



移动扫码阅读

李治豪,陈世江,杜广盛,等.不同围压和水压加载下煤岩渗流规律研究[J].煤炭科学技术,2020,48(12): 101-108. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.12.012
LI Zhihao, CHEN Shijiang, DU Guangsheng, et al. Research on coal and rock seepage laws under different confining pressures and hydraulic pressures [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48 (12): 101 - 108. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2020.12.012

不同围压和水压加载下煤岩渗流规律研究

李治豪,陈世江,杜广盛,高臻炜,谷运峰,刘守彬
(内蒙古科技大学 矿业研究院,内蒙古 包头 014000)

摘要:随着煤炭资源逐步进入深部开采,煤岩的赋存条件异常复杂,严重影响其渗流特性。基于此,为研究煤岩在复杂地质条件作用下其渗流特性的变化规律,采用岩石渗透分析仪和核磁共振煤岩孔隙分析系统,进行煤岩试件在不同水压和围压下的加载试验,得到了不同载荷下的渗流量。以此为基础,分别分析计算了渗透率、渗透系数与围压的关系,进而分析了渗流场和应力场的耦合作用。研究结果表明:煤岩受载渗流过程分为 3 个阶段:非线性阶段、近线性阶段和线性阶段;围压是煤岩渗流主要影响因素,且低围压和高围压下煤岩渗流速度变化规律不同;此次煤岩渗流试验,围压小于 4 MPa 时,渗流变化量呈指数增长;围压大于 4 MPa 时渗流变化量呈线性增长;煤岩孔隙变形分 3 个阶段:孔隙受压急剧变形阶段、孔隙受压缓慢变形阶段和孔隙受压压密阶段。研究结果可为煤层涌水量估算提供参考。

关键词:渗流试验;围压;渗流量;渗透速度;渗透系数

中图分类号:TD313 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2020)12-0101-08

Research on coal and rock seepage laws under different confining pressures and hydraulic pressures

LI Zhihao, CHEN Shijiang, DU Guangsheng, GAO Zhenwei, GU Yunfeng, LIU Shoubin
(Mining Research Institute of Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014000, China)

Abstract: As coal resources gradually enter deep mining, the occurrence conditions of coal and rock are extremely complicated, which seriously affects the seepage characteristics. Based on this study, the seepage characteristics of coal and rock under complex geological conditions, the loading tests of coal specimens were performed under different hydraulic pressure and confining pressure using rock permeability analyzer and nuclear magnetic resonance. The seepage flow under different loads was calculated. Based on this, the relationship between permeability, permeability coefficient and confining pressure was analyzed and calculated, and then the coupling effect of seepage field and stress field was analyzed. The results show that: The process of coal seepage under load is divided into three stages: nonlinear stage, nearly linear stage and linear stage. Confining pressure is one of the major influencing factors of coal seepage, and the law of seepage velocity of coal is different under low confining pressure and high confining pressure. In this coal seepage test, when the confining pressure is less than 4 MPa, the seepage change increases linearly and when the seepage change is greater than 4 MPa, it is linear. The pore deformation of coal can be divided into three stages, and they are rapid pore deformation under pressure, slow pore deformation under pressure and pore compaction. The research results can provide references for coal seam water inflow estimation.

Key words: seepage test; confining pressure; seepage flow; seepage velocity; permeability coefficient

0 引 言

煤岩是一种内部构造复杂的非均质性多孔介

质,在地应力的作用下或受到不同程度采动影响时,其内部结构特征会随着外力的改变发生不同程度的变化。因此,研究煤岩的渗流,探索其在外界载荷作

收稿日期:2020-06-21;责任编辑:曾康生
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51564038)
作者简介:李治豪(1996—)男,山西长治人,硕士研究生。E-mail:1457280516@qq.com

用下的渗透特性,对于煤田的地质勘探与开发和煤矿的安全生产有重要意义。

20 世纪末至今,国内外学者对煤岩渗流进行了大量的研究,以岩体的损伤破裂为基础,研究了煤岩的渗透机理。曹亚军等^[1]以花岗岩为试验材料进行了三轴流变试验,研究分析了低渗透岩石在不同围压和渗压下,岩石流变过程中的渗透性演化规律,分析和讨论了孔隙率和渗透率随围压的变化关系以及孔隙率和渗透率之间的函数关系。何峰等^[2]通过自行研发的三轴渗流蠕变测试仪对煤岩进行了渗流与蠕变的耦合试验,探讨了岩石在渗流作用下的蠕变特性,研究了煤岩峰前峰后的渗流蠕变规律;夏祖昊等^[3]采用自行研发的多场耦合三轴试验系统,针对破裂后的岩石进行了加、卸载的渗流试验,研究了峰后岩石裂隙不同路径下的渗流特征。李波等^[4]建立了煤岩渗透率和瓦斯压力梯度的数学模型,并进行了不同条件的渗流试验,对煤岩渗透率和孔隙压力之间的关系进行了研究。张永超等^[5]对国内外含水沉积物的微观孔隙探测方法进行了总结,对比分析了断层扫描(CT)、扫描电子显微镜(SEM)和核磁共振成像的应用现状和研究进展。张培森等^[6]通过高温与不同静水压力结合的方法对砂岩进行了温度应力耦合试验,发现高温高压下砂岩的渗透率近线性趋势降低,影响渗透率的主要原因是压力条件。丛海龙等^[7]采用 CT 扫描技术、压力敏感试验和数值模拟技术,从孔隙尺度对致密砂岩岩心单轴受力以及三轴受力过程进行分析,研究应力条件下的孔隙结构变化规律。杜敬国等^[8]以煤岩样品进行了扫描电镜试验,对研究区域煤岩裂缝发育形态进行了定量描述,分析了裂缝长度、宽度、密度等参数,建立了裂缝渗透性定量评价指标并研究了其影响因素。张瑞刚等^[9]以安坝金矿床为基础,通过研究断裂破碎带中不同岩性的孔隙度和渗透率的变化特性,发现赋存矿岩石表现出低孔隙度的特性。游利军等^[10]采用扫描电镜来观测砂岩孔喉的赋存状态,并以压汞法分析了盐析前后岩心孔喉半径的分布情况。赵阳等^[11]采用声发射的渗透试验对深部岩石顶板砂岩进行研究,从不同层面进行分析,总结出了深部岩层顶板砂岩的不同应力渗透演化特征。赖令彬等^[12]以毛细管两相渗流规律为基础,研究了毛细管不同流态的微观渗流机理,阐述了岩石相对渗透率的比值随流体饱和度变化的微观机理。邱淑霞等^[13]在分形几何理论的基础上,建立了多孔介质气体渗流的数学模型,推导了多尺度多孔介质的有效气体渗透率,研究了多孔介质微

结构对渗透率的影响。张朔等^[14]采用数值模拟分析的方法,对孔隙中气体单相流做了研究,分析了煤岩介质孔渗关系的影响作用。黄强等^[15]开展了覆压孔渗试验对比研究,研究了中、高煤阶煤储层在覆压条件的孔隙度、渗透率及应力敏感性的差异变化特征。司俊鸿等^[16]为了减少采空区渗透率分布对流场数值模拟精确度的影响,分析了采空区非均质多孔介质孔隙分布规律。张帅等^[17]采用理论分析和数值模拟的方法分析了煤体的渗透率分布规律。庞锋等^[18]采用试验模拟研究了煤层气注氮过程中的闷压压力和时间对高阶煤层渗透率的影响规律。关财芳等^[19]通过分析滇东老厂矿区水力压裂试井数据,探讨了地应力对储层压力、渗透率及超压现象的影响。

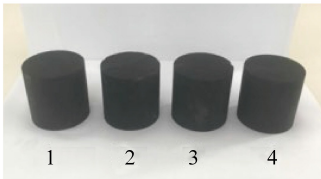
煤岩在围压的作用下,其内部结构必然发生变化,致使煤岩的渗透率也会发生变化。为研究煤岩渗透特性与围压和水压之间的关系,试验采用岩石渗透分析仪和纽迈核磁共振系统,对煤岩试件进行了不同围压下和不同水压的渗流试验,研究煤岩的渗流规律。

1 煤岩样制作

为了研究煤岩在不同围压加载下的渗流试验,需要制备与试验仪器吻合的煤岩试样,煤岩取自鄂尔多斯门克庆煤矿,煤质较为坚硬,且在单轴试验机测得煤样的单轴抗压强度为 7.8 MPa。试验所用渗流仪器为 HYS-4 型岩石渗透分析仪如图 1 所示,该仪器所需试件规格为 $\phi 50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 的圆柱形试件。



(a) 岩石渗透分析仪



(b) 试样

图 1 岩石渗透分析仪与试样

Fig.1 Rock permeability analyzer and samples

2 煤样孔隙度分析

在煤样渗流试验前,采用纽迈核磁共振仪如图 2 所示,对其孔隙进行测量,试件断面孔隙分布核磁成像如图 3 所示。核磁共振仪测量原理是在试件饱水的条件下,通过核磁共振仪将水信号反馈为孔隙

信号,以此得到每个试件自然状态下孔径分布范围(表 1)及其孔隙度和渗透率(表 2)。



图 2 纽迈核磁共振仪
Fig.2 Niumai NMR instrument

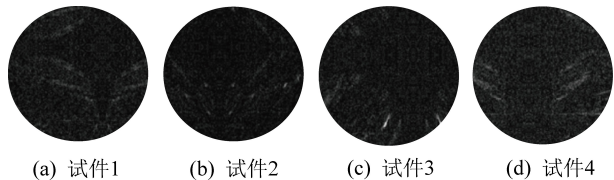


图 3 煤样孔隙成像
Fig.3 Pore imaging of coal samples

表 1 煤岩试件孔喉分布情况

Table 1 Pore throat distribution of coal and rock samples				
孔喉半径 $r/\mu\text{m}$	孔喉半径分布区间百分比/%			
	试件 1	试件 2	试件 3	试件 4
0~0.10	92.43	92.47	93.73	93.21
0.10~0.16	4.36	4.65	3.93	4.15
0.16~0.25	0.11	0.10	0.01	0.05
0.25~0.40	0.29	0.48	0.39	0.36
0.40~0.63	1.05	1.30	1.09	1.16
0.63~1.00	1.01	0.86	0.77	0.91
1.00~1.60	0.60	0.04	0.08	0.16
1.60~2.50	0.10	0	0	0

表 2 煤样饱水后的孔隙度和渗透率

Table 2 Porosity and permeability of coal samples after water saturation			
试件	T_2 截至值/ms	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$
1	1.6	27.810 9	41.547 7
2	1.6	28.138 3	43.220 1
3	1.6	27.999 2	37.424 3
4	1.6	27.777 7	39.607 1

3 煤岩渗流试验

3.1 煤岩渗流试验程序

采用 HYS-4 型岩石渗透分析仪进行煤岩渗流试验。该系统主要由围压和水压装置组成,最大围压可达 100 MPa,水压可以达到 100 MPa。装置仪表采用 24 位 A/D 转换器与各类传感器、变送器配

合,实现对压力、流量、物位、成分分析等等物理参数的测量、显示、报警监控、数据采集和记录。该仪器的工作环境温度要求:0~50℃。本次渗流试验主要步骤如下:

1)将制备好的煤样经过干燥处理后放入岩石渗透分析仪的压力室中。

2)压力室密封好后,检查手动泵油箱是否有充足的油以供试验,随后手动加压,首先加围压至 1 MPa。

3)打开电源开关,将 HP4.0-4 型程控抗渗仪主机的压力值上限设置为 1.0 MPa,下限设置为 0.9 MPa,即可将仪器水压设置为 1 MPa。将水压开关阀门关紧,放气阀门关紧,检查水箱储水情况,保证水箱内有满足试验用水后启动水压开关进行加压,当压力值达到设定好的压力值后仪器会自动停止加压。

4)打开排气阀,直到排气孔均匀流出水流时关闭排气阀,压力表在排气过程中压力下降,排气完成关闭阀门后压力表会自动加压到设定值;打开水压阀门,水压系统的导水管在压力泵的作用下会压入压力室,当压力室的水压达到设定值后加压系统会自动停止。

5)压力室下方出水口用胶皮管连接刻度试管,用来测量煤岩的渗水量,整个渗流试验时间设定为 4 h。

6)首先对 1 号试件进行测量。在相同水压下,对试件进行 1~10 MPa 逐级加围压,测量每级围压下的渗流量。对于其他 3 个试件,分别量测水压为 2、3、4 MPa 时不同围压下的煤样的渗流量。

3.2 煤岩渗流试验结果

水压 1 MPa 下的煤岩试件 1~10 级围压下渗流结果如图 4 所示,4 个试件渗流试验数据见表 3。

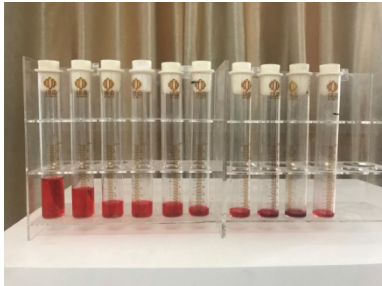


图 4 1 号煤岩试件渗流试验结果
Fig.4 Seepage test results of No.1 coal and rock samples

3.3 围压和水压对渗流量和渗透系数的影响

地下水渗流力学中,地下煤层的渗流是方向不

表3 不同水压和围压下的渗流量变化

Table 3 Variation of seepage flow wder water pressures and confining pressures

试件	水压/ MPa	孔隙 度/%	不同围压下渗流量/mL									
			1 MPa	2 MPa	3 MPa	4 MPa	5 MPa	6 MPa	7 MPa	8 MPa	9 MPa	10 MPa
1	1	27.810 9	29.15	20.90	10.45	9.35	7.70	4.40	3.30	3.00	3.00	3.00
2	2	28.138 3	92.00	78.30	64.80	54.00	51.00	48.40	46.00	45.20	45.00	45.00
3	3	27.909 2	253.82	191.71	135.00	102.60	94.50	90.45	81.00	81.00	81.00	81.00
4	4	27.777 7	715.50	526.50	243.00	124.20	110.70	101.20	92.40	73.70	73.00	73.00

变且低速的流动,由试验数据记录和参考相关资料,渗流速度可由以下公式进行计算^[20]为

$$v = Q/A = KJ \tag{1}$$

式中: v 为渗流速度,cm/s; Q 为渗流量,mL; A 为过水断面面积,m²; K 为渗透系数,cm/s,渗流速度 v 和水力梯度 J 呈线性关系,故又称线性渗透定律。

由表3试验数据可获得不同水压下渗流量与围压的关系,如图5所示,试件过水断面面积统一为0.001 962 5 m²,由表4数据和式(1)可获得不同水压下渗流速度与围压的关系,如图6所示。

渗流量与渗流速度快速下降阶段,围压越大,下降速度越快;第2阶段,在围压增大到4~8 MPa过程中,渗流量与渗流速度随着围压的增大仍然在下降,但是相对于第1阶段,下降比较缓慢,此过程为渗流量与渗流速度缓慢下降阶段;第3阶段:在围压增大到8 MPa之后,渗流量与渗流速度随着围压的继续增大基本趋于稳定,由于内部结构的复杂性仍然存在渗流通道,但是渗流速度极其缓慢,受围压水压的影响极其微弱,此过程为渗流量与渗流速度稳定阶段。

符合达西定律渗流速度和水力坡度的试验关系如图7所示。

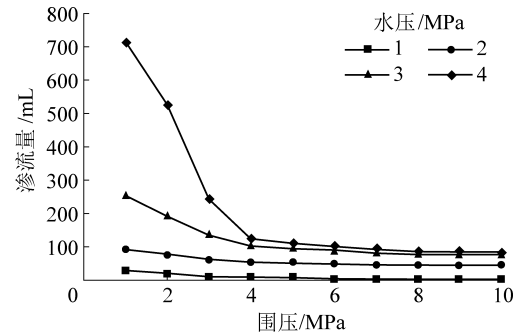


图5 渗流量随水压和围压的变化关系

Fig.5 Relations of seepage flow with water pressures and confining pressures

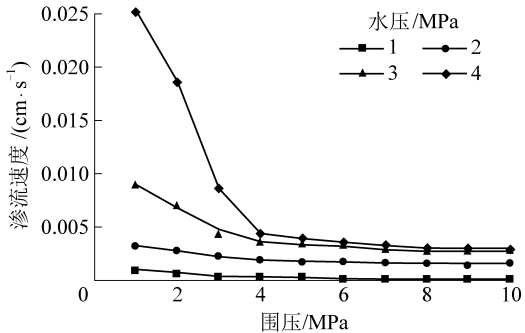


图6 渗流速度随水压和围压的变化关系

Fig.6 Relation of seepage velocity with water pressures and confining pressures

由图5、图6可知,在水压恒定时,渗流量与渗流速度均随着围压的增大而逐渐减小;总体来说,本次试验煤岩的渗流过程可以划分为3个阶段:第1阶段,在围压1~4 MPa过程中,渗流量与渗流速度随着围压的增大快速下降,下降幅度较快,此过程为

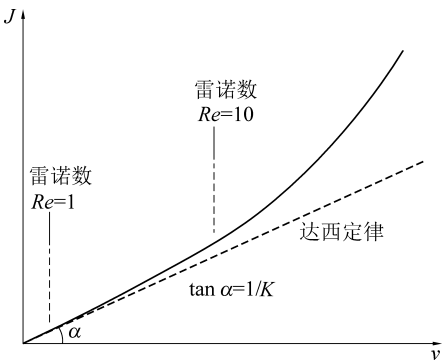


图7 渗流速度和水力坡度关系

Fig.7 Relationships between seepage velocity and hydraulic slope

根据地下水渗流力学理论,符合Darcy定律的渗透系数和水力坡度的试验关系曲线为直线,直线的斜率为渗透系数的倒数。渗透系数可由公式(2)进行计算^[3]为

$$K = qL\gamma_w / (\Delta P A) \tag{2}$$

式中: q 为通过试件渗流的水流量,mL; L 为试件的长度m; γ_w 为流体的容重,N/m³; ΔP 为试件两端的渗透压力,MPa。

逐个计算渗流试验数据,求得煤样的渗透系数,得出如下结果:

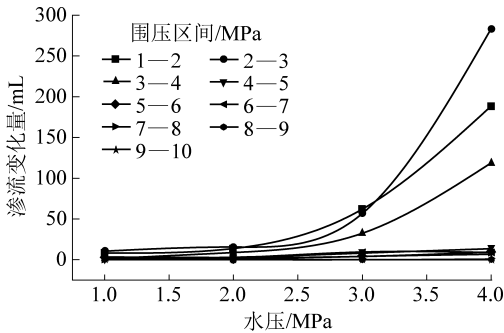
1) 围压在达到4 MPa之前,渗流量和渗流速率随着水压的增大呈现出较大的增长趋势,渗透系数随着水压的增大而增大,故在此阶段煤岩试件的渗流是非线性的。

2) 围压在达到 4 MPa 而未达到 8 MPa 之前, 渗流试验中煤岩的渗流量的变化趋势相比于第 1 阶段逐渐减少, 在这一阶段对煤岩试件的渗透系数进行计算, 渗透系数并不符合 Darcy 定律, 但是渗透系数的计算值对比相差数值较第 1 阶段是非常小的, 故此阶段是紊流向层流的过渡阶段, 称之为近线性阶段。

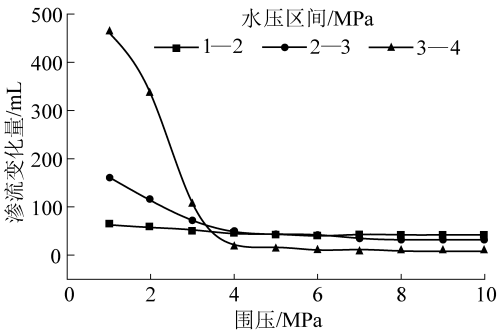
3) 围压在达到 8 MPa 之后, 渗流试验的渗流以非常微小的速度在进行, 在相同水压下逐渐增大围压, 渗流量拟合曲线几近于直线; 计算此阶段的渗透系数, K 值趋于稳定。故此阶段的渗流呈现出线性规律, 称之为线性阶段。

3.4 围压和水压对渗流变化量的影响

渗流变化量体现了渗流试验中逐级加压渗流量的增长程度, 通过渗流变化量可以直观反映出渗流过程的渗流量增长和减小幅度。对试验数据进行汇总计算, 拟合出围压和水压对渗流变化量的关系曲线, 如图 8 所示。随着水压的增长, 围压每增大 1 MPa 时煤岩渗流的变化量的对比; 图 8b 呈现的是随着围压的增长, 水压每增大 1 MPa 时煤岩渗流的变化量的对比。



(a) 水压与渗流变化量



(b) 围压与渗流变化量

图 8 渗流变化量随围压和水压的变化关系

Fig.8 Relationship between confining pressure and water pressure on seepage changes

通过图 8a 的比较分析, 随着水压逐级增大, 渗流变化量是在持续增大的, 并且观察到围压 3—4 MPa 的曲线与大于 5 MPa 的曲线增长幅度差异十

分明显, 在大于 5 MPa 之后的所有曲线较为接近且为线性直线, 说明 4 MPa 的围压为渗流发生显著变化的临界值。在围压达到 4 MPa 之前, 渗流变化量是呈指数函数式增长; 在围压达到 4 MPa 之后, 渗流变化量是呈线性函数式增长。通过对图 8b 的比较分析, 较为直观的现象是随着围压的逐级增大, 渗流变化量持续减小。分析每条曲线的变化趋势, 可以发现在围压达到 4 MPa 之前, 渗流量变化量是随着水压的增大而增大的, 但是在 4 MPa 之后, 函数曲线是几乎稳定的, 说明水压对于煤岩的渗流在围压大于 4 MPa 之后的影响非常小。

由图 8 渗流变化量随围压和水压的变化趋势可知, 围压是煤岩渗流试验的关键影响因素。本次试验设定 10 级围压, 围压在 4 MPa 时, 试验煤岩渗流量明显降至低点, 说明此围压接近本次试验煤岩发生结构变化的临界载荷。水压对煤岩的影响只存在于临界载荷之前, 超过这个限度, 水压对于渗流变化量的影响可以忽略。

3.5 围压和水压对煤样渗透率的影响

渗透率是表征岩石本身传导液体能力的参数, 渗透率大小与多种因素有关, 而与介质中运动的流体性质无关, 煤岩渗流试验着重研究在围压和水压加载下孔隙变化对渗透率的影响。根据试验记录的渗流量计算出的渗透系数来计算渗透率, 试件渗透率计算公式^[20]为

$$k = Kv/g \tag{3}$$

式中: k 为试件渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; g 为重力加速度, m/s^2 。

围压和水压的加载过程中 40 组试验的渗透率的计算结果见表 4。

表 4 不同水压和围压下的煤样渗透率关系

Table 4 Relationship between permeability under confining pressures, water pressures

围压/ MPa	不同水压下煤样渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$			
	1 MPa	2 MPa	3 MPa	4 MPa
1	5.37	26.85	136.50	1 080.30
2	2.70	19.20	77.81	585.53
3	0.69	12.40	38.56	124.50
4	0.55	9.24	22.26	32.63
5	0.38	8.23	18.87	25.94
6	0.12	7.43	17.30	21.68
7	0.07	6.72	13.89	18.16
8	0.05	6.48	12.51	15.51
9	0.05	6.42	12.51	15.20
10	0.05	6.42	12.51	15.20

由试验数据可以拟合出渗透率随水压和围压的

变化关系如图 9 所示,由图 9 可以得出在围压不变的状态下,渗透率随着水压的增大是逐渐增大的,在水压不变的状态下,渗透率随着围压的增大是在逐渐减小的。试验中的围压 1 MPa,水压 4 MPa 时的渗透率为最大渗透率,为 $1\,080.30\times 10^{-3}\,\mu\text{m}^2$,围压 10 MPa,水压 1 MPa 时的渗透率为最小渗透率,为 $0.05\times 10^{-3}\,\mu\text{m}^2$ 。

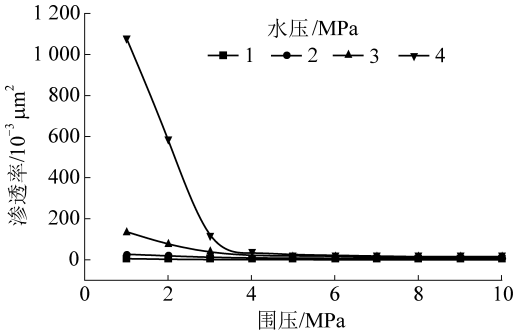


图 9 渗透率与水压和围压的关系

Fig.9 Relationship between permeability and water pressure confining pressure

由核磁共振仪测量得出的数据,4 块煤岩试件试验之前的渗透率分别为 41.50×10^{-3} 、 43.20×10^{-3} 、 37.40×10^{-3} 、 $39.60\times 10^{-3}\,\mu\text{m}^2$ 。从渗透率微观裂隙的复杂程度与渗透性有紧密的相关性,通过改变煤体的孔隙-裂隙的结构形态,可以有效提高煤体的连通性和渗透性,一般情况下,孔隙度越大,岩石的渗透率会越高,所以由渗透率的变化可以推理出孔隙的大致变化程度。

在对煤岩施加围压达到 4 MPa 之前,增大围压时渗透率下降幅度十分明显,说明在此过程中孔隙受压变形比较严重,孔隙之间的连通性和渗透性受压力的影响急剧下降,这一阶段为孔隙受压急剧变形阶段;在围压介于 4~8 MPa 的区间内时,渗透率的下降程度开始变得平缓,且不同水压下的渗透率相差数值较小,说明在此过程中孔隙受压的变形程度已经变得微弱,这一阶段为孔隙受压缓慢变形阶段;在围压超过 8 MPa 之后,可以观察到不同水压下的煤岩渗透率基本相同且处于水平值,说明再此过程的孔隙受压已经基本压实,这一阶段为孔隙受压压实阶段。

3.6 流体场和应力场耦合作用分析

地下赋存煤岩是多孔隙的复杂介质体,主要受到渗流场和应力场的作用,在这一过程中,煤岩内的渗流场和应力场是相互作用,相互影响的。在试验过程中,煤岩试件存在水头差,孔隙中的水发生渗流运动,产生了渗透体积力。渗透体积力相当于内部载荷长时间作用在内部孔隙介质上,使孔隙内部的

应力场发生了改变,而围压的作用以外部载荷的形式对孔隙的应力场仍然存在影响。应力场的改变会引起介质内部结构发生改变,介质颗粒的空间位置和孔隙大小会发生改变,进而影响煤岩的渗透系数,最终使渗流的流体场发生改变。

通过渗透率和渗透系数的试验数据,可以判定内部渗流应力场和外部载荷应力场的作用效果,围压和水压对渗流规律的影响,实则是有效应力的变化。由计算结果可得,在围压达到 3 MPa,同时水压也达到 3 MPa 时,煤岩的渗透率为 $38.56\times 10^{-3}\,\mu\text{m}^2$,与煤岩未受载荷状态下的渗透率十分接近,由此可以推出在这一应力状态下内部渗流应力场和外部载荷应力场处于基本平衡状态。由渗透率的规律得出,在水压未达到 3 MPa 的过程中,外部载荷所产生的应力场是整个渗流过程中的主要影响因素,而在水压大于 3 MPa 之后,渗透体积力产生的耦合作用的应力场是整个渗流的主导因素。

3.7 围压和水压对煤样渗透率增长率的影响

渗透率增长率和围压水压的关系曲线如图 10 所示。由试验数据发现,在水压 1 MPa 逐级加压到 2 MPa 时,渗透率增长率在围压 1 MPa 时为 400%,在逐级增大围压的过程中渗透率增长率是在缓慢增大,在围压达到 5 MPa 时,渗透率增长率为 2 070%,此过程为渗透率缓慢增长阶段;在围压 5 MPa 之后,渗透率增长速度明显加快,直到围压达到 8 MPa 时渗透率增长率为 11 329%,此过程为渗透率快速增长阶段;之后增加围压渗透率增长率趋于稳定值,此过程为渗透率保持恒定阶段。

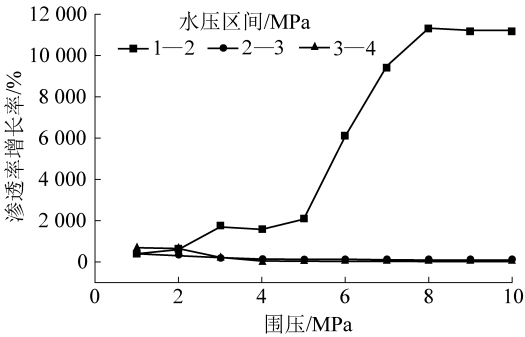


图 10 渗透率增长率和围压水压的关系

Fig.10 Relationship between permeability growth rate and confining pressure and water pressure

在水压 2 MPa 之后继续逐级增加水压,渗透率的增长率随着围压的增大呈现出缓慢降低的趋势,水压 2—3 MPa 时的最大渗透率增长率为 400%,水压 3—4 MPa 时的最大增长率为 691%。综合分析,围压增大到 8 MPa 甚至更大,煤岩的渗透率的

增幅受外界压力的影响几近消失,渗透率趋于稳定值。

4 结 论

1)由核磁共振成像和岩心分析系统得出煤岩的孔隙率为28%左右,且孔隙成像较为明显;孔喉分布范围为 $0 \sim 2.5 \mu\text{m}$,且主要集中分布在 $0 \sim 0.1 \mu\text{m}$,这部分的孔喉占总孔喉的92.8%左右。

2)试验的渗流过程可以分为3个阶段:第1阶段的渗流表现出明显的非线性特征,渗流速度较快;第2阶段表现出近似线性的特征,此过程的渗流速度较为缓慢;第3阶段则表现出明显的线性特征,渗流的速度较小且较为平稳。在渗流速度达到恒定之后,继续增大围压对渗流量和渗流速度几乎没有影响,只有增大水压,渗流量和渗流速度才会发生明显的变化。

3)在相同的围压下,随着水压的增大,煤岩试件渗流量是在逐渐增大的。4 MPa的围压十分接近本次煤岩试验渗流规律的临界值,在临界值之前渗流变化量随水压增长的同时,围压越小渗流现象越为明显,且呈指数函数形式增长;在临界值之后的渗流变化量开始平稳发展,呈近水平线性函数形式增长。

4)煤岩的孔隙与渗透率密切相关,由试验数据计算所得的渗透率的变化过程可以说明在围压水压同时达到3 MPa之前,煤岩外部载荷对内部介质产生的应力场为主导因素,在水压达到3 MPa之后,渗流过程的渗流应力场成为了渗流的主要影响因素。且煤岩孔隙受力变形大致分为3个阶段:孔隙受压急剧变形阶段、孔隙受压缓慢变形阶段和孔隙受压压实阶段。

5)通过监测煤岩的渗透规律以及周围应力情况,可以有效评价地下采煤安全系数以及对于地下煤田的勘探有预测作用。

参考文献(References):

[1] 曹亚军,王 伟,徐卫亚,等.低渗透岩石流变过程渗透演化规律试验研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(S2):3822-3829.
CAO Yajun, WANG Wei, XU Weiya, *et al.* Permeability evolution of low-permeability rocks in triaxial creep tests [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S2): 3822-3829.

[2] 何 峰,贾 渊,邵英楼.破碎煤岩峰后渗流-蠕变实验[J].辽宁工程技术大学学报,2015,34(9):999-1003.
HE Feng, JIA Yuan, TAI Yinglou. Experimental study on creep-seepage peak after crushing coal [J]. Journal of Liaoning

Technical University, 2015, 34(9): 999-1003.

[3] 夏祖昊,张小波,姚 池,等.峰后破裂岩石加、卸载围压过程渗流特性的试验研究[J].煤炭学报,2019,44(11):3379-3387.
XIA Zuhao, ZHANG Xiaobo, YAO Chi, *et al.* Experimental study on seepage characteristics during loading and unloading confining pressures of post-peak fracture rock [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(11): 3379-3387.

[4] 李 波,孙东辉,魏建平,等.孔隙压力梯度对煤的渗透性影响实验[J].煤田地质与勘探,2018,46(1):35-40.
LI Bo, SUN Donghui, WEI Jianping, *et al.* Experimental study on the effect of gas pressure gradient on coal permeability [J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(1): 35-40.

[5] 张永超,刘昌岭,吴能友,等.含水合物沉积物孔隙结构特征与微观渗流模拟研究[J].海洋地质前沿,2020,36(9):23-33.
ZHANG Yongchao, LIU Changling, WU Nengyou, *et al.* Advances in the porestructure characteristics and microscopic seepage numerical simulation of the hydrate-bearing sediments [J]. Marine Geology Frontiers, 2020, 36(9): 23-33.

[6] 张培森,赵成业,侯季群,等.高温与不同水压下深部砂岩渗透特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(6):1117-1128.
ZHANG Peisen, ZHAO Chengye, HOU Jiqun, *et al.* Experimental study on seepage characteristics of deep sandstone under high temperature and different hydraulic pressure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(6): 1117-1128.

[7] 丛海龙,吴子森,李 虹,等.致密砂岩孔隙尺度应力敏感分析[J].科学技术与工程,2019,19(15):105-110.
CONG Hailong, WU Zisen, LI Hong, *et al.* Pore-scale stress sensitivity analysis of tight sandstone [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(15): 105-110.

[8] 杜敬国,蒋建勋,霍征光,等.高阶煤煤层气储层裂缝发育程度及渗透性定量评价[J].煤矿安全,2019,50(6):181-184.
DU Jingguo, JIANG Jianxun, HUO Zhengguang, *et al.* Quantitative evaluation on fracture development and its permeability of high-rank coalbed methane reservoir [J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(6): 181-184.

[9] 张瑞刚,李 楠,饶寿银,等.西秦岭安坝金矿床孔渗结构及成矿效应[J].中国矿业,2018,27(S1):169-176.
ZHANG Ruigang, LI Nan, RAO Shouyin, *et al.* Porosity permeability texture and mineralization effect in the Anba gold deposit in western Qinling [J]. China Mining Magazine, 2018, 27(S1): 169-176.

[10] 游利军,王 哲,康毅力,等.致密砂岩孔渗对盐析的响应实验研究[J].天然气地球科学,2018,29(6):866-872.
YOU Lijun, WANG Zhe, KANG Yili, *et al.* Experimental investigation of pore-permeability characteristics change caused by salt precipitation in tight sandstone gas reservoirs [J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(6): 866-872.

[11] 赵 阳,周宏伟,任伟光,等.循环荷载下深部煤层工作面顶板砂岩的渗透率演化规律[J].煤炭学报,2019,44(5):1495-1507.
ZHAO Yang, ZHOU Hongwei, REN Weiguang, *et al.* Permea-

- bility evolution of roof sandstone at deep coal seam working face under cyclic loading [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44 (5): 1495–1507.
- [12] 赖令彬, 潘婷婷, 张虎俊, 等. 相对渗透率与含水饱和度关系微观机理[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(12): 115–122.
LAI Lingbin, PAN Tingting, ZHANG Hujun, *et al.* Microscopic mechanism of relationship between relative permeability and fluid saturation in porous medium [J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19 (12): 115–122.
- [13] 邱淑霞, 徐鹏, 杨莱. 多尺度多孔介质的有效气体渗透率研究[J]. *工程热物理学报*, 2019, 40(6): 1375–1379.
QIU Shuxia, XU Peng, YANG Mo. The effective gas permeability of porous media with multi-scale pore structure [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2019, 40(6): 1375–1379.
- [14] 张朔, 刘顺喜, 金毅. 多相随机自相似多孔介质表征及其孔-渗关系数值分析[J]. *中国矿业*, 2019, 28(S1): 331–335, 339.
ZHANG Shuo, LIU Shunxi, JIN Yi. Characterization of multiphase random self-similar porous media and numerical analysis of pore-permeability relationship [J]. *China Mining Magazine*, 2019, 28 (S1): 331–335, 339.
- [15] 黄强, 傅雪海, 张庆辉, 等. 沁水盆地中高煤阶煤储层覆压孔渗试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(6): 164–170.
HUANG Qiang, FU Xuehai, ZHANG Qinghui, *et al.* Experimental study on overburden pore permeability of medium and high rank coal reservoirs in Qinshui Basin [J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(6): 164–170.
- [16] 司俊鸿, 程根银, 朱建芳, 等. 采空区非均质多孔介质渗透特性三维建模及应用[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(5): 220–224.
SI Junhong, CHENG Genyin, ZHU Jianfang, *et al.* Three dimensional modeling and application of permeability characteristics of heterogeneous porous media in goaf [J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(5): 220–224.
- [17] 张帅, 刘志伟, 韩承强, 等. 高突低渗透煤层超高压水力割缝卸压增透研究[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(4): 147–151.
ZHANG Shuai, LIU Zhiwei, HAN Chengqiang, *et al.* Study on coal pressure relief and permeability increase through ultra-high pressure hydraulic slotting in high outburst and low permeability coal seam [J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(4): 147–151.
- [18] 庞锋, 张劲, 周劲辉, 等. 氮气闷压对高阶煤渗透率影响的试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(2): 101–106.
PANG Feng, ZHANG Jin, ZHOU Jinhui, *et al.* Experimental study on the influence of nitrogen soaking on the permeability of high rank coal [J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(2): 101–106.
- [19] 吴财芳, 王肖, 刘小磊, 等. 滇东老厂矿区多煤层条件下地应力特征及其影响研究[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(1): 118–124.
WU Caifang, WANG Xiao, LIU Xiaolei, *et al.* Study on geostress features and influences under multi-seam condition in Laochang Mining Area of east Yunnan [J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(1): 118–124.
- [20] 王俊杰, 陈亮, 梁越. 地下水渗流力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013: 46–47.