

吕明杰, 刘立仁, 张小涛, 等. 水力耦合作用下煤岩渗流动态演化规律[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2024, 6(2): 023039.

LYU Mingjie, LIU Liren, ZHANG Xiaotao, et al. Dynamic evolution law of coal seepage under hydraulic coupling[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2024, 6(2): 023039.

水力耦合作用下煤岩渗流动态演化规律

吕明杰¹, 刘立仁¹, 张小涛², 陈博¹

(1. 陕西德源府谷能源有限公司 三道沟煤矿, 陕西 府谷 719400; 2. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400037)

摘要: 为探究煤层注水时水在煤体中的渗流演化规律, 采用实验室试验与数值模拟结合的方法, 开展了地应力及孔隙水压力耦合作用下煤体结构变形及渗透率演化规律试验, 并建立了水力耦合下体积变形演化数学模型, 基于UDF二次开发进行了煤岩注水渗流动态演化数值模拟。研究表明: 煤岩孔隙率变化受应力与水压共同作用的影响; 煤岩轴向变形量与水压分布由上至下呈递减式传递, 体积变形与轴向力、孔隙水压大小成正相关; 孔隙水压为赋存于孔裂隙的自由水提供渗透动力, 并对煤岩基质骨架产生力学作用, 水压越大, 煤岩基质骨架越容易破坏; 采用UDF程序加载渗透性试验结果对孔隙率随孔隙水压变化进行拟合的结果更接近试验结果, 误差较小, 对于研究煤岩渗流规律可以提供一定的参考。

关键词: 煤层注水; 渗流; UDF; 孔隙率; 流固耦合; 数值模拟

中图分类号: TD31

文献标志码: A

文章编号: 2096-7187(2024)02-3039-12

Dynamic evolution law of coal seepage under hydraulic coupling

LYU Mingjie¹, LIU Liren¹, ZHANG Xiaotao², CHEN Bo¹

(1. Sandaogou Coal Mine, Shanxi Deyuan Fugu Energy Co., Ltd., Fugu 719400, China; 2. Chongqing Research Institute of China Coal Science and Industry Group Co., Ltd., Chongqing 400037, China)

Abstract: To investigate the seepage and evolution of water within coal during the process of coal seam injection, a combination of laboratory tests and numerical simulations was employed. This study involved conducting experiments to explore the deformation of coal structure and the evolution of permeability under the combined influence of geostress and pore water pressure coupling. Additionally, a mathematical model for volume deformation evolution under hydraulic coupling was established, and dynamic numerical simulations of coal injection seepage were performed based on User Defined Functions (UDF) development. The results indicated that changes in coal porosity are influenced by both stress and water pressure. The axial deformation of coal and the distribution of water pressure decrease from top to bottom in a descending manner, and volume deformation is positively correlated with axial force and pore water pressure magnitude. Pore water pressure provides the permeation force for free water stored in the fractures and exerts mechanical effects on the coal matrix; the greater the water pressure, the easier it is for the coal matrix to be damaged. The simulated results from the UDF program, which was fitted to the porosity variation with respect to pore water pressure using the results of loading permeability tests, closely matched experimental results with minimal error. Therefore, the numerical simulation based on Fluent secondary development can achieve dynamic simulation of fluid-solid coupling experiments, which holds certain guiding significance for studying the seepage law of coal.

Key words: coal seam water injection; seepage; UDF; porosity; fluid-structure coupling; numerical simulation

收稿日期: 2023-10-23

修回日期: 2023-12-07

责任编辑:

作者简介: 吕明杰(1995—), 男, 宁夏平罗人, 助理工程师。主要从事“一通三防”等方面的研究工作。E-mail: 20041272@ccic.com

随着我国煤炭资源的不断开采,很多煤矿开始进入深部开采阶段^[1-2]。但由于深部煤体存在裂隙孔隙不发育、含水量较低等特性,致使煤炭开采过程中矿压显现^[3]、粉尘污染^[4]等问题严重。煤层注水^[5-7]作为矿井粉尘防治^[8-9]、增渗^[10-11]的主要技术措施,可极大地提高煤矿安全生产水平和保障职工的健康^[12]。然而在煤层注水的实际应用中,由于煤自身结构的复杂性、所受应力-应变的多变性,以及注水过程中应力-渗流耦合的复杂性,使得注水渗流过程的研究较为复杂。

众多学者对煤层注水的渗流展开深入研究,并取得了诸多成果。20世纪50年代,BIOT等^[13]研究了材料的孔隙压力和三轴受力的关系,建立了多孔介质的三维固结理论,提出煤岩内应力渗流耦合时,可将煤视为连续多孔介质的假设;NOORISHAD等^[14]开发了第1个用于渗透应力和载荷应力作用下渗流分析的软件;THALLAK等^[15]用离散元模型耦合渗流压力分析了水压致裂过程;WITHERPOON^[16]编写了分析渗透应力、体应力和边界载荷耦合作用的有限元程序;薛世峰等^[17]考虑了有效应力定律、流固耦合程度和数值模拟算法等问题,进一步发展和巩固了流固耦合理论的数学模型;易欣等^[18]采用MTS815测试系统研究了热-力耦合作用下煤岩渗透过程中形变及渗透性的变化特征;MENG等^[19]揭示了原煤在不同加载过程中的渗流规律,开发并应用了重力恒载渗流实验系统;王利等^[20]基于多孔介质渗流-损伤耦合的水力压裂耦合原理,提出了水力压裂裂缝张开度计算公式、多孔介质-力学属性的各向异性表达式以及FEM数值实现方法;蒋长宝等^[21]从煤岩孔裂隙受应力-应变影响而变化的角度分析了煤岩渗透特性演化规律;王进尚等^[22]应用FLAC3D固液耦合模式深入研究了底板渗流应力耦合破坏与递进导升协同突水演变的规律;张国新^[23]从孔隙水压作用下的应力-应变关系出发,推导出了有限元渗透荷载式(孔隙压力初应力/应变法),结果表明,该方法可以较好得到渗流场中渗透压力作用下的应力和变形;弓昊等^[24]采用现场实测与数值模拟手段确定了煤层及覆岩的损伤程度范围以及渗透率的演化规律;陈绍杰等^[25]采用Fluent软件及多孔介质模型耦合求解,对煤层注水促抽瓦斯技术及其影响因素进行数值模拟,并将模拟结果应用于现场,数值模拟与现场

实测数据基本吻合;王波等^[26]利用自主研发的RRTS-IV型岩石流变扰动效应试验机和含瓦斯煤岩流变扰动效应渗流试验装置进行了含瓦斯煤岩三轴流变试验,得到了含瓦斯煤岩的蠕变规律;周刚等^[27]采用应力-应变关系与计算流体力学相结合的ANSYS软件,模拟了不同注水压力下煤层的压力和速度场,确定了最佳的注水参数,表明联合注水技术具有明显的防尘、防岩爆效果;SHAN P F等^[28]通过数值模拟软件,利用反演方法计算了研究区域地应力,并根据现场监测数据验证了反演方法的准确性;王婉洁等^[29]采用相似模拟和数值模拟的方法研究了工作面推进过程中采空区覆岩采动裂隙的演化规律,得到较硬直接顶对于提高采动裂隙渗透率有积极作用。

许多学者在有关煤岩流固耦合的研究方面已取得不少的研究成果,但鲜有煤岩注水渗流动态模拟分析方面的研究。因此笔者基于试验结果,采用Fluent二次开发实现注水渗流的动态模拟,并通过ANSYS软件中的Transient Structural与Fluent结合进行流固耦合分析,研究成果更加符合流固耦合试验的研究要求,对于研究煤岩渗流规律具有重要意义。

1 煤岩水力耦合试验及其结果分析

1.1 煤岩三轴压缩试验

三轴压缩试验是研究岩石强度和变形特性及岩石破裂发展过程的基本手段之一^[30]。因此,笔者利用自主研发的岩石多场耦合渗流与增透试验系统,对煤岩试件进行三轴压缩试验。试验采用 $\phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的标准圆柱型试件,试验前进行编号,试验所需煤岩试件如图1所示。



图1 煤岩试件

Fig. 1 Coal sample

1.2 煤岩渗透性试验

为了研究不同应力及孔隙水压对煤岩渗透特性的影响,根据常规三轴压缩试验结果及煤矿生产

实际中的应力情况, 进行不同应力及孔隙水压作用下的煤岩渗透试验^[31], 研究不同应力及孔隙水压作用下煤岩的渗透率及孔隙率变化率, 试件参数见表1。

表1 渗透性试验试件参数及试验条件
Table 1 Sample parameters and test conditions of permeability test

试件状态	试件编号	高度/mm	直径/mm	围压/MPa	轴压/MPa	孔隙水压/MPa
饱水	11号	98.5	50.5	10	15.42	2, 4, 6, 8
	12号	97.5	50	10	22.67	2, 4, 6, 8

表2 煤岩三轴压缩试验结果
Table 2 Results of coal triaxial compression test

试件状态	试件编号	高度/mm	直径/mm	围压/MPa	破坏主应力差/kN	强度极限/MPa	弹性模量/MPa
饱水	1号	101.0	51	10	48.37	23.68	2 797.43
	2号	102.5	52	10	43.82	20.57	2 313.91
	平均	101.75	51.5	10	43.595	23.625	2 555.67

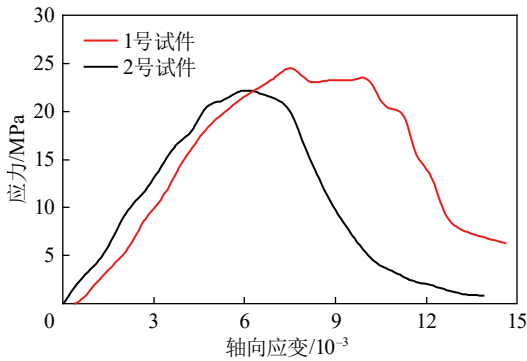


图2 围压 10 MPa 煤岩试件三轴压缩应力-应变曲线
Fig. 2 Triaxial compressive stress-strain curve of coal sample under confining pressure of 10 MPa

由图2可知, 在孔裂隙压密阶段, 煤岩试件中的裂隙由于承压压力作用基本闭合, 应力-应变曲线呈凹形。随轴向荷载增加, 煤岩变形表现出相对明显的线弹性, 变形量随轴向应力增加而增大。内应力的变化, 导致新裂隙的出现, 煤岩试件进入裂隙萌生阶段, 裂隙数量增加。随着裂隙变形规模的扩大, 数量增加, 大量裂隙开始贯通, 最终煤岩试件内部结构失稳, 沿某结构面产生剪切滑移, 煤岩试件失去承载力, 应力-应变曲线下降, 进入破碎阶段。

三轴压缩试验中, 煤岩试件轴向力及孔隙率变化率随加载时间的变化以及孔隙率变化率拟合曲线如图3所示。

1号, 2号试件孔隙率变化率的拟合公式分别为

试验利用稳态法进行渗透率的计算^[32], 计算公式为

$$k = -\frac{Q \Delta L}{A \Delta p} u \quad (1)$$

式中, Q 为单位时间通过试件的渗流量, m^3/s ; A 为试件断面面积, m^2 ; ΔL 为试件高度, m ; Δp 为试件两端压差, Pa ; u 为流体黏滞系数, $Pa \cdot s$ 。

1.3 试验结果分析

饱水煤岩三轴压缩试验结果见表2, 全应力-应变曲线如图2所示。

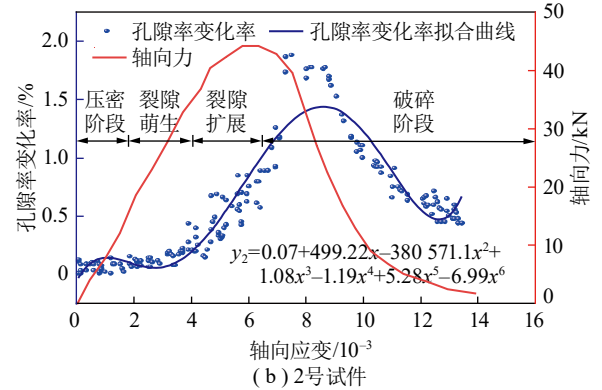
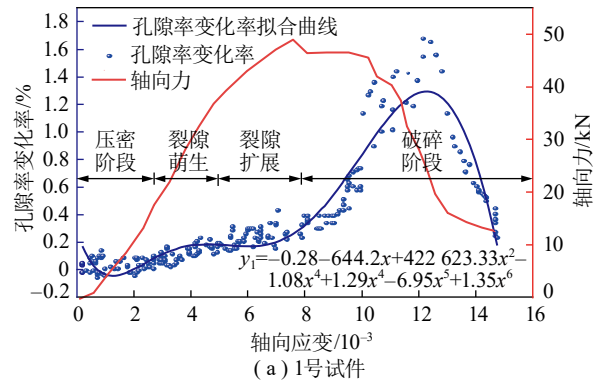


图3 煤岩试件轴向力及孔隙率变化率曲线
Fig. 3 Curves of axial force and porosity change rate of coal sample

$$\begin{cases} y_1 = -0.28 - 644.2x + 422 623.33x^2 - 1.08x^3 + 1.29x^4 - 6.95x^5 + 1.35x^6 \\ y_2 = -0.07 + 499.22x - 380 571.1x^2 + 1.08x^3 - 1.19x^4 + 5.28x^5 - 6.99x^6 \end{cases} \quad (2)$$

式中, x 为轴向应变, 10^{-3} ; y_1 为1号试件的孔隙率变化

率, %; y_2 为2号试件的孔隙率变化率, %。

根据图3, 对1号, 2号试件的峰前孔隙率变化进行拟合, 拟合曲线如图4所示。拟合公式为

$$y' = 0.1 - 0.0021f_a + 0.00588f_a^2 - 6.17 \times 10^{-4}f_a^3 + 2.96 \times 10^{-5}f_a^4 - 6.471 \times 10^{-7}f_a^5 + 5.368 \times 10^{-9}f_a^6 \quad (3)$$

式中, f_a 为轴向力, kN; y' 为三轴压缩试验拟合孔隙率变化率, %。

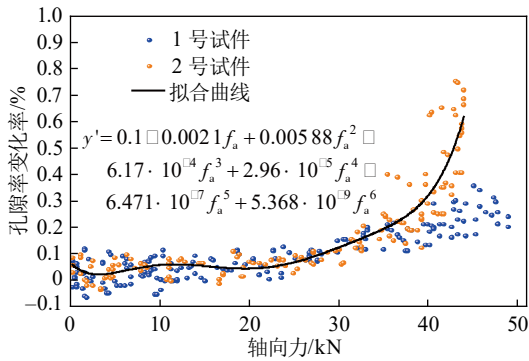


图4 煤岩试件峰前孔隙率变化率拟合曲线
Fig. 4 Fitting curve of pre-peak porosity change rate of coal sample

结合图3与图4可以发现, 在孔裂隙压密阶段, 孔隙率变化率出现负值且波动较小, 说明该阶段煤岩试件孔隙率减小, 孔隙率变化较小; 随着轴向力的逐渐增大, 试件变形量增大, 孔裂隙数量增加, 试件变形进入裂隙萌生阶段。此时煤岩试件孔隙率变化率为正值且呈上升趋势, 说明在该阶段孔隙率逐渐增大; 随着煤岩试件孔裂隙规模逐渐增大, 试件内部大量裂隙开始贯通, 孔隙率变化率呈直线上升, 达到峰值; 在破碎阶段, 孔隙率变化率呈减小趋势, 此时孔隙率虽然呈增长趋势, 但其增长速率减慢。

由渗透性试验数据, 得到不同孔隙水压与应力状态下煤岩渗透率的变化曲线, 如图5所示。

11号, 12号试件分别对应15.42, 22.67 MPa的应力, 由图5可知, 煤岩渗透率随着孔隙水压的增大而增加。11号煤加载孔隙水压后, 煤岩渗透率变化较小。在2, 4, 6, 8 MPa孔隙水压力作用下, 渗透率分别为-0.017 76, -0.006 23, 0.001 03, 0.054 1, 几乎为微渗透或非渗透。12号煤加载孔隙水压后, 煤岩渗透率变化较为明显, 在2 MPa低孔隙水压力时, 渗透率为-0.005 73, 而随着孔隙水压力的增大, 尤其在8 MPa高孔隙水压力作用下, 渗透率为0.699 57,

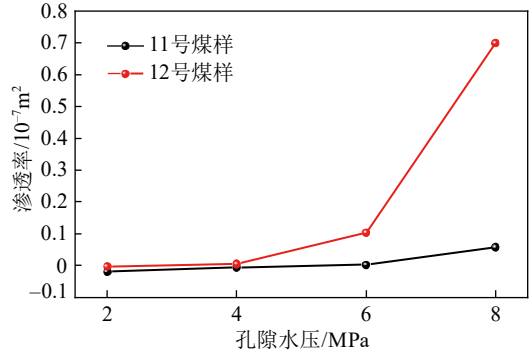


图5 不同孔隙水压与应力状态下煤岩渗透率的变化曲线
Fig. 5 Changes of coal permeability under different pore water pressure and stress states

此时渗透率呈线性增长。造成11号, 12号煤渗透率变化程度具有差异性的原因是两个试件对应的应力条件不同, 而应力大小与煤岩渗透率的变化具有相关性。从煤岩渗透率随孔隙水压大小增加变化程度逐渐显著也可以发现, 煤岩试件所受应力越大, 煤岩渗透性能越容易发生改变。因此, 相对于11号试件, 12号试件在不同孔隙水压与应力状态下煤岩渗透率变化更加明显。

图6为在一定应力条件下加载孔隙水压后, 煤岩试件孔隙率变化以及其变化率的拟合结果。

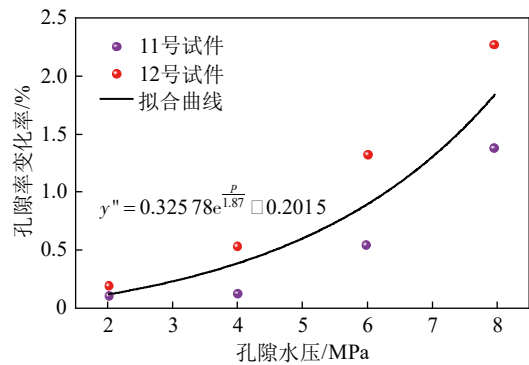


图6 不同孔隙水压下煤岩孔隙率变化率拟合曲线
Fig. 6 Fitting curve of coal porosity change rate under different pore water pressure conditions

煤岩试件孔隙率变化率的拟合公式为

$$y'' = 0.32578e^{\frac{p}{1.87}} - 0.2015 \quad (4)$$

式中, p 为孔隙水压, MPa; y'' 为渗透性试验拟合孔隙率变化率, %。

随着水压的逐渐增大, 煤体孔隙率变化率升高, 孔隙率增大。11号煤在15.42 MPa应力条件下加载孔隙水压后, 其煤岩孔隙率的变化率低于12号煤在22.67 MPa下加载孔隙水压后的变化率。在高

孔隙水压力作用下, 孔隙率增长较快, 煤体孔裂隙充分发育, 煤体体积变形较明显, 渗透率增加。

在进行三轴压缩试验时, 轴向力在0~20 kN时, 孔隙率变化率呈逐渐减小的趋势, 在20~48 kN时, 变化率呈逐渐上升趋势; 从煤岩渗透性试验可知, 在同等应力条件下加载不同孔隙水压后, 煤体孔隙率变化率与孔隙水压成正相关。

2 基于ANSYS的数值模拟

2.1 Fluent边界条件及UDF的设置

在ANSYS软件中, 根据煤岩试件的实际尺寸, 建立 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的三维数值模型, 物理几何模型及网格划分如图7所示。在模型顶部施加孔隙水压, inlet设定为pressure-inlet, 采用UDF编程对其进行2, 4, 6, 8 MPa的分段加载, 每种水压加载500 s, outlet设定为pressure-outlet, 材料为多孔介质材料, 孔隙率采用UDF加载。对计算机的环境变量设定完毕后, 将Visual Studio与Fluent连接, 保证UDF程序能够成功加载, 然后利用Visual Studio软件编写UDF程序。孔隙水压入口UDF的编写采用DEFINE_PROFILE宏^[33], 孔隙率变化的UDF的编

写采用DEFINE_PROPERTY宏。将三轴压缩试验与渗透性试验结果拟合的孔隙率变化曲线结果多项式分别编入UDF中, 通过Fluent中User-Defined窗口进行加载UDF程序, 进行模拟, 对比加载两种UDF后的模拟结果。

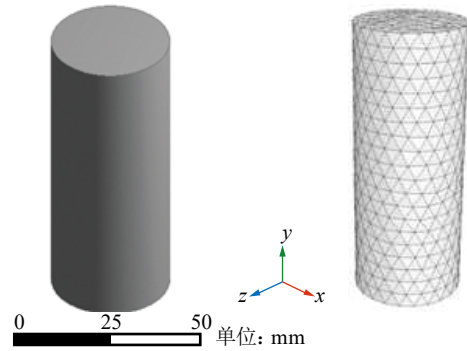


图7 几何模型及网格划分
Fig. 7 Geometric model and meshing

2.2 水力耦合数值模拟煤岩属性设置

通过Transient Structural进行应力场的分析, 结合Fluent分别加载不同大小的孔隙水压进行流场分析, 计算应力及孔隙水压共同作用下的煤岩体积变形大小。其材料属性设置的基本参数见表3。

表3 煤岩属性参数设置

Table 3 Setting of coal attribute parameters

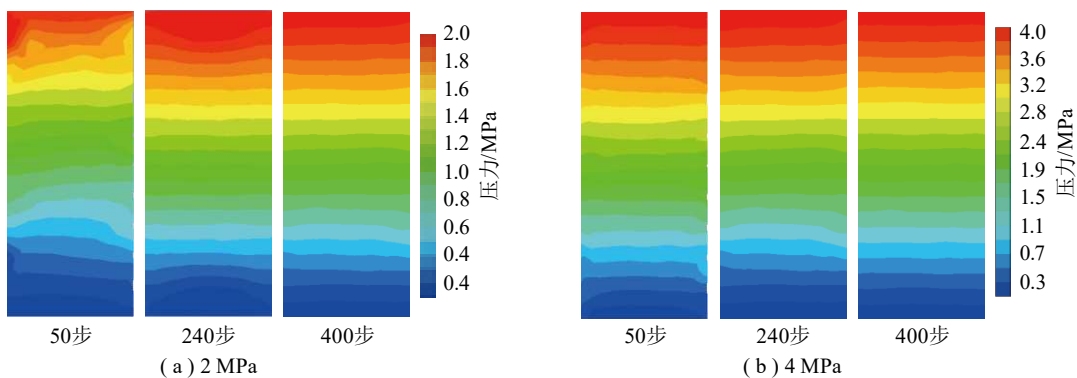
参数名称	模型高度/mm	模型直径/mm	围压/MPa	强度极限/MPa	弹性模量/MPa	煤体密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	初始孔隙率/%
参数值	100	50	10	23.68	2 797.43	1.42	4

2.3 模拟结果分析

通过对Fluent模拟进行二次开发, 可以实现注水渗流过程中的动态模拟。首先对加载三轴压缩试验结果拟合孔隙率随孔隙水压变化的UDF程序后的模拟结果(以下简称模拟结果1)进行展示, 压力剖面如图8所示。

图8为分别在不同水压下计算50步、240步、

400步时的煤岩内部压力分布。在加载水压初始阶段, 煤岩内部压力发生动态变化, 随着水压持续加载, 煤岩内部压力变化逐趋于稳定。图9为分别在不同孔隙水压作用下计算200步、300步、400步时的煤岩内部密度分布。由图9可以明显看出随着水压增大, 煤体孔隙率增大, 煤体内部含水率增大, 分布范围从顶部的压力入口至底部逐渐扩散。



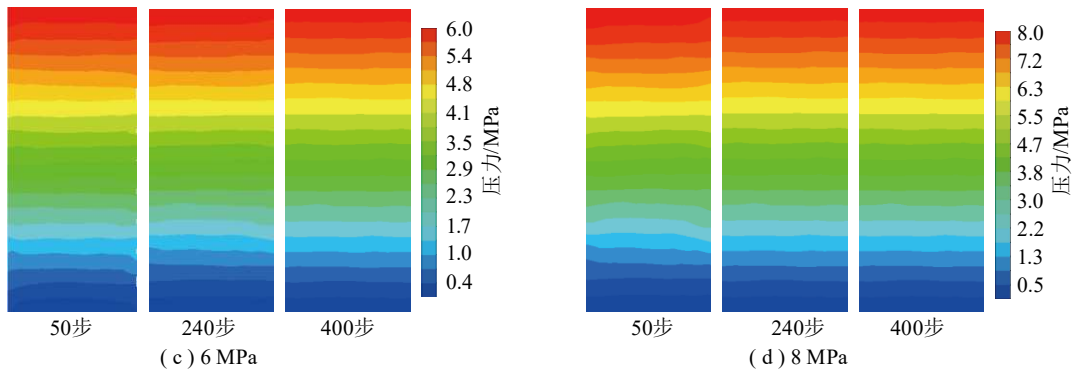


图 8 模拟结果 1 煤岩内部压力分布剖面图

Fig. 8 Simulation result 1. profile of pressure distribution in coal

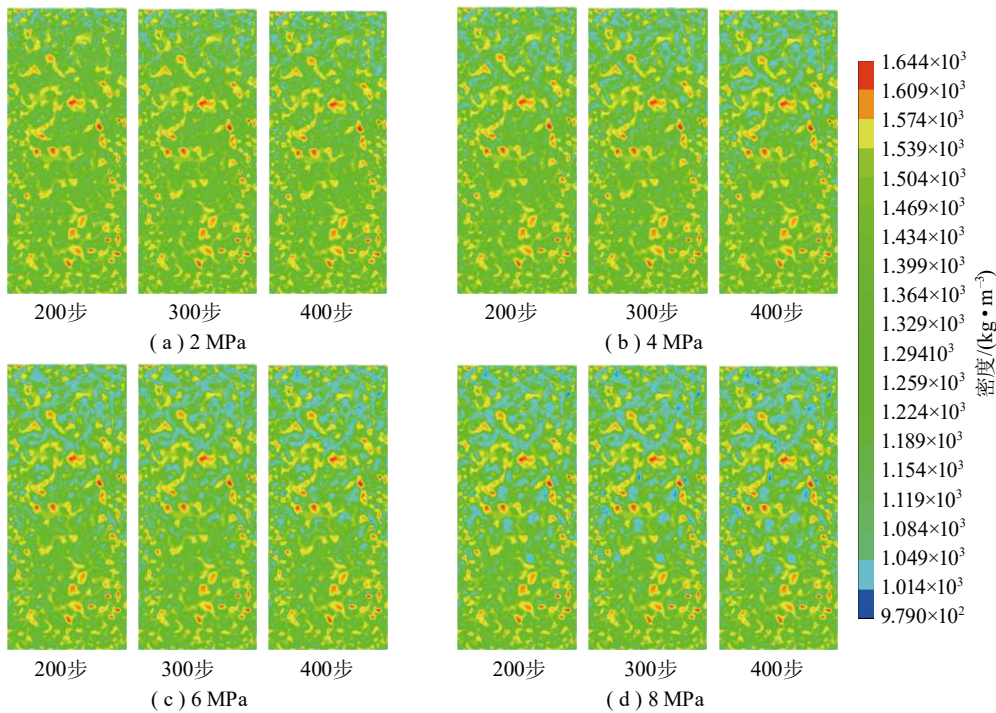


图 9 模拟结果 1 煤岩内部密度分布剖面图

Fig. 9 Simulation results 1. profile of density distribution in coal

对模拟过程中的入口流速进行监控, 分别将2, 4, 6, 8 MPa孔隙水压下的入口注入量进行绘制, 如图10所示。

加载2 MPa水压初始阶段, 入口注入流量有短暂波动。孔隙压力稳定后, 入口注入流速大小随之稳定。随着孔隙水压的增大, 入口注入流速呈现小幅阶段性增长。主要是由于在进行三轴试验时, 在0~20 kN, 孔隙率随轴向力的增大而减小, 因此在模拟结果1中, 入口注入流速受模型孔隙率大小的影响, 使模拟结果1的入口流速只能以较小的幅度增长。

对于加载渗透性试验结果拟合孔隙率随孔隙水压变化的UDF程序后的数值模拟结果(以下简称

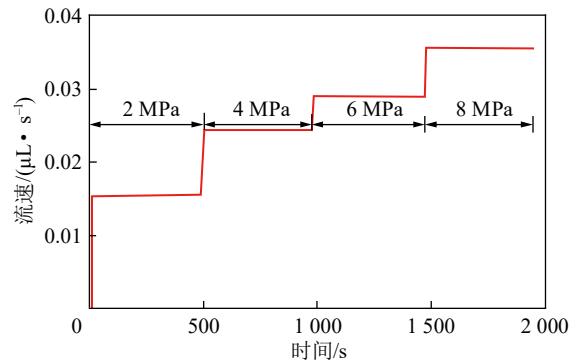


图 10 模拟结果 1 入口流速变化

Fig. 10 Inlet velocity variation of simulation result 1

模拟结果2), 煤岩内部压力分布剖面如图11所示。同模拟结果1相似, 在加载水压的初始阶段, 煤岩

内部压力处于动态的变化中, 随着水压的加载, 煤岩内部压力变化逐渐趋于稳定。与模拟结果1不同,

模拟结果2压力分布的变化更明显, 高压区域占比相较于模拟结果1更大。

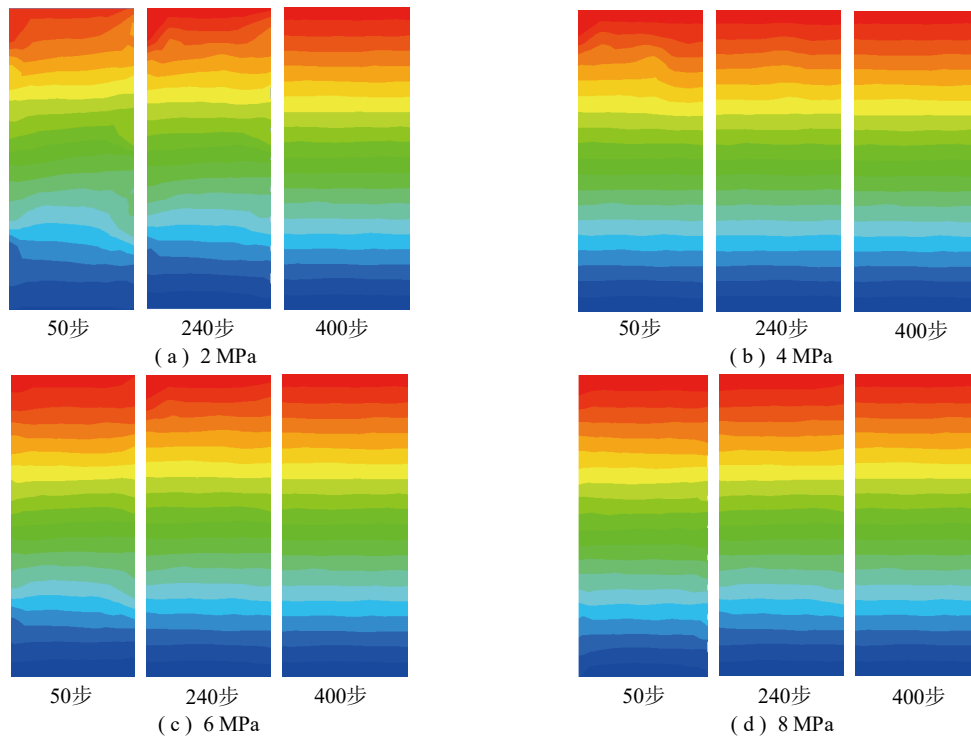


图 11 模拟结果 2 煤岩内部压力分布剖面图

Fig. 11 Simulation result 2 profile of pressure distribution in coal

加载程序后, 煤岩内部密度分布剖面如图12所示, 由图12可以明显看出, 与模拟结果1一样, 随着水压的不断增大, 煤体内部含水率逐渐增大, 水分

从注入点向底部逐渐扩散。相对于模拟结果1, 模拟结果2水分扩散范围更广, 煤岩孔隙率变化更显著。

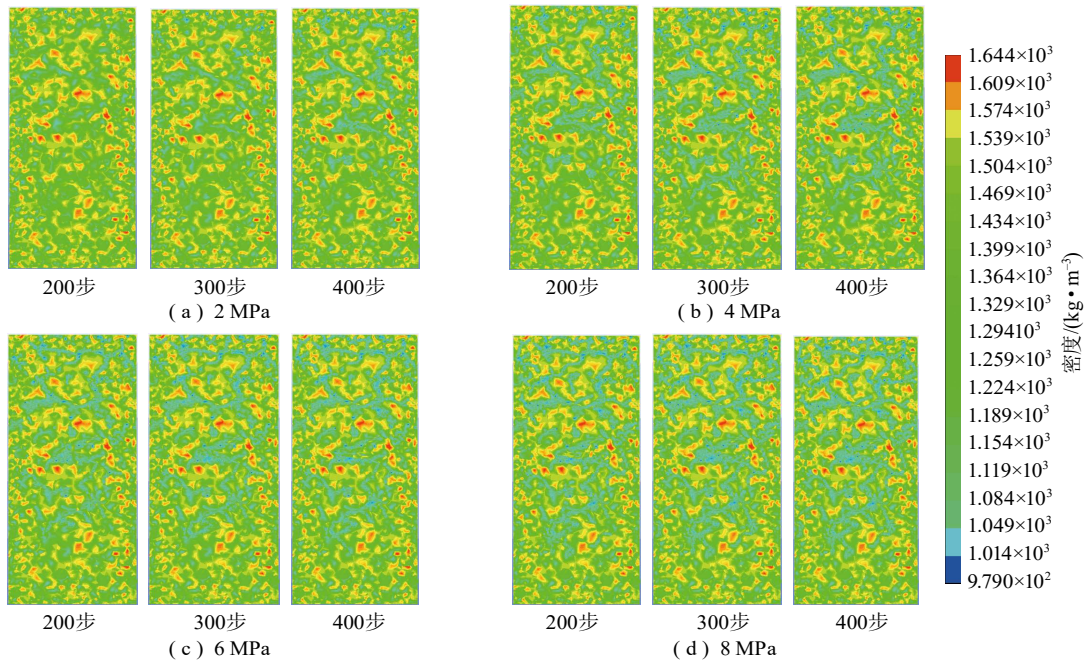


图 12 模拟结果 2 煤岩内部密度分布剖面图

Fig. 12 Simulation results 2. profile of density distribution in coal

对不同孔隙水压下模拟过程中的入口流速进行监控, 如图13所示。

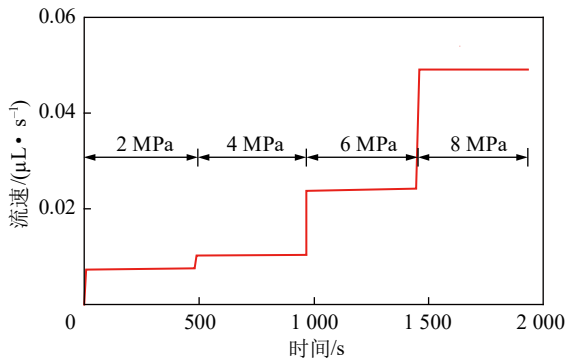


图 13 模拟结果 2 入口流速变化

Fig. 13 Inlet velocity variation of simulation result 2

由图13可知, 随着孔隙水压的增大, 模拟结果2入口注入流速呈现阶段性增长, 且增长幅度较大。出现图13中流速变化的主要原因为, 在进行煤岩渗透性试验时, 孔隙率随孔隙水压的增大而增大, 因此在模拟结果2中, 加载孔隙水压时, 模型孔隙率会增大, 导致入口流速递增, 且入口流速最大值高于模拟结果1。

综上所述, 相对于模拟结果1, 模拟结果2煤岩

内部压力分布与密度分布变化更大。并且由于入口注入流速受模型孔隙率大小的影响, 模拟结果1与模拟结果2入口流速变化呈不同的变化规律。

为进一步研究应力及孔隙水压共同作用下煤岩体积变形的影响规律, 在Transient Structural应力场模拟中进行流固耦合数值模拟, 应力的加载路径如图14所示。图15为在不同孔隙水压条件下计算600, 1 200, 1 800 s时的流固耦合数值模拟的煤岩轴向变形结果。图16为4种不同孔隙水压下流固耦合数值模拟的煤岩体积变形与孔隙率变化曲线。

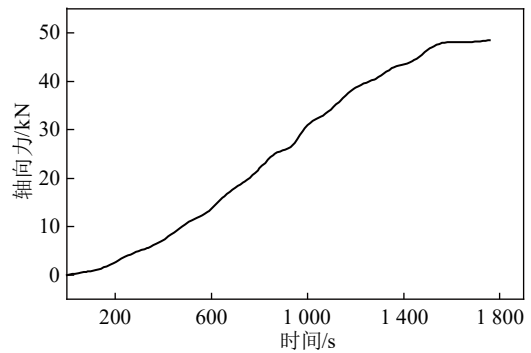


图 14 应力加载路径

Fig. 14 Stress loading path

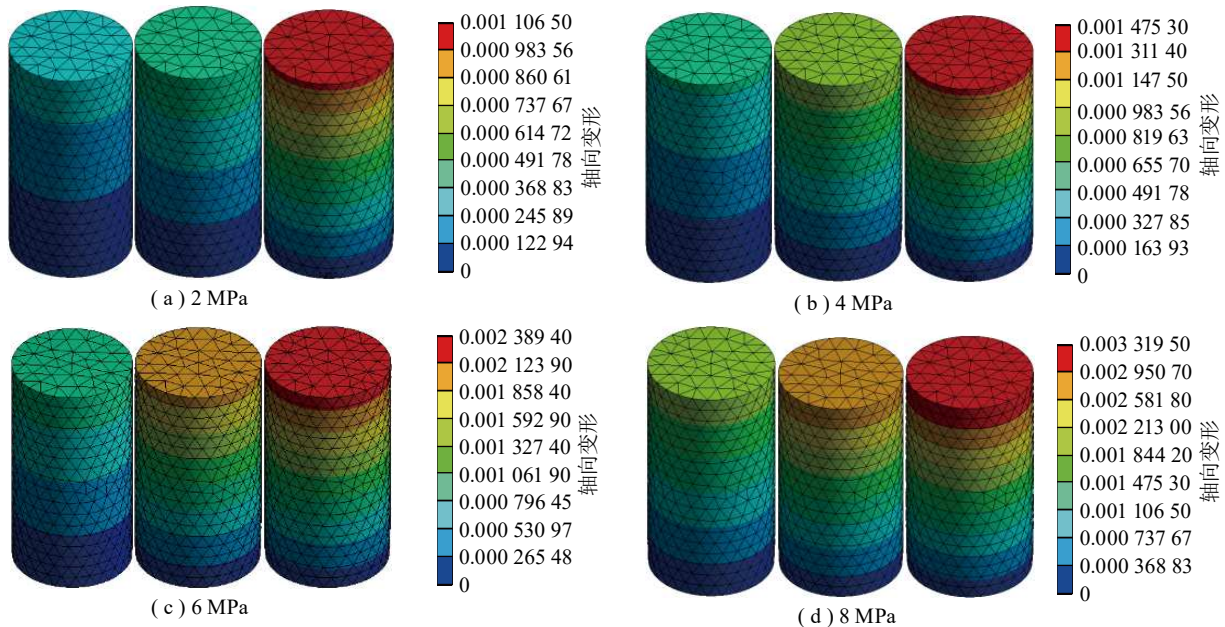


图 15 不同孔隙水压下流固耦合数值模拟煤岩轴向变形结果

Fig. 15 Numerical simulation of axial deformation in coal under different pore water pressure

根据流固耦合数值模拟结果, 可知, 煤岩上部变形最大, 轴向变形量由下至上逐渐增加, 且变形由上至下逐渐传递。在相同孔隙水压下, 轴向力大小与体积变形成正相关; 在同等应力状态下, 孔隙

水压与体积变形成正相关。

孔隙水压对煤岩具有双重作用效果, 一方面为赋存于裂隙、孔隙的自由水提供渗透动力, 另一方面对煤岩基质骨架产生明显的力学作用, 且不同

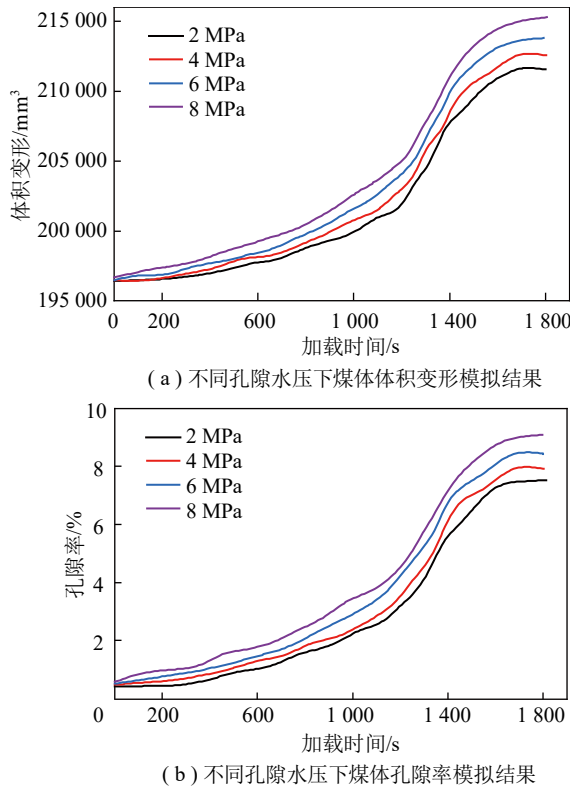


图 16 不同孔隙水压下流固耦合数值模拟煤岩体积变形与孔隙率变化

Fig. 16 Numerical simulation of coupled flow-deformation and porosity variation in coal under different pore water pressure

应力状态下孔隙水压力的力学作用效果亦不相同, 具体表现为孔隙水压越大, 越容易对煤岩基质骨架造成破坏。

3 讨论

根据试验数据及加载两种不同孔隙率随孔隙水压变化UDF程序后的模拟数据, 绘制了入口注入流量以及渗透率随孔隙水压变化的折线图, 如图17所示。图17中黑色折线为试验平均值, 其入口注入流量与渗透率随孔隙水压的增大而逐渐增加, 呈逐渐上升趋势; 红色折线为模拟结果1, 虽然其入口注入流量以及渗透率随孔隙水压的增大也在增大, 但增长率明显减小; 蓝色折线为模拟结果2, 其入口注入流量与渗透率随孔隙水压的增大而增加, 增长趋势与试验结果较为相似, 但略高于试验结果数据。这是由于数值模拟是在较为理想状态下进行的计算, 未考虑其煤体物理特征的复杂性。对于模拟结果1、模拟结果2与试验结果的曲线变化趋势不同这一现象可以解释为: 在模拟结果1中加载的

是三轴压缩试验结果拟合孔隙率随孔隙水压变化的UDF程序, 不考虑试验过程中水压对孔隙率的影响, 而模拟结果2加载的是渗透性试验结果拟合孔隙率随孔隙水压变化的UDF程序, 考虑了水压的影响。除此之外, 由于在模拟过程中, 入口注入流量与渗透率的变化与模型孔隙率相关。在三轴压缩试验中, 轴向力在0~20 kN时, 煤岩孔隙率随轴向力的增大而减小, 但在进行煤岩渗透性试验时, 孔隙率随孔隙水压的增大而增大。在以上因素的共同作用下, 导致模拟结果1、模拟结果2与试验结果曲线变化趋势具有一定的差异性。正如上文所提到, 煤岩孔隙率的变化受应力与水压的共同影响, 通过比较可以得出, 模拟结果2的环境更接近于实际的试验环境, 因此模拟结果2入口注入流量与渗透率变化更加接近于试验结果, 相较于试验结果, 误差范围均在9%以内。

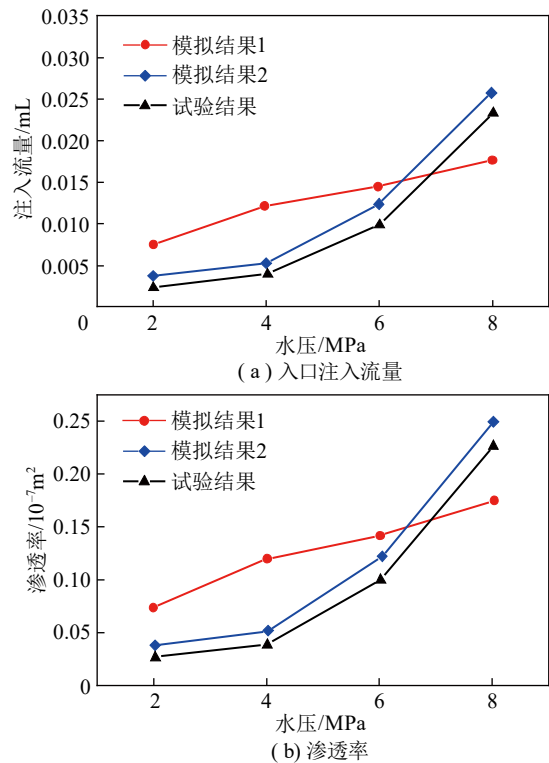


图 17 试验与模拟结果对比

Fig. 17 Comparison of test and simulation results

4 结论

(1)三轴压缩试验中, 在轴向力加载初期, 孔隙率变化率首先呈降低趋势, 但随轴向力的逐渐增大, 煤岩孔隙率变化率逐渐开始增加; 在三轴压缩试验基础上进行的煤岩渗透性试验中, 当施加应力

条件并增加孔隙水压时, 孔隙率变化率随孔隙水压的增大而增大, 说明煤体孔隙率的变化受应力条件及孔隙水压的共同作用。

(2)基于Fluent动态数值模拟可知, 煤岩轴向变形与水压分布由上至下传递, 且在传递过程中逐渐减小。相同孔隙水压下, 轴向力大小与体积变形成正相关; 在同等应力状态下, 孔隙水压与体积变形成正相关。

(3)对比模拟与试验结果可以发现, 采用加载渗透性试验结果拟合孔隙率随孔隙水压变化UDF程序的模拟结果(模拟结果2)压力分布与密度分布变化程度更明显, 且模拟结果2的入口注入流量及煤体渗透率变化更加接近试验结果, 误差范围均小于9%。

(4)由不同孔隙水压及应力条件下的流固耦合数值模拟结果可知, 煤岩的变形与渗流受应力及孔隙水压的共同影响, 且孔隙水压力对煤岩具有双重作用效果。一方面, 孔隙水压能为赋存于孔隙的自由水提供渗透动力; 另一方面, 孔隙水压能对煤岩基质骨架产生明显的力学作用。不同应力状态下孔隙水压力的力学作用效果亦不相同, 具体表现为孔隙水压越大, 越容易对煤岩基质骨架造成破坏。

参考文献(References):

- [1] 丁湘, 闫鑫, 李哲, 等. 基于沉积控压规律的鄂尔多斯盆地中深部矿井冲击危险性分区评价[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2023, 5(4): 043014.
DING Xiang, YAN Xin, LI Zhe, et al. Risk assessment of rock burst in middle deep mines, the northern ordos basin based on depositional controlling theory[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2023, 5(4): 043014.
- [2] 吕志强, 黄亚军, 景明, 等. 深部软岩巷道变形破坏机理及支护技术[J]. 能源与环保, 2023, 45(11): 280–286.
LYU Zhiqiang, HUANG Yajun, JING Ming, et al. Deformation and failure mechanism and supporting technology of deep soft rock roadway[J]. China Energy and Environmental Protection, 2023, 45(11): 280–286.
- [3] 卢恒, 张传宝, 仵振华, 等. 综放工作面过空巷矿压显现规律及控制技术研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(6): 063011.
LU Heng, ZHANG Chuanbao, WU Zhenhua, et al. Study on ground pressure and control technology of a fully mechanized top coal caving longwall face passing a pre-driven roadway[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(6): 063011.
- [4] 李德文, 赵政, 郭胜均, 等. “十三五”煤矿粉尘职业危害防治技术及发展方向[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(4): 51–58.
LI Dewen, ZHAO zheng, GUO Shengjun, et al. “13th five-year plan” coal mine dust occupational hazard prevention and control technology and development direction[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(4): 51–58.
- [5] 王青松, 金龙哲, 孙金华. 煤层注水过程分析和煤体润湿机理研究[J]. 安全与环境学报, 2004(1): 70–73.
WANG Qingsong, JIN Longzhe, SUN Jinhua. A Research on coal seam water infusion course and coal body wetness mechanism[J]. Journal of Safety and Environment, 2004(1): 70–73.
- [6] 陈向军, 程远平, 何涛, 等. 注水对煤的瓦斯扩散特性影响[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(3): 443–448.
CHEN Xiangjun, CHENG Yuanping, HE Tao, et al. Water injection impact on gas diffusion characteristic of coal[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(3): 443–448.
- [7] 郭红玉, 苏现波. 煤层注水抑制瓦斯涌出机理研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(6): 928–931.
GUO Hongyu, SU Xianbo. Research on the mechanism of gas emission inhibition in water-flooding coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(6): 928–931.
- [8] 吴国友, 刘奎, 郭胜均, 等. 综放面特殊煤层的注水降尘研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(1): 99–103.
WU Guoyou, LIU Kui, GUO Shengjun, et al. Dust reduction by water injection into coal seam of fully mechanized top-coal caving face[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(1): 99–103.
- [9] 阮进林, 李旺年, 钟自成. 机载锚杆钻机巷道支护及煤层注水技术应用[J]. 煤炭工程, 2022, 54(5): 50–53.
RUAN Jinlin, LI Wangnian, ZHONG Zicheng. Application of mounted jumbolter in roadway supporting and coal seam water injection[J]. Coal Engineering, 2022, 54(5): 50–53.
- [10] 肖知国, 王兆丰. 煤层注水防治煤与瓦斯突出机理的研究现状与进展[J]. 中国安全科学学报, 2009, 19(10): 150–158.
XIAO Zhiguo, WANG Zhaofeng. Status and progress of studies on mechanism of preventing coal and gas outburst by coal seam[J]. China Safety Science Journal, 2009, 19(10): 150–158.
- [11] 赵东, 冯增朝, 赵阳升. 高压注水对煤体瓦斯解吸特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(3): 547–555.
ZHAO Dong, FENG Zengchao, ZHAO Yangsheng. Ex-

- perimental study of effects of high pressure water injection on desorption characteristic of coal-bed methane(CBM)[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(3): 547–555.
- [12] 陈泽, 董旭东, 卞涛, 等. 采煤工作面职业病危害防治研究[J]. 煤炭工程, 2022, 54(S1): 230–234.
CHEN Ze, DONG Xudong, BIAN tao, et al. Exploration of prevention and control of occupational diseases in coal mining faces[J]. Coal Engineering, 2022, 54(S1): 230–234.
- [13] BIOT C, GLORIAN G, MACIEJEWSKI L A, et al. Synthesis and antimalarial activity in vitro and in vivo of a new ferrocene-chloroquine analogue[J]. Journal of Medicinal Chemistry, 1997, 40(23): 3715–3718.
- [14] NOORISHAD J, AYATOLLAHI M-S, WITHERSPOON P-A. A finite-element method for coupled stress and fluid flow analysis in fractured rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1982, 19(4): 185–193.
- [15] THALLAK S, ROTHENBURG L, DUSSEAUULT M. Simulation of multiple hydraulic fractures in a discrete element system[M]. American Rock Mechanics Association, 1991.
- [16] PAUL Witherspoon. Investigations at Berkeley on fracture flow in rocks: From the parallel plate model to chaotic systems[J]. Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series, 2013, 122: 1–58.
- [17] 薛世峰, 仝兴华, 岳伯谦, 等. 地下流固耦合理论的研究进展及应用[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2000(2): 109–114.
XUE Shifeng, TONG Xinghua, YUE Boqian, et al. Progress of seepage rock mass coupling theory and its application[J]. Journal of the University of Petroleum China, 2000, 24(2): 109–114.
- [18] 易欣, 任瑶, 肖旻, 等. 热-力耦合作用下煤岩体渗流特性研究[J]. 煤矿安全, 2022, 53(4): 56–61.
YI Xin, REN Yao, XIAO Yang, et al. Study on coal permeability characteristics under thermo-mechanical coupling[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(4): 56–61.
- [19] MENG Junqing, NIE Baisheng. Study on water seepage law of raw coal during loading process[J]. Mathematical and Computational Applications, 2015, 20: 217–227.
- [20] 王利, 张新生, 田林, 等. 基于孔隙弹性耦合的水力压裂数值模拟研究[J]. 固体力学学报, 2017, 38(6): 558–569.
WANG Li, ZHANG Xinsheng, TIAN Lin, et al. The coupling method and numerical simulation of hydraulic fracturing based on poroelasticity[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2017, 38(6): 558–569.
- [21] 蒋长宝, 魏文辉, 刘晓冬等. 应力—应变—渗流耦合条件下煤岩渗流特性及其可视化研究[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(5): 59–63, 72.
JIANG Changbao, WEI Wenhui, LIU Xiaodong, et al. Study on seepage characteristics and visualization of coal and rock under coupled stress-strain-seepage conditions[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(5): 59–63, 72.
- [22] 王进尚, 王俊, 姚多喜. 底板渗流应力耦合破坏与递进导升协同突水演变规律研究[J]. 能源与环保, 2022, 44(1): 16–20.
WANG Jinshang, WANG jun, YAO Duoxi. Study on evolution law of water inrush coordinated by seepage stress coupled failure and progressive guiding in floor[J]. China Energy and Environmental Protection, 2022, 44(1): 16–20.
- [23] 张国新. 多孔连续介质渗透压力对变形应力影响的数值模拟方法探讨[J]. 水利学报, 2017, 48(6): 640–650.
ZHANG Guoxin. Study on numerical simulation method used in analyzing the effect of seepage pressure in continuous medium with pores on deformation and stress[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(6): 640–650.
- [24] 弓昊, 李铮, 胡皓宇. 基于赵固二矿煤岩损伤程度范围确定及渗透率演化规律研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2023, 5(1): 013023.
GONG Hao, LI Zheng, HU Haoyu. Determination of the damage degree of coal rocks and study on the evolution law of permeability based on Zhaogu No. 2 Coal Mine[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2023, 5(1): 013023.
- [25] 陈绍杰, 陈举师, 汲银凤, 等. 煤层注水促抽瓦斯及其影响因素的数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(11): 87–94.
CHEN Shaojie, CHEN Jushi, JI Yinfeng, et al. Numerical simulation of coal seam water infusion promoting methane drainage and its influence factors[J]. Journal of Harbin Insitute of Technology, 2017, 49(11): 87–94.
- [26] 王波, 黄子康, 胡仕宇, 等. 含瓦斯煤岩流变规律及三维本构模型研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2022, 41(5): 60–67.
WANG Bo, HUANG Zikang, HU Shiyu, et al. Rheological law and 3d constitutive model of coal rock containing gas[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2022, 41(5): 60–67.
- [27] ZHOU Gang, XU Mao, FAN Tao. Numerical simulation of combined water injection in deep coal seam and its field application for dust suppression and de-stressing: A case study at dongtan coal mine, China[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2018, 36: 1–9.
- [28] SHAN P F, LAI X P. Numerical simulation of the fluid-solid coupling process during the failure of a fractured

- coal-rock mass based on the regional geostress[J]. *Transport in Porous Media*, 2018, 124(3): 1061–1079.
- [29] 王婉洁, 高富强. 工作面覆岩采动裂隙演化规律物理及数值模拟研究[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2023, 5(2): 023033.
WANG Wanjie, GAO Fuqiang. Study of the evolution of mining-induced fractures with longwall face proceeds-insight from physical and numerical modeling[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2023, 5(2): 023033.
- [30] 孙庆刚, 张德矿, 韩甲业, 等. 煤与瓦斯突出防治技术途径探讨[J]. *中国煤层气*, 2015, 12(2): 3–7.
SUN Qinggang, ZHANG Dekuang, HAN Jiaye, et al. Discussion on the technical approaches of coal and gas outburst prevention and control[J]. *China Coalbed Methane*, 2015, 12(2): 3–7.
- [31] 蒋仲安, 王龙飞, 张晋京, 等. 煤层注水对原煤孔隙及甲烷吸脱附性能的影响[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(10): 2780–2788.
JIANG Zhongan, WANG Longfei, ZHANG Jinjing, et al. Influence of coal water injection on pore and methane adsorption desorption properties of raw coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(10): 2780–2788.
- [32] 孙四清, 张群, 闫志铭, 等. 碎软低渗高突煤层井下长钻孔整体水力压裂增透工程实践[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(9): 2337–2344.
SUN Siqing, ZHANG Qun, YAN Zhiming, et al. Practice of permeability enhancement through overall hydraulic fracturing of long hole in outburst-prone soft crushed coal seam with low permeability[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(9): 2337–2344.
- [33] MASSOUDI Farid M, JEONG H J, KIM K H, et al. Numerical investigation of particle transport hydrodynamics and coal combustion in an industrial-scale circulating fluidized bed combustor: Effects of coal feeder positions and coal feeding rates[J]. *Fuel*, 2017, 192: 187–200.