



致密储层压裂开发有效缝长 (改造体积) 定量分析与评价

北京科技大学

汇报人：张启涛

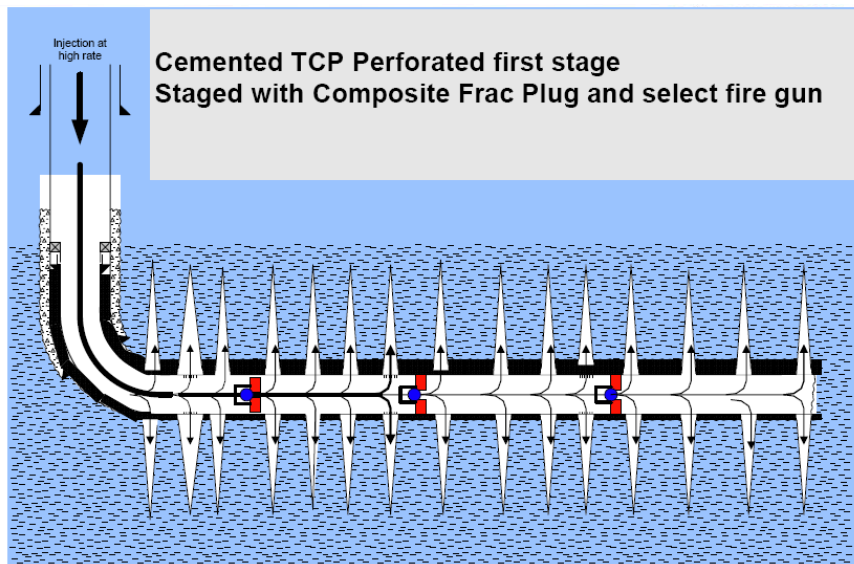
作者：张启涛 朱维耀 岳明

COMSOL
CONFERENCE
2018 SHANGHAI

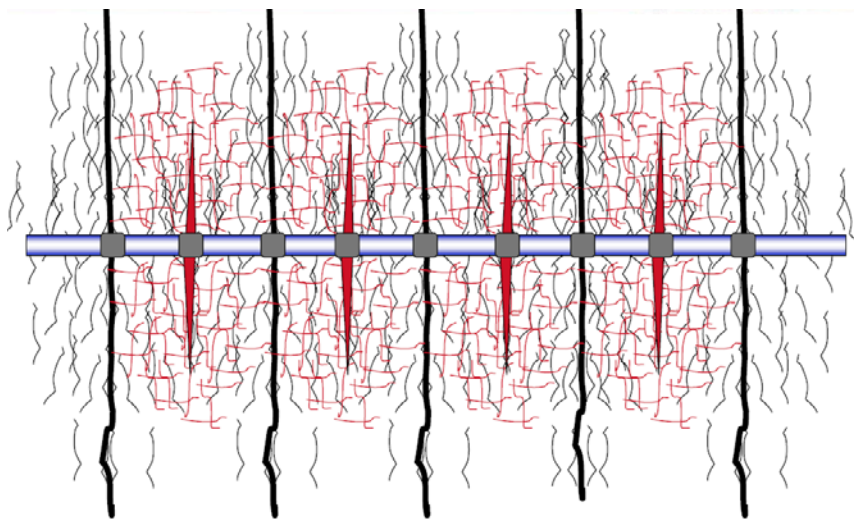
1 研究目的

非常规油气资源是指用传统技术无法获得自然工业产量、需用新技术改善储层渗透率或流体黏度等才能经济开采、连续或准连续型聚集的油气资源。

水力压裂改造是实现非常规油气资源有效开发的主体技术，水平井与分段压裂技术相结合的方式，增产效果显著。



页岩气多级压裂示意图

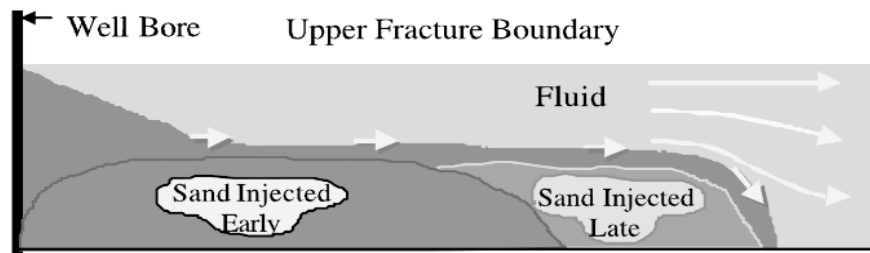


多级压裂水平井网状裂缝

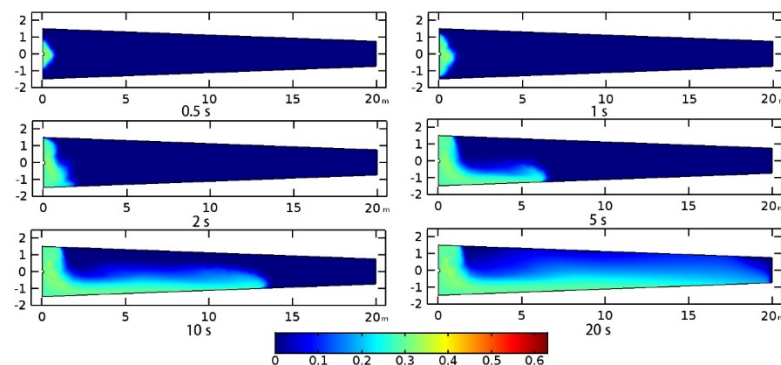
1 研究目的

对于单个裂缝来说，诸多因素影响了其裂缝的实际效果。以铺砂过程为例，致密储层水力压裂过程中，支撑剂的存在是为了防止裂缝完全闭合，保持裂缝导流能力。在理论研究中通常将裂缝当成理想裂缝，整条裂缝都有相同的导流能力。

然而研究表明，裂缝内支撑剂的分布是不均匀的，其分布状态对裂缝的导流能力和裂缝的实际效果有着很大的影响。



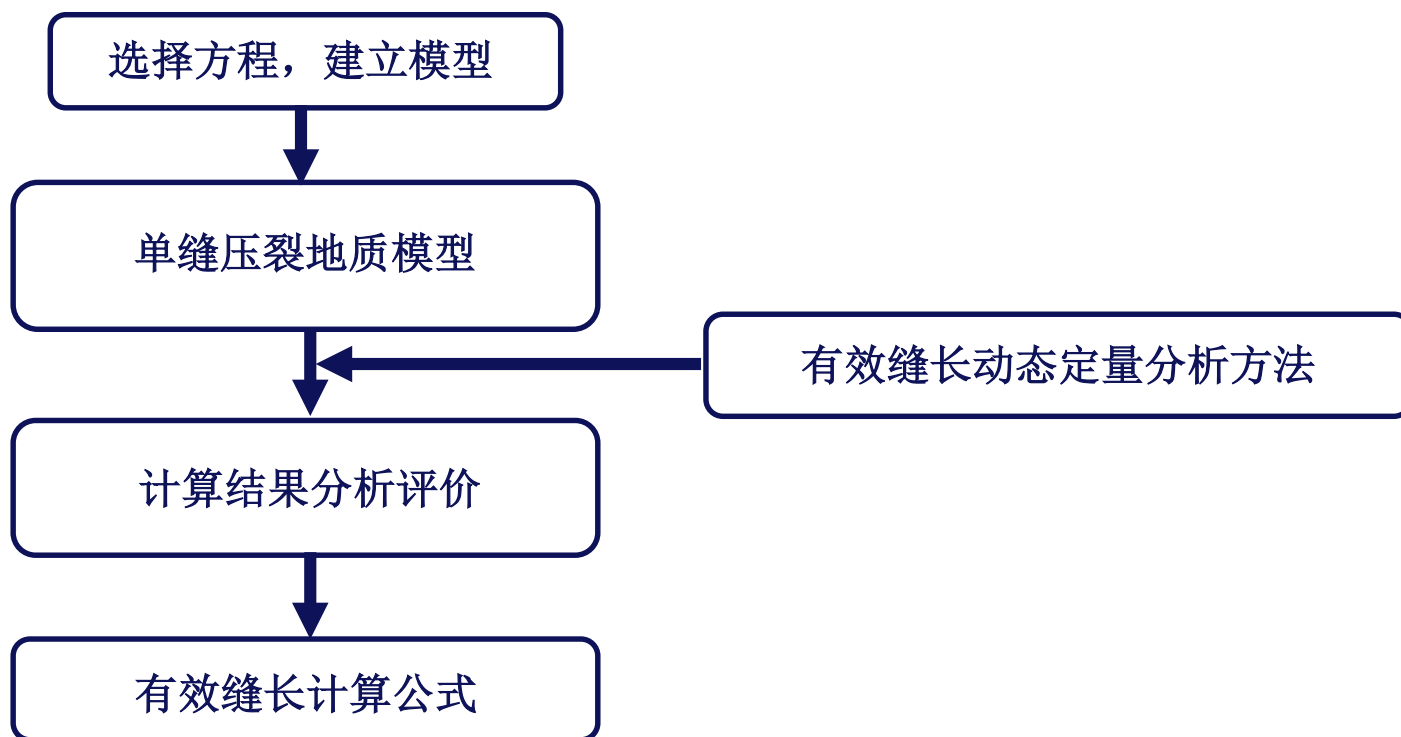
Patankr的支撑剂运移理论



数值模拟结算结果

2 模型建立

有效缝长定量研究路线:



2 模型建立

本研究利用COMSOL Multiphysics，通过修改达西定律模块，手动添加启动压力梯度计算模块，进行致密储层裂缝压裂有效缝长的研究。

(1) 达西定律模块：

计算方法：采用CFD模块的达西定律模型（Darcy's Law）对地层流场进行模拟计算，主要公式如下：

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

对于致密储层，大量实验表明，流体流动状态偏离了线性达西流动。基础的达西定律模型无法描述非线性流动，本模型通过添加域常微分和微分代数方程的方法，引入启动压力梯度，主要公式如下：

$$\lambda = ak^{-b} \cdot \frac{\mathbf{u}}{|\mathbf{u}|}$$

2 模型建立

(2) 裂隙流模块:

对于裂缝采用裂隙流进行描述，主要公式如下:

$$d_f \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_p \rho) + \nabla \cdot (d_f \rho \mathbf{u}) = d_f Q_m$$

$$\mathbf{u} = -\frac{k_f}{\mu} \nabla_T p$$

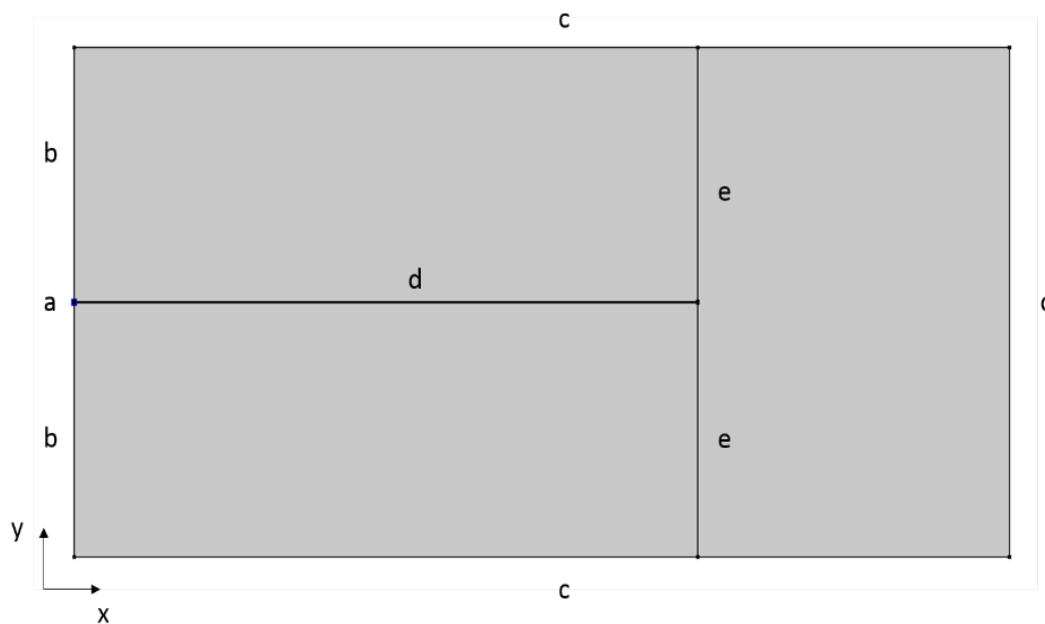
对于井，采用离散的点源/点汇进行描述（定井底流压）

$$\frac{1}{A_w} \int_{\partial S(r_w)} p ds = p_w$$

3 有效缝长模型建立

基本参数：

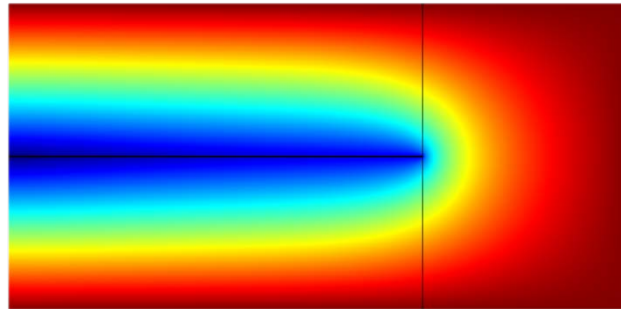
- 主缝长度：100 m
- 边界压力：20 MPa
- 生产压差：10 MPa
- 基质渗透率：0.1 mD
- 启动压力梯度：0.1 MPa/m
- 生产压差：5MPa
- 油层厚度:10 m



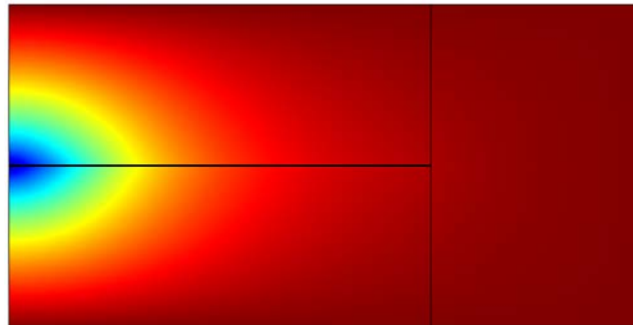
边b为对称边界；边c为储层外边界；边e为网格辅助线。本次模拟中裂缝长度设置为100m，裂缝宽度为0.01m，储层长度为200m，基质宽度为100m。

3 有效缝长模型建立

当储层渗透率足够大，生产条件足够理想的情况下，裂缝为理想裂缝的条件下，认为压裂裂缝的每一部分都发挥了效用，此时认为有效裂缝所占的比例为100%：



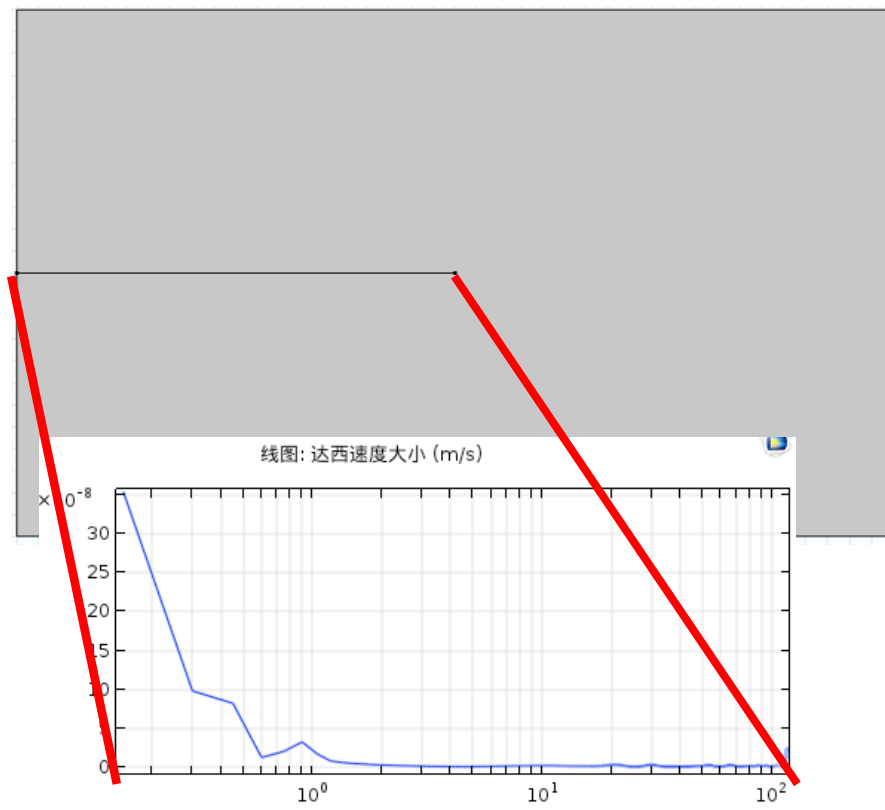
然而真实情况下，多种因素影响下往往只能有部分裂缝表现处比较理想的生产效果，这种情况下占裂缝主要产量份额的部分裂缝称之为**有效裂缝**，余下部分的裂缝称之为无效裂缝。



3 有效缝长模型建立

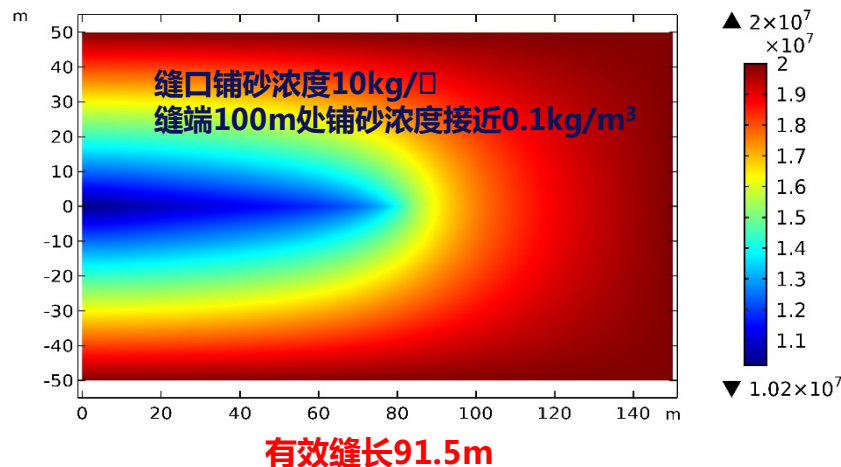
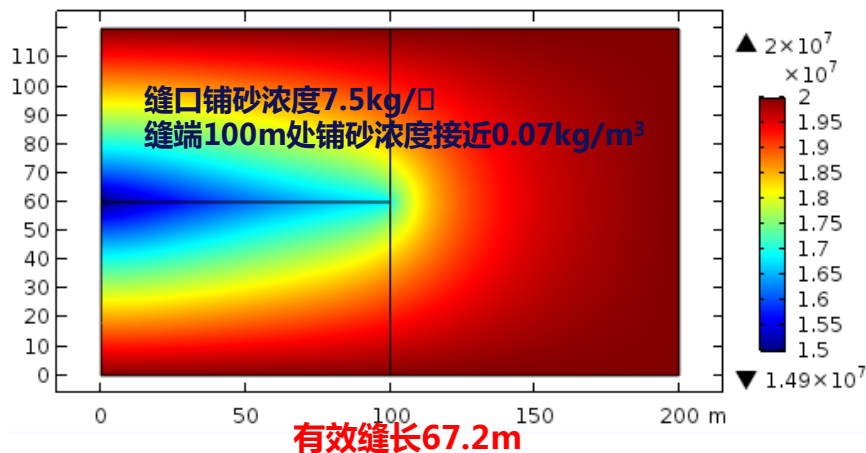
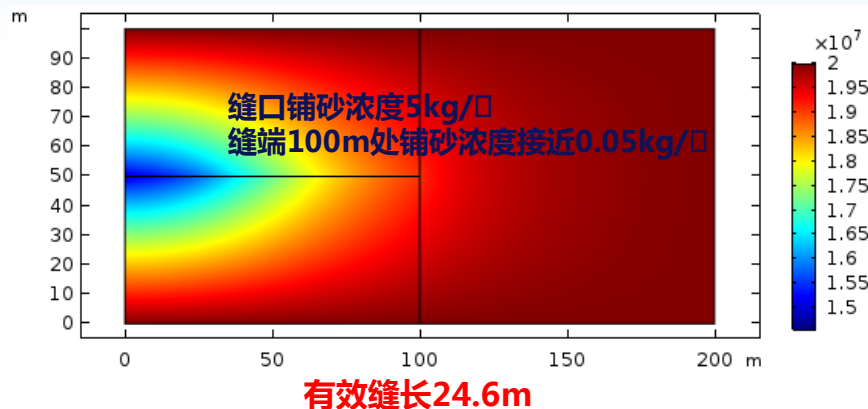
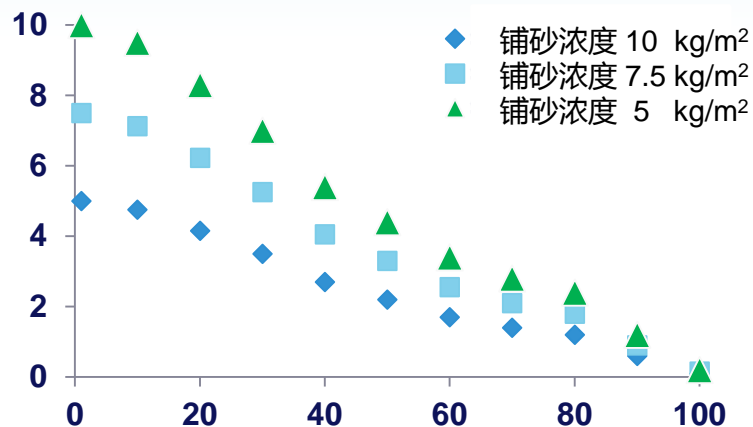
裂缝有效缝长量化分析方法

利用COMSOL求解，得到达西速度场 U_y ，通过COMSOL后处理计算100m裂缝各处流体法向流入裂缝的速度，进而推算出裂缝各个部分的产量贡献，将产量贡献占总产量95%的裂缝部分定为有效裂缝。



4 有效缝长计算结果

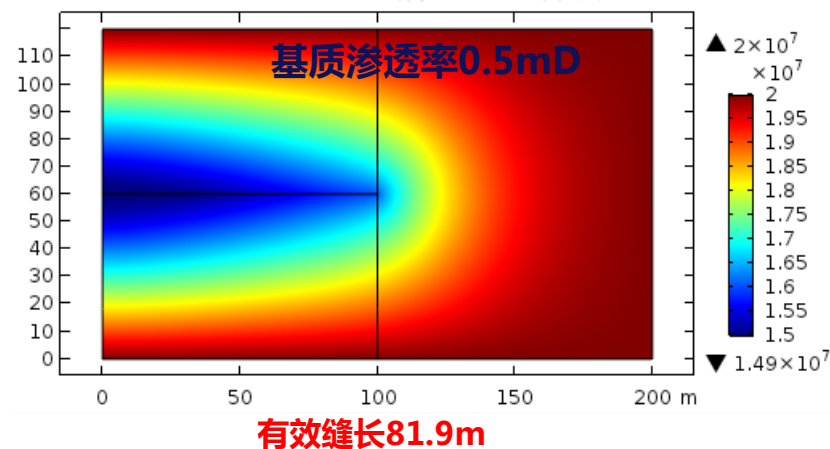
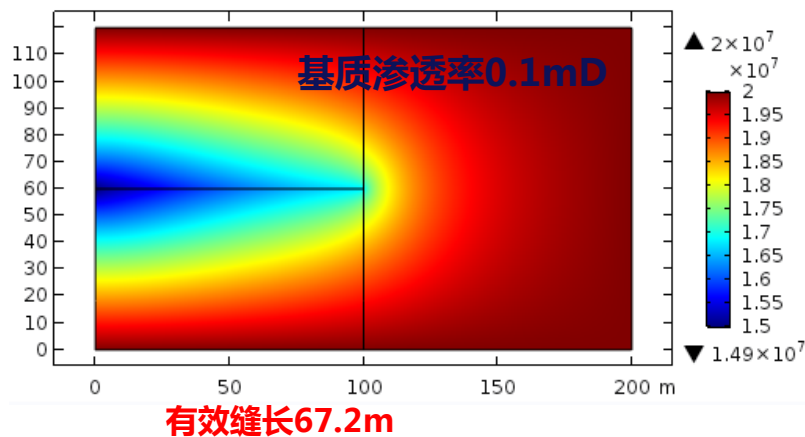
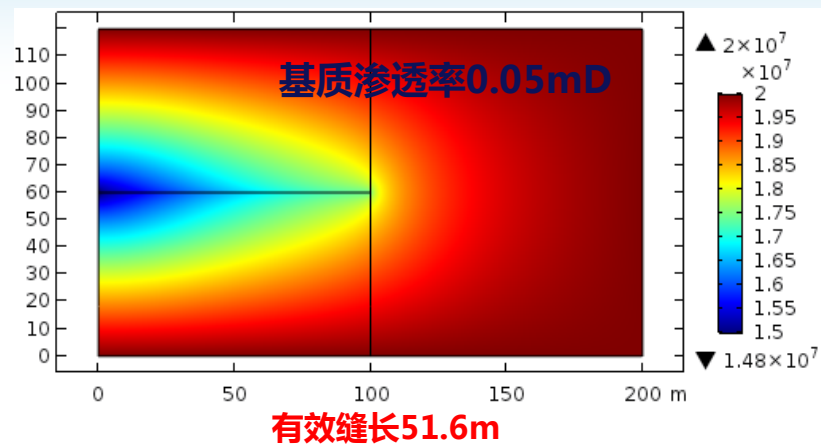
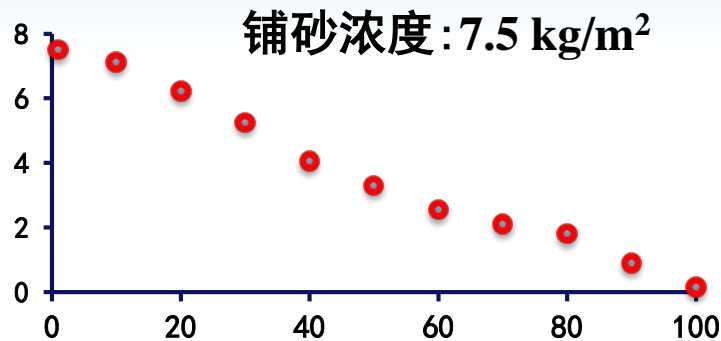
(1) 铺砂浓度与有效缝长关系影响因素分析



模型假设条件：铺砂浓度10kg/m²， 7.5kg/m²， 5kg/m²，

4 有效缝长计算结果

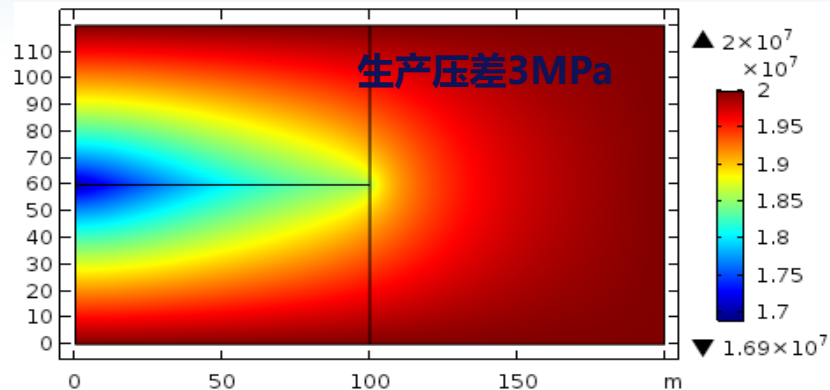
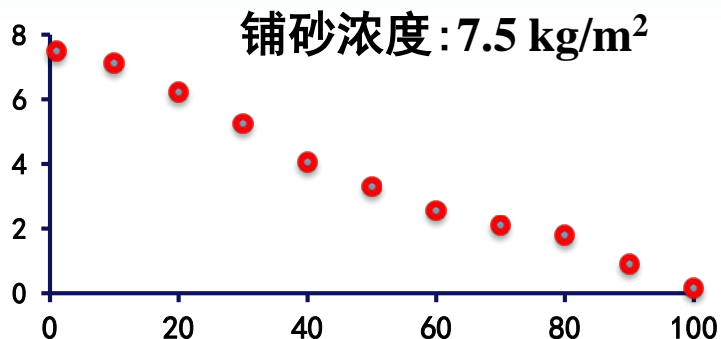
(2) 基质渗透率（启动压力梯度）有效缝长关系影响因素分析



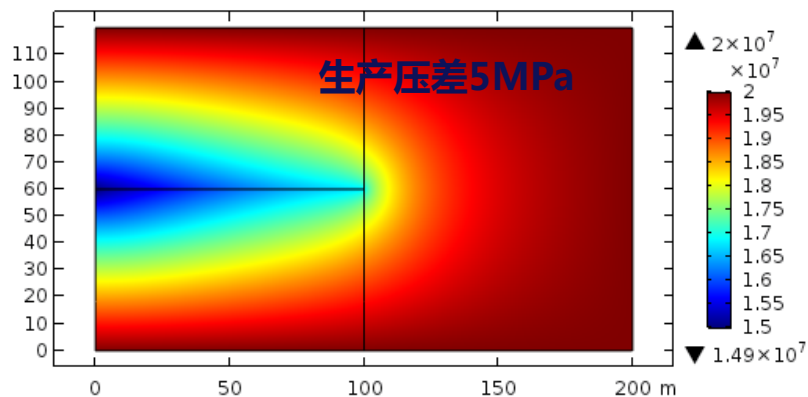
模型假设条件：渗透率 0.1 mD 、 0.5 mD 、 1 mD ，生产时间 100 天

4 有效缝长计算结果

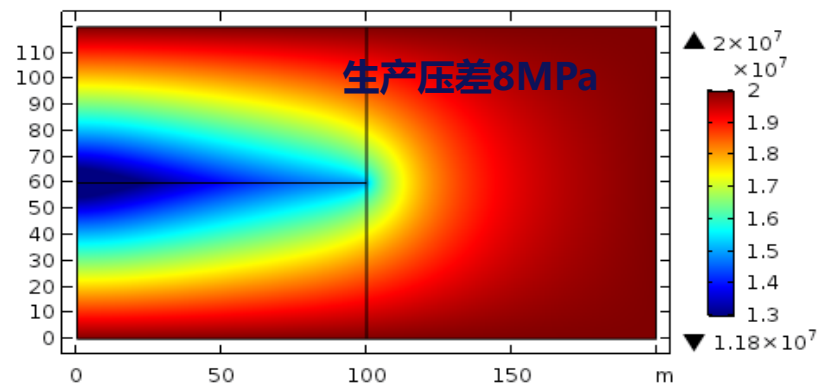
(3) 生产压差与有效缝长关系影响因素分析



有效缝长47.1m



有效缝长67.2m

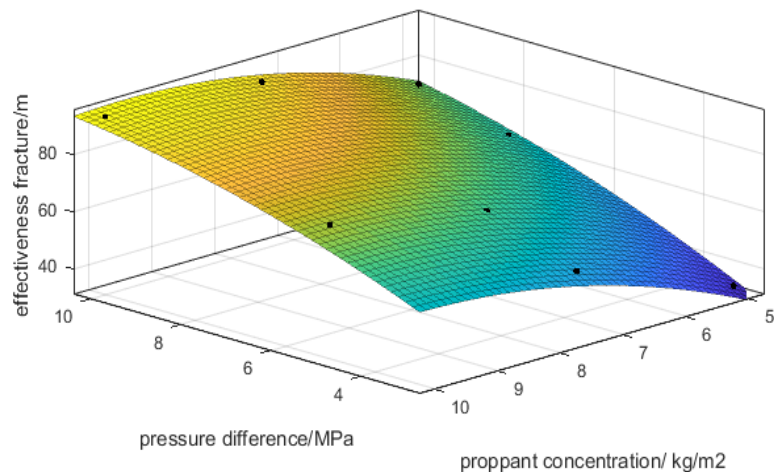
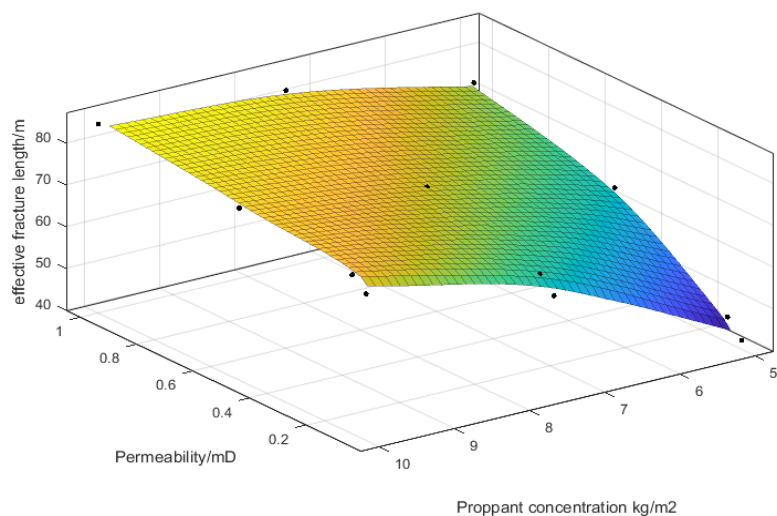


有效缝长74.6m

模型假设条件：生产压差3MPa, 5MPa, 8MPa, 生产时间100天

4 有效缝长计算结果

有效缝长多因素影响分析



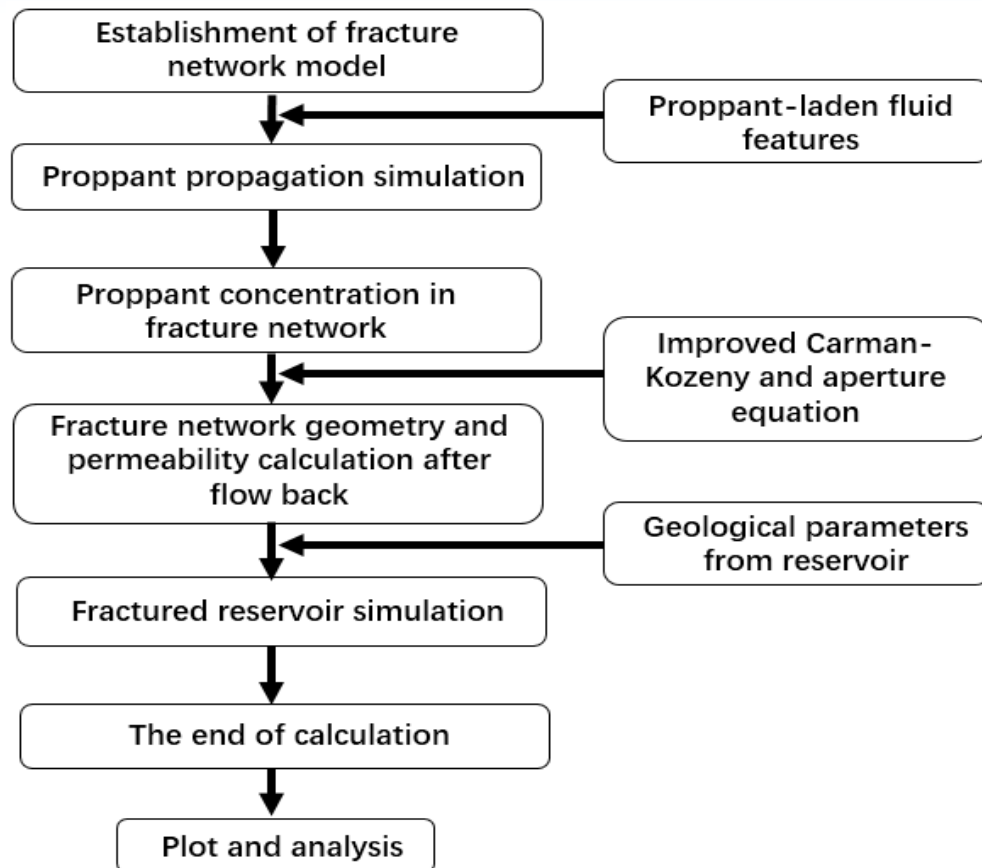
有效缝长 vs 渗透率，铺砂浓度，生产压差

有效缝长拟合计算公式

$$L_e = L \cdot \left(1 - \left(\frac{p_i - \Delta p}{p_i} \right)^a \frac{C_{fi} - C_{fe}}{C_{fi}} \left(\frac{k}{k_f} \right)^b \right)$$

5 有效改造体积计算

复杂缝网有效改造体积评价计算体系

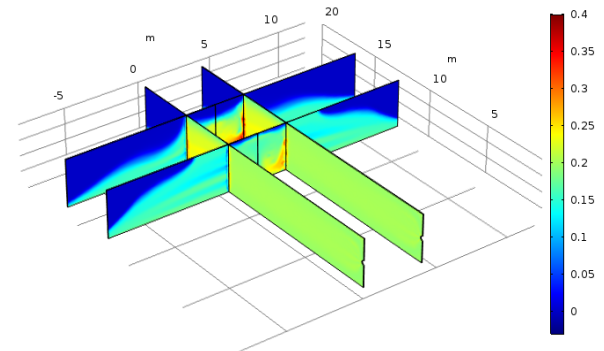
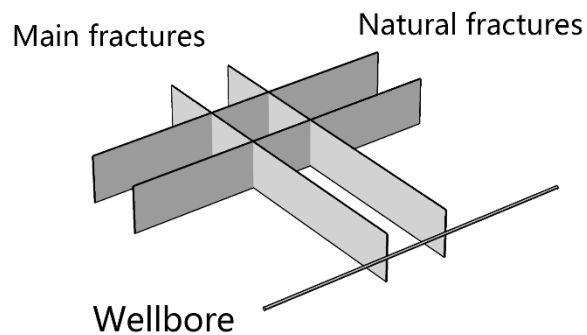


5 有效改造体积计算

致密储层有效改造体积计算

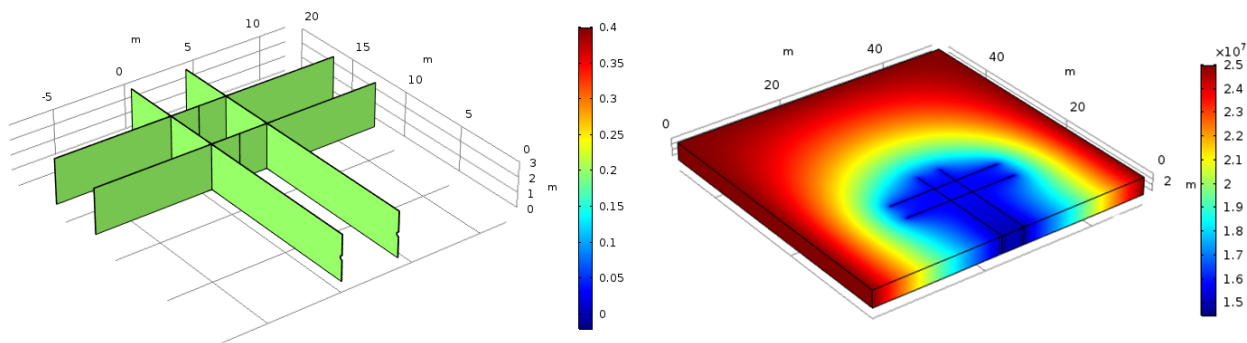
Table 3 Basic calculation parameters

参数	计算值	参数	计算值
固体密度	2100 kg/m ³	固体颗粒直径	3×10 ⁻⁴ m
注入速度	0.4m/s	注入固体体积分数	0.2
液体密度	1300 kg/m ³	液体粘度	5 mPa·s

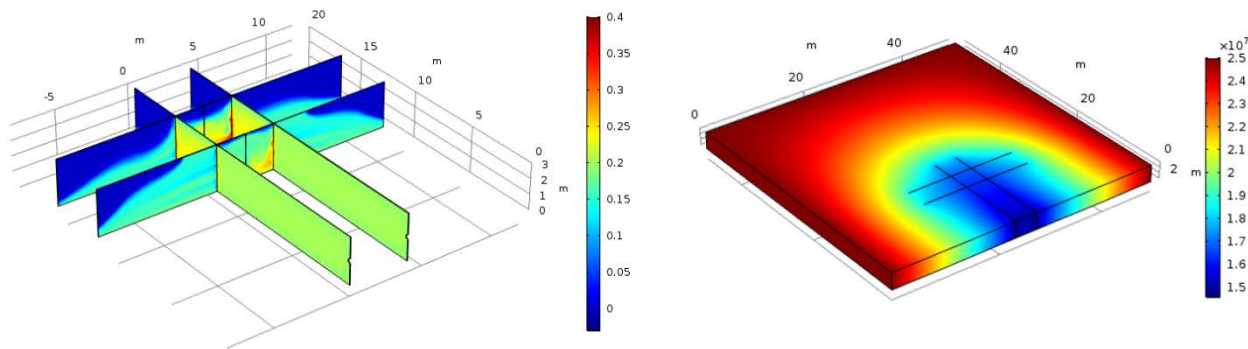


5 有效改造体积计算

裂缝网络铺砂对于裂缝网络有效改造体积的影响



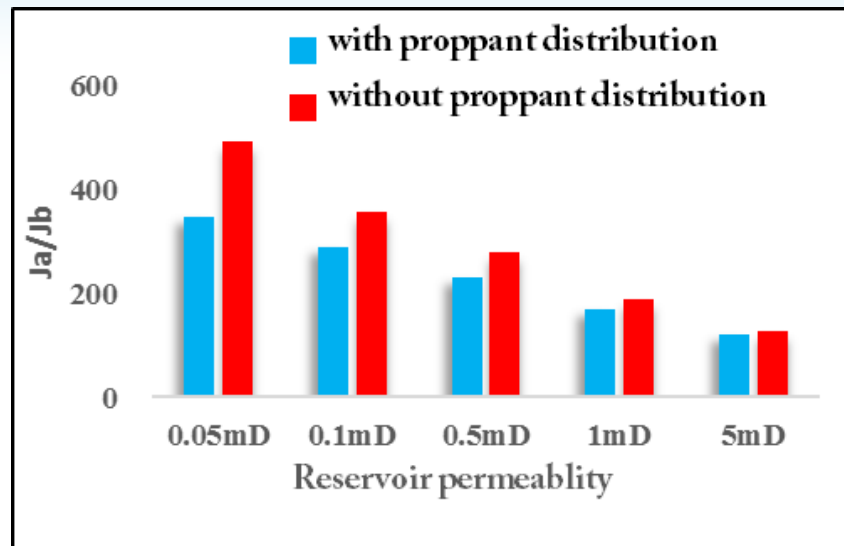
(a) Without proppant distribution



(b) With proppant distribution

5 有效改造体积计算

不同渗透率条件下，裂缝网络支撑剂均匀/不均匀分布对于产能的影响



在本文模型条件下，支撑剂不均匀分布情况与理想分布情况在产能系数大小上存在差异，且储层越致密，这种差异越明显。

当储层渗透率减小至0.05mD时，二者之间的产能系数差异甚至可以达到41.7%。当储层渗透率达到5mD以上时，产能系数比可以下降至5%以内，在该范围内使用理想化裂缝则相对合理。



谢谢!

COMSOL
CONFERENCE
2018 SHANGHAI