



移动扫码阅读

帅官印,张永波,郑秀清,等.压裂层双重介质中煤层水渗流规律仿真试验研究[J].煤炭科学技术,2019,47(5):145-150.doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.05.023

SHUAI Guanyin,ZHANG Yongbo,ZHENG Xiuqing,et al.Simulation of dual-porosity medium seepage flow in fractured zone[J].Coal Science and Technology,2019,47(5):145-150.doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.05.023

压裂层双重介质中煤层水渗流规律仿真试验研究

帅官印,张永波,郑秀清,陈军锋,张志祥,赵雪花

(太原理工大学 水利科学与工程学院,山西 太原 030024)

摘要:为了探究发生井间干扰前煤层水的渗流规律及双重介质的渗透性规律,利用 COMSOL Multiphysics 多物理场仿真软件,对煤层气开采压裂煤储层后形成双重介质中煤层水渗流特性进行了仿真试验研究。试验结果表明:排水一段时间后,裂缝区域裂隙水压力明显低于周围煤岩孔隙水压力;在任意一条垂直于裂缝的压力切面上,裂缝处压力最低,向两边压力逐渐升高;沿裂缝方向,裂缝末端压力最高,靠近井筒,压力降低,井筒处压力最低;排水时,裂缝中的煤层水最先进入井筒,并且水头降低很快,同时,在压差作用下,煤岩中的水不断渗流进入裂缝,再经裂缝流入井筒;将测得的流速水头数据拟合后,得到双重介质 x 方向上渗透系数为 0.0135 m/s , y 方向渗透系数为 $8 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ 。研究结果可为分析煤层气开采对地下水水动力条件和储存条件的影响提供参考。

关键词:煤层气;水力压裂;双重介质;煤层水;渗流规律

中图分类号:TD741

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2019)05-0145-06

Simulation of dual-porosity medium seepage flow in fractured zone

SHUAI Guanyin,ZHANG Yongbo,ZHENG Xiuqing,CHEN Junfeng,ZHANG Zhixiang,ZHAO Xuehua

(Department of Hydraulic Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: This paper focuses on studying the coalbed water flow and dual-porosity medium permeability before the inter-well interference. Coalbed water flow in dual-porosity medium formed by fracturing coal seams is simulated using COMSOL multi-physics software. The results show that the fissure water pressure in fissure zone is significantly lower than the pore water pressure in the coal after a period of draining. The pressure at the fracture is the lowest and increases gradually toward both sides on any tangential plane. Along the direction of fracture, the pressure at the end of the fracture is the highest while the pressure is the lowest at the wellbore. When draining, coalbed water of fracture firstly enters the wellbore with rapid decrease of head. Due to differential pressure, the coalbed water flows into the fracture continuously, then flows into the wellbore. According to the measuring datas of flow velocity head, the permeability of the dual-porosity medium is 0.0135 m/s in the x -direction and $8 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ in the y -direction. The research results can provide the reference for the analysis of the influence of CBM exploitation on the hydrodynamic and storage conditions of ground water.

Key words: coalbed methane; hydraulic fracturing; dual-porosity medium; coalbed water; seepage flow

0 引 言

原始煤储层是一个由微孔隙和天然裂隙组成的孔隙裂隙系统,而煤层气以游离气、吸附气和溶解气的形态赋存在这些孔隙裂隙系统、煤基质以及煤层水之中^[1-2]。由于储层的低渗透特性,决定了开采煤层气时,必须对气井实施水力压裂增产措施,才能实现煤层气的商业化生产^[3-5]。水力压裂各气井会使煤

层产生延伸方向较有规律、分布较均匀的人工压裂缝,相比煤层中随机分布数量巨大的天然裂缝,压裂缝在数量上远不及天然裂缝,但尺寸却远大于天然裂缝^[6-7]。因此,可以将人工压裂缝看作裂隙系统,而天然裂缝与原始孔隙可以共同等效成多孔岩体系统。两者组合之后,煤储层可以看作双重介质,其中由人工压裂缝构成的裂隙系统是煤层水流动的主要通道,而多孔岩体系统由于空隙总体积较大而渗透

收稿日期:2018-12-11;责任编辑:王晓珍

基金项目:山西省基础研究资助项目(2014012002)

作者简介:帅官印(1992—),男,山西朔州人,硕士研究生。E-mail:2223689783@qq.com

通讯作者:张永波(1962—),男,山西晋城人,教授,博士生导师。

性相对较弱,可看作煤层水的存储空间^[8]。目前,对煤储层双重介质研究更多关注渗流对煤层气井产能的影响。秦跃平等^[9]通过建立双重介质中煤层气双渗流数学模型,模拟了煤层气在煤基质内的解吸、运移以及在裂隙中的流动过程;Prob Thararoop等^[10]采用双重介质方法探索了煤基质收缩效应以及地下水存在条件下气体流动的规律,并研究了CO₂注入地层对提高煤层气采收率的作用。然而,现有成果中较少关心煤层气开采引起的地下水环境问题。比如,压裂造成的含水层结构破坏以及排水采气对地下水水量的影响等。

针对目前研究存在的问题,笔者以山西省鄂东煤层气田保德区块为研究背景,以直井压裂4+5号煤层形成的双重介质为研究对象,通过构建单口直井影响范围内的压裂层三维几何模型,进而基于多物理场耦合软件COMSOL Multiphysics进行渗流仿真试验,研究了煤层气直井压裂后形成的双重介质中发生井间干扰前煤层水的渗流规律和双重介质渗透性规律,以期为进一步研究煤层气开采对地下水水动力条件和储存条件影响奠定基础,最终实现采气的同时尽量减少对地下水环境影响这一目的。

1 仿真试验模型建立

渗流有限元计算分析实质上就是求解渗流场所满足的偏微分方程和边界条件。COMSOL预置了多孔介质和地下水流模块,包含了渗流计算中常用到的基本微分方程与边界条件,可以方便地将孔隙介质与裂隙介质耦合并进行渗流计算分析^[11]。

1.1 基本方程

基于Darcy定律和质量守恒定律,确定多孔介质渗流连续性方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon_p) + \operatorname{div}\left\{\rho\left[-\frac{\kappa}{\mu}(\nabla p + \rho g \nabla D)\right]\right\} = Q_m \quad (1)$$

式中: t 为时间; ρ 为流体密度; ε_p 为多孔介质孔隙率; div 为散度; ∇ 为梯度算子; κ 为多孔介质渗透率; μ 为流体动力黏度; p 为压力; g 为重力加速度; D 为水头; Q_m 为源项。

根据水的压缩性和多孔介质基体的压缩性,确定多孔介质储水量的变化,公式为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_p \rho) = \rho(\varepsilon_p \chi_f + \chi_p) \frac{\partial p}{\partial t} \quad (2)$$

式中: χ_f 为水的压缩率; χ_p 为基体等效压缩率。

水在裂隙中的流动服从Darcy定律,并且与裂隙的宽度有关。裂隙介质渗流连续性方程为

$$d_f \frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_f \rho) + \operatorname{div}\left\{d_f \rho \left[-\frac{\kappa_f}{\mu}(\nabla p + \rho g \nabla D)\right]\right\} = d_f Q_m \quad (3)$$

式中: d_f 为裂隙宽度; ε_f 为裂隙边界材料孔隙率; κ_f 为裂隙渗透率。

1.2 几何模型建立

保德采区4+5号煤层厚度为5.72~9.89 m。煤层最大主应力方向为北偏东50°,气井按平行于最大主应力方向布置并以梅花形井网形式分布,基础井距350 m×350 m。在不受地质构造影响条件下,气井压裂裂缝一般为双翼对称垂直裂缝,以井轴为对称轴,顺着地层最大主应力方向延伸。保德采区压裂裂缝半长为120~150 m。为了简便,均考虑为直井压裂,井径240 mm。压裂时,压裂液中用到的支撑剂包括石英砂、陶粒、树脂包层砂等,粒径为0.85~1.20 mm(12~20目)。支撑剂起支撑裂缝,防止裂缝闭合的作用。因此,裂缝的宽度近似等于支撑剂的粒径。

排水采气初期,各气井排水通常只会影响气井周围较小范围内的流场,并且达到一定时间后,出水量会接近稳定状态。排水持续时间至少4个月后,会出现井间干扰^[12]。本文研究发生井间干扰前煤层水的渗流规律。因为在井间干扰发生前,井与井之间不发生水力联系,并且假设各井压裂后的情况基本一致。因此,研究单口压裂井排水时的渗流过程,即可类比整个区域其他煤层气井在这一排采过程中的地下水渗流情况。假设相邻煤层气井同时开始以相同的压差进行排水采气,则可以把单口气井开始排水后与相邻井发生井间干扰时的距离作为研究边界长度。本文确定水平面上的模型尺寸原则为:在垂直地层最大主应力方向上,以相邻井连线的垂直平分线为一边;在平行地层最大主应力方向上,以到相邻2排井距离相同的直线为另一边,从而确定出水平面上的模型尺寸。图1为模型边界水平面投影示意。

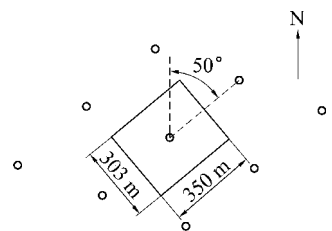


图1 模型边界水平面投影示意

Fig.1 Model boundary projection in water level

综上,几何模型可简化为一个立方体。此时,煤层气井(直井)概化为圆柱,直径为240 mm,处于模

型对称轴上;垂直双翼对称裂缝处于模型的对称面上。为了绘图及计算方便,以北偏东 50° 作为 x 轴。模型沿 x 轴方向长度为350 m, y 轴方向长度为303 m, z 轴方向为煤层厚度,取煤层厚度平均值7.79 m。裂缝半长取平均值135 m,裂缝宽度取支撑剂粒径平均值1.025 mm。假设裂缝贯穿煤层,则裂缝高度取7.79 m,几何模型如图2所示。

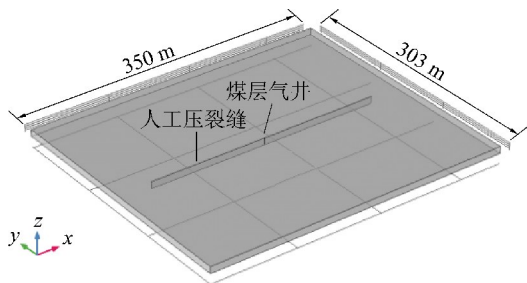


图2 渗流仿真试验几何模型

Fig.2 Geometric model of seepage simulation test

1.3 渗流模型参数选取

保德井区的煤层平均埋深在810 m左右,井深一般在700~1 200 m。主力煤层的煤镜质体反射率在0.8%左右,主要为气煤,储层渗透率为 $(0.3 \sim 12.0) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,一般为 $(2.5 \sim 8.0) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。考虑成各向同性,渗透率取平均值 $5.182 \times 10^{-15} \text{m}^2$,储层孔隙率取7.1%^[13-14]。煤层温度 35°C ,水的密度为 $994 \text{kg}/\text{m}^3$,动力黏度为 $0.723 \times 10^{-3} \text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$,水的压缩率为 $4.464 \times 10^{-10} \text{Pa}^{-1}$ ^[15]。据不同煤阶煤岩力学参数测试结果,气煤在埋深1 000 m、围压7 MPa情况下,体积压缩系数取 $4.59 \times 10^{-10} \text{Pa}^{-1}$ ^[16]。

裂隙渗透为各向异性, x 方向为裂隙主渗透方向,渗透率采用单裂隙水流立方定律计算^[17]。

$$\kappa_f = \frac{d_f^2}{12} \quad (4)$$

式中: κ_f 为单裂隙渗透率; d_f 为裂隙宽度。计算得到裂隙 x 方向渗透率为 $8.755 \times 10^{-8} \text{m}^2$; y 方向渗透率等于煤层渗透率为 $5.182 \times 10^{-15} \text{m}^2$; z 方向同 x 方向,渗透率取 $8.755 \times 10^{-8} \text{m}^2$ 。

1.4 初始条件和边界条件设定

假设开始时刻煤层为天然状态,储层压力没有受到人类活动影响。由于研究范围不大,研究区域内,压力变化不明显。因此,设置模型初始时刻各处压力均为原始储层压力,据资料设定为4 MPa。

渗流试验研究发生井间干扰之前的渗流变化情况,在该情况下,排水所致的水头降低并未影响到边界。因此,设置前后左右4个边界面的压力均为初始压力4 MPa。假设煤层与上下含水层没有水力联系,因此,设定上下2个边界面为不透水边界面。裂

缝处于模型内部,为模型的内边界,COMSOL 软件默认裂缝与周围岩体界面上的压强是连续的^[18-19]。当裂缝与周围岩体存在压力差时,裂缝和周围岩体会发生水量交换。煤层气井直接连通外界,井周边界反映排水时的压力降低值。设定井周边界压力分别为3.5、3.0、2.5、2.0、1.5 MPa,对这5组不同压差方案,分别进行渗流仿真试验研究。

1.5 网格剖分

根据渗流有限单元法计算要求,需对模型进行网格剖分。选取较细化自由四面体网格剖分方法进行剖分,为了保证仿真计算尽量准确,对裂缝与气井周围进行加密剖分。几何模型网格剖分如图3所示。

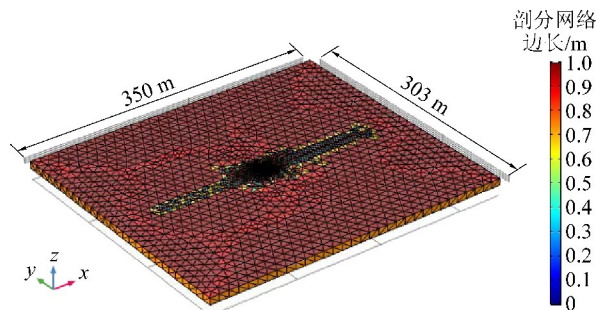


图3 渗流仿真试验几何模型网格剖分

Fig.3 Mesh of geometric model of seepage simulation test

2 仿真试验结果分析

模型模拟煤岩孔隙系统与裂隙系统耦合形成的双重介质中煤层水的渗流。经过多次尝试,发现渗流时间达到40 h后,井口沿裂缝方向(主渗透方向)的渗流速度下降速率很小。为了准确,尽量延长渗流试验时间,笔者选取100 h为渗流试验时间,计算时间步长设置为0.2 h,分别对5组方案进行试验。

2.1 双重介质中水压力分布规律

在5组不同压差方案中,水压力分布情况基本相似。因此,笔者以外边界面压力4 MPa,井周3.5 MPa渗流试验为例来分析动水压力分布规律。图4、图5、图6为渗流100 h后,得到的压力曲面、压力等值面和压力切面。

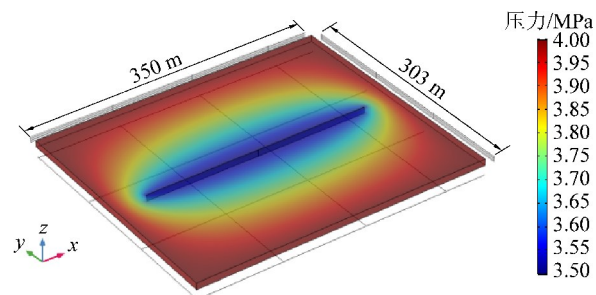


图4 渗流仿真试验压力曲面

Fig.4 Pressure surface of seepage simulation test

从图4、图5可以看出,等压面在模型上部边界的投影基本呈椭圆形,长轴平行于裂缝方向,短轴垂直于裂缝方向。由于煤岩和裂缝渗透率相差悬殊,裂缝排水更迅速。因而,整个模型范围内,裂缝区域相比周围煤岩区域压力更低。图6反映出,在垂直于裂缝的任一条压力切面上,裂缝处压力最低,距裂缝越远,压降越小,压力越高;沿裂缝方向,裂缝末端压力最高,距井筒越近压力越低,井筒处压力最低,井筒两侧裂缝压降规律相同。

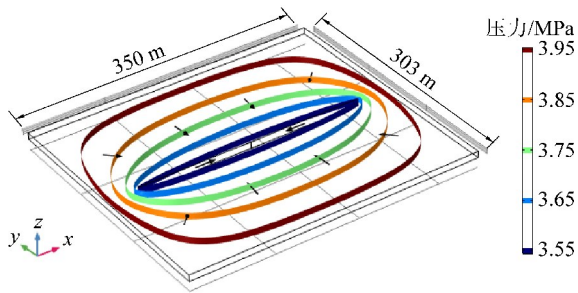


图5 渗流仿真试验压力等值面

Fig.5 Pressure isosurface of seepage simulation test

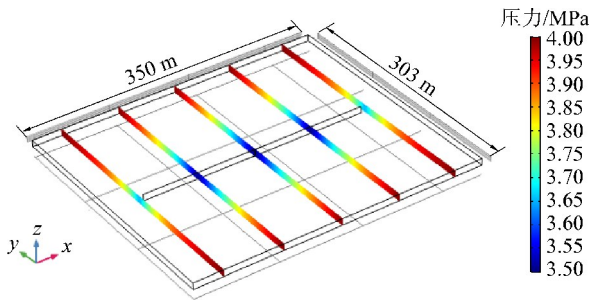


图6 渗流仿真试验压力切面

Fig.6 Pressure section of seepage simulation test

2.2 双重介质中煤层水渗流规律

用边探针测量并绘制5组方案井口沿裂缝方向渗流速度随时间变化曲线,如图7所示。由图7可知,渗流过程大体上都经历了从快速下降,再到稳定下降,最后到缓慢下降3个阶段;但不同压差情况下流速变化具有差异性,总体而言,压差越大,流速减小达到缓慢下降阶段的持续时间越长,最终流速也越大。笔者以压差0.5 MPa情况为例说明渗流过程。从图中对应曲线以及导出的流速数据可知,0~7 h为流速快速下降阶段,流速从0.377 m/s降到0.011 m/s;7~40 h为流速稳定下降阶段,流速从0.011 m/s降到0.005 m/s;40~100 h为流速缓慢下降阶段,流速从0.005 m/s降到0.004 m/s。

用探针测量并绘制5组方案裂缝末端水头随时间变化曲线,如图8所示。由图8可知,5组方案水头也都经历了从快速下降,再到稳定下降,最后到缓慢下降3个阶段;但不同压差下水头变化不同,压差越

大,最终水头越小。同样以压差0.5 MPa为例具体说明水头变化过程。另外绘制了该压差下纵坐标精度更高的水头时间关系曲线,如图9所示。从图8、图9及导出的水头数据可知,0~12 h为水头快速下降阶段,水头从405.2 m降到358.5 m;12~40 h为水头稳定下降阶段,水头从358.5 m降到358.0 m;40~100 h为水头缓慢下降阶段,水头从358.0 m降到357.8 m。

结合图5可以推测出整个渗流过程。开始排水时,裂缝末端水头迅速降低,沿裂缝到达井口的煤层水流速也随之不断降低,此时主要排出的是裂缝中的煤层水,并且由于渗透率相差悬殊,煤岩中的水来不及大量渗流补充到裂缝中。当裂缝末端的水头进入缓慢下降阶段时,裂缝中原始储存的煤层水大部分排完。在压力差的作用下,煤岩中的水不断但又缓慢地渗透进入裂缝,再沿裂缝流入井中。井筒两侧裂缝渗流规律相同。

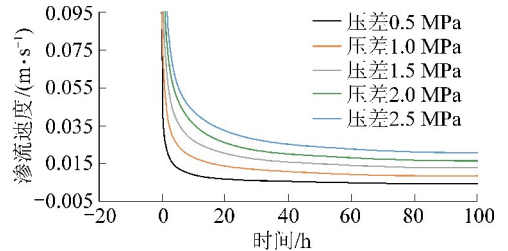


图7 不同压差井口主渗透方向
渗流速度-时间关系曲线

Fig.7 Wellhead seepage velocity-time curves of different pressure in principal permeability direction

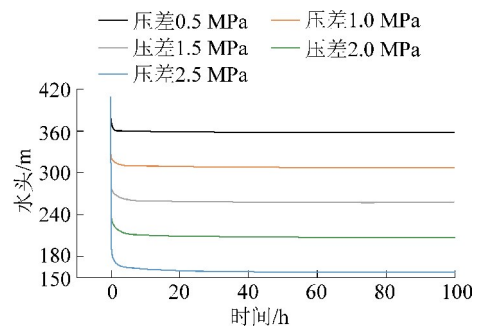


图8 不同压差裂缝末端水头-时间关系曲线

Fig.8 Waterhead-time curves of different pressure in crack end

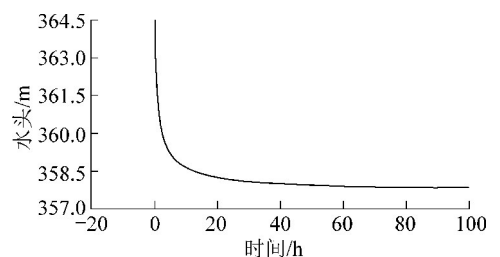


图9 压差0.5 MPa下裂缝末端水头-时间关系曲线
Fig.9 Waterhead-time curve of 0.5 MPa differential pressure in crack end

2.3 双重介质渗透性规律

分别用探针测出 100 h 末,5 组方案中, x 、 y 方向煤层水到达井口的流速以及模型相邻两边中点水头、井口水头,得到 5 组流速水头数据。计算出各方案 x 、 y 方向水力梯度后,以水力梯度为 x 轴,以相应的流速为 y 轴作散点图,拟合得到的直线斜率即 x 、 y 方向的渗透系数,拟合情况如图 10 所示。得到孔隙和裂隙耦合之后的双重介质模型 x 方向渗透系数为 0.0135 m/s , y 方向渗透系数为 $8 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ 。以上数据显示, x 方向渗透系数远大于 y 方向渗透系数,前者为后者的 168 750 倍,表明压裂煤层形成的双重介质在不同方向上渗透性差异明显。

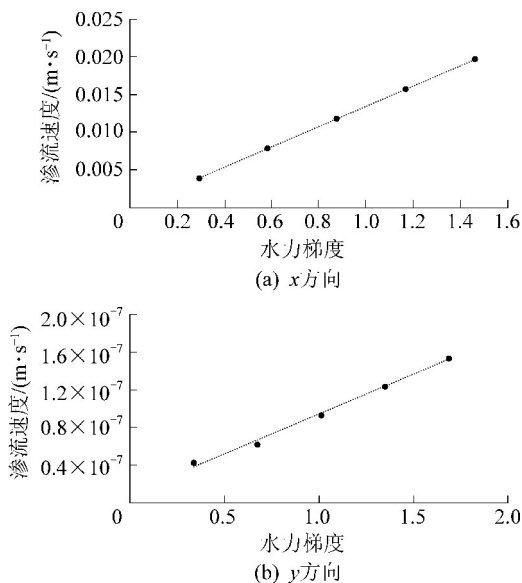


图 10 水力梯度-流速关系曲线

Fig.10 Hydraulic gradient-velocity curve

3 结论及建议

1) 排水一段时间后,裂缝区域裂隙水压力明显低于周围煤岩孔隙水压力,在任意一条垂直于裂缝的压力切面上,裂缝处压力最低,向两边压力逐渐升高;沿裂缝方向,裂缝末端压力最高,靠近井筒,压力降低,井筒处压力最低。

2) 开始排水时,裂缝中的水最先进入井筒,裂缝末端水头迅速降低,一段时间内,裂缝中大部分煤层水排完。在此过程中,煤岩中的水在压差作用下不断渗透进入裂缝,并沿裂缝渗流进入井筒。

3) 拟合得到双重介质 x 方向渗透系数为 0.0135 m/s , y 方向渗透系数为 $8 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ 。

4) 在只考虑单相单场条件下得出的双重介质中煤层水的渗流规律。实际情况中,煤层水的渗流还会受到煤层气压力变化和应力场改变的影响。因此,建议今后可以从多相和多场耦合角度进行综合

考虑,通过构建多相流-固耦合模型进行模拟研究,从而实现双重介质中煤层水渗流规律更加深入的认识。

参考文献 (References):

- [1] 孙可明.低渗透煤层气开采与注气增产流固耦合理论及其应用[D].阜新:辽宁工程技术大学,2004.
- [2] 张华珍,王利鹏,刘嘉.煤层气开发技术现状及发展趋势[J].石油科技论坛,2013,32(5):17-21,27,65.
ZHANG Huazhen, WANG Lipeng, LIU Jia. Present conditions and development trend of CBM technology [J]. Oil Forum, 2013, 32(5): 17-21, 27, 65.
- [3] 王博洋,秦勇,申建,等.我国低煤阶煤煤层气地质研究综述[J].煤炭科学技术,2017,45(1):170-179.
WANG Boyang, QIN Yong, SHEN Jian, et al. Summarization of geological study on low rank coalbed methane in China [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(1): 170-179.
- [4] 李五忠,孙斌,孙钦平,等.以煤系天然气开发促进中国煤层气发展的对策分析[J].煤炭学报,2016,41(1):67-71.
LI Wuzhong, SUN Bin, SUN Qiping, et al. Analysis on coal-bed methane development based on coal measure gas in China and its counter-measure [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 67-71.
- [5] 毕彩芹,迟焕鹏,单衍胜,等.水城矿区煤层气储层特征及压裂改造工艺研究[J].煤炭科学技术,2017,45(9):182-187.
BI Caiqin, CHI Huanpeng, SHAN Yansheng, et al. Analysis of coalbed methane reservoir characteristics and reconstruction process in Shuicheng Mining [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(9): 182-187.
- [6] 张小东,张鹏,刘浩,等.高煤级煤储层水力压裂裂缝扩展模型研究[J].中国矿业大学学报,2013,42(4):573-579.
ZHANG Xiaodong, ZHANG Peng, LIU Hao, et al. Fracture extended model under hydraulic fracturing engineering for high rank coal reservoirs [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(4): 573-579.
- [7] 付雪海,秦勇,韦重韬.煤层气地质学[M].徐州:中国矿业大学出版社,2007:237-242.
- [8] 薛禹群.地下水动力学[M].北京:地质出版社,1997:39-42.
- [9] 秦跃平,刘鹏,刘伟,等.双重介质煤体钻孔瓦斯双渗流模型及数值解算[J].中国矿业大学学报,2016,45(6):1111-1117.
QIN Yueping, LIU Peng, LIU Wei, et al. Modeling and numerical simulation of borehole methane flow in a dual-porosity, dual-permeability coal [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(6): 1111-1117.
- [10] PROB Thararop, ZULEIMA T K, TURGAY E. Development of a multi-mechanistic, dual-permeability, numerical flow model for coalbed methane reservoirs [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2012(8): 121-131.
- [11] 徐轶,徐青.基于COMSOL Multiphysics的渗流有限元分析[J].武汉大学学报:工学版,2014,47(2):165-170.
XU Yi, XU Qing. Finite element analysis of seepage based on

- COMSOL Multiphysics[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2014, 47(2): 165-170.
- [12] 闫霞, 李小军, 赵辉, 等. 煤层气井井间干扰研究及应用[J]. 岩性油气藏, 2015, 27(2): 126-132.
YAN Xia, LI Xiaojun, ZHAO Hui, *et al.* Research on well interference of coalbed methane wells and its application[J]. Lithologic Reservoirs, 2015, 27(2): 126-132.
- [13] 接铭训. 鄂尔多斯盆地东缘煤层气勘探开发前景[J]. 天然气工业, 2010, 30(6): 1-6, 121.
JIE Mingxun. Prospects in coalbed methane gas exploration and production in the eastern Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(6): 1-6, 121.
- [14] 傅雪海, 秦勇, 韦重韬. 煤层气地质学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007: 43-44.
- [15] 张志昌, 李国栋, 李治勤. 水力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011: 3-5.
- [16] 申卫兵, 张保平. 不同煤阶煤岩力学参数测试[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(S1): 860-862.
SHEN Weibing, ZHANG Baoping. Testing study on mechanical parameters of coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(S1): 860-862.
- [17] 周志芳. 裂隙介质水动力学原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 32-36.
- [18] 李淑君, 王惠泉, 赵文玉, 等. 基于COMSOL多物理场耦合仿真建模方法研究[J]. 机械工程与自动化, 2014(4): 19-20, 23.
LI Shujun, WANG Huiquan, ZHAO Wenyu, *et al.* Multiphysics coupling simulation modeling methods based on COMSOL[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2014(4): 19-20, 23.
- [19] 焦会青. 绿洲棉田膜下滴灌土壤水盐运移模型构建及应用[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.