

文章编号: 1001-1986(2001) 01-0022-03

# 煤样全应力应变过程中的渗透系数—应变方程

李树刚<sup>1</sup>, 钱鸣高<sup>2</sup>, 石平五<sup>1</sup>

(1. 西安科技学院, 陕西 西安 710054; 2. 中国矿业大学, 江苏 徐州 221008)

**摘要:** 借助现代化的电液伺服岩石力学试验系统, 以数控瞬态渗透法进行了全应力应变过程的软煤样渗透特性试验。实验中首次设置了环向应变传感器, 得出煤样渗透性与主应力差、轴应变、体积应变关系曲线, 并拟合出相应方程。从中可知, 煤样全应力应变过程对应的渗透系数是体积应变的双值函数, 体积缩小时为 2 次多项式, 体积膨胀时为 5 次多项式。该方程用在应力场—渗流场耦合的数值分析中, 可使计算结果更符合工程实际。

**关键词:** 全应力应变; 渗透系数—应变方程; 煤样渗透性; 瓦斯运移

**中图分类号:** TD712.51 **文献标识码:** A

## 1 引言

原始煤岩体与瓦斯流体组成的系统在多孔介质中处于平衡状态。采动影响下煤岩体发生变形, 并使煤岩的渗透性质随其变形程度发生变化, 从而影响其中的瓦斯压力分布及运移状况。在瓦斯运移的基本参数中, 地应力或采动后的矿山压力对煤岩渗透性变化有决定性作用, 而渗透性的大小对瓦斯的聚集和运移(排放)等起着主要的作用。

XIONG B B, Somerton W H, 林伯泉, 赵阳升等通过大量试验对不同矿井的各种煤样应力与瓦斯渗透系数关系进行了广泛研究<sup>[1-4]</sup>, 结果表明它们一般均为指数函数关系, 这对煤层瓦斯流动特性、抽排瓦斯参数选取及煤与瓦斯突出预防等有重要的指导意义。但此前研究只揭示了事实的一部分, 即在试验的峰值强度前, 随着轴向压力和侧压力的增加, 煤体结构不断被压密实, 所以渗透系数自然趋于减小, 而在煤样超过峰值强度后, 其渗透性会有何变化, 尚未见报导。本文即是首次对全应力应变过程中煤样渗

透系数与应变规律的探讨。

## 2 煤样电液伺服试验及其结果

### 2.1 试验设置 原理及煤样采集加工

煤样试验在中国矿业大学引进的先进的室内岩石力学试验系统——MTS815.02 型电液伺服岩石力学试验系统 (Electro hydraulic Servocontrolled Rock Mechanics Testing System) 上进行, 该系统具有国内唯一的孔隙水压 (Pore Water Pressure) 和水渗透 (Water Permeability) 试验的相关设备, 它曾对岩石试件进行了大量的渗透试验, 但未就煤样渗透性做系统试验。

水渗透试验中, 先施加一定的轴压  $p_1$ 、侧压  $p_2$  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, 其减少速率与试样种类、组构 (Fabric)、试件长度 (渗流路程)、截面尺寸、流体密度、粘度, 以及应力状态和应力水平等因素有关。根据试验过程中计算机自

收稿日期: 2000-02-29

作者简介: 李树刚 (1963—), 男, 甘肃会宁县人, 西安科技学院副教授, 博士, 主要从事岩层控制及瓦斯运移教学与研究。

## Distribution features of ship-sheet structures and thinning zones in Coal Seam No. 4 Qianling District

TONG Hong-shu<sup>1</sup>, WU Su-zhen<sup>2</sup>

(1. Renlou Coal Mine, Northern Anhui Administration, Suzhou 234001, China;

2. Technique Department, Northern Anhui Administration, Suzhou 234001, China)

**Abstract** The orientation and amplitude of thinning and thickening zones of main mining coal seams in some mining areas of Qianling coal mine are studied, through observation and research on the features and distribution regularities of slip-sheet structures. The results indicated the development situation of soft beds and slip-sheet structures in coal seams No. 3, 4 and 5 and the thinning or thickening regularities in the coal seam No. 4, which provided geological information.

**Key words** coal seam; slip-sheet structure; soft bed; forecast

表 1 试件规格、试验条件及参数表

煤样 编号	试件尺寸 D× H/mm	侧压 P <sub>2</sub> /MPa	孔隙压力 P <sub>3</sub> /MPa	渗透压差 Δ P/kPa	峰值应力 /MPa	峰值应变 X /MPa	渗透系数变化 K× 10 <sup>-6</sup>	层理 状态
W1	54.0× 66.1	4.0	3.9	1 500	24.9	0.008 169	1.35~ 30.96	倾斜
W2	54.0× 60.4	4.0	3.9	1 500	36.2	0.011 48	0.46~ 3.03	近水平
W3	54.0× 61.8	3.0	2.9	1 500	37.2	0.012 57	0.45~ 12.79	近水平
W4	54.0× 71.8	3.0	2.9	1 500	23.6	0.019 64	0.05~ 6.51	倾斜

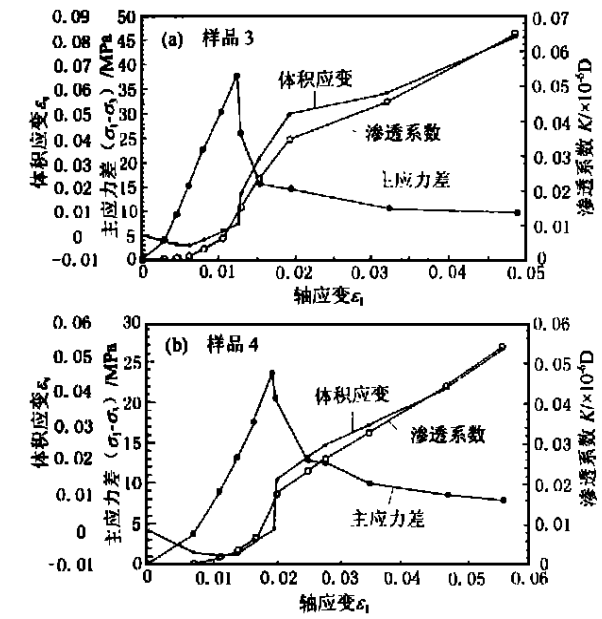


图 1 W3和 W4煤样渗透系数应变曲线

动采集的数据,试样渗透系数  $K$  按下式计算

$$K = \frac{1}{A} \sum_{I=1}^A 526 \times 10^6 \times \lg [\Delta p(I-1) \Delta p(I)] \quad (1)$$

式中  $A$ ——数据采集行数;  
 $p(I-1)$ ——第  $(I-1)$  行渗透压差值;  
 $\Delta p(I)$ ——第  $I$  行渗透压差值

本试验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 1 s。一定的  $p_1$ 、 $p_3$ 、 $p_5$  和  $p_4$  下渗透性试验完成后,可调整上述各参数开始下一轮的渗透试验。经恰当安排,如先固定  $p_2$ 、 $p_3$  和  $p_4$  不变,在伺服机的载荷控制 (Load Control) 下,使轴压力  $p_1$  从煤样处于弹性段的低应力开始,逐步提高至和弹塑性段相对应的应力。当应力接近峰值以及峰值后区,自动转换为冲程控制 (Stroke Control) 方式,即可安全顺利地进行接近峰值应力及峰后区的渗透性试验。这样全应力应变过程的煤样水渗透特性试验可通过计算机程序控制,使在同一试件的一次不间断的试验中自动完成。同时本试验首次设置了环向应变传感器,以测定环向变形<sup>[5]</sup>。

试样取自靖远矿务局魏家地矿 105 综放面内的一层煤。首先在井下精心采集免受采动影响和风化



图 2 试验后煤样的破坏形状

的典型地质单元的煤块,然后运至井上仔细蜡封塑包、锯末隔拥装箱,再谨慎运至中国矿大。在岩控中心 78-50 型立式岩石钻样机上严格取心, DQ-1 型自动岩石切片机上切平两端并磨光,最终在平均硬度  $f=0.58$  的煤块中加工出 5 块标准试样。

### 2.2 试验设计及试验结果

试验前先将试样用真空浸水装置含水饱和,确认其饱和后用聚四氟乙稀 (Teflon) 热缩塑料双层致密牢固热封煤样周围,保证流体介质不能从防护套和试件间隙渗漏,然后置于伺服机三轴缸内进行加压试验。本次试验成功了 4 个煤样,其规格、试验条件及试验参数如表 1 所示。试验中控制试件应力峰值前后至少 7 个关键点,即最高、最低及峰值应力时的渗透系数,弹性段、弹塑性段、应变软化段、塑性流动段的渗透系数,这样可基本控制全应力应变过程的渗透曲线的几何特征和数值特征。设定 60 s 加载过程, 100 s 渗过程,微机自动采集数据,并给出每次采样的渗透压差值  $\Delta p-t$  曲线,试件 W3 和 W4 的全应力应变曲线及渗透系数、体积应变随轴向应变的变化曲线如图 1 所示。试验结束后煤样破坏形状如图 2 所示。

### 3 试验结果分析及拟合方程

分析试验结果,可得出以下重要结论:

- 3.1 煤样渗透系数并非随应力增加一直呈负指数规律降低,在应力超过弹性极限进入弹塑性段,试件中逐步由少到多地产生新的微裂隙,渗透系数转而趋向增长;越接近峰值应力,产生的微裂隙越多,其中有裂隙互相交割而贯通,因此渗透系数急剧增长;至峰值强度后,煤样失去最大承载能力,渗透系数仍趋增长,但增长斜率有渐缓趋势,说明峰后区新裂隙虽仍有扩展,但其数量较少。
- 3.2 最大渗透系数值发生在软化段或塑性流动段,

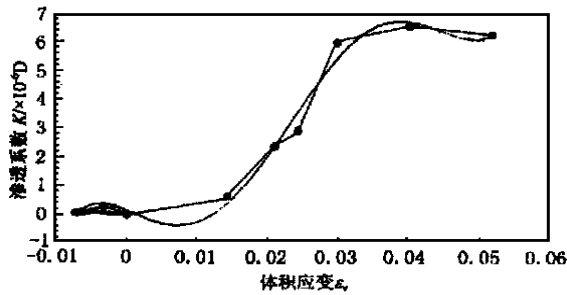


图 3 煤样渗透系数—体积应变关系曲线 (W4)

最小值则出现在弹性变形发展到一定程度时,它表明初期弹性段,因有孔隙和微裂隙在应力作用下被压密闭合而使渗透系数减小。两极值相差最大 130.2 倍 (W4 煤样),最小 6.6 倍 (W2 煤样),即最大增加了两个数量级。

3.3 应变与渗透系数间亦呈非线性变化。从图 1 中可看出,渗透系数  $K$  随轴应变  $X$  的变化梯度在全应力应变过程中有所不同。借助通用的 Graph tool 软件,可分两段进行多项式拟合,以 W4 为例,其回归方程为:

$$K_1 = 7.3108 \times 10^{-5} - 4.0258 \times 10^{-2} X + 15.0966 X^2 - 1.237.66 X^3 + 34.721 X^4 \quad (0 < X \leq 0.02507) \quad (R = 0.9167), \quad (2)$$

$$K_2 = 5.5069 \times 10^{-5} - 8.7018 \times 10^{-3} X + 0.6494 X^2 - 20.0893 X^3 + 290.371 X^4 - 158.571 X^5 \quad (0.02507 < X < 0.05572) \quad (R = 0.9989). \quad (3)$$

体积应变  $X$  ( $X = -X_1 + 2X_2$ ) 和  $K$  随  $X$  的变化有同步发展的趋势,但在加载初始阶段,试样体积因其中孔裂隙受压密闭合而减小,进入弹塑性段后,总体积膨胀,尤其在峰后区,试样急剧膨胀,即试样扩容或剪胀 (Dilatancy),但在塑性流动段,  $K$  值增加减缓,  $K$  与  $X$  间变化关系如图 3 所示。

以 W4 为例通过曲线拟合可得出其多项式方程。

体积缩小:

$$K_1 = 1.3358 \times 10^{-9} - 4.2334 \times 10^{-2} X - 4.9957 X^2 \quad (R = 0.9231), \quad (4)$$

体积膨胀:

$$K_2 = 1.4292 \times 10^{-4} - 1.0007 X - 4.3923 X^2 + 1.4318 \times 10^3 X^3 - 4.4124 \times 10^4 X^4 + 3.7185 \times 10^5 X^5 \quad (R = 0.9387). \quad (5)$$

可见,试样体积缩小、膨胀过程中,渗透系数为体积应变的双值函数。

#### 4 结论

a. 通过实验,首次拟合出对应于煤样全应力应变过程的渗透系数—应变过程,即  $K-X$  曲线的数学表达式,随煤体性质的不同,  $K-X$  表达式有各自相应的系数。

b. 影响煤样渗透系数的因素很多,其渗透过程亦具极端复杂性。煤样在峰值前后的体积变化以及由此引起的渗透系数变化,较难从纯理论上分析清楚,只有通过大量试验寻求其内在规律。我们首次提出:煤样渗透系数—体积应变作为应力场和渗流场耦合数值分析中与本构方程同等重要的控制方程,通过应变量可以使两种方程产生相互影响的耦合联系,唯其如此,所分析结果才更符合工程实际。

本文实验得到中国矿业大学岩控中心李玉寿和张少华高工、缪协兴教授的大力帮助,谨表谢忱。

#### 参考文献

- [1] ХОНОТ Б.Б.,宋世钊,王佑安译.煤与瓦斯突出[M].北京:中国工业出版社,1966.25~36.
- [2] Somerton W. H. Effect of stress on permeability of coal[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 1974, (12): 129~145.
- [3] 林伯泉,周世宁.煤样瓦斯渗透率的实验研究[J].中国矿业学院学报,1987,(1): 21~28.
- [4] 赵阳升.矿山岩石流体力学[M].北京:煤炭工业出版社,1994.182~195.
- [5] 李树刚.综放开采围岩活动影响下瓦斯运移规律及其控制[D].中国矿业大学博士学位论文,1998.6.

### Permeability-strain equation relation to complete stress-strain path of coal sample

LI Shu-gang<sup>1</sup>, QIAN Ming-gao<sup>2</sup>, SHI Ping-wu<sup>1</sup>

(1. Xi'an University of Science Technology, Shaanxi Xi'an 710054, China;

2. China University of Mining and Technology, Jiangsu Xuzhou 221008, China)

**Abstract** With the Electro-hydraulic Servocontrolled Rock Mechanics Testing System, the permeability of soft coal sample related to complete stress-strain path is experimented with instantaneous permeating method of data auto control. An annular strain sensor is set up firstly in testing, and the curves, reflecting the relationship between permeability of coal sample and principal stress difference, axial strain and volumetric strain, as well as the relevant equations are established. Thus it can be seen the coal sample permeability coefficient is twofold function of volumetric strain. It is binomial equation when the sample volume decreased, and five-polynomial one when the volume increased. The equation can be applied to the numerical analysis of the coupled stress field and the fluid flow field, and the calculated results agree well with those observed.

**Key words** complete stress-strain path; permeability-strain equation; permeability of coal sample; gas delivery