

文章编号: 1673-3363-(2015)01-0144-06

煤层高压注水渗透特性试验研究

于岩斌¹, 蒋宇静^{1,2}, 程卫民¹, 陈连军¹, 周刚¹, 王刚¹

(1. 山东科技大学矿山灾害预防控制重点实验室, 山东 青岛 266590; 2. 长崎大学工学部, 日本 长崎 852-8521)

摘要 为了研究不同孔隙水压对煤岩渗透特性的影响规律, 利用 MTS 电液伺服岩石试验系统对深部矿井的煤岩试件进行了不同孔隙水压、尤其是高孔隙水压下的煤岩渗透特性试验。结果表明: 渗透率以及体积应变曲线具有较好的一致性, 均呈现 U 字形走势; 而在外界条件一定的情况下, 孔隙水压对渗透性能以及体积应变的作用效果与该煤岩孔隙水压临界阈值有关, 高于临界阈值的孔隙水压对煤岩渗透性能起到数倍于低孔隙水压时的改善作用。此外, 孔隙水压对煤岩强度极限亦有重要影响, 且孔隙水压愈高, 煤岩的破坏强度极限愈低, 扩容效果愈明显, 渗透率峰值亦愈加后延。研究结果对利用高孔隙水压改善煤岩渗透性能、提高煤层注水防灾效果具一定指导意义。

关键词 煤岩; 高孔隙水压; 渗透特性; 全应力应变; 体积应变

中图分类号 TD 714 **文献标志码** A **DOI** 10.13545/j.cnki.jmse.2015.01.023

Experimental study on permeability properties of coal seam under high pressure water injection

YU Yanbin¹, JIANG Yujing^{1,2}, CHENG Weimin¹, CHEN Lianjun¹, ZHOU Gang¹, WANG Gang¹

(1. State Key Laboratory Breeding Base of Mining Disaster Prevention and Control, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 2. Faculty of Engineering, Nagasaki University, Nagasaki 852-8521, Japan)

Abstract For the purpose of studying the influences of permeability properties affected by the different pore-water pressures, MTS electro-hydraulic servo system has been utilized to conduct the permeability characteristics experiments of specimens from deep coal mine under the conditions of the different pore-water pressures, especially the high pore-water pressures. The results show that the permeability rate curves are quite consistent with volumetric strain curves, which are both U-shaped. Meanwhile, under a certain external condition, the effect of the pore-water pressures on the permeability properties and volumetric-strain depends on the critical threshold pore-water pressures of coal specimens. The permeability properties under higher pore-water pressure than the critical threshold have been improved several times than that under lower pore-water pressure. Moreover, the pore-water pressure has an important influence on ultimate strength of coal rock. The higher the pore-water pressure is, the lower the peak strength is. The more distinctive effects of dilatation emerge, the more strain is needed for the appearance of permeability peak. The research result provides the guidance for the employment of high pore-water pressure to improve the permeability and disaster prevention of coal seam water injection.

Key words coal seam; high pore-water pressure; permeability properties; whole stress-strain; volumetric strain

收稿日期: 2013-05-21

基金项目: 国家自然科学基金煤炭联合基金重点项目(U1261205); 国家自然科学基金项目(51474139, 51204103, 51304128)

作者简介: 于岩斌(1986—), 男, 山东省威海市人, 博士研究生, 从事矿山灾害防治方面的研究。

通信作者: 程卫民

E-mail: chengmw@163.com

Tel: 0532-86057013

传统的煤层注水预湿煤体是采掘工作面最基本、最有效的防尘措施^[1]。随着国内煤炭资源开采深度的逐年加大，高地应力作用下的低孔隙率难渗透煤层越来越多，严重制约了传统煤层注水防灾技术的应用；而利用高压水改变煤岩的渗透性能，是提高深部煤层注水应用效果的有效技术手段。为此，探究高压水作用下煤岩渗透特性的变化规律显得尤为重要。

由于岩体渗透性能在地质工程研究、实践中的重要作用，国内外学者对不同条件下的岩石渗透性能进行了诸多相关研究。Snow(1966), Jones(1975), Louis 及 Feuga 在对岩石渗透性随着应力变化情况的研究基础上提出描述应力与渗透性关系的经验公式^[2-3]；李世平、彭苏萍、李树刚、朱珍德等对不同岩石全应力应变过程的渗透率变化规律进行了较大规模的试验研究，证实了岩石的渗透率在全应力应变过程中为应力应变的函数，并拟合了渗透率-应变方程^[4-7]；谭学术、仵彦卿、姜振泉、赵阳升等进行了有效应力、孔隙压力、剪应力以及构造演化、煤岩变质对煤岩、砂岩等渗透性能的影响关系研究^[8-12]；曹树刚等对型煤与原煤全应力应变过程中的渗透特性进行了对比试验研究，结果显示原煤的试验过程能够较好地反映矿井灾害发生发展过程^[13]；此外，李树刚、杨永杰等对不同围压下的煤岩渗透特性进行了研究，揭示了煤岩全应力应变过程中的渗透特性^[14-15]。

岩石在不同条件下其表现出不同的复杂特征，尤其是组分与结构大不相同的煤岩；但以往的试验研究较多集中于围压、主应力变化对其渗透性能的影响，且其孔隙水压试验条件多为低压(2~4 MPa)，而对于煤岩在不同孔隙水压、尤其是高孔隙水压作用下的渗透性能变化规律研究涉及较少。研究不同水压对煤岩渗透性能的影响规律，对于煤层注水防灾减灾工作具有重要指导意义。为此，本文利用 MTS815.03 电液伺服岩石试验系统对深部矿井原煤试样进行不同孔隙水压作用下的煤岩渗透特性试验，研究深部高地应力条件下孔隙水压对煤岩渗透特性变化的影响作用。

1 煤岩渗透特性试验设备与方法

1.1 试验原理与设备

利用 MTS815.03 电液伺服岩石试验系统进行渗透试验的原理见图 1。在试件的上下端头各有 1 块透水板。透水板是具有许多均匀分布小孔的钢

板，其作用是使水压均匀地作用于整个试件断面，以保证液体在整个试件表面均匀地向试件内渗透。在上渗透板的上部为试件上端水压，下渗透板的下部为试件下端水压，其中心各开有 1 个竖向小孔，这是水流动的通道。

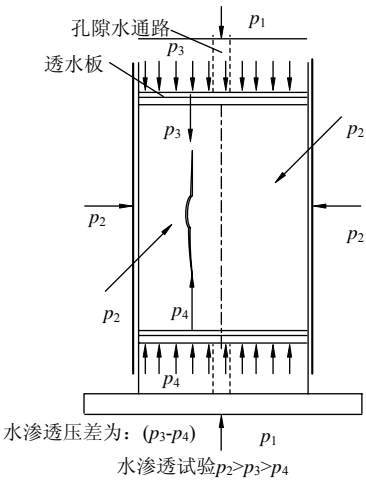


图 1 水渗透试验原理图
Fig.1 Principle of water permeability tests

本次试验采用瞬态法，即：试验先施加一定的轴压 p_1 、围压 p_2 、孔压 p_3 ，且始终保持 $p_3 < p_2$ ，然后降低试件一端的孔压至 p_4 ，在试件两端形成渗透压差 $\Delta p = p_3 - p_4$ ，从而引起水体通过试件渗流。渗流过程中， Δp 不断减小。根据试验过程中计算机自动采集的数据，计算岩石渗透率 k 值^[7,14]

$$k = \frac{1}{5n} \sum_{i=1}^n 526 \times 10^{-6} \times \lg [\Delta p(i-1) / \Delta p(i)]$$

式中： n 为数据采集行数； $\Delta p(i-1)$ 为第 $i-1$ 行渗透压差，MPa； $\Delta p(i)$ 为第 i 行渗透压差，MPa。

1.2 试件及试验条件

试验煤样选自东滩煤矿 1305 工作面，根据地应力测试报告显示，该区域原岩垂向应力为 13.30 MPa，水平应力为 11.12~18.72 MPa。为了更好地模拟现场煤岩受力环境，进行不同应力、孔隙水压条件下煤岩渗透特性试验，其试验参数如表 1 所列。

表 1 试验条件及试验参数
Table 1 Test conditions and parameters

试件 编号	试样尺寸/mm		轴压/ MPa	围压/ MPa	渗透 压差/MPa	孔隙 水压/MPa
	直径	高度				
DT-1	98.92	48.38	—	12	1.5	3.5
DT-2	100.4	48.44	—	12	1.5	7
DT-3	97.86	48.4	—	12	1.5	10
						3.5
DT-4	97.72	48.14	25	12	1.5	7
						10

2 煤岩渗透特性试验

试验研究煤样在不同应力状态与孔隙水压下的渗透特性,其基本思路是给试件分别施加试验设计的轴压、围压、孔隙压力和渗透压差,测定该状态下渗透压差随时间的变化过程,从而计算出试样在该应力状态下的渗透率(为消除试验误差,一般选择压差开始稳定降低后的 100~300 s 时间内的有关参数计算渗透率)。

在本次试验 DT-1 至 DT-3 试件的全应力应变过程选择 12~13 个应变点进行测试。在渗透试验时尽可能地捕捉到应力峰值,并合理选择不同应力应变

点进行渗透试验。DT-4 试件设计 3 个试验测点,分别在 3 种不同孔隙水压作用下进行渗透率测定试验。试验测定结果如图 2 所示。以 DT-2 试件试验结果(图 2b)为例,全应力应变试验过程中,煤岩在轴向应力、围压以及孔隙水压的作用下,依次经历了 AB 弹性变形段、 BC 非线性变形段、 CD 峰值强度段和 DE 应变软化段;而在此作用下渗透率、体积应变亦呈现出与之相对应的变化趋势,即渗透率呈现出 $A'B'$ 压密降低、 $B'C'$ 缓慢增加、 $C'D'$ 急剧增加、 $D'E'$ 峰值等变化状态,体积应变则表现出 $A''B''$ 体积压缩、 $B''C''$ 缓慢扩容、 $C''E''$ 急剧扩容过程。

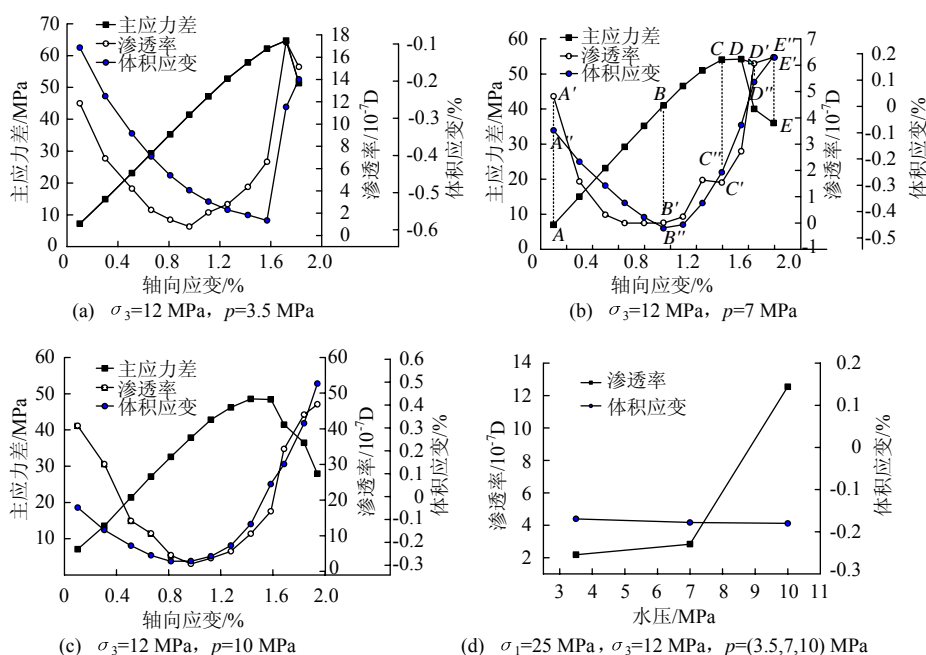


图 2 煤岩全应力应变过程中渗透率与体积应变曲线

Fig.2 Strain-permeability rate curves and stress-volumetric strain curves of the whole stress strain process

全应力应变过程中,煤岩渗透率的变化受其应力状态作用下的煤岩内部裂隙孔隙损伤演化过程的影响,而裂隙孔隙损伤过程宏观上表现为煤岩体积应变的变化。DT-1 至 DT-3 试验结果亦表明:煤岩渗透率与体积应变的变化趋势具有较好的一致性,均呈现 U 字形走势;但二者均不同程度上滞后于应力状态变化趋势。在 DT-4 试件试验过程中,如图 2d 所示,围压、轴压一定的应力环境下,煤岩体积基本保持不变;然而孔隙水压的变化对煤岩渗透性能的改变起到重要的影响作用。

3 煤层高压注水渗透特性试验分析

3.1 孔隙水压对煤岩渗透性能的影响分析

根据全应力应变渗透特性试验数据绘制不同

孔隙水压作用下煤岩渗透性能的变化曲线如图 3 所示,从中可以看出,孔隙水压的大小影响着煤岩渗透率的改变。在孔隙水压为 3.5, 7 MPa 条件下,渗透率最低值降低到 $(0.2393 \sim 0.8031) \times 10^{-7} D$, 甚至出现不渗透现象;相比而言,在 10 MPa 孔隙水压的作用下渗透率的最低值增加到 $2.0996 \times 10^{-7} D$, 且 10 MPa 孔隙水压试验的其他应力状态的渗透率明显高于 3.5, 7 MPa 孔隙水压的试验结果。由此可见,高孔隙水压对煤岩的渗透性有着较好的促进作用。值得注意的是,试验结果中 7 MPa 孔隙水压的渗透率结果要低于 3.5 MPa 时的渗透率。由此说明:虽然孔隙水压影响着煤岩的渗透特性,但煤岩渗透率并非完全随着孔隙水压的增加而提高,而是煤岩在一定的应力条件下对其渗透性能具有显著提高作

用的孔隙水压存在特定的临界阈值。

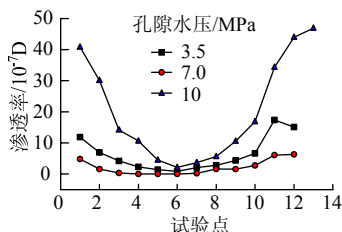


图 3 不同孔隙水压作用下煤岩全应力应变渗透率曲线

Fig.3 Stain-permeability curves of coal seam under the conditions of different water pressures

如图 2d 所示, DT-4 试件在固定围压、轴压条件下进行不同孔隙水压的煤岩渗透特性试验结果进一步验证了上述结论。从图 2d 可看到: 煤岩渗透率随着孔隙水压的逐步增加呈现缓慢增加和激增 2 个阶段, 即当孔隙水压在较低范围内变化增加时, 煤岩的渗透率增加较为缓慢, 而当孔隙水压处于较高范围内变化增加时, 其渗透率增加较快。具体而言, 3.5 MPa 孔隙水压作用下, 煤岩渗透率仅为 $2.1802 \times 10^{-7} \text{ D}$; 7 MPa 作用时, 煤岩渗透率提高至 $2.8391 \times 10^{-7} \text{ D}$, 其间渗透率随孔隙水压的变化梯度仅为 $0.1883 \times 10^{-7} \text{ D/MPa}$; 而当孔隙水压提高至 10 MPa 时, 煤岩渗透率增加至 $12.5450 \times 10^{-7} \text{ D}$, 其变化梯度达到 $3.2353 \times 10^{-7} \text{ D/MPa}$, 约为 3.5~7 MPa 孔隙水压条件下的 17 倍多。由此亦可看出: 煤岩在受力条件一定的情况下, 孔隙水压对煤岩渗透性能的作用存在临界阈值, 即当小于临界阈值的孔隙水压作用于煤岩体时, 其对煤岩渗透性能的改善作用较小, 甚至起到反作用; 而当孔隙水压超过该临界阈值时, 煤岩的渗透性能改善效果较显著。

根据 DT-4 孔隙水压单增煤岩渗透试验结果, 拟合试验应力条件下渗透率 k 与孔隙水压 p 之间的关系式为

$$k = 13.00657 - 4.73399p + 0.46878p^2$$

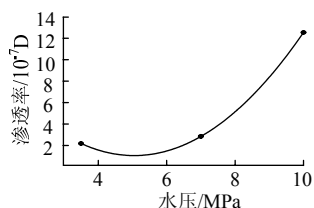


图 4 DT-4 煤岩渗透率变化拟合曲线

Fig.4 Permeability rate fitting curve of DT-4

由拟合曲线方程可知: 应力一定的情况下, 渗透率 k 是孔隙水压 p 的二次函数, 计算可得孔隙水压 p 为 5.05 MPa 时, 渗透率 k 取得该试验条件下的

最低值 $1.05 \times 10^{-7} \text{ D}$, 亦即围压、轴压分别为 12, 25 MPa 条件下试验煤岩的孔隙水压临界阈值约为 5.05 MPa; 因此, 应力稳定区域进行煤层注水工作时, 采用 5.05 MPa 以上的注水压力对增透润湿煤体具有较好的促进作用。

3.2 孔隙水压对煤岩体积应变的影响分析

全应力应变渗透试验过程中, 煤岩试件在应力作用下其体积依次出现受压缩小、损伤扩容的动态变化现象。不同应力状态与孔隙水压作用下, 煤岩的体积应变情况各不相同。图 5 给出了不同孔隙水压下煤岩体积应变的相关试验曲线, 从中可见, 孔隙水压的存在影响着煤岩体积应变的变化。应力峰值之前, 相同轴向应变试验条件下, 煤岩所受孔隙水压越高, 其受到的有效应力越小, 煤岩体积应变亦越小。如图 5 所示, 7, 3.5 MPa 孔隙水压作用下其各自试验初期的体积应变大小相当, 表明试验初期 7 MPa 孔隙水压对煤岩体积应变的影响作用不明显; 相比而言, 10 MPa 孔隙水压明显减小了煤岩试件的有效受力状态, 其初期体积应变量小于 7, 3.5 MPa 孔隙水压条件下。从图中放大比例得到的 DT-4 试件体积应变变化曲线可以看出: 随着孔隙水压的增大, 煤岩体积应变演化速率呈现减小趋势。由此亦说明: 煤岩微观损伤之前, 在一定的应力条件下孔隙水压对煤岩起到一定的扩展增容作用; 而孔隙水压对煤岩体积扩展存在着具有显著提高作用的临界阈值, 此亦印证了孔隙水压对煤岩渗透性能改善的临界阈值的存在。

从图 5 可以看出: 10 MPa 孔隙水压作用下, 煤岩微观裂隙孔隙开始损伤破坏, 发生扩容现象的起点分别先于 7, 3.5 MPa 孔隙水压条件下; 应力峰值之后, 孔隙水压对煤岩扩容亦起到促进作用, 且孔隙水压愈大, 扩容现象愈显著, 表现为 10 MPa 压力下体积应变斜率明显大于 7 MPa 及 3.5 MPa。

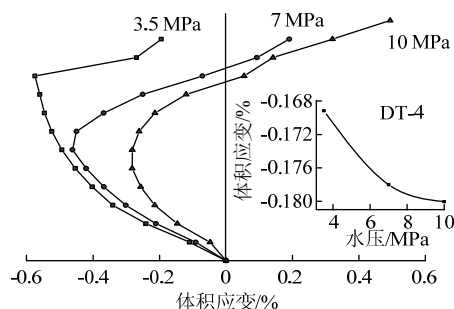


图 5 不同孔隙水压作用下煤岩体积应变曲线

Fig.5 Volumetric strain curves of coal seam under the conditions of different pore-water pressures

3.3 孔隙水压对煤岩极限强度的影响分析

全应力应变渗透试验结果表明:不同孔隙水压作用下,煤岩的破坏强度极限各不相同。3.5, 7, 10 MPa 孔隙水压下煤岩试件的强度极限分别为 64.69, 54.22, 48.43 MPa, 如图 6 所示。可见:孔隙水压愈大,其煤岩全应力应变过程中所承受的极限应力愈小。

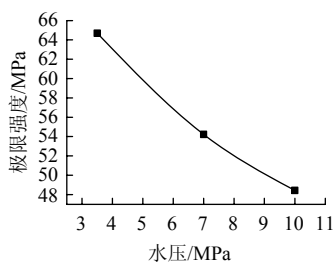


图 6 不同孔隙水压作用下煤岩极限强度变化曲线

Fig.6 Ultimate strength curves of coal seam under the conditions of different pore-water pressures

应力的大小对煤岩强度破坏与裂隙贯通错移具有主导作用,而孔隙水压的存在,减小了煤岩的有效应力,由 Mohr-Coulomb 定律可知,煤岩更容易破坏;同时,孔隙水压的浮托效应、渗压效应、渗透潜蚀和水力冲刷等^[16]在裂隙中起到一定的扩容作用,减小了颗粒间的压应力与摩擦,从而降低了煤岩的抗剪强度,加剧了裂隙的劈裂过程。此外,受有效应力分布与煤岩损伤单元演化的影响,较高梯度分布的孔隙水压易楔入煤岩裂隙孔隙中,随着微小裂隙的萌生、扩展、演化,压力水逐步汇集于裂隙,即煤岩局部变形损伤导致孔隙水压力分布的动态变化;孔隙水压力的分布变化反过来改变了煤岩的有效应力场分布以及裂隙的扩展变化,使得高压作用下的煤岩试件更容易发生微小损伤甚至极限强度破坏。

3.4 孔隙水压对峰后煤岩渗透性能的影响分析

从图 2 可以看出:相比应力状态变化趋势,煤岩渗透率出现不同程度的滞后性。笔者认为,煤岩渗透率的大小与裂隙孔隙的动态变化有关,尤其是主渗裂隙的开度。煤岩强度破坏与裂隙贯通错移是其在应力作用下随时间推移而连续发生的动态变化过程,历经裂隙孔隙压密、微裂隙扩展贯通、煤岩强度破坏、裂隙贯通错移等过程。应力应变峰值发生于煤岩强度破坏处,破坏的煤岩形成的宏观裂隙在应力的作用下继续贯通错移,使得煤岩裂隙连通性与开度增大,而此时煤岩渗透性能方达到峰值,因而出现渗透率峰值滞后现象。

随着新萌生裂隙的扩展,煤岩试件的整体渗透性能不断提高,但是围压的存在抑制了裂隙的扩展。在全应力应变试验过程中,DT-1 试件渗透率峰值与煤岩应力应变峰值几乎同时达到;而 DT-2, DT-3 试件渗透率峰值出现滞后于应力应变峰值现象,且孔隙水压愈大其滞后幅度亦愈大。DT-1 试件试验过程中,煤岩达到强度极限后,结构遭到破坏,裂隙孔隙在应力作用下扩展、贯通,提高了煤岩的渗透性能,但在 12 MPa 高围压作用下,开度提高、贯通的裂隙孔隙逐渐被压闭合,使得煤岩渗透性能降低,呈现图 2a 所示的曲线;而 DT-2, DT-3 试件在高孔隙水压作用下,削弱了有效围压的作用强度,增加了煤岩的裂隙开度及其体积应变,且孔隙水压愈高,越有利于降低围压对裂隙的压密闭合作用,从而使其峰后渗透率增速衰减放慢,使得煤岩渗透率峰值呈现愈加后延的现象,如图 2b, c 所示。

峰后应力应变演化过程十分复杂,即使是相同孔隙率的煤岩材料,由于其孔隙、裂隙、节理等缺陷结构的密度和尺度不同,在孔隙水压作用下的整体力学响应也有所不同,尤其应力应变过程中煤岩裂隙孔隙结构处于动态变化之中,因此其渗透规律有待更为深入地研究。

4 结 论

1) 煤岩全应力应变渗透特性试验结果表明:同等应力条件下,渗透率与体积应变的变化规律具有较好的一致性,二者均呈现 U 字形走势;且煤岩渗透率及体积应变的改变与煤岩所处孔隙水压条件密切相关。试验发现:孔隙水压对煤岩体积的扩展增容作用存在临界阈值;而高孔隙水压对煤岩的扩容作用显著,且孔隙水压愈大,作用效果愈明显。

2) 煤岩在受力条件一定的情况下,渗透率是孔隙水压的二次函数。利用高压水对煤岩渗透性能进行改造时,孔隙水压能否提高煤岩的渗透率与其所受应力条件下的临界阈值压力有关:小于临界阈值的孔隙水压作用于煤岩体时,其对煤岩渗透性能的改善作用较小,甚至起到反作用;而高于临界阈值的孔隙水压对煤岩渗透性能具有显著的提高作用。拟合计算结果显示本试验条件下煤岩的孔隙水压临界阈值为 5.05 MPa。

3) 煤岩全应力应变渗透试验过程中,渗透率的变化与应力作用下煤岩裂隙、孔隙连通性和开度大小有关,而煤岩损伤破坏产生的裂隙、孔隙扩展贯通情况随应力作用时间推移而不断演变,使得渗透

率的变化在不同程度上滞后于应力的变化趋势; 且孔隙水压愈高, 煤岩渗透率峰值愈加后延, 同时, 煤岩发生破坏所需的应力极限亦愈低。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990: 272-288.
- [3] 蒋宇静, 李博, 王刚, 等. 岩石裂隙渗流特性试验研究的新进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(12): 2377-2386.
JIANG Yujing, LI Bo, WANG Gang, et al. New advances in experimental study on seepage characteristics of rock fractures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(12): 2377-2386.
- [4] 李世平, 李玉寿, 吴振业. 岩石全应力应变过程对应的渗透率-应变方程[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(1): 13-19.
LI Shiping, LI Yushou, WU Zhenye. The permeability-strain equations relating to complete stress-strain path of the rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(1): 13-19.
- [5] 李树刚, 徐精彩. 软煤样渗透特性的电液伺服试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 68-70.
LI Shugang, XU Jingcai. Experimental study on permeability of soft coal sample with electro-hydraulic servocontrolled testing system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 68-70.
- [6] 彭苏萍, 屈洪亮, 罗立平, 等. 沉积岩石全应力应变过程的渗透性试验研究[J]. 煤炭学报, 2000, 25(2): 113-116.
PENG Suping, QU Hongliang, LUO Liping, et al. An experimental study on the penetrability of sedimentary rock during the complete stress-strain path[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(2): 113-116.
- [7] 朱珍德, 刘立民. 脆性岩石动态渗流特性试验研究[J]. 煤炭学报, 2003, 28(6): 588-592.
ZHU Zhende, LIU Limin. Experimental research on dynamic seepage characteristics of brittle rock[J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(6): 588-592.
- [8] 傅冬梅, 赵永军, 姜林, 等. 煤层气储层渗透性研究进展[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2008, 30(6): 31-34.
FU Dongmei, ZHAO Yongjun, JIANG Lin, et al. Progress of the research on coal-bed gas reservoir permeability[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2008, 30(6): 31-34.
- [9] 刘静波, 赵阳升, 胡耀青, 等. 剪应力对煤体渗透性影响的研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(10): 1631-1635.
LIU Jingbo, ZHAO Yangsheng, HU Yaoqing, et al. Influence of shear stress on permeability coefficient of coal[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(10): 1631-1635.
- [10] 谭学术, 鲜学福, 张广洋, 等. 煤的渗透性研究[J]. 西安矿业学院学报, 1994(1): 22-25.
TAN Xueshu, XIAN Xuefu, ZHANG Guangyang, et al. Research on the permeability of coal[J]. Journal of Xi'an Mining Institute, 1994(1): 22-25.
- [11] 曹广祝, 仵彦卿, 丁卫华. 低渗透压力条件下砂岩渗透性质的CT试验[J]. 煤田地质与勘探, 2005, 33(4): 59-62.
CAO Guangzhu, WU Yanqing, DING Weihua. Permeability experiment of sandstone under low seepage pressures by X-ray CT test[J]. Coal Geology & Exploration, 2005, 33(4): 59-62.
- [12] 姜振泉, 季梁军. 岩石全应力-应变过程渗透性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(2): 153-156.
JIANG Zhenquan, JI Liangjun. The laboratory study on behavior of permeability of rock along the complete stress-strain path[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(2): 153-156.
- [13] 曹树刚, 李勇, 郭平, 等. 型煤与原煤全应力-应变过程渗流特性对比研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 899-906.
CAO Shugang, LI Yong, GUO Ping, et al. Comparative research on permeability characteristics in complete stress-strain process of briquettes and coal samples[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 899-906.
- [14] 杨永杰, 楚俊, 郇冬至, 等. 煤岩固液耦合应变-渗透率试验[J]. 煤炭学报, 2008, 33(7): 760-764.
YANG Yongjie, CHU Jun, HUAN Dongzhi, et al. Experimental of coal's strain-permeability rate under solid and liquid coupling condition[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(7): 760-764.
- [15] 李树刚, 钱鸣高, 石平五. 煤样全应力应变过程中的渗透系数-应变方程[J]. 煤田地质与勘探, 2001, 29(3): 22-24.
LI Shugang, QIAN Minggao, SHI Pingwu. Permeability-strain equation relation to complete stress-strain path of coal sample[J]. Coal Geology & Exploration, 2001, 29(3): 22-24.
- [16] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 112-119.