

多场耦合条件下岩石孔-裂隙模型的渗流特征模拟

赵磊磊¹, 程鑫辉¹, 司凯¹, 彭瑞东^{1,2}

1.中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京

2.中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京

摘要: 鉴于煤岩体“孔—裂隙”双重介质属性, 利用 COMSOL 软件建立了含有孔、裂隙结构的煤岩细观结构模型。在模型中采用固体力学模块、层流模块、达西定律模块、稀物质传递模块以及多孔介质稀物质传递模块, 结合软件自带耦合方式和自定义耦合方式实现了多物理场的相互耦合作用。针对不同裂隙出口压力情况进行了数值模拟计算和分析。结果表明在裂隙壁附近应力过渡明显, 渗透率变化显著, 且在裂隙壁附近出现了明显的拉应力, 极有可能发生损伤破坏。进一步分析还发现在裂隙壁附近存在明显的临界位置, 使得应力值与裂隙出口压力值呈“先正相关-后负相关”的关系过渡, 渗透率与裂隙出口压力值呈“先负相关-后正相关-再负相关”的关系过渡。这一发现对于控制岩石压裂缝网的布局具有一定指导和借鉴意义。当前研究初步揭示了多场耦合下岩石孔裂隙结构对渗流特征的影响机制, 同时为开展不同尺度下储层岩石中的气体运移模拟提供了切实可行的多场耦合数值模拟方法。

关键词: 岩石; 多场耦合; 孔—裂隙模型; 渗流特征; 渗透率

1. 引言

煤层气是贮存在煤基质中的烃类气体, 既是井下煤炭开采过程中极其危险的因素, 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^[1]。中国煤层气资源储量丰富, 目前正在积极开采和利用煤层气资源^[2]。

煤层气的储存方式主要以吸附为主, 然而煤体属于典型的“孔-裂隙”结构^[3], 吸附于煤基质中的煤层气会在一定条件下发生解吸, 游离于孔隙和裂隙中, 且在孔隙和裂隙中符合不同的运移规律。在煤层气抽采过程中, 由于煤基质应力作用, 煤体中的孔隙和裂隙分布及形态会发生相应变化, 进而反过来影响煤层气的流动和煤层气压力的分布, 使得煤层气的存储和扩散规律变得十分复杂, 即在煤层气开采过程中需要同时涉及到固体力学场、渗流场, 甚至温度场的相互耦合作用。因此说, 要正确高效的开采和利用煤层气资源, 必须弄清多场耦合条件下的煤岩基质中煤层气运移规律。

国内外专家学者利用理论推导、力学实验和数值模拟的方法对多场耦合条件下的煤层气渗流特征展开了大量研究^[4-7], 但目前对于煤层气的多场耦合实现方法还不够完善。COMSOL 有限元软件具有强大的多物理场耦合分析功能, 用户可以采用软件自带的耦合计算模式或者自定义多物理场间耦合方式。本文利用 COMSOL 软件中的固体力学模块、层流模块、达西定律模块、稀物质传递模块以及多孔介质稀物质传递模块, 通过自定义参数耦合

和边界耦合的方式实现了多物理场的相互耦合作用, 对不同裂隙出口压力条件下的煤层气渗流特征进行了分析探讨。

2. 数值模型

考虑到煤体的“孔-裂隙”结构特点, 本文采用 COMSOL 软件建立了单一裂隙结构模型, 裂隙采用圆锥和圆柱体组合建模, 为方便模拟计算, 选取 1/4 模型进行分析, 如图 1 所示, 长方体煤岩基质长 5mm, 宽 1mm, 高 1mm; 圆柱体半径 0.1mm, 高 2.5mm; 圆锥体半径 0.1mm, 高 1mm。

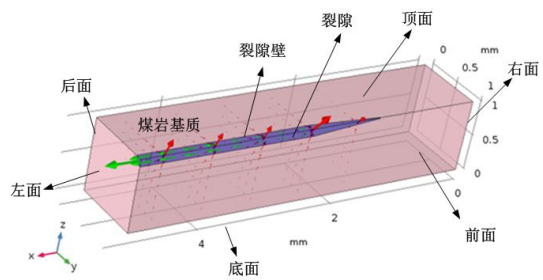


图 1 数值模型示意图

模型中通过在煤体基质中引入孔隙率的方法实现对孔隙介质的模拟, 并认为煤层气在孔隙介质中的渗流符合达西定律, 采用固体力学模块、流体力学达西定律模块、多孔介质稀物质传递模块相耦合的方式实现孔隙介质的模拟计算。对于裂隙介质而言, 煤层气在其内渗流符合层流规律, 因此通过固体力学模块、流体力学层流模块、稀物质传递模块相耦合的方式实现裂隙介质的模拟计算。另外,

设置模型的孔隙率和渗透率为动态变量^[8-10]，在给
定某一初值后随体应变变化而改变。

固体力学场中，将模型顶面、前面设置为对称；
右面、底面、后面设置位移边界条件以模拟地应力
5MPa 的情况。达西场中，将模型顶面、前面设置为
对称；右面、后面、底面设为压力入口，压力值为
5MPa，以模拟储层压力；裂隙壁设为压力流出，压
力值为层流场计算值，进而实现与层流场耦合。层
流场中，将裂隙顶面、前面设为对称；裂隙壁设为
速度入口，速度值为达西定律计算值，以实现与达
西场的耦合；裂隙尾部设为压力流出。多孔介质稀
物质场中，将煤岩基质的顶面、前面、左面设置为
对称；右面、后面、底面设为浓度入口，浓度值为
200mol/m³；裂隙壁面设置为通量出口，通量值为稀
物质场计算值。稀物质场中，将裂隙顶面、前面设
为对称；裂隙壁面设为通量入口，通量值与多孔介
质稀物质场中相反，以实现与多孔介质稀物质场的
耦合；裂隙尾部设为流出。

模型中采用的煤体及煤层气物理力学参数如
表 1 所示。

表 1 煤层气参数值

名称	参数取值
煤岩基质的杨氏模量	1.4 GPa
煤岩基质的泊松比	0.3
煤岩基质的密度	1300 kg/m ³
煤岩基质的初始孔隙率	0.03
煤岩基质的初始渗透率	1×10 ⁻¹⁵ m ²
煤层气密度	0.717 kg/m ³
煤层气动力粘度	1.084×10 ⁻⁵ Pa·s
煤层气可压缩性	0.324 MPa ⁻¹
扩散系数	1×10 ⁻⁸ m ² /s

3. 仿真结果分析

3.1 不同裂隙出口压力条件下应力分布情况

模型计算过程中，为了分析不同抽采压力的影
响，分别对裂隙出口压力为 0.5MPa、1.0MPa、
2.0MPa、3.0MPa、4.0MPa 条件下的数值模型进行
计算，不同模型中的第一主应力分布云图如图 2 所
示。提取模型边界至裂尖的第一主应力数据，绘制
出应力曲线如图 3 所示。

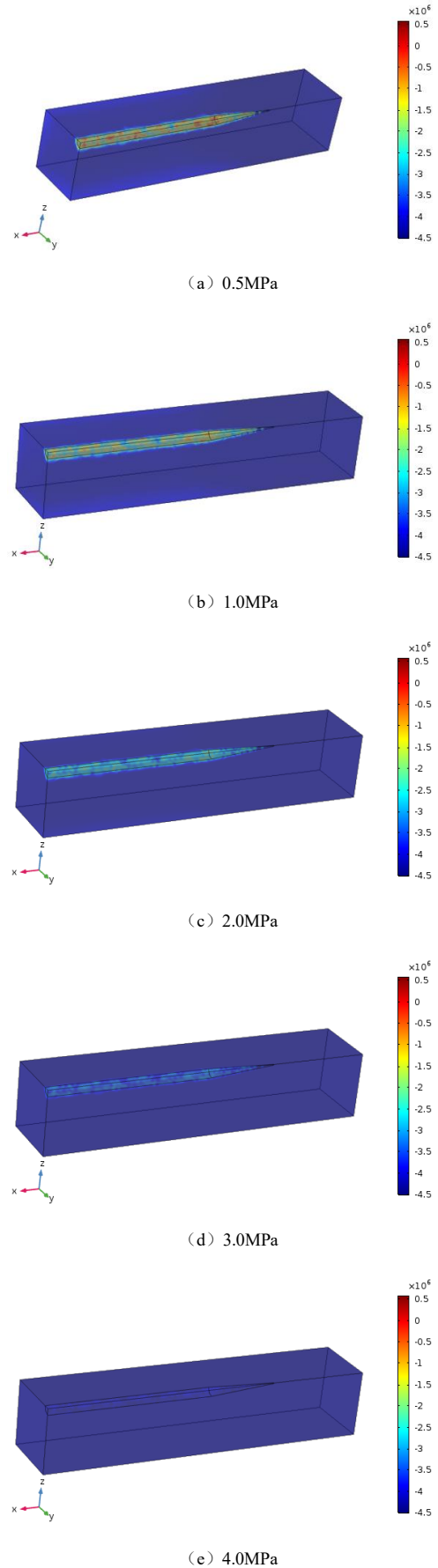


图 2 不同裂隙出口压力条件下第一主应力分布云图

由图2中不同模型中第一主应力分布云图对比可以看出,裂隙壁附近应力过渡明显,随着裂隙出口处压力的逐渐减小,裂隙壁附近应力逐渐由压应力转变为拉应力。考虑到煤岩基质材料抗拉强度一般很低,这也就意味着在裂隙壁附近,尤其是裂尖位置处,极有可能产生损伤破坏,从而有利于煤层气抽采活动的进行。

图3曲线中提取数据测线为模型底面至裂隙尖端的垂线上。横坐标0点处为模型边界,横坐标为1处为裂隙尖端位置。为便于观察,将裂尖附近处的变化在图b中给出。

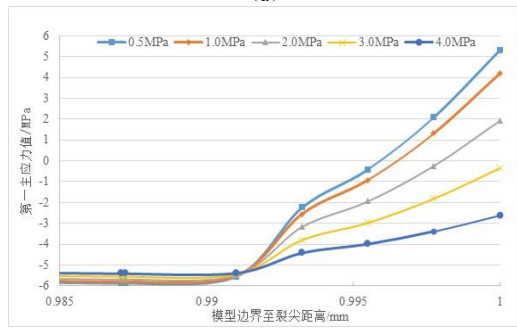
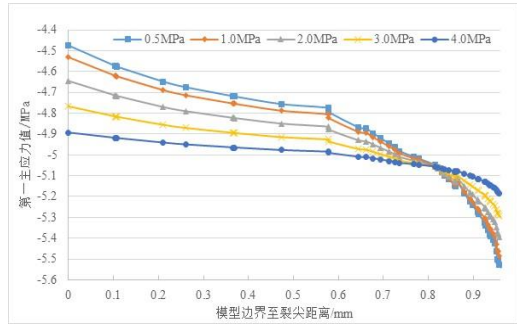
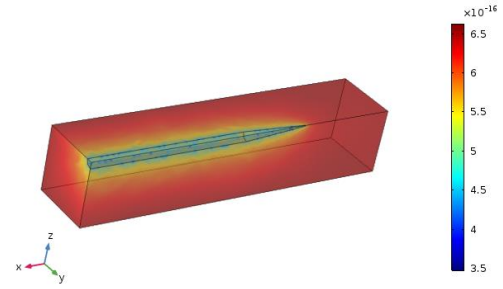


图3 不同裂隙出口压力条件下第一主应力分布曲线

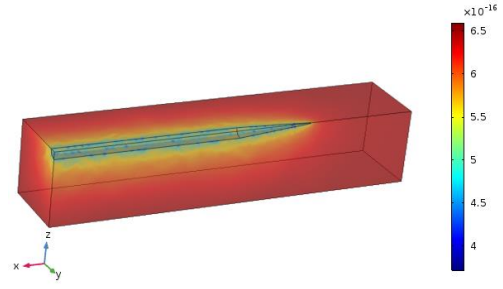
由曲线可以看出,在远离裂隙的煤岩基质中应力均为压应力;压应力值与裂隙出口处压力值成正相关关系,裂隙出口处压力值越大,煤岩基质中压应力越大;各模型中应力值均随靠近裂隙壁而表现出增大的趋势;在裂隙尖端附近出现了明显了拉应力,且拉应力值与裂隙出口处压力值成负相关关系,裂隙出口处压力值越小,裂尖处的拉应力值越大;在裂隙壁附近处存在明显的临界位置,使得应力值随裂隙出口处压力值呈“先正相关-后负相关”的关系过渡。

3.2 不同裂隙出口压力条件下渗透率分布情况

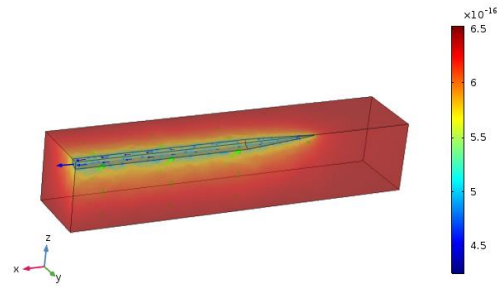
除此之外,对不同裂隙出口压力条件下的渗透率分布情况进行分析,不同模型中的渗透率分布云图如图4所示。提取模型边界至裂尖的渗透率数据,绘制出应力曲线如图5所示。



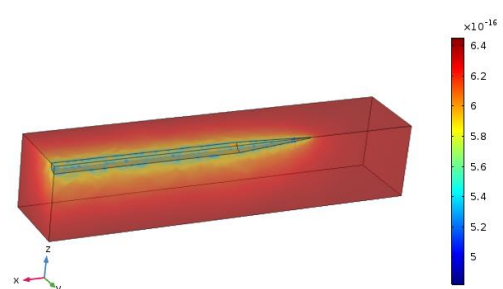
(a) 0.5MPa



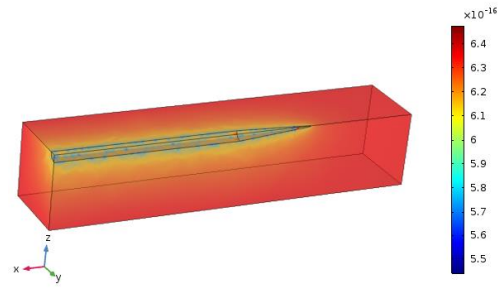
(b) 1.0MPa



(c) 2.0MPa

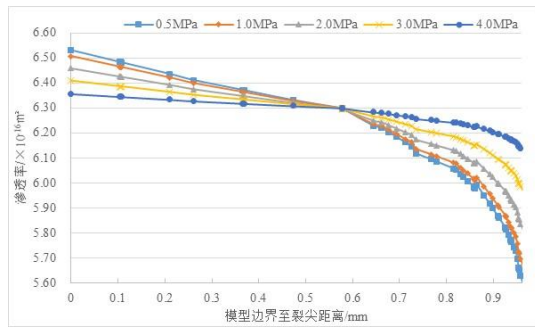


(d) 3.0MPa

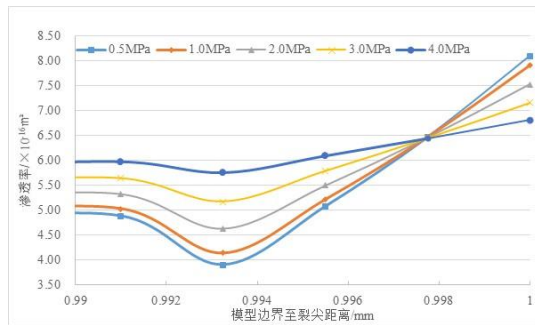


(e) 4.0MPa

图4 不同裂隙出口压力条件渗透率分布云图



(a)



(b)

图5 不同裂隙出口压力条件下渗透率分布曲线

结合图4及图5可以看出,不同裂隙出口压力条件下的渗透率分布规律与第一主应力类似,在远离裂隙的煤岩基质中渗透率与裂隙出口压力值成负相关关系;各模型中的煤岩基质渗透率均随靠近裂隙而表现出先减小后增大的趋势;在裂隙尖端附近渗透率明显增大,且裂隙出口压力值越大,裂尖渗透率值越大;在裂隙壁附近存在明显的临界位置使得渗透率与裂隙出口压力值呈“先负相关-后正相关-再负相关”的关系过渡。鉴于渗透率的这一变化规律,在调节抽采压力以及缝网布局时需开展进一步的优化设计。

4.结论

本文利用COMSOL软件建立了煤体“孔-裂隙”结构模型,并结合软件自带耦合方式和自定义耦合方式实现了固体力学场、层流场、达西场、稀物质传递场及多孔介质稀物质场的相互耦合作用。通过改变模型中裂隙出口压力值进行计算分析发现裂隙壁附近应力过渡明显,渗透率变化显著,且在裂隙壁附近出现了明显的拉应力,极易发生裂隙损伤和扩展;且在裂隙壁附近存在明显的临界位置,使

得应力值随裂隙出口压力值呈“先正相关-后负相关”的关系过渡,渗透率与裂隙出口压力值呈“先负相关-后正相关-再负相关”的关系过渡。

参考文献

- [1] 谢和平,周宏伟,薛东杰,等. 我国煤与瓦斯共采:理论、技术与工程[J]. 煤炭学报,2014,39(8): 1391-1397.
- [2] 孙可明,潘一山,梁冰,2007. 流固耦合作用下深部煤层气井群开采数值模拟. 岩石力学与工程学报 (05), 994-1001.
- [3] 朱斌,高峰,杨建文,王国华,陈智,2014. 深部薄层煤岩体裂隙-孔隙双渗流模拟研究. 中国矿业大学学报 43 (06), 987-994.
- [4] 冯增朝,赵阳升,文再明. 煤岩体孔隙裂隙双重介质逾渗机理研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24 (2): 236-240.
- [5] 赵阳升. 多孔介质多场耦合作用及其工程响应[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [6] 尹光志,鲜学福,王登科,等. 含瓦斯煤岩固气耦合失稳理论与实验研究[M]. 北京: 科学出版社,2011.
- [7] Zhou Hongwei, Liu Jinfeng, Xue Dongjie, et al. Numerical simulation of gas flow process in mining induced crack network. International Journal of Mining Science and Technology, 2012, 22(6): 793-799.
- [8] 祐文彬. 流固耦合下煤层气吸附解吸及渗流规律的数值模拟研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京), 2015.
- [9] 武天帅. 流-固耦合下煤层气运移特征的三维数值模拟研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京), 2018.
- [10] 程鑫辉. 多场耦合下深部岩石中的渗流与损伤规律模拟[D]. 北京:中国矿业大学(北京), 2019.

致谢

本文研究工作得到了“中央高校基本科研业务费专项资金(2009QM03)”资助,也非常感谢COMSOL公司在数值模拟中给予的支持与帮助。