

# 多场耦合下煤层气在孔裂隙中的运移特征模拟

中国矿业大学（北京）

武天帅

2017年11月2日

## 目录

- 一、研究背景与意义
- 二、数值模拟
- 三、仿真结果
- 四、分析讨论
- 五、结论与展望

●煤层气 (Coalbed methane), 是指储存在煤基质块体里表面, 而且主要吸附在煤基质颗粒外表面为主, 少部分游离于煤孔隙、煤基质块体裂隙中或溶解于煤层水中的烃类气体, 以前常被称为煤矿瓦斯, 是井下煤矿开采过程中极其危险的因素。但同时煤层气也属于一种非常规天然气资源, 是非常重要的能源。加强煤层气 (煤矿瓦斯) 抽采利用, 既是预防煤矿瓦斯事故的治本措施, 也有利于减少温室气体排放、增加清洁能源, 对优化我国能源结构、促进节能减排具有重要意义。

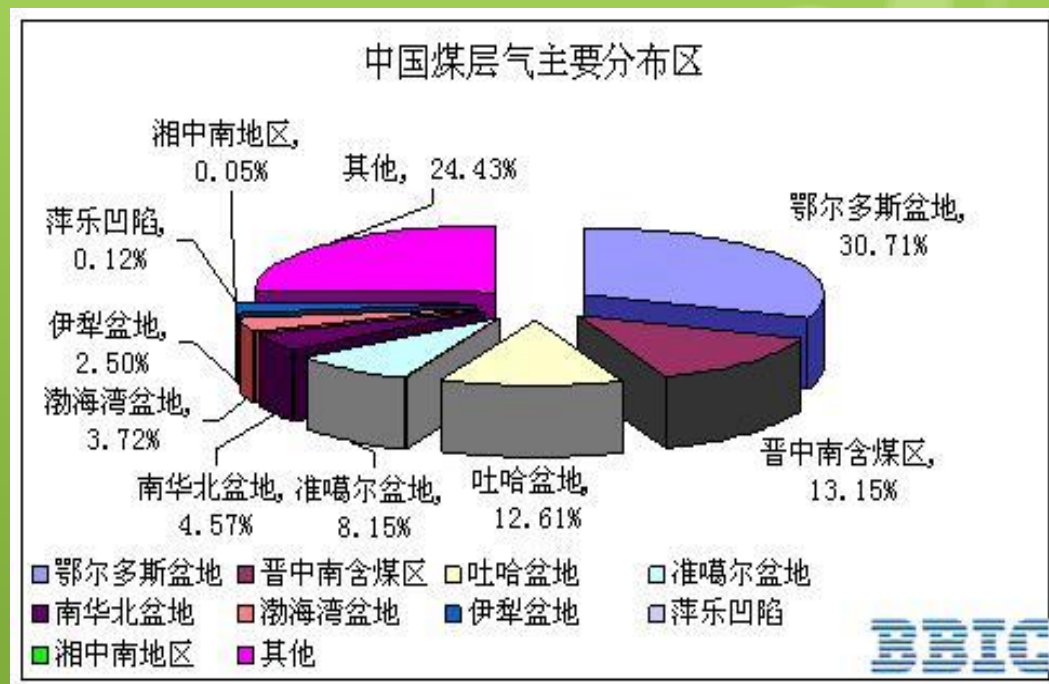


图1 中国煤层气主要分布图

●煤是煤层气的赋存环境，煤岩基质内部存在多种尺度的孔裂隙，因此将煤岩基质表征为双重孔隙或孔裂隙模型。煤岩基质内部的孔裂隙结构是煤层气运移扩散的重要通道，煤层气开采的进行会使煤储层骨架发生变形，引起孔隙率发生变化，从而孔裂隙中的气体压力也会发生变化，进而引起煤层气吸附量和骨架所受有效应力发生变化，导致煤岩特性发生变化。反过来这些变化影响煤层气的渗流扩散和煤层气压力分布。因此，煤层气渗流机理更符合实际，必须考虑煤岩体和煤层气的多场流固耦合作用。

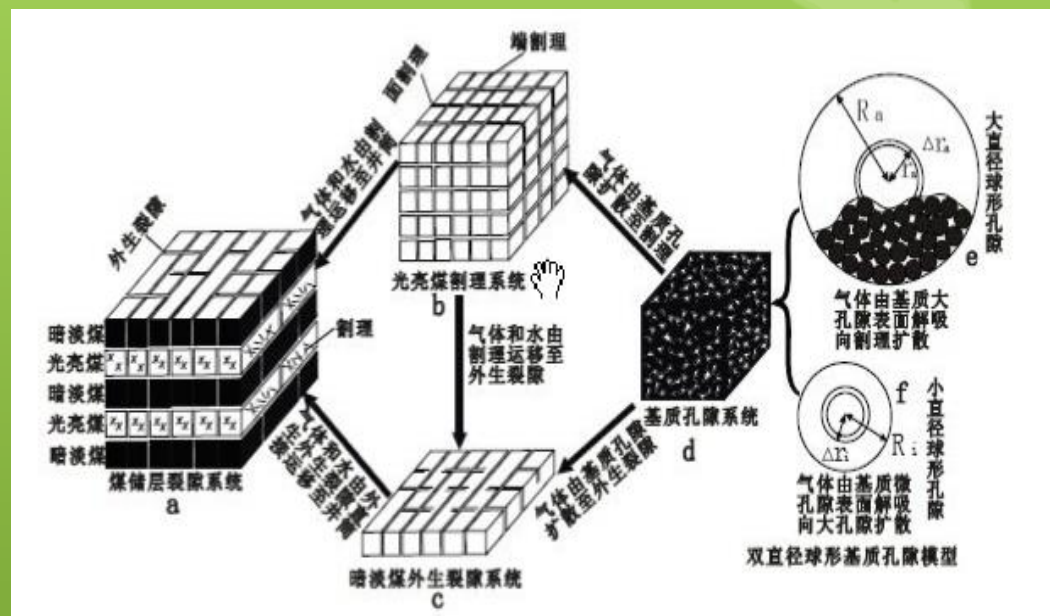


图2 煤层气储集层孔裂隙介质几何模型

● 本文在流固耦合的基础上加入物质场，考虑扩散和吸附效应，借助COMSOL软件 进行数值模拟，探讨在多场耦合作用下裂隙形态特征对于煤层气渗流的影响规律。

几何模型：

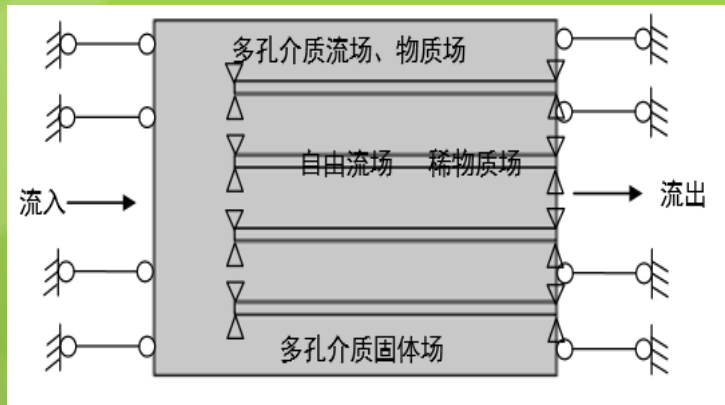


图3 几何模型示意图

● 模型尺寸宽为10cm，高为7cm。水平裂隙长度均为8cm，垂直裂隙高度均为5cm。裂隙宽度与裂隙条数有关，以保证裂隙总面积不变。一条水平裂隙时宽度为10mm，两条时分别为5mm，以此类推，四条时分别为2.5mm。孔隙介质部分采用固体力学模块、自由和多孔介质流动模块、多孔介质稀物质传递模块用三个物理场叠合在一起构成，裂隙部分采用自由和多孔介质流动模块、稀物质传递模块用两个物理场叠合在一起构成，孔隙介质与裂隙之间的交界面传递流体压力与速度，并发生吸附解析引起物质浓度变化。

对于孔隙介质部分，将其孔隙率 $e_p$ 设为固体场体应变 $e_{vol}$ 的函数，即：

$$e_p = \frac{e_0 + e_{vol}}{1 + e_{vol}} \quad (1)$$

其中 $e_0$ 为初始孔隙率，并将渗透率 $k$ 也设为体应变 $e_{vol}$ 的函数，即：

$$k = \frac{k_0}{1 + e_{vol}} \left( 1 + \frac{e_{vol}}{e_0} \right)^3 \quad (2)$$

其中 $k_0$ 为初始渗透率，这就将流体场与固体场耦合起来。另外在物质场中设定传输速度等于流场的速度，从而将流场与物质场耦合起来。并设定扩散系数为：

$$D = D_0 \cdot \frac{e_0 + e_{vol}}{1 + e_{vol}} \quad (3)$$

其中 $D_0$ 为初始扩散系数，从而将固体场与物质场耦合起来。

●通过数值模拟，可以得到在不同裂隙条数下煤岩基质的变形情况和应力分布情况，煤层气的压力分布情况和速度分布情况，以及煤层气浓度和总通量的分布情况。这些分布云图给出了多场耦合下煤层气在孔裂隙中运移的特征，形象直观地展示达到特定平衡态后各个物理场的分布规律

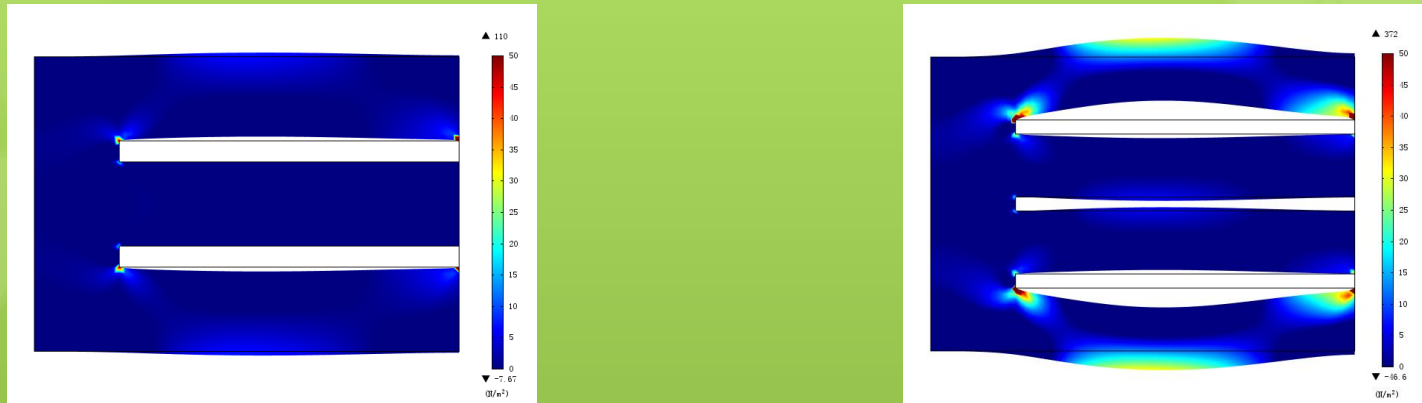
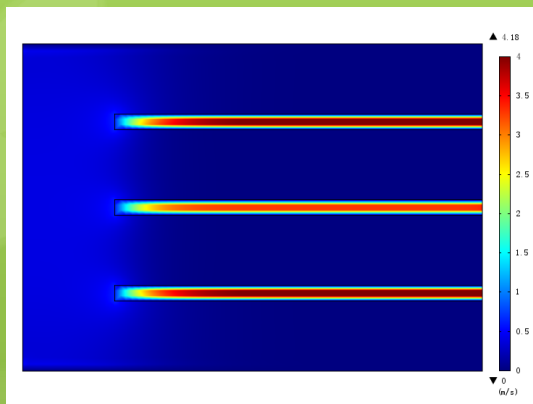
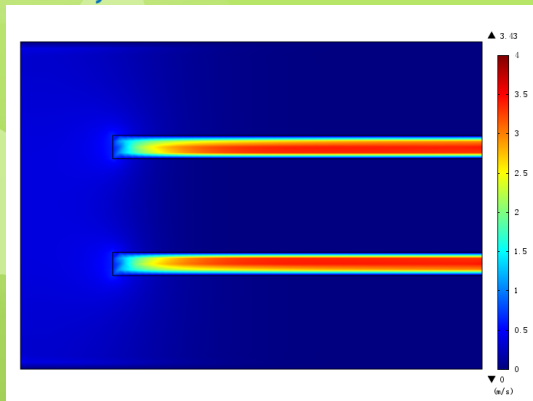


图4 第一主应力分布图

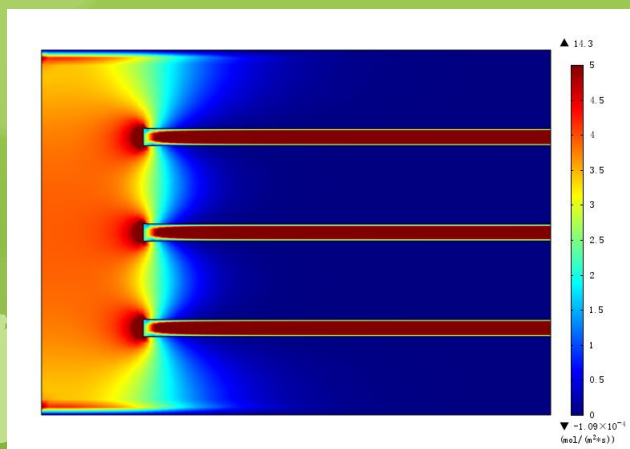
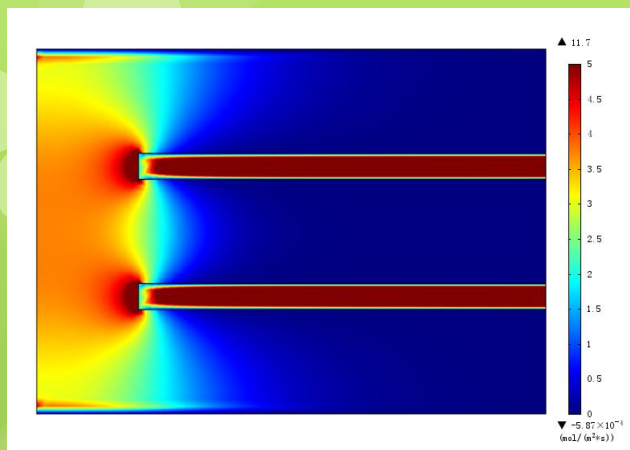
●图4所示为两条及三条裂隙时的固体场变形以及第一主应力分布情况。煤岩基质的应力对称分布，上下两边煤岩基质在裂隙中流体压力作用下，朝外变形，中间裂隙因为双向的压力作用，使其裂隙宽度变小，改变了其中流体有效流通宽度，因此平行裂隙条数增加，在一定程度上会造成煤岩基质内部有效的流通过程变小，这将阻碍煤层气在其内部的运移，从而影响煤层气的流出速度和浓度。另外可以看到在裂隙前端有着明显的应力集中现象，拉应力显著增大，这就有可能导致裂隙发生扩展，进而影响整个裂隙缝网的形态和连通性。



● 图5所示为两条及三条裂隙时的流体场水平速度分布情况。从图中可以看出，煤层气的流动主要发生在裂隙内，煤岩基质内部流体的流动速度较小。这是因为在煤岩基质内为达西渗流，而当前压力梯度并不很大，煤基质渗透率也较低所导致。仔细比较后可以发现，中间裂隙中的速度要比上下两条裂隙中的速度小一些，这是因为中间裂隙受到挤压而逐渐闭合。

图5 水平速度分布图





● 图6所示为两条及三条裂隙时煤层气在水平方向的总通量分布情况。从图中可以看出，煤层气的扩散通量主要是在裂隙内以及裂隙前端的基质内，与当前压力梯度方向一致。另外，在裂隙面积占总煤岩基质面积一定情况下，随着平行裂隙条数的增多，出口处通量有减小的趋势。

图6 水平方向总通量分布图

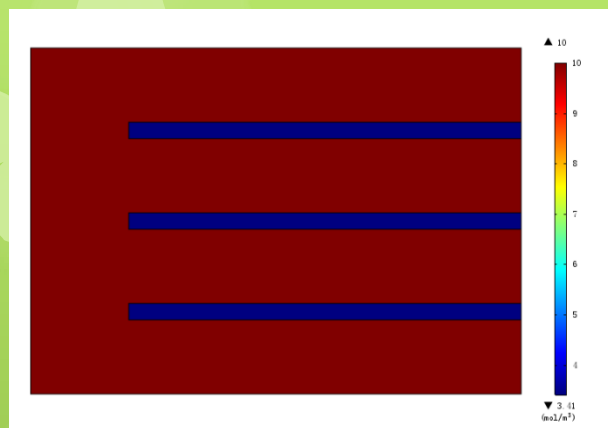


图7 浓度分布图

●图7所示为煤层气浓度的分布情况。从图中可以看出，煤层气在煤基质和煤裂隙中的浓度差异较大，这是因为煤基质对煤层气的吸附作用使得一部分煤层气无法渗透到煤裂隙中。另外图中所示煤基质中的浓度基本一致，煤裂隙中的浓度也基本一致，这是因为当前模型尺度不大，而煤层气扩散系数又较大，所以达到平衡后基本没有浓度差。

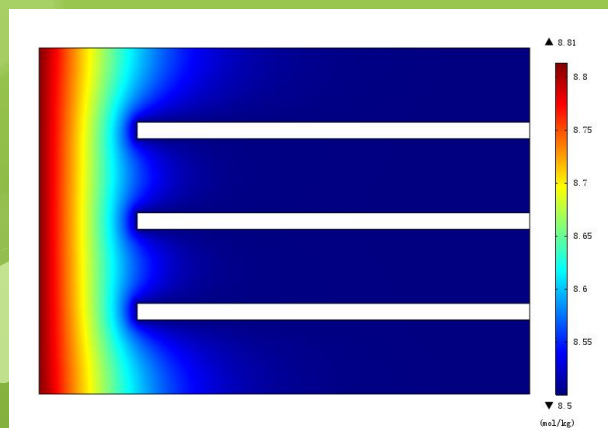
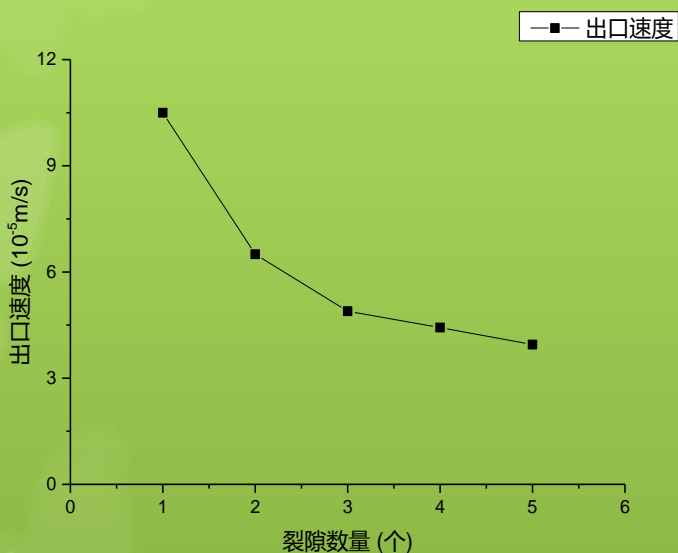


图8 吸附浓度分布图

●图8所示为煤基质中吸附的煤层气浓度分布情况。从图中可以看出，吸附浓度分布规律与压力梯度分布基本一致。这表明在压力较大时，吸附能力也较强。

●借助COMSOL软件的后处理功能，对裂隙出口截面的流速、浓度进行线平均函数计算，可得到出口截面的平均流速和平均浓度；对裂隙出口截面的总通量进行线积分函数计算，可得出出口截面的平均流量。



(1) 当煤岩内部裂隙的宽度值大小越小时，流体在流动过程中对煤岩基质边壁产生作用力，使煤岩基质产生了一定大小的应力、应变，这将造成煤岩内部流体煤层气有效的流通过程渐渐减小，增大了煤层气流动所受的阻力。

图9 不同平行裂隙数量下出口速度关系图

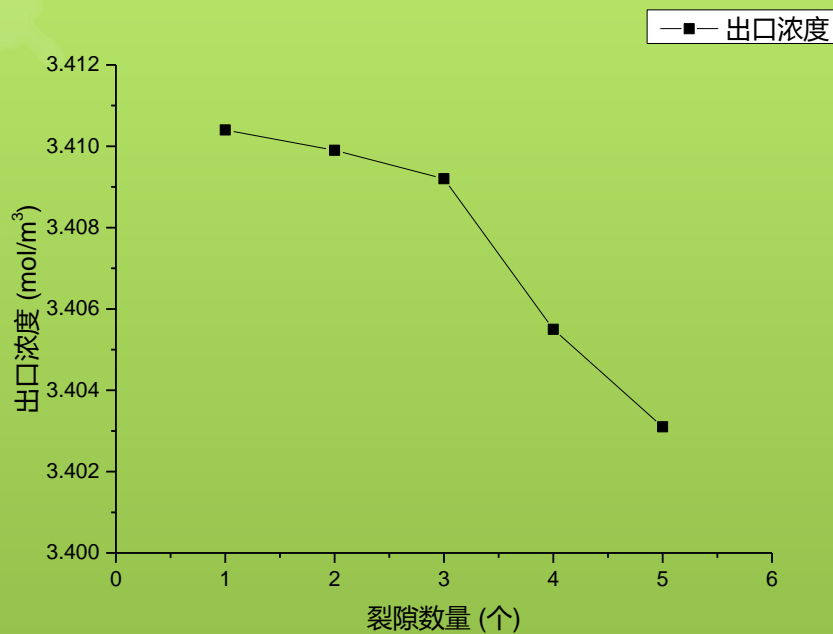
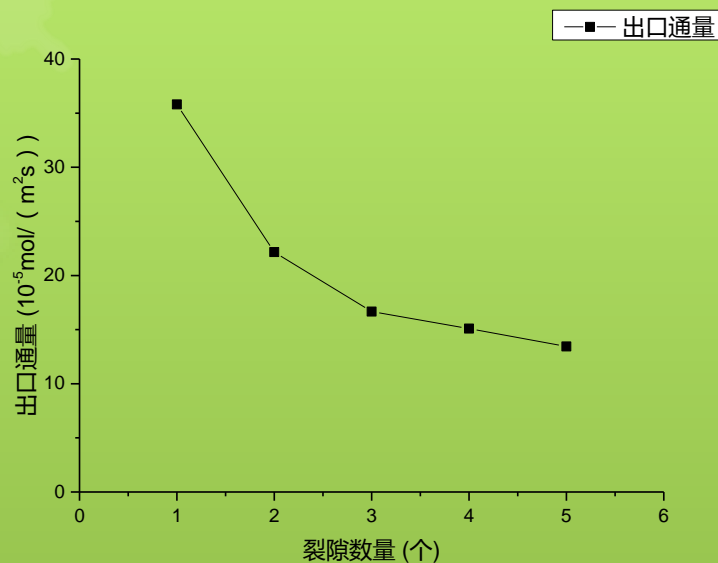


图10 不同平行裂隙数量下出口浓度关系图

(2) 这与裂隙增多后煤岩基质中应力增大，孔隙压力增大，从而导致煤岩基质吸附能力增强有关，另外与裂隙增多后煤层气速度下降有关。因此在工程抽采煤层气、油气等资源时，当裂隙面积与总面积比例一定，且裂隙长度一定时，应尽可能的形成一条主裂隙，这样有助于增加出口浓度值。



(3) 这是因为在入口压力和浓度一定的情况下，随着裂隙数量增多，煤岩基质对煤层气的阻碍因子变大，溶质的速度也逐渐减小，被煤岩基质吸附的煤层气增多，导致煤岩裂隙出口的浓度降低，所以出口处煤层气的通量也随之减少。

图11 不同平行裂隙数量下出口通量关系图

## 结论与展望

- 借助COMSOL多物理场仿真软件，可以模拟多场流固耦合下煤层气在煤岩孔裂隙结构中的渗流、扩散、吸附等运移过程，为系统研究不同边界条件和不同孔裂隙形态下的运移特征提供基础。当前针对沿平行于压力梯度方向的不同条数裂隙的拟一维数值模拟揭示了各物理场之间的复杂耦合关系。
- 数值计算结果表明，在入口压力和浓度一定的情况下，随着裂隙数量的增加，煤层气出口速度、浓度以及通量降低，这就表明沿压力梯度方向的单一主裂隙要比平行分散多裂隙更有利于煤层气的运移。
- 关于更复杂的裂隙分布以及更接近实际工况的边界条件可以在此基础上借助COMSOL软件模拟实现，文中所述方法亦可推广到真实的二维和三维模型中。

谢谢