

煤岩水理性质及浸水弱化效应实验研究^{*}

曹健^{1,2,3,4}, 孙轩^{1,2,3,4}, 董雄斐⁵

(1. 内蒙古科技大学 矿业与煤炭学院, 内蒙古 包头 014010; 2. 内蒙古自治区矿业工程重点实验室, 内蒙古 包头 014010; 3. 内蒙古自治区煤炭安全开采与利用工程技术研究中心, 内蒙古 包头 014010; 4. 内蒙古煤炭绿色开采与绿色利用协同创新中心, 内蒙古 包头 014010; 5. 国能神东煤炭集团上湾煤矿, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

摘要: 通过测定孔隙率和渗透率的水理实验, 得出煤体渗透率为 0.744 1 mD、孔隙率为 2.79% ~ 2.83%, 通过设计煤样试件在不同含水率条件下的单轴压缩实验, 量化分析出不同饱和度条件下力学参数的衰减规律。与干燥组煤样相比, 含水率为 4.25% 的半饱和组煤样峰值强度下降了 1.77%、弹性模量下降了 15.83%, 峰值应变和泊松比分别升高了 17.25% 和 24.00%; 含水率为 8.25% 的半饱和组煤样峰值强度下降了 5.73%、弹性模量下降了 30.22%, 峰值应变和泊松比分别升高了 35.81% 和 48.00%。研究结果表明: 水对煤样的力学性质弱化明显, 浸水程度越高, 峰值强度和弹性模量数值越低, 峰值应变和泊松比数值越高。

关键词: 软化特性; 浸水弱化; 地下水库; 水理实验

中图分类号: TD325 文献标识码: A

文章编号: 2095-2295(2026)01-0082-07

DOI: 10.16559/j.cnki.2095-2295.2026.01.011

Hydrophysical properties of coal and the experimental research of the weakening effect of immersion water

CAO Jian^{1,2,3,4}, SUN Xuan^{1,2,3,4}, DONG Xiongfei⁵

(1. School of Mining and Coal, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010, China; 2. Inner Mongolia Key Laboratory of Mining Engineering, Baotou 014010, China; 3. Inner Mongolia Research Center for Coal Safety Mining and Utilization Engineering and Technology, Baotou 014010, China; 4. Inner Mongolia Cooperative Innovation Center for Coal Green Mining and Green Utilization, Baotou 014010, China; 5. Shangwan Coal Mine, CHN Energy Shendong Coal Group, Ordos 017000, China)

Abstract: Through the hydrological experiments of determining porosity and permeability, the permeability of the coal body is 0.744 1 mD; the porosity is 2.79% ~ 2.83%; through the design of uniaxial compression experiments of coal sample specimens under different water content conditions, the attenuation law of mechanical parameters under different saturation conditions is quantitatively analyzed. Compared with the dry group, the peak strength of the half-saturated group with 4.25% water content decreased by 1.77%, the modulus of elasticity decreased by 15.83%, and the peak strain and Poisson's ratio increased by 17.25% and 24.00%, respectively; for the half-saturated group with 8.25% water content, the peak strength decreased by 5.73%, the modulus of elasticity decreased by 30.22%, and the peak strain and Poisson's ratio increased by 35.81% and 48.00%. The results showed that water weakened the mechanical properties of coal samples significantly, the higher the degree of water immersion, the lower the values of peak strength and elastic modulus, and the higher the values of peak strain and Poisson's ratio.

Key words: softening properties; weakening by water immersion; groundwater reservoir; hydrological experiment

* 基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金(2022QN05007)。

作者简介: 曹健, 男, 教授, E-mail: 2020913@imust.edu.cn

收稿日期: 2025-04-01

顾大钊首次提出了“煤矿地下水库”的理论架构,认为坝体的构建是煤矿地下水库建设的关键,且煤柱坝体由于其自身的复杂性,也是目前坝体参数设计中的重要环节之一^[1-2]。地下水是影响煤柱稳定性的的重要因素^[3],由于浸水影响范围取决于渗透率和孔隙率等煤体水理性质,力学参数的降低幅值取决于力学强度、弹性模量等不同含水率下的力学性质;而煤柱坝体长期浸水后,力学参数会显著降低。因此,开展煤体水理参数及浸水后力学参数弱化的测定实验,成为研究坝体稳定性的先决条件,对保证煤柱坝体的安全运行具有重要意义。

目前,国内外学者在煤体水理性质及浸水后力学弱化方面做了广泛研究,刘志雄等^[4]研究了类岩石材料浸水后的孔隙特征。齐学元等^[5]通过对煤样天然含水率和吸水性的测定试验,研究了煤样的含水率与浸水时间的相互关系,通过对浸水的煤样进行超声波检测试验及单轴压缩试验,分析了浸水对煤岩体物理力学性质的影响。此外,通过物理试验量化了不饱和水含量和饱和水含量间煤的强度的降低程度^[5-8]。MEDHURST等^[7]研究了不同亮度的煤在浸水后力学三轴强度上的变化,在霍克-布朗准则基础上,采用损伤因子快速评估浸水后煤体的力学性能。刘成城等^[6]通过石灰岩单轴压缩试验,得到了石灰岩单轴压缩条件下的应力特征。YAO等^[8]通过单轴压缩试验得出,随着煤试样含水率的增加,全应力-应变曲线呈现出塑性变形的特征。此外,也有学者研究得出^[9-11],峰值应变与含水率呈正线性关系,抗压强度与含水率呈负线性关系的结论。

研究通过对神东矿区煤体的水理性质、强度弱化及对不同含水率条件下多力学参数弱化的定量分析,构建水理实验,考察煤样的孔隙度和含水率,再结合不同含水率条件下煤样的单轴实验,得出不同含水率条件下的力学参数,进而分析含水率与力学参数弱化指标间的换算关系。

1 实验方案

1.1 试样制备及无损浸水装置构建

选取神东矿区某矿井作为实验煤样,按照国际岩石力学学会要求,将实验煤样加工成18块直径为50 mm、高度为100 mm的标准煤(岩)样,挑选其中9块用于单轴压缩试验,3块用于水理实验,其余样品作为备用试样。

煤(岩)样浸水饱和操作分为直接浸泡法、加压

饱水法以及无损浸水法^[2],其中无损浸水法采用无损浸水装置探究煤样的吸水特性。如图1所示,无损浸水设备由超声波雾化器、大功率风扇、导雾管等部分组成。工作期间,雾化器中的10孔雾化片在超声波作用下,带动附近的液体水共振,使液体水转化为雾化小液滴聚集在雾化腔内。雾化腔上方的大功率风扇启动后,导致雾化腔内的压力增大,雾化小液滴通过导雾管压入试件腔并附着于煤样表面,由于煤样试件内孔隙结构而形成毛管力的作用,使得雾化小液滴浸入煤样内部,从而达到无损浸水的效果。



图1 无损浸水设备

Fig. 1 Non-destructive water immersion device

与其他浸水饱和方法相比,无损浸水法的优势在于:降低了水压力的影响,减少了直接浸水压力对试样本身所带来的损伤。与此同时,由于附着于煤样表面的水膜与直接浸水面不同,水膜未对煤样表面所有孔隙通道密封,雾化小液滴所驱替出的原有孔隙中的空气有排出通道,可以进一步提高浸水效率。

1.2 水理实验方案

在水理实验前,将其中3件煤样分别编号为A-1、A-2、A-3。

1)天然质量称取:取9件天然煤样分别置于电子天平,待数值稳定后记录数值为其天然重量 w_0 。

2)烘干操作:将3件天然煤样置于电热鼓风干燥箱,设定烘干温度为105℃,达到预设温度后,每隔40 min 暂停加热并静置冷却至室温后,取出试样

并称取此时煤样的重量,随后循环进行加热、静置、称量操作直至煤样的重量不发生改变,记录此时的煤样重量为干重量,记为 w_0 。

3) 浸水操作:接通无损浸水装置的电源,观察到试件腔内有稳定的水雾喷出,或壁面有水滴均匀滴下时,将试件放入试件腔。按照一定时间间隔取出试样,用纸巾去除试件表面水滴后称重,并向雾化腔内添加适量的去离子水。重复浸水-称量步骤,直至煤样重量保持不变,此时的重量即为饱和重量。

4) 渗透率测量:将饱和煤样放入岩芯夹持器内并密封,设置驱替压力为 5 MPa、围压压力为 8 MPa、试验温度为 16 °C,接入去离子水作为驱替介质,启动岩性驱替实验装置后,以 1 s 为时间间隔确定出口流量。

5) 孔隙度测量:将标准油样置于纽迈低场核磁共振岩芯分析仪的线圈中央预扫描,自动找到中心频率等参数后,取出标准油样,放入饱和煤样,执行定位扫描操作,调整测量序列为 SPIN ECHO 序列,调整参数 TR3 200、TE9.5、TI20 ms,移动试样放置位置,直至观察到清晰定位像后,启动扫描采集核磁信号。启动岩芯分析软件,将 t_2 信号频谱转化为孔隙度信息,如图 2 所示。

1.3 力学实验方案

根据浸水煤样完全饱和和状态下试件含水率在

8.34% ~ 8.51% 区间的吸水特征,将含水率为 0%、4%、8% 的煤样试件分为干燥组 D、半饱和组 H、饱和组 S3 个小组,每组 3 个试件,选取每组对应浸水时间分别为 0、25、75 min 的煤样进行实验,浸水操作同吸水特性分析时的操作相同。选取 SAS 电液伺服岩石力学试验机作为加载系统,30 mm × 7 mm 应变片及 DH3816 型多线程应变仪作为数据采集系统。其中,多线程应变片每个试件安装 2 片,分别按照径向和轴向监测试件表面应变数据。

不同含水率下煤样实验组的具体参数如表 1 所示,采用岩石力学试验机对不同含水率的煤样试件进行单轴压缩试验,实验过程采用位移控制加载方式,加载速率为 $0.15 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,保持加载速率恒定直至试件发生破坏,确保所有煤样加载条件相同。

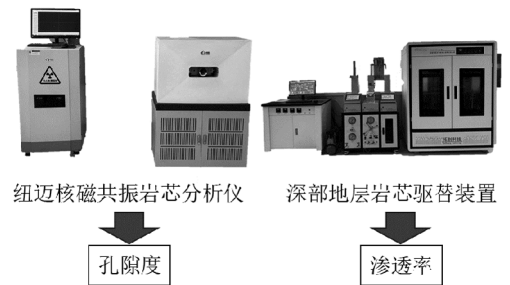


图 2 水理特性试验方案

Fig. 2 Test plan for hydraulic properties

表 1 不同含水率下煤样实验组参数

Table 1 Experimental group parameters of coal samples under different moisture contents

组别	煤样编号	烘干重量/g	含水重量/g	含水率/%	浸水时间/min
干燥组	D-1	241.60	—	0	0
	D-2	246.30	—	0	0
	D-3	240.30	—	0	0
半饱和组	H-1	242.70	252.50	4.03	25
	H-2	244.70	255.90	4.57	25
	H-3	245.40	256.30	4.15	25
饱和组	S-1	248.30	268.70	8.21	75
	S-2	243.20	263.30	8.26	75
	S-3	239.70	259.90	8.42	75

2 煤体水理实验结果分析

2.1 浸水实验分析

根据上述试验方案,无损浸水过程中的吸水量(含水率)随时间的变化曲线,如图3所示:

煤样试件吸水试验共进行了100 min,由于干燥煤样试件质量相近,且吸水量与含水率的变化趋势关联性较强。根据吸水量和含水率随时间变化率的大小,将整个吸水过程划分为3个阶段:

1)快速吸水阶段(0~25 min):此阶段表明干燥试件质量越小,试件内部孔隙越多,对于水雾的毛细作用力越强,快速吸水阶段曲线变化斜率越大。快速吸水阶段在第25 min时,其吸水量数据点集中在11.00~12.70 g、含水率集中在4.23%~4.67%,可认为表面孔隙被水充满。

2)匀速吸水阶段(25~75 min):煤样试件在该阶段内吸水速率放缓,部分时刻出现了暂时停滞现象,可能是由于通道中的空气与水冲突,保持了暂时性的力平衡状态。在第75 min时,含水量保持在21.80~22.50 g,含水率保持在7.99%~8.38%。

3)吸水饱和阶段(75~100 min):该阶段煤样试件重量基本不变,含水量保持恒定,吸水量保持在22.20~24.10 g,含水率保持在8.34%~8.51%。

岩石浸水过程,其实就是水驱替孔隙中空气的过程,驱替过程自表面不断深入,岩石内空气和水的渗流路径,随着水的深入而逐渐复杂,在孔隙结构较为相近的情况下,吸水速率取决于通道的复杂性,因此表面通道简单,吸水最快,体现出快速吸水阶段的现象,而中部及内部则体现出匀速和慢速吸水的特性。

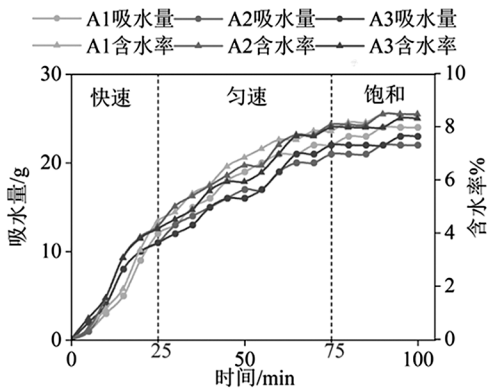


图3 浸水实验结果

Fig. 3 Water immersion test results

2.2 渗透率实测分析

渗透率测量遵照《煤和岩石渗透率测定方法(MT/T 233—90)》行业标准,采用拓创-TCQT150型层多功能岩心驱替实验装置对饱和煤样试件A-1进行液相渗透率测试,渗透分析的基本原理是利用注入端和出口端水压差的变化,运用达西定律进行计算,计算方法如式(1)所示:

$$K = \frac{\mu L Q}{S \Delta P} \quad (1)$$

式中: K 为组合岩芯液测渗透率值, mD ; μ 为地层水动力粘度, $Pa \cdot s^{-1}$; L 为岩芯长度, m ; Q 为注入液流速, $m^3 \cdot s^{-1}$; S 为组合岩芯的横截面积, m^2 ; ΔP 为注入端和出口端压力差值, Pa 。

根据式(1)及实际实验中所测得的进出口水压变化数据,如图4(左)所示,得到了实验过程中渗透率变化曲线,为了确定1个固定值作为后续研究中的参数,在此采用统计学方法,如图4(右)所示,对数据进行分类,选用数据样本的中值点作为煤样试件的渗透率参数,该煤样渗透率为 $0.007441 \mu m^2$ 。

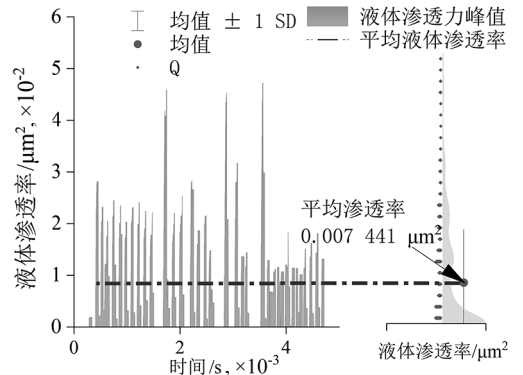


图4 煤岩渗透率测量结果

Fig. 4 Measurement results of coal-rock permeability

2.3 孔隙率实测分析

在浸水实验中,遵照《煤和岩石孔径分布的测定核磁共振法(GB/T 42035—2022)》国家标准,对A-2试件开展核磁共振实验,以测量饱和煤样的孔隙率,明确浸水机理,核磁共振测量孔隙率(NMRC)的基本原理为:分布于岩石孔隙中的水,其氢核在梯度磁场中发生自旋,从而产生T2信号,通过对T2信号进行反演,得到空间上的氢核密度,反映出孔隙的分布形式。当试样为饱和状态时,总体的氢核密度就可以反演出试样的孔隙率。基于此原理,分别在

A-2 煤样含水率为 3.96%、7.94%、8.38% (饱和) 时,进行核磁共振实验,实验结果如图 5 所示。

如图 5 所示,煤样在不同含水率下,孔的形态存在一定差异,浸水前期含水率为 3.69%,孔径大小相对集中,孔的形态相对单一。随着浸水过程的深入,含水率增加至 7.94%,与前一阶段相比,小孔的分布概率明显降低。图 5 中所出现的第 2 个孔径分布峰值,表明原有的小孔逐渐导通为中型孔。第 3 个峰值表明中孔变为大孔,当煤样处于饱和状态时,此时的孔径分布结构以大孔为主,小孔的分布峰值趋大化为中孔。饱和状态下煤样试件的孔隙率为 2.59% ~ 2.73%。

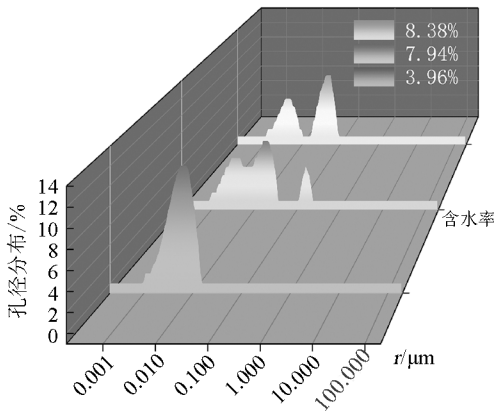


图 5 煤样试件不同含水率下的孔径大小分布瀑布图

Fig. 5 Waterfall plot of pore size distribution for coal specimens under different moisture contents

3 煤体浸水弱化实验分析

3.1 浸水煤样应力-应变关系分析

力学试验遵照《煤和岩石物理力学性质测定方法第 7 部分,单轴抗压强度测定及软化系数计算方法(GB/T 23 561.7—2009)》国家标准。由于岩石力学试验机与多线程应变仪所得数据采样时间点不统一,因此将岩石力学试验机输出的应力数据及多线程应变仪所得数据,以固定的测试时间为标准,同时结合多项克里金插值方法,从 2 组数据中选取一定数量的数据点绘制应力-应变曲线。

如图 6、图 7 所示,3 组试件的实验曲线相对较为集中,整体趋势符合标准煤样试件全程应力-应变曲线的特征。峰值应力(单轴抗压强度)和弹性阶段斜率(弹性模量)排除个体极端值的影响,总体呈现出干燥组(D 组) > 半饱和组(H 组) > 饱和组(S

组)的结果,表明浸水操作对力学参数的弱化效应较为显著。

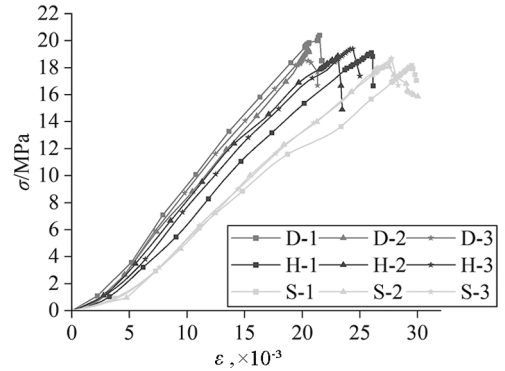


图 6 煤样试件应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of coal specimens

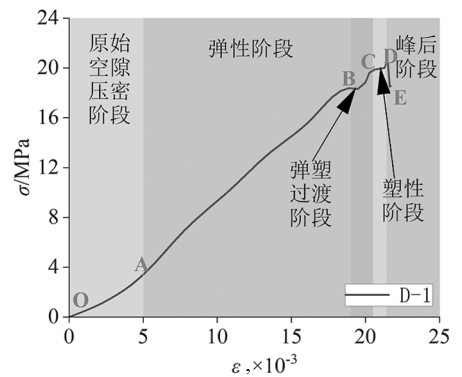


图 7 煤样破坏过程示意图

Fig. 7 Failure process of coal samples

3.2 浸水煤样力学参数弱化规律

为了探究不同含水率条件下,煤样力学弱化的参数指标,将上述力学试验结果进行整理分析,如表 2 所示。

依据单轴压缩试验数据计算不同含水率煤样的抗压强度、弹性模量、泊松比等力学参数。其中弹性模量、泊松比的计算公式,如式(2)所示:

$$E = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_{hb} - \varepsilon_{ha}} \quad (2)$$

式中: E 为弹性模量, GPa; σ_a 和 σ_b 为应力与轴向应变曲线直线段起点和终点应力值, GPa; ε_{hb} 和 ε_{ha} 为应力在 σ_a 和 σ_b 的轴向应变值, a. u.。

$$\mu = \frac{\varepsilon_{db} - \varepsilon_{da}}{\varepsilon_{hb} - \varepsilon_{ha}} \quad (3)$$

如式(3)所示: μ 为泊松比; ε_{hb} 和 ε_{ha} 为应力在 σ_a 和

σ_b 的轴向应变值, a. u. ; ε_{db} 和 ε_{da} 为应力在 σ_a 和 σ_b 的径向应变值, a. u. 。

峰值应力、峰值应变、弹性模量和泊松比随含水率变化趋势,如图 8 所示。

表 2 不同含水率条件下实验力学参数结果

Table 2 Results of experimental mechanical parameters under different moisture contents

编组	编号	峰值应力 σ_b /MPa	峰值应变 ε	弹性模量 E /GPa	泊松比 μ
干燥组	D-1	20.41	0.021	0.940	0.24
	D-2	19.33	0.020	0.942	0.22
	D-3	18.49	0.020	0.901	0.25
	平均	19.41	0.021	0.931	0.24
半饱和组	H-1	19.12	0.026	0.735	0.31
	H-2	18.71	0.022	0.816	0.32
	H-3	19.38	0.024	0.794	0.30
	平均	19.07	0.024	0.782	0.31
饱和组	S-1	18.16	0.029	0.615	0.36
	S-2	18.07	0.027	0.656	0.38
	S-3	18.68	0.027	0.673	0.37
	均值	18.31	0.028	0.648	0.37

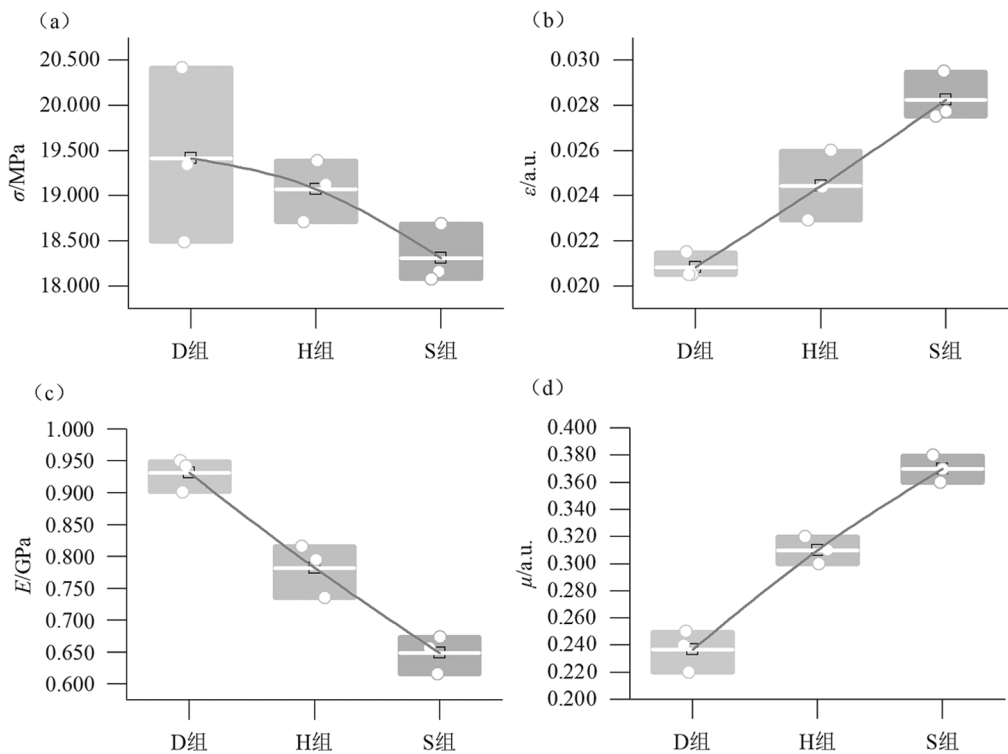


图 8 力学参数弱化折线图

Fig. 8 Line chart of mechanical parameter weakening

4 讨论

区别于文献[4]的直接浸泡方式,采用新型无损浸水方式,得到了浸水过程中的孔隙变化特征,实现了浸水方式的改进。基于神东矿区实际条件,对现场煤样进行了水理实验,通过掌握煤体水理参数,得出了含水率与时间的变化关系,该曲线变化特征可能适用于其他岩石材料^[6]。

5 结论

研究实测得到了现场煤样的水理参数,标准煤样在完全浸水饱和后,渗透率为 0.744 1 mD,孔隙率为 2.79% ~ 2.83%。

量化分析了煤样在浸水操作后的力学参数弱化规律,随着浸水饱和度的提高,煤样力学性质弱化规律逐渐突出。含水率为 4.25% 的半饱和状态煤样与含水率为 8.25% 的饱和状态煤样,相较于干燥状态煤样的力学性质发生弱化,峰值强度分别下降了 1.77% 和 5.73%,弹性模量分别下降了 15.83% 和 30.22%,峰值应变分别升高了 17.25% 和 35.81%,泊松比分别升高了 24.00% 和 48.00%。

确定了不同含水率条件下的煤样力学参数弱化指标,初步揭示了煤体浸水弱化机理,为神东矿区的煤柱坝体设计提供了科学依据。

参考文献:

- [1] 顾大钊. 煤矿地下水库理论框架和技术体系[J]. 煤炭学报,2015,40(2):239.
- [2] 姚强岭,郝琪,陈翔宇,等. 煤矿地下水库煤柱坝体宽度设计[J]. 煤炭学报,2019,44(3):890.

- [3] SHEOREY P R. Design of coal pillar arrays and chain pillars[M]. Oxford, UK: Pergamon Press, Ltd,1993:631.
- [4] 刘志雄,赵天成,孙鹏,等. 基于核磁共振技术的类岩石细观特征及对渗透率影响研究[J]. 内蒙古科技大学学报,2024,43(3):218.
- [5] 齐学元,邓广哲. 浸水耦合作用对煤体强度影响试验研究[J]. 煤炭技术,2022,41(1):4.
- [6] 刘城成,王创业,韩天宇,等. 单轴压缩下石灰岩声发射主频特征[J]. 内蒙古科技大学学报,2023,42(1):76.
- [7] MEDHURST T P, BROWN E T. A study of the mechanical behaviour of coal for pillar design[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,1998,35(8):1087.
- [8] YAO Q L, LI X H, ZHOU J, et. al. Experimental study of strength characteristics of coal specimens after water intrusion[J]. Arabian Journal of Geosciences,2015,8(9):6779.
- [9] VERSTRYNCE E, ADRIAENS R, ELSEN J, et. al. Multi-scale analysis on the influence of moisture on the mechanical behavior of ferruginous sandstone[J]. Construction and Building Materials,2014,54:78.
- [10] ROSHAN H, EHSANI S, MARJO C E, et. al. Mechanisms of water adsorption into partially saturated fractured shales: an experimental study[J]. Fuel,2015,159:628.
- [11] PAN Z J, CONNELL L D, CAMILLERI M, et. al. Effects of matrix moisture on gas diffusion and flow in coal[J]. Fuel,2010,89(11):3207.

(责任编辑:祁鑫)