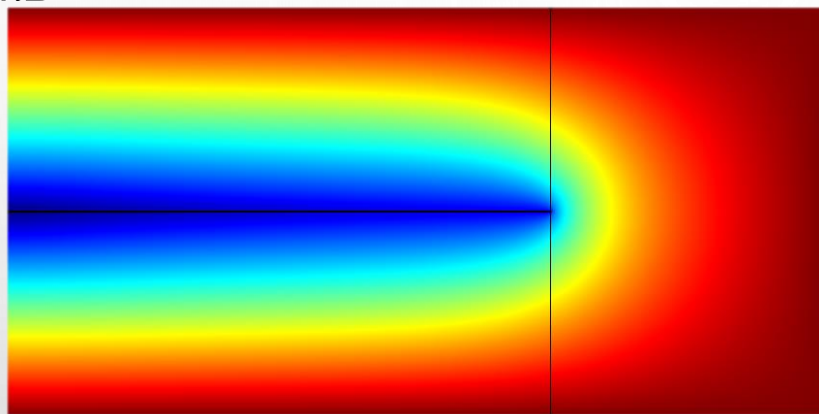
裂缝模型没有流量边界条件



# 裂缝对渗流的影响

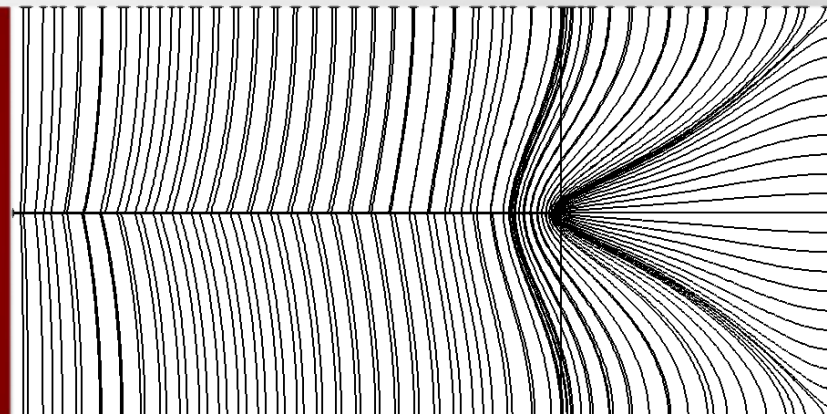
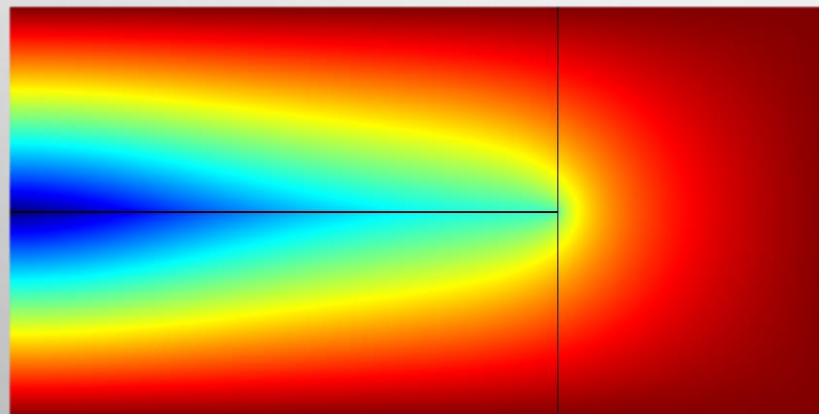
$$k_m = 10mD$$

均匀  
渗透率



$$k_{f \max} = 1000D$$

不均匀  
渗透率



压力图

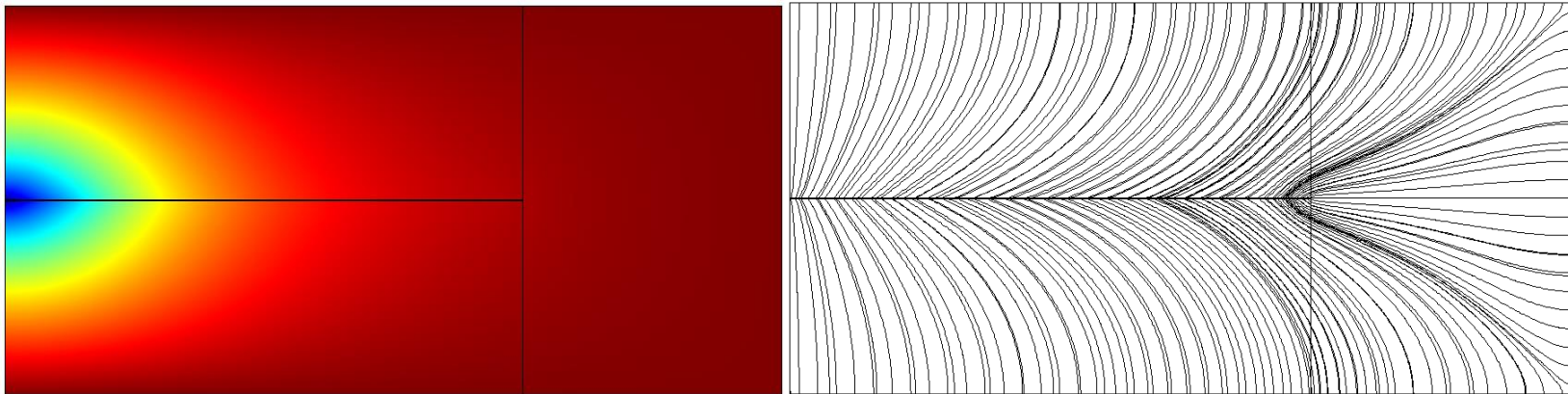
流线图



# 裂缝对渗流的影响

$$k_{f \max} = 100D$$

不均匀  
渗透率



压力图

流线图

当基质渗透率与裂缝最大渗透率相差5个数量级时，变渗透率的裂缝对流场的影响已偏离椭圆模型。当基质渗透率与裂缝最大渗透率相差4个数量级时，裂缝远端附近压力值与基质中未动用区域压力值相同，因此从井筒到此位置的距离才是裂缝的有效长度。

# 致谢

感谢COMSOL公司提供此次  
珍贵的交流机会

感谢各位技术支持人员对本研究的帮助