

# 砂岩峰后卸除围压过程的渗透性试验研究\*

李小琴 李文平 李洪亮 孙如华

(中国矿业大学资源与地球科学学院 徐州 221008)

**摘要** 为了探讨煤层开采引起的围岩卸除围压过程中砂岩渗透性的变化规律,本文用数控瞬态渗透法在电液伺服岩石力学试验系统 MTS815.02 上进行了砂岩试样的渗透特性试验。得出了试样峰前渗透系数 - 应变与应力 - 应变的关系曲线,以及在峰后保持轴向应变一定卸除围压过程中试样的渗透系数 - 围压与主应力差 - 围压的关系曲线;对试验砂岩在变形破坏过程中渗透性变化规律进行了总结,重点分析了其峰后卸除围压过程中渗透性的变化规律;并对试验砂岩峰后渗透系数与有效围压关系进行了拟合,得出了拟合方程式,为煤层开采引起的围岩体应力场与渗流场耦合问题提供参考。

**关键词** 峰后卸除围压 渗透特性 渗透性 - 有效围压关系 试验研究

**中图分类号:**TD322+.5 O357.3 **文献标识码:**A

## EXPERIMENTAL STUDY ON PERMEABILITY OF SANDSTONE DURING POST - PEAK UNLOADING OF THE CONFINING PRESSURE

LI Xiaoqin LI Wenping LI Hongliang SUN Ruhua

(School of Resource and Earth Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008)

**Abstract** In order to understand the permeability of surrounding rock during post peak unloading of the confining pressure caused by coal mining, the authors conducted permeability test of sandstone using instantaneous permeating method with the electro - hydraulic servo controlled rock mechanics testing system (MTS - 815.02). The curves of permeability - axial strain and stress - axial strain before the peak point were obtained. The curves of permeability - confining pressure and principal stress difference - confining pressure during post - peak unloading of confining pressure under a constant axial strain were also obtained. The permeability of sandstone during post - peak unloading of the confining pressure was evaluated by fitting relationship curve of the post - peak permeability - effective confining pressure. The results provide guidelines for solving the problem caused by coupling stress field and seepage field of rock mass in underground engineering.

**Key words** Post - peak unloading of the confining pressure, Permeability, Permeability - effective stress relation, Experimental study

### 1 引言

在煤矿采掘过程中,煤层顶底板岩体应力状态

发生变化,产生弯曲变形、破坏、移动下沉等现象,改变了原有岩层的渗透特性,形成新的不均匀、各向异性的渗流场。研究发现,这种与煤层开采有关的渗

\* 收稿日期:2004-11-11;收到修改稿日期:2004-12-21.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 40272114).

第一作者简介:李小琴(1980-),女,硕士研究生,主要进行水文地质与工程地质方面的学习与研究. Email: qinzili98@126.com

流场的改变对评价或计算矿井涌水量、突水危害性等工程问题具有重大意义。因此,国内外许多学者通过煤矿顶底板岩石在全应力应变过程中的渗透性试验,研究采动岩体在变形破坏过程中渗流特性的变化<sup>[1-6]</sup>。但应注意的是,在煤层开采过程中围岩体表现为卸载特点,即是说,煤层开采将会引起煤层顶底板岩体从初始原岩地应力场中卸除原岩应力<sup>[7-8]</sup>。因此,本文以围压模拟原岩地应力,通过煤层顶板砂岩的三轴伺服仪渗透试验研究,分析了试验砂岩在加载及峰后卸载过程中随变形产生的渗透性变化规律,并对峰值强度后岩石渗透系数与卸除围压(即原岩应力)的关系进行了拟合,得出了表示渗透性与围压关系的非单一指数形式的拟合方程式。

## 2 试验设备及原理

试验在美国产电液伺服岩石力学试验系统(MTS 815.02)上进行,该系统具有独特的孔隙水压和水渗透试验的相关设备。试验中,先施加一定的轴压 $p_1$ 、围压 $p_2$ 及孔压 $p_3$ ( $p_3 < p_2$ ),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, $\Delta p$ 不断减少,其减少速率与岩石种类、岩石结构、试件长度(渗流路程)、截面尺寸、流体密度、粘度、应力状态和应力水平等因素有关。

试验中采用常规试验机上难以实现的瞬态渗透法,采样时间精度为1s。根据试验过程中计算机自动采集的数据,可由式(1)计算出各试样在不同应力应变状态下的渗透系数 $K$ :

$$K = 9701.5976 \times H \times \frac{\ln(I_1/I_2)}{5 \times d^2 \times (A_2 - A_1)} \quad (1)$$

其中, $K$ 为试样渗透系数(Darcy); $H,d$ 为分别为试样高度和直径(cm); $I_1,I_2$ 为对应1,2时刻的孔压差即 $\Delta p$ (MPa); $A_1,A_2$ 为对应的时间(s)。

## 3 试样及试验条件

试验所用试样取自兖州矿区某矿3煤顶板砂岩含水层,包括粉砂岩、中砂岩和粗砂岩样(表1)。

根据矿区地应力实测结果<sup>[9]</sup>,可知该矿区为构造应力场型,3煤顶板砂岩中最大水平主应力为9.43~15.25MPa,可以取其平均最大水平主应力为10MPa。为反映试样的初始地应力状态及模拟由于煤层开采引起的顶板岩体卸载特点,首先将试样在围压 $p_2$ 为10MPa,孔压差 $\Delta p$ 为1.5MPa下轴向加

载至其峰值强度,然后保持试样的孔压差 $\Delta p$ (1.5MPa)和轴向位移 $\delta_a$ 不变,以2MPa/级的速度逐级卸除围压 $p_2$ 。即是说,在卸载阶段,在围压 $p_2$ 依次为10→8→6→4→2MPa,对应孔压 $p_3$ 依次为3→3→3→3→1.8MPa的情况下测出试样的渗透系数。试样的整个加卸载过程控制11~13个测试点进行测试。具体试验条件及试验参数见表1。

表1 渗透试验条件及试验参数

Table 1 Permeability test conditions and parameters

样号	岩性	直径×高/ cm×cm	孔压 差/kPa	峰值应变/ $\times 10^{-2}$	峰值应 力/MPa	渗透系数变化 范围/ $m \cdot day^{-1}$
S1	中砂岩	4.92×8.36	1500	1.32	92.07	0.08848~1.1448
S2	中砂岩	4.92×8.50	1500	1.79	46.31	0.03640~0.7658
S3	粗砂岩	4.82×8.28	1500	1.40	83.70	0.5571~20.4240
S4	粉砂岩	4.95×8.12	1500	1.54	70.11	0.1357~1.7613

注:1.在加载的前两点,围压依次为2,5MPa;在卸载过程中,围压依次为8→6→4→2MPa;2.除第一点和最末点的孔压为1.8MPa,全过程中的孔压保持为3MPa。

## 4 试验结果及分析

根据试验结果,得出了各试样在加卸载过程中应力、应变及渗透系数的变化情况。考虑到试验过程中加卸载的特点(在峰值以前保持围压、孔压和孔压差不变,逐渐增大轴向载荷引起轴向应变的相应增加;在峰值以后保持孔压差和轴向位移不变,逐渐卸除围压),以及为了便于分析峰后阶段围压与渗透系数的关系和体现出全应力-应变过程的特点,本文列出了各试样峰前阶段的轴向应变-最大主应力曲线和轴向应变-渗透系数曲线,并在同一图中列出了峰后段围压-最大主应力曲线和围压-渗透系数曲线(图1)。以图1a为例,虚线左侧为峰值以前的应变-应力及应变-渗透系数曲线,虚线右侧为峰值以后的围压-应力及围压-渗透系数曲线,左右两侧曲线共用应力及渗透系数轴。

分析以上试验结果,可以得到以下几点结论:

(1)对于试验砂岩,在达到其峰值强度之前的低应力水平阶段,渗透系数随应变增加而略有下降;反映了在初期弹性阶段,岩石原生微裂隙及孔隙由于压密而略有下降。随着应力的增大,岩石渗透性发生了缓慢或者急剧的增长,表明岩石开始由压密变形转换为剪裂变形,新生裂隙逐渐扩展、贯穿。

(2)当岩石达到其峰值强度时,其渗透性仍呈现增长趋势,即是说,岩石峰值渗透系数滞后于峰值强度,在峰后区出现。表明在峰前区岩石微裂隙虽

有所扩展但并未达到其最大的贯通程度。

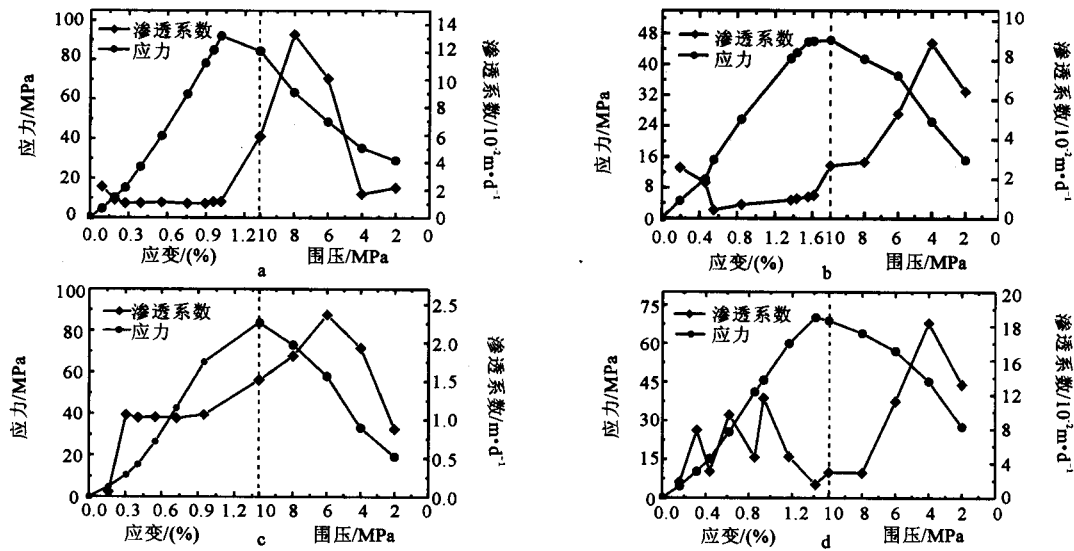


图1 应力-应变、渗透率-应变关系(峰前)和应力-围压、渗透率-围压关系(峰后)实测曲线

Fig. 1 Stress-strain curves and permeability-strain curves (before the peak) & stress-confining pressure curves and permeability-confining pressure curves (after the peak)

a. 试样 S1; b. 试样 S2; c. 试样 S3; d. 试样 S4

(3)在峰后卸载阶段,岩样渗透系数并非随围压减小一直呈幂指数规律增加<sup>[10-12]</sup>。随着围压的减小,岩石渗透性先有所增加,随后发生了较大的减小。表明岩石裂隙的张开度和连通程度随变形扩展而逐渐提高,连通性较好的裂隙渗流通道发育形成,从而使渗透系数达到峰值。随后进入应变软化阶段,裂隙产生一定程度的闭合,使渗透性有所下降。

由此,可以对峰后的有效围压-渗透系数关系曲线用最小二乘法进行如下形式的多项式拟合(拟合多项式最高次数为4次):

$$k = \sum_{i=0}^4 a_i p^i \quad (2)$$

式中,  $a_i$  为试验拟合常数;  $p$  为有效围压(MPa),  $p = p_2 - p_3$ 。各试样峰后的有效围压-渗透系数拟合结果见表2。

表2 试样渗透系数与有效围压关系拟合参数表

Table 2 The fitting parameters for relation of permeability and effective confining pressure

样号	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$
S1	3.0930	-5.5642	5.1347	-1.0013	0.0556
S2	5.0575	7.6849	-4.7123	0.8874	-0.0540
S3	0.4875	2.0994	-0.7489	0.0999	-0.0047
S4	9.4604	21.1489	-12.2939	2.1969	-0.1273

同时,鉴于渗透系数随有效围压的变化梯度在峰后段有所不同,可以分阶段进行最小二乘拟合。以样 S3 为例,在最大渗透系数之前,为便于比较取拟合方程为指数形式;在最大渗透系数之后,采用多项式拟合。样 S3 的分阶段拟合结果和不分阶段拟合结果的比较见图2,拟合方程分别为:

不分阶段拟合方程式:

$$k = -0.0047 \times p^4 + 0.0999 \times p^3 - 0.7489 \times p^2 + 2.0994 \times p + 0.4875$$

分阶段拟合方程式:

$$\begin{cases} k_1 = 2.91158 \times \exp(-p/3.56209) + 1.10969 \text{ (最大渗透系数之前)} \\ k_2 = -0.3941 \times p^2 + 1.7916 \times p + 0.5356 \text{ (最大渗透系数之后)} \end{cases}$$

由图2可以看出,不分阶段的多项式拟合和分阶段的指数及多项式拟合曲线精度都较高,误差较小;而且,在最大渗透系数之前(峰后区),用指数方程的拟合效果较整个峰后区采用高次多项式拟合效果好。这一结果表明,岩石渗透系数并非一直与有效围压呈指数关系,但是在最大渗透系数之前,两者具有较好的指数函数关系;由任意单值函数都可以展开为多项式这一特点,可以认为多项式型的有效围压-渗透系数关系具有更普遍的意义。

(4)影响岩石渗透性的因素很多,其渗透过程

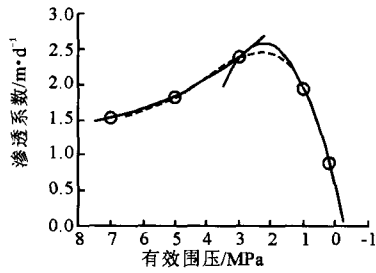


图2 试样 S3 渗透系数 - 有效围压(峰后)拟合曲线

Fig. 2 Fitting curves for the post - peak permeability - confining pressure

其中:实线为分阶段拟合曲线,虚线为不分阶段拟合曲线

亦极端复杂,较难得到统一而普适的结论,实际情况中应分别情况具体分析。

## 5 结 论

(1)本文以围压模拟原岩地应力,研究煤层开采引起的围岩体随应力状态的改变而产生的渗流规律的变化特点。

(2)通过煤层顶板砂岩峰后卸载的渗透性试验研究,得出了其渗透性变化随应力水平不同的总体变化规律。

(3)在峰后卸载区,岩石渗透性并非一直与有效围压呈单一幂指数关系;从普遍意义上来看,试验砂岩的渗透系数与有效围压的关系可以较好的用多项式拟合方程表示。

## 参 考 文 献

- [1] 韩宝平, 冯启言, 于礼山等. 全应力应变过程中碳酸盐岩渗透性研究[J]. 工程地质学报, 2000, 8 (2): 127 ~ 128.  
Han Baoping, Feng Qiyan, Yu Lishan, etc. Study on the permeability of carbonate during full periods of stress - strain. Journal of Engineering Geology, 2000, 8 (2): 127 ~ 128.
- [2] 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, etc. An experimental study on the penetrability of sedimentary rock during the complete stress - strain path. Journal of China Coal Society, 2000, 25 (2): 113 ~ 116.
- [3] 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. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23 (1): 68 ~ 70.
- [4] 郑纲. 岩体裂隙三轴应力渗透规律的试验研究[J]. 工程地质学报, 2004, 12 (1): 30 ~ 33.  
Zheng Gang. Experimental study on the permeability regularities of rocks under triaxial compression. Journal of Engineering Geology, 2004, 12 (1): 30 ~ 33.
- [5] 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 (2): 13 ~ 19.  
Li Shiping, Li Yushou, Wu Zhenye. The permeability - strain equations relating to complete stress - strain path of rock. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17 (2): 13 ~ 19.
- [6] 冯启言, 韩宝平, 隋旺华. 鲁西南地区红层软岩水岩作用特征与工程应用[J]. 工程地质学报, 1999, 7 (3): 266 ~ 271.  
Feng Qiyan, Han Baoping, Sui Wanhua. Characteristics of water - rock interaction of red - beds and its application to engineering in southwestern Shandong. Journal of Engineering Geology, 1999, 7 (3): 266 ~ 271.
- [7] 刘宝琛. 矿山岩体力学概论[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1982.  
Liu Baochen. Rock Mechanics of Mines. Changsha: Hunan Publishing of Science and Technology, 1982.
- [8] 黄乐亭. 开采沉陷力学的研究与发展[J]. 煤炭科学技术, 2003, 31 (2): 54 ~ 56.  
Huang Leting. Research and development of mining subsidence mechanism. Coal Science and Technology, 2003, 31 (2): 54 ~ 56.
- [9] 刁望印. 兖州矿区原岩应力实测技术[J]. 煤矿现代化, 2002, 48 (3): 29 ~ 30.  
Diao Wangyin. In - situ measured technique of geostress in Yanzhou mine area. Modernization of Coal Mine, 2002, 48 (3): 29 ~ 30.
- [10] 张新红, 秦积舜. 低渗岩心物性参数与应力关系的试验研究[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2001, 25 (4): 56 ~ 57.  
Zhang Xinhong, Qin Jisun. Relation of ground stress with the properties of low permeable core. Journal of the University of Petroleum, 2001, 25 (4): 56 ~ 57.
- [11] Jones F O. A laboratory study of the effects of confining pressure on fracture flow and storage capacity in carbonate rock. Journal of Petrol Technology, 1975, 21 (3): 21 ~ 27.
- [12] 彭苏萍, 孟召平, 王虎等. 不同围压下砂岩孔渗规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22 (5): 742 ~ 746.  
Peng Suping, Meng Zhaoping, Wang Hu, etc. Testing study on pore ratio and permeability of sandstone under different confining pressure. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22 (5): 742 ~ 746.