

采矿与井巷工程

基于 CT 扫描的煤岩细观损伤特性研究

官伟力^{1,2}, 吴小东^{1,2}, 张自翔^{1,2}, 赵海燕³

(1. 中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院, 北京 100083; 2. 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083;

3. 装备指挥学院 士官系, 北京 102249)

摘要:为了研究煤岩在加载前后各扫描断面的图像分形维数以及孔隙度的变化规律,利用工业 CT 探测技术及三轴加载试验系统,在三轴条件下对初始煤岩及加载破坏后煤岩进行 CT 扫描观测,分析煤岩 CT 断面的密度分布图像以及荷载作用下煤岩的动态损伤过程。研究表明:煤岩在不同断面破坏前后的分形维数与孔隙度的变化不同,在相同应力状态下,煤岩的不同层面有着不同的损伤扩展特性,在荷载作用下煤岩的损伤演化局部化和不均匀。通过分析煤岩的灰度概率密度曲线,得出曲线中出现多峰分布,反映出在煤体内存在多种损伤因素;曲线中存在单个突出的尖峰,反映出某种因素占主导地位。由试验结果及煤岩的动态损伤过程,并结合煤岩的变形损伤特征,选取合适的损伤参量建立了在荷载作用下煤样的损伤本构模型,证明理论曲线与试验曲线能够较好地吻合。

关键词:三轴加载试验;工业 CT;分形维数;煤岩损伤

中图分类号:TD313

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2018)09-0117-09



Study on microscopic damage features of coal-rock based on CT scanning

GONG Weili^{1,2}, WU Xiaodong^{1,2}, ZHANG Zixiang^{1,2}, ZHAO Haiyan³

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

2. State Key Lab of Deep Geomechanics and Underground Engineering, Beijing 100083, China;

3. Department of Non-commissioned Officers, Academy of Equipment Command and Technology, Beijing 102249, China)

Abstract: In order to study the image fractal dimension of each scanning section and the variation law of the porosity before and after the loading on the coal-rock, the industrial CT detection technology and the triaxial loading test system were applied to the CT scanning observations on the initial coal-rock and the loading damaged coal-rock under the triaxial condition. An analysis was conducted on the density distribution images of the coal-rock CT sections and the dynamic failure process of the coal-rock under the role of the loading. The study results showed that the fractal dimension and porosity of the coal-rock before and after the failure of different section were different in variation. Under the same stress state, the different section of the coal-rock would have different damage expansion features. Under the role of the loading, the damage evolution of the coal-rock would be a localization and inhomogeneity. With an analysis on the density curve of the coal-rock grey probability, a multimodal distribution occurred in the curves was obtained and could explain the multi damage factors existed in the coal-rock. A single protruding peak existed in the curves could explain one factor in the leading position of a factor. The test results and the coal-rock dynamic damage process combined with the deformation damage features of the coal-rock and with the selection of the suitable damage parameters were applied to establish a damage constitutive model of the coal samples under the role of the loading. The results showed that the theoretical curve and the test curve could be well fitted.

Key words: triaxial loading test; industrial CT; fractal dimension; coal-rock damage

收稿日期:2018-04-18; **责任编辑:**曾康生 **DOI:**10.13199/j.cnki.cst.2018.09.019

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51574248);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2010YL12)

作者简介:官伟力(1955—),男,辽宁清原人,教授,博士生导师,博士。E-mail: gwl@cumt.edu.cn

引用格式:官伟力,吴小东,张自翔,等. 基于 CT 扫描的煤岩细观损伤特性研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(9): 117-125.

GONG Weili, WU Xiaodong, ZHANG Zixiang, et al. Study on microscopic damage features of coal-rock based on CT scanning[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(9): 117-128.

0 引言

煤储层是一种非连续、非均质、各向异性体,是由宏观裂隙、显微裂隙和煤岩基质块中的孔隙组成的三元孔、裂隙介质,其孔、裂隙结构直接影响煤层气的吸附和渗流^[1-2]。煤中由于孔隙的存在对煤岩体的力学性质有着很大的影响,从细观角度进行分析,研究煤的孔隙结构在荷载作用下煤岩的损伤破坏机理具有重要意义。随着科学技术的不断进步,工业CT在航空、航天、军事工业、核能、石油、电子、机械、新材料等许多领域得到了广泛的应用。X射线CT技术起源于20世纪80年代后期,用于无损探测岩石内部结构和裂纹演化的过程,对CT图像由最初的表面认识逐步深化为对岩石裂纹演化规律的分析 and 应用研究。

基于对岩石扫描断面的CT图像分析,一些科研工作者开展了大量的研究工作,其主要成果包括:利用微焦点X射线计算机层析(CT)扫描仪对岩石微观孔隙特征进行成像,并利用CT定量分析、CT图像分析和分形几何方法对岩石孔隙进行定量分析^[3];研究在三轴压缩破裂后扫描断面的CT图像,并推论在不同应力条件下不同断面的CT图像组合可以显示内部裂纹演化过程^[4];有分析关于岩石CT图像的CT数分布特征,即无裂纹时CT数直方图呈现单峰曲线特点,有裂纹或空洞发育时直方图呈现多峰曲线特点^[5];在三轴和单轴荷载作用下进行煤岩破坏全过程的细观损伤演化规律的即时动态CT试验^[6];利用计算机层析摄影技术研究了单轴压缩脆性煤岩破坏全过程的细观损伤演化规律^[7];利用分形理论对煤岩破坏过程的CT图像进行了分析^[8];基于图像分割的煤岩孔隙多尺度分形特征的研究^[9];基于图像描述的煤岩裂隙CT图像多尺度特征的研究^[10];基于图像分割的煤岩割理CT图像各向异性特征的分析,对煤岩的各向异性分形维数与孔隙度在2D与3D空间进行了精细描述^[11];基于图像检索技术的CT扫描图像处理方法的研究^[12];通过对煤岩试件进行常规三轴力学试验,并对破坏后的煤岩试件进行CT扫描,得到了煤岩试件内部裂隙空间的分布情况^[13];三轴压缩载荷作用下单裂隙扩展的CT实时扫描试验的研究^[14];基于CT图像单轴受载煤样损伤计算的研究^[15];基于对孔隙煤岩损伤破坏行为的数值模拟,表明孔隙集中的区域会出现应力或应变集中的现象,

随着孔隙率及孔隙长短轴比增大,煤岩细观单元损伤现象更加明显,弹性模量下降,煤岩强度急剧下降,且损伤阈值也有所下降^[16];基于工业CT扫描观测了吸附瓦斯煤体在加载过程中的细观变形过程^[17];YAO等利用微焦CT手段计算了不同煤中孔隙率大小,获得了煤中孔隙和裂隙的分布特征^[18];通过低温液氮吸附和SEM分析煤的孔隙结构特征,再通过CT扫描观测吸附瓦斯煤体细观结构的受载破坏过程,分析孔隙结构对煤体受载变形的影响^[19-20]。

煤岩损伤力学研究是具有初始缺陷的岩石力学问题,但针对目前的宏观连续损伤力学和基于典型损伤基元的细观损伤力学方法采用的力学模型难以描述受力煤岩从细观损伤到宏观破坏的本质特征。

现有的扫描电镜或光学显微镜下的煤岩损伤演化细观试验因力学机制不明确、试件太小、加载能力有限等因素的影响,降低了试验结果的可靠性,而由于CT技术可以弥补上述缺陷,从而受到广泛的应用。

笔者以工业CT为探测手段,对含气煤岩进行三轴加载试验,并利用数字图像处理技术对三轴条件下煤岩细观损伤破坏的规律进行分析,基于损伤基本理论可得到煤岩细观结构体的分形损伤特征及损伤本构模型,从而得到煤岩变形破坏的规律。

1 工业CT扫描试验系统

层析成像法(也即CT扫描法)是利用射线源(X或 γ 射线)使被检测物体在无损状态下从多个方向透射被测物体的断层,并把扫描断面以二维灰度图像的形式表现出来的一种新型检测技术。与常规试验研究方法相比,工业CT扫描能给出与试件材料、几何结构、组分及密度特性相对应的断层图像,具有成像直观、分辨率高、不受试件结构限制的优点。

采用FXE-225微焦点X射线工业CT系统进行扫描试验,该系统主要由X-射线系统、检测器系统、机械扫描运动系统、图像处理系统组成。CT图像的像素矩阵为 $1\,024 \times 1\,024$,视场为 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$,像素分辨率 $48\text{ }\mu\text{m}$,密度分辨率在直径 10 mm 区域中可达 0.2% 。工业CT层析试验系统如图1所示。图2为工业CT系统的试验装置。

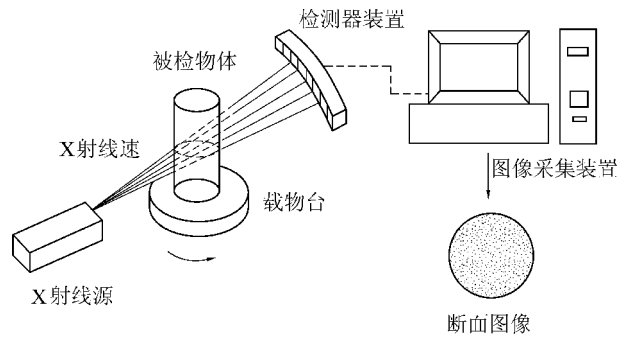


图 1 CT 试验系统示意

Fig.1 Sketch map of computed tomography test system



图 2 CT 扫描试验装置

Fig.2 Computed tomography scanning test device

试验煤样来自山西潞安矿区所属屯留矿的 3 号煤层,煤层平均厚度为 6.3 m,各井田在总体上为单斜构造,次一级背、向斜构造起伏平缓,煤层的层、节理发育中等,普氏系数 $f=1\sim2$ 。为观测煤层中裂隙的自然赋存情况,在煤层剖面上选取体积较大的块煤,取与原剖面平行的面为端面制作成多个规格为 $\phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的圆柱形煤样。选取其中多个煤样岩心作为 CT 扫描试样,把试样置于 CT 机械转台上,对煤样不同高度层位的多个断面进行扫描,得到相应断面的 CT 切片图像。笔者选择一个煤样作为试验对象,煤试件高为 100 mm,以煤样底端为 z 向坐标的 0 起点,选取 $z=19、21、49、51、79、91\text{ mm}$ 共 6 个圆形截面,分别设定为第 1、2、3、4、5、6 断面。煤样扫描断面的位置如图 3 所示。

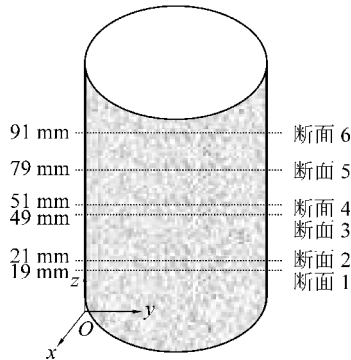


图 3 CT 扫描的煤样位置示意

Fig.3 Sketch of coal sample location on CT scanning

2 三轴加载试验

在实验室的岩体三轴加载试验系统对煤样进行加载。试验系统主要包括轴压加载系统、环压加载系统、气体流动及计量系统、流程管汇系统、数据采集和处理系统。为了精确测定轴压、围压和孔压的大小,在系统压力入口管线上放置了较高精度的压力传感器,可以实时采取孔压、环压及轴压动态变化的数据。由于该试验系统具有应变和应力控制装置,可进行三轴向荷载和变形的测量。三轴加载系统的最大轴向压力 P 为 400 kN,围压为 20 MPa,轴向工作行程为 40 mm。三轴加载试验系统如图 4 所示。试验步骤为如下:

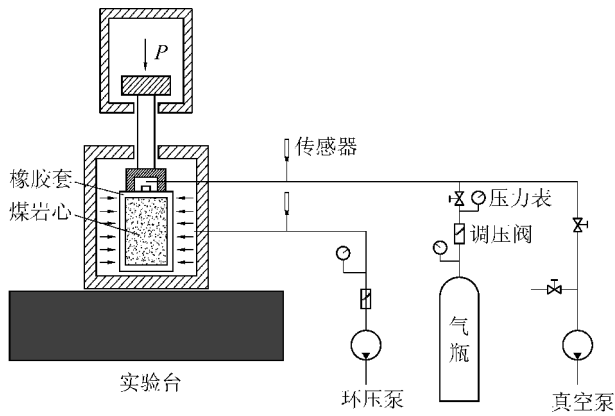


图 4 三轴加载试验系统

Fig.4 Triaxial loading test system

- 1) 试验前,首先将煤样置于电子天平上称重,然后置于工业 CT 机上。通过采用工业 CT 探测设备得到在初始状态下煤样断面的 CT 图像。
- 2) 试验过程中,将煤样置于加载装置中,打开气体进口阀门,用真空泵抽真空,当真空泵仪表显示为 0 时,则认为煤样孔隙内为真空状态。
- 3) 开始对煤样施加固定围压(P_w) 为 10 MPa,打开高压气瓶的进气阀,设定 N_2 的压力为 2 MPa,并保持气体的压力不变,持续通入体积分数为 99% 的 N_2 。
- 4) 煤样在围压作用下吸附 12 h 后,开始施加轴压(P_z),轴向以 0.002 mm/s 的速率匀速加载至煤样破坏。
- 5) 试验结束后,关闭气瓶进气阀门,停止轴压及围压加载,从橡皮套中取出煤样,置于工业 CT 机上,进行扫描之前设定的相应位置,得到在三轴加载条件下含气煤样的损伤破坏图像特征。

试验加载条件:氮气的密度为 1.25 kg/m^3 , 试验的温度为 $20.0\text{ }^\circ\text{C}$, 大气压强为 101.325 Pa 以及煤样的抗压强度为 35.28 MPa 。

3 三轴条件下煤岩变形破坏的细观规律

对于细观损伤力学的研究,是从材料内的微裂纹、空洞等细观尺度上来研究各类损伤的形态、分布及其演化特性。计算机断层成像技术在煤岩细观破坏观测中取得了很大的成功,采用 CT 检测技术手段进行煤岩细观损伤演化的机理研究是目前国内外岩石细观损伤研究的发展趋势。

3.1 煤岩损伤的分形规律

煤岩损伤的发展过程具有统计自相似性,损伤区域内局部与整体统计的自相似。对于煤岩来说,将其内部的孔隙体看成一个分形网络,通过构造这种孔隙介质的分形模型来模拟煤岩在损伤过程中微孔隙发展和变化的规律,并能用试验测定这个过程的分形维数及其变化规律。

基于分形几何的覆盖法可以定量考察损伤演化的统计自相似性是否存在。用 $x-y$ 平面的方格表示网络覆盖损伤区的范围,即损伤区的大小,以边长为 L 的正方形网格去覆盖整个损伤区,并计算出每一小正方形内微裂纹的条数。由盒维数的定义,该损伤区的分形维数 D 为

$$D = \ln N(L) / \ln (1/L) \tag{1}$$

式中, $N(L)$ 为覆盖图像中心线的网格数量。

因此,在煤岩损伤发展的过程中可以利用该方法得到损伤区的分形维数。

煤样 6 个断面的初始 CT 图像、煤样加载破坏后的 CT 图像如图 5 所示。

由图 5 可看出,煤样加载至破坏后在断面上所产生的裂纹,且每个断面上产生裂纹的位置及长度都不相同。在荷载作用下,从宏观上不能明显发现其内部孔隙发生了变化,因为宏观尺度上内部孔隙的微小变化被忽略了,但可以通过像素的统计计算来分析煤岩小孔隙的变化特征。利用式(1)计算破坏前后煤样各个断面 CT 图像的分形维数,可得到各断面的分形维数见表 1,其分形维数曲线如图 6 所示。

从图 6 中可以看出,对于损伤后煤样断面的分形维数比初始没有荷载时都有所增大。在煤样 6 个断面中,中间部位(断面 3、4)的分形维数变化幅度均小于两端部位(断面 1、2、5、6)的,说明煤样两端

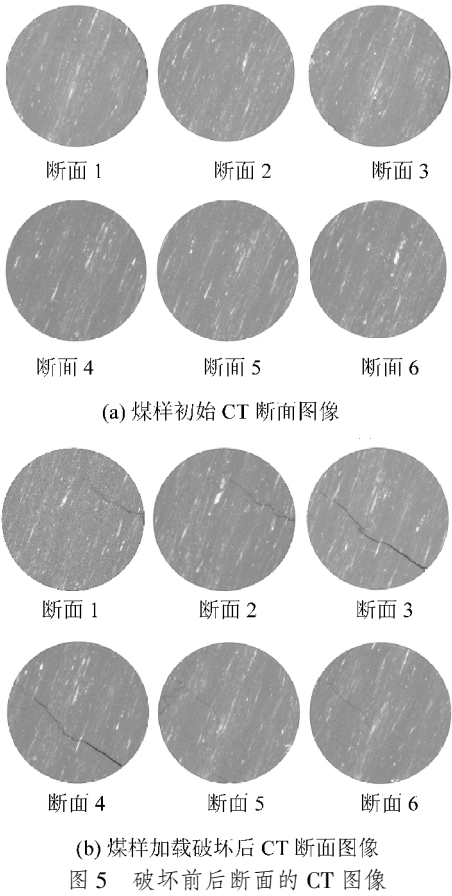


图 5 破坏前后断面的 CT 图像

表 1 破坏前后煤样断面分形维数
Table 1 Fractal dimension of coal sample sections before and after damage

断面	分形维数	
	破坏前	破坏后
1	1.850 1	1.895 8
2	1.851 2	1.897 3
3	1.839 1	1.857 1
4	1.839 2	1.852 7
5	1.850 1	1.877 5
6	1.843 4	1.864 0

的损伤程度较大。各个断面分形维数变化程度不同,说明在荷载作用下煤岩的损伤演化局部化和不均匀性,这一变形结果与煤样孔隙、裂隙的初始分布状态也有很大的关系。

3.2 煤岩损伤的孔隙率变化规律

煤岩的损伤演化过程实际上可以看作是煤岩体内微孔隙的发展、汇合、贯通而最终导致破坏的过程。煤岩体内孔隙是无序分布的并且具有不同阶次,故这种孔隙体也可以看成是一个分形网络,通过

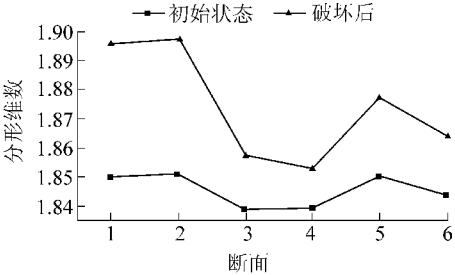


图 6 煤样断面破坏前后的分形维数曲线

Fig.6 Fractal dimension curve of coal sample sections before and after damage

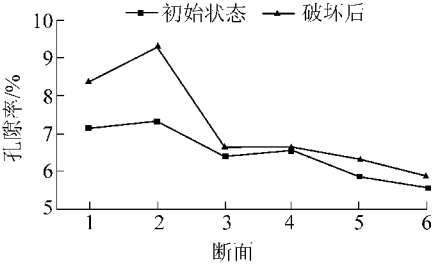


图 7 煤样断面破坏前后的孔隙率曲线

Fig.7 Porosity curves of coal sample sections before and after damage

构造这种孔隙介质的分形模型可以模拟煤岩在损伤过程中微孔隙的发展变化规律。在加载作用下,煤岩体大部分的变形主要发生在裂隙,而应力是引起裂隙变形的主要因素之一。在吸附过程中大部分煤岩都处于与氮气的相互作用之中,气体在煤体中的吸附渗流作用于煤体的裂隙面而使煤体孔隙、裂隙结构发生变化。所以,应力和气体吸附都对煤岩造成了变形损伤。

利用图像分析法来确定二维面孔隙率,经过二值化后的 CT 图像,1 代表孔隙,0 代表背景,统计整幅图像中孔隙所占像素点的个数(即二值图像中 1 的总数),即可求得该断面图像的面孔隙率。利用 CT 图像分析确定二维面孔隙率的方法如下:

$$\phi = N_p / N_b \quad (2)$$

式中: N_p 为岩心孔隙所占的像素数量; N_b 为整个岩心的像素数量。

在工业 CT 图上可以看出煤体损伤裂纹的存在,但一些微米级孔隙的变化用肉眼很难辨别,现采用像素分析的方法计算煤岩体加载前后煤样断面的孔隙度,分析煤体损伤引起内部孔隙率的变化规律。表 2 为 3 号煤样各个断面加载前后的孔隙率。加载前后煤样各个断面孔隙率的曲线分布如图 7 所示。

表 2 破坏前后煤样各断面孔隙率

Table 2 Porosity distribution of coal sample sections before and after damage

断面	孔隙率/%	
	荷载为 0	最大荷载
1	7.14	8.38
2	7.36	9.31
3	6.41	6.65
4	6.57	6.66
5	5.88	6.31
6	5.55	5.89

从图 7 可得知,在三轴荷载作用下含气煤样的

孔隙率增大。所以,应力的变化与孔隙率的变化有着密切的关系,孔隙率的变化反映了煤岩内部结构的变化。孔隙率的变化与分形维数的变化并不完全一致,相同的是在煤样中部断面 3 和 4 的孔隙率变化范围明显小于两端的孔隙率的变化,这与分形维数的变化是一致的。由此可见,分形维数与断面的孔隙率有密切联系,煤样的分形维数增大,相应断面的孔隙率也应增大。煤样破坏后分形维数的增大表明了荷载对煤体损伤的重要表现之一为对孔隙率的重大影响。

由于各个断面的分形维数和孔隙率的变化程度不同,说明在荷载作用下煤岩的损伤演化局部化和不均匀性。损伤的不均匀性也即在同一应力状态下时,同一煤样的不同层面有着不同的损伤扩展特性。损伤的局部性也即在同一断面不同区域的损伤演化也不同,煤岩体的最终破坏是由一条或多条主裂纹来决定的,对于结构不均匀的区域易于遭到破坏。

3.3 煤岩损伤的密度分布规律

采用 CT 图形的分析能够在一定程度上反映煤岩的损伤特性,并通过对比研究 CT 数的大小及 CT 数的分布规律,可以从总体上了解煤岩的损伤特性,这种基于图像处理的定量分析方法,是 CT 技术识别的优点之一。

由于 CT 数与图像的灰度值有密切关系,CT 图像是利用正比于 CT 数的值成像得到的灰度图。从损伤的观点来看,CT 图像内任意像素点的 CT 数随应力的变化都意味着对应的岩石密度的变化,即损伤的发生。煤样破坏前后 6 个扫描断面灰度的概率密度分布曲线如图 8 与图 9 所示,其中 $P(x_i)$ 为灰度像素在该图像中出现的概率密度函数, x_i 为灰度。图中煤样灰度值的概率密度分布曲线呈多峰分布,且峰值起伏较大,说明在煤样内损伤并不是单一的,而是存在多种因素。试验过程中有煤样内裂隙及层

理引起的损伤,也有矿物颗粒间的空洞引起的损伤,有煤样所受应力引起的损伤,也有气体在煤孔隙中的吸附渗流而引起的损伤。曲线峰值中存在 1 个或

2 个尖锐的峰值,说明其中一类损伤起着明显的主导作用。

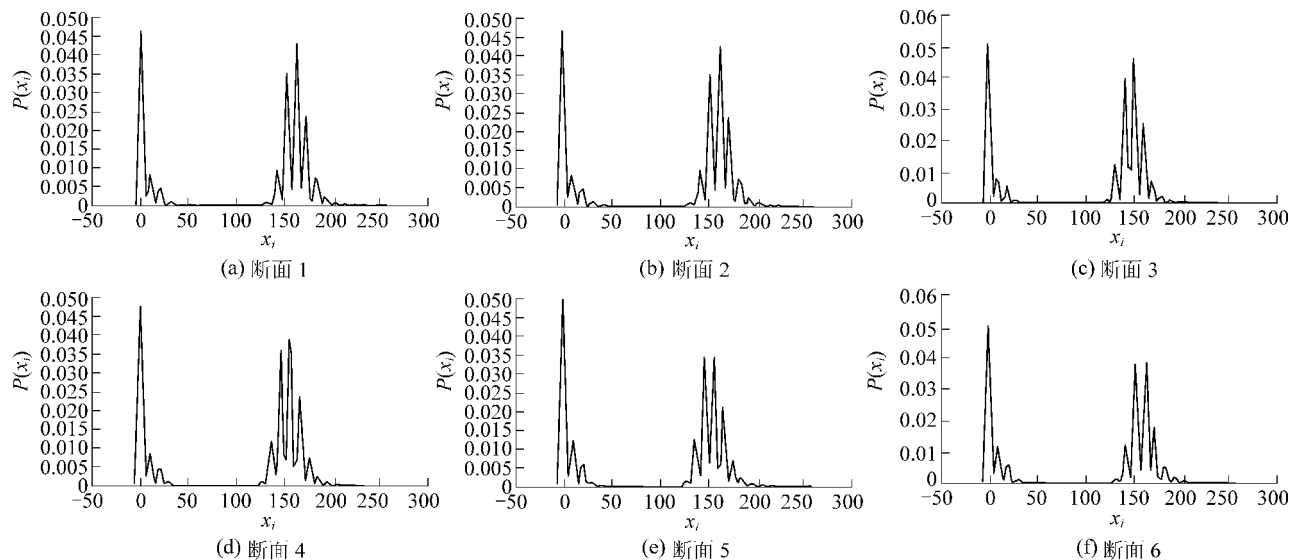


图 8 初始煤样的 CT 密度分布图像

Fig.8 CT density distribution image of initial coal sample

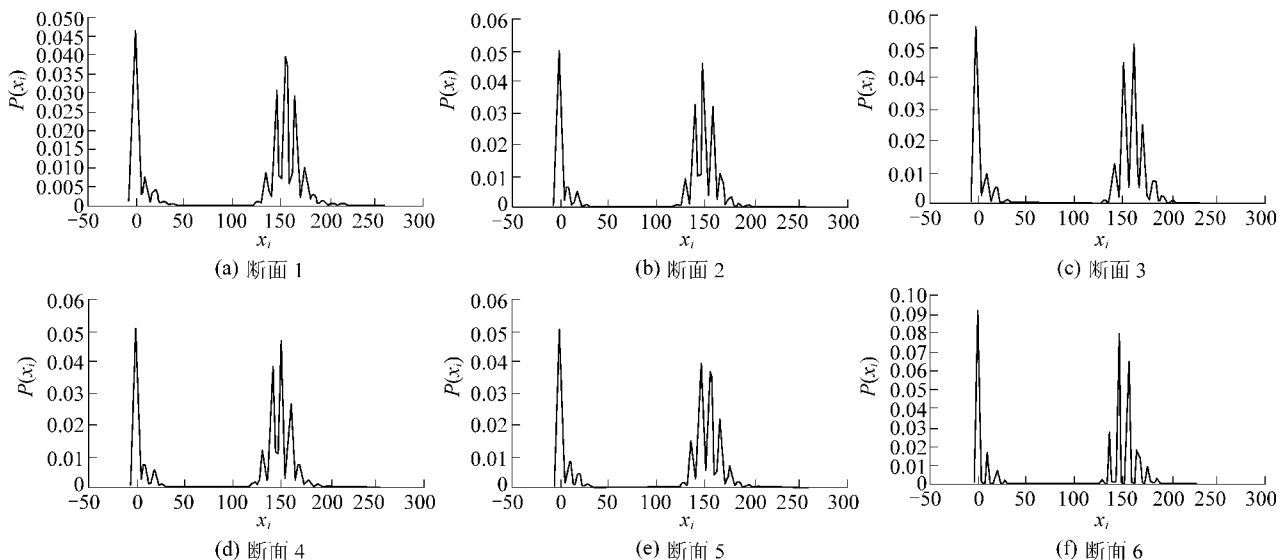


图 9 破坏后煤样的 CT 密度分布图像

Fig.9 CT density distribution image of coal sample after damage

由于灰度值为 140~200,其密度分布变化情况较大,煤断面出现裂纹后,该区间概率密度分布的峰值有所增加。针对 CT 图上深色的高密度区表示裂纹,浅色的低密度区表示煤基质,由此可知,灰度在 140~200 区域内对应的裂纹及孔隙在加载后发生了明显的变化。

由于 CT 数的分布从本质上可以反映煤岩灰度的分布,方差则可以表示损伤种类(孔洞,微裂纹)的分布情况。煤样破坏前后不同 CT 断面的灰度均

值、方差均值的变化曲线如图 10 所示。

从图 10 中可看出,煤样 6 个断面的平均灰度和平均方差变化相差不是很大,说明在微小尺度空间上煤岩样的损伤具有一定的相似性。但煤样中间(3、4 断面)与其他断面(煤样两端)的灰度和方差均值相比,则各不相同,这是由于该变化与煤的初始结构有直接的关系。从以上分析可以说明,在同一应力状态下,对于同一试件不同层面有着不同的损伤扩展特性,即损伤演化具有不均匀性。煤样破坏

后各个扫描断面的灰度均值都有所增加,平均方差的变化不一致,说明各断面密度变化的差异不同,故煤样损伤的程度也不相同。灰度和方差的变化规律与煤岩应力-应变全过程曲线之间有着一定的对应关系。

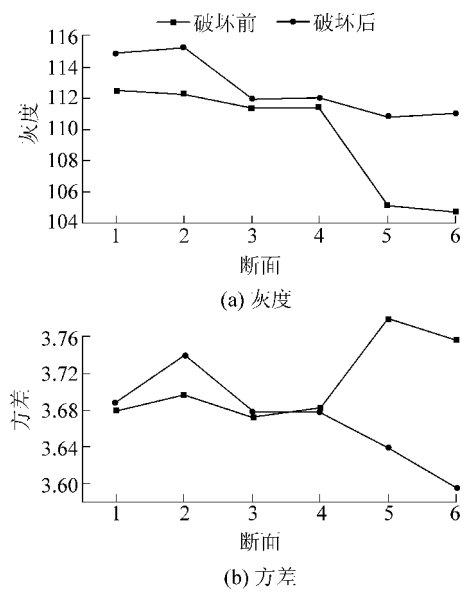


图 10 破坏前后煤样 CT 图像灰度及方差分布
Fig.10 Gray and variance distributions of CT image of coal sample before and after damage

基于 CT 数的密度损伤增量 ΔD 可定义为

$$\Delta D = \frac{\rho_i - \rho_0}{\rho_0} = \frac{H_i - H_0}{1\,000 + H_0} \quad (3)$$

式中: ρ_i 、 ρ_0 为煤岩试件损伤演化某一阶段的密度及煤岩的初始密度; H_i 、 H_0 分别为煤岩试件损伤演化某一阶段的 CT 数及煤岩的初始 CT 数。

H_0 和 H_i 由相应 CT 图像得到,密度损伤增量 ΔD 反映了煤岩内每一个体素的密度相对变化量。计算得到各个断面煤样的密度损伤增量,结果见表 3。由表中数据可以看出,煤样两端的损伤增量大于中间部位。

表 3 密度损伤的增量计算结果

断面	1	2	3	4	5	6
ΔD	0.014 54	0.018 95	0.002 93	0.004 15	0.035 78	0.039 43

4 煤岩损伤演化的宏观规律

煤岩是一种具有内部结构的非均匀介质,在外载荷作用下,煤岩内部微缺陷的成核、扩展以及相互之间的作用决定了煤岩的宏观变形、破裂特性。煤

岩由变形到破坏可视为一个逐渐发展过程:由变形、损伤的萌生和演化,直至出现宏观裂纹,再由裂纹扩展到破坏的全过程。煤岩破坏的产生,主要是由于岩体应力场的改变,引起煤岩内部细观裂纹扩展演化的结果在宏观上是岩体应力应变特征变化的客观表现。

分段模型是用来研究习惯损伤力学的一条可行途径,如图 11 为煤样轴向应变和径向应变与应力关系的曲线,根据荷载情况下煤岩应力应变全过程曲线,可将煤岩破坏宏观过程分为以下 5 个阶段。

1) OA 为损伤弱化阶段。在该阶段内,随着轴向应力的增加,轴向和横向变形也相应的增加,但轴向变形大于横向变形,体应变也逐渐增大,而试件的体积变小,曲线略向上弯曲,产生该现象的原因是煤岩试件中的微裂纹或微孔洞被压密闭合,煤样密度增加,强度提高。

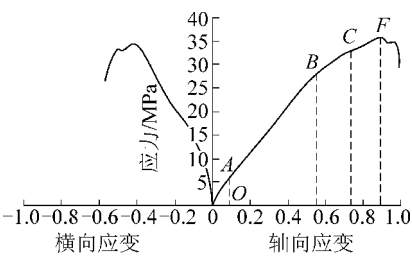


图 11 煤样应力应变曲线关系
Fig.11 Relationship between stress and strain curve of coal sample

2) AB 为线性阶段。该阶段体应变逐渐减小,试件的体积也逐渐增大,试件内部的微裂纹(孔洞)被压密闭合后,应力与轴向应变曲线近似直线。此阶段煤岩处于弹性变形阶段,煤岩的细观损伤并没有很大的变化。线性阶段的本构模型取为线弹性,经过拟和处理,煤岩在线性阶段的本构模型定义为

$$\sigma = 44.86\varepsilon + 3.79 \quad (10.82 \text{ MPa} < \sigma < 27.01 \text{ MPa}) \quad (4)$$

所以,在该阶段煤岩的损伤演化方程为

$$D = 0 \quad (5)$$

3) BC 为损伤开始演化和稳定发展阶段。该阶段煤岩内部细观损伤开始演化,煤岩微裂纹开始萌生并稳定发展。

4) CF 为损伤加速发展阶段。该阶段的微裂纹逐渐贯通,并出现宏观的裂纹,此段为破坏前兆阶段,当煤岩强度达到峰值强度后,煤岩样就发生破坏。

5) F 点以后为峰后软化阶段。该阶段的宏观裂纹迅速张开,煤岩开始加速扩容。当试件产生破坏

之后,煤岩的承载能力没有完全丧失,仍还有一定的承载能力,体应变继续增大,试件体积也进一步增大,随着继续施加载荷,煤岩出现第二次破坏,随后便完全丧失承载能力。

因此,煤岩在单轴应力作用下的损伤本构关系为

$$\sigma = E(1 - m \varepsilon^m) \varepsilon = E\varepsilon - Em\varepsilon^{n+1} \quad (6)$$

$$n = \frac{E\varepsilon_c}{E\varepsilon_c - \sigma_c} - 1, m = \frac{E\varepsilon_c - \sigma_c}{E\varepsilon_c^{n+1}}$$

式中: ε_c 、 σ_c 为应力-应变曲线峰值点的应变和应力; m 为煤岩的材料常数; n 为损伤指数,它是反映煤的损伤程度,间接反映了煤的脆性程度; E 为受损材料的弹性模量,称为有效弹性模量; σ 为应力; ε 为应变。

由本构关系方程可以看出,煤岩一方面经历着载荷使变形增长服从胡克定律,即方程右边第1项 $E\varepsilon$, 反映煤的弹性性质; 另一方面又随着变形的增长导致其抵抗外载荷能力的下降,即方程右边第2项 $Em\varepsilon^{n+1}$, 反映煤的损伤状态,是损伤累计造成煤的承载能力下降的一种量度。试验得到了抗压强度及对应的应变,据此可以求出煤的损伤相关参数 m 、 n 以及损伤本构方程,见表4。

表4 煤样损伤参数

Table 4 Damage parameters of coal sample

弹性模量/ MPa	抗压强度/ MPa	轴向应变	损伤指数 n	材料系数 m
44.86	35.28	0.915 7	7.08	0.26

所以煤样损伤的本构方程为

$$\sigma = 44.86\varepsilon(1 - 0.26\varepsilon^{7.08}) \quad (7)$$

把求出的理论损伤本构模型 $\sigma - \varepsilon$ 曲线2和试验的 $\sigma - \varepsilon$ 曲线1相对比,如图12所示。图12中煤样损伤本构模型的预测结果与试验结果之间存在较小的误差,因此,该模型是合理的。

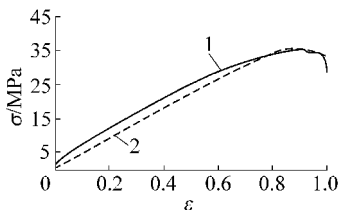


图12 煤样损伤本构模型曲线与试验曲线对比

Fig.12 Damage constitutive model and experimental curves of coal samples

5 结 论

1) 采用工业 CT 探测技术观测煤样破坏前后分形维数和孔隙率的变化规律,发现同一煤样在不同断面破坏前后分形维数与孔隙度的变化不同,这表明在同一应力状态下,同一煤样的不同层面有着不同的损伤扩展特性,说明在荷载作用下煤岩的损伤演化局部化和不均匀性。分形维数可以作为表征材料损伤演化程度的一个参量。

2) 煤岩的损伤力学特性对 CT 图像灰度级的变化是比较敏感的,灰度和方差的变化及分布规律可以清楚地反映了岩石的损伤程度。煤样灰度的概率密度曲线呈现多峰分布,说明在煤体内,存在多种损伤因素,有煤体裂隙、层理引起的损伤,也有空洞引起的损伤,有煤体所受应力引起的损伤,也有气体在煤孔隙中的吸附渗流引起的损伤。在概率密度曲线中存在单个突出的尖峰,说明在煤体损伤的因素中,某一种因素占据了主导地位。

3) 分析了在荷载作用下煤岩的动态损伤过程,根据试验结果对煤岩损伤全过程曲线分段进行讨论。结合煤样的变形损伤特征,通过选取合适的损伤参量,建立在荷载作用下煤样的损伤本构模型,结果表明理论曲线与试验曲线能够较好地相吻合。

参考文献(References):

- [1] 傅雪海,秦 勇,薛秀谦.煤储层孔、裂隙系统分形研究[J].中国矿业大学学报,2001,30(3):225-228.
FU Xuehai, QIN Yong, XUE Xiuqian. Research on fractals of pore and fracture-structure of coal reservoirs[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2001, 30(3): 225-228.
- [2] 冯增朝,赵阳升,文再明.煤岩体孔隙裂隙双重介质逾渗机理研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(2):236-240.
FENG Zengchao, ZHAO Yangsheng, WEN Zaiming. Percolation mechanism of fractured coal rocks as dual-continua[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(2): 236-240.
- [3] 李玉彬,李向良,高 岩.用微焦点 X-CT 成像研究岩石微观特征[J].油气采收率技术,2000,7(4):50-52.
LI Yubin, LI Xiangliang, GAO Yan. Study of microscopic rock feature using microfocus X-CT imaging[J]. Oil & Gas Recovery Technology, 2000, 7(4): 50-52.
- [4] Raynaud S, Fabre D, Mazerolle F, et al. Analysis of the internal structure of rocks and characterization of mechanical deformation by a non-destructive method: X-ray tomodensitometry[J]. Tec-tonophysics, 1989, 159: 149-159.
- [5] 杨更社,谢定义,张长庆,等.岩石损伤特性的 CT 识别[J].岩石

- 力学与工程学报,1996,15(1):48-54.
- YANG Gengshe, XIE Dingyi, ZHANG Changqing, *et al.* CT identification of rock damage properties[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(1): 48-54.
- [6] 葛修润,任建喜,蒲毅彬,等.煤岩三轴细观损伤演化规律的 CT 动态试验[J].岩石力学与工程学报,1999,18(5):498-502.
- GE Xiurun, REN Jianxi, PU Yibin, *et al.* A real-time CT triaxial testing study of mesodamage evolution law of coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(5): 498-502.
- [7] 代高飞,尹光志,皮文丽.压缩荷载下煤岩损伤演化规律细观试验研究[J].同济大学学报,2004,32,(5):591-995.
- DAI Gaofer, YIN Guangzhi, PI Wenli. Experimental study on meso-damage evolution of coal under uniaxial compression[J]. Journal of Tongji University, 2004, 32(5): 591-995.
- [8] 刘京红,姜耀东,赵毅鑫,等.煤岩破裂过程 CT 图像的分形描述[J].北京理工大学学报,2012,32(12):1219-1222.
- LIU Jinghong, JIANG Yaodong, ZHAO Yixin, *et al.* Fractal description of coal damage process based on CT image[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2012, 32(12): 1219-1222.
- [9] 宫伟力,张艳松,安里千.基于图像分割的煤岩孔隙多尺度分形特征[J].煤炭科学技术,2008,36(6):28-32.
- GONG Weili, ZHANG Yansong, AN Liqian. Multi-scale fractal features of coal and rock porosity based on image segmentation[J]. Coal Science and Technology, 2008, 36(6): 28-32.
- [10] 宫伟力,安里千,赵海燕,等.基于图像描述的煤岩裂隙 CT 图像多尺度特征[J].岩土力学,2010,31(2):371-376.
- GONG Weili, AN Liqian, ZHAO Haiyan, *et al.* Multiple scale characterization of CT image for coal rock fractures based on image description[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(2): 371-376.
- [11] 赵海燕,宫伟力.基于图像分割的煤岩割理 CT 图像各向异性特征[J].煤田地质与勘探,2009,37(6):14-18.
- ZHAO Haiyan, GONG Weili. Characterization on anisotropic fractures of coal and rocks by computed X-ray tomography based on image segmentation[J]. Coal Geology & Exploration, 2009, 37(6): 14-18.
- [12] 王彦琪,冯增朝,郭红强,等.基于图像检索技术的岩石单轴压缩破坏过程 CT 描述[J].岩土力学,2013,34(9):2534-2540.
- WANG Yanqi, FENG Zengchao, GUO Hongqiang, *et al.* CT description of rock failure process under uniaxial compression loading based on image retrieval technology[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(9): 2534-2540.
- [13] 李 果,张 茹,徐晓炼,等.三轴压缩煤岩三维裂隙 CT 图像重构及体分形维数研究.[J] 岩土力学,2015,36(6):1633-1642.
- LI Guo, ZHANG Ru, XU Xiaolian, *et al.* CT image reconstruction of coal rock three-dimensional fractures and body fractal dimension under triaxial compression test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(6): 1633-1642.
- [14] 李廷春,吕海波.三轴压缩载荷作用下单裂隙扩展的 CT 实时扫描试验[J].岩石力学与工程学报,2010,29(2):289-296.
- LI Tingchun, LYU Haibo. CT real-time scanning tests on single crack propagation under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 289-296.
- [15] 毛灵涛,石 鹏,涂 辉,等.基于 CT 图像单轴加载煤样损伤计算[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2013,32(1):59-63.
- MAO Lingtao, SHI Peng, TU Hui, *et al.* Coal damage calculation under uniaxial loading based on CT images[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science Edition, 2013, 32(1): 59-63.
- [16] 彭瑞东,张玉军,杨永明,等.孔隙煤岩损伤破坏行为的数值模拟[J].煤炭学报,2014,39(6):1039-1048.
- PENG Ruidong, ZHANG Yujun, YANG Yongming, *et al.* Numerical simulation of porous rock damage and failure[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(6): 1039-1048.
- [17] 聂百胜,杨龙龙,李默庚,等.煤体微观孔隙结构与受载细观变形特征规律研究[J].煤炭科学技术,2016,44(6):123-126.
- NIE Baisheng, YANG Longlong, LI Mogeng, *et al.* Study on pore structure and loaded meso deformation feature law of gassy coal mass[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(6): 123-126.
- [18] YAO Yanbin, LIU Dameng, CHE Yao, *et al.* Non-destructive characterization of coal samples from China using microfocus X-ray computed tomography[J]. International Journal of Coal Geology, 2009, 80(2): 113-123.
- [19] GÜRDAL G, YALIN M N. Pore volume and surface area of the Carboniferous coals from the Zonguldak Basin (NW Turkey) and their variations with rank and maceral composition[J]. International Journal of Coal Geology, 2001, 48(1): 133-144.
- [20] LI H, OGAWA Y, SHIMADA S. Mechanism of methane flow through sheared coals and its role on methane recovery[J]. Fuel, 2003, 82(10): 1271-1279.