

基于散斑点数的松软型煤单轴压缩损伤演化研究

张天军^{1,2,3},董晓刚^{2,3},潘红宇^{2,3},张磊^{1,3}

(1. 西安科技大学 理学院,陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学 安全科学与工程学院,陕西 西安 710054;

3. 西部矿井开采及灾害防治教育部重点实验室,陕西 西安 710054)

摘要:为定量分析松软煤样在压缩过程中的损伤演化特性,利用数字图像相关方法对正方体型煤试样单轴压缩试验过程中采集的表面数字图像进行处理分析,对比分析不同煤样的损伤演化特性,提出了以散斑点数为基准量的散斑损伤变量 D_1 ,分阶段探究了煤样的损伤特性,并与面积损伤变量 D_s 值进行比较。结果表明:在应变相等的情况下,依据 VIC 系统所得到的散斑损伤变量比面积损伤变量大,对于损伤边界和微损伤能够更加细致和具体的描述;强度不同的煤样其加载曲线虽有所差异,但具有相似的规律;煤样强度越高,损伤变量越小,反之越大;散斑损伤变量 D_1 曲线与加载曲线存在相互对应的关系,能够反映煤样经历的损伤孕育、损伤萌生、损伤发展、损伤增长至完全破损全过程,散斑损伤变量 D_1 曲线上 C_1 点可以作为煤样在压缩过程中由弹性到塑性的标志,散斑损伤变量可以描述煤样损伤演化的规律。

关键词:数字图像相关方法;单轴压缩;散斑点数;损伤演化;散斑损伤变量

中图分类号:TD 313 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2017)11-0088-07

Study on uniaxial compression damage evolution of soft coal briquette based on speckle number

ZHANG Tianjun^{1,2,3}, DONG Xiaogang^{2,3}, PAN Hongyu^{2,3}, ZHANG Lei^{1,3}

(1. School of Science, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. School of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

3. MOE Key Lab of Mining and Disaster Prevention in Western Mine, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to quantitatively analyze damage evolution characteristics of soft coal briquette during compression process, the digital image correlation method was applied to process analysis on surface digital images collected from uniaxial compression test process of cubic coal briquette specimens. A comparison analysis was conducted on damage evolution characteristics of different coal samples. With the speckle number as datum value, the speckle damage variation D_1 was provided and applied to the stage study on damage characteristics of coal samples. A comparison with the area damage variation D_s was conducted. The results showed that under the same condition of strain, the speckle damage variation obtained based on the VIC System was higher than the area damage variation and a more detail and certain representation could be made on damage boundary and micro-damage. The load curves of different strength coal samples would be different and could have a similar law. The higher strength of coal samples, the lower damage variation would be and on the contrary would be higher. The damage variation D_1 curves of speckles would have mutual corresponded relationships between the damage variation D_1 curves of speckles and could reflect damage inoculation, damage sprouting, damage development, damage increasing and until full failure process of coal samples. On the speckle damage variation D_1 curves, Point C_1 could be a symbol from elastic to plastic during compression process of coal samples. The speckle damage variation could explain the damage evolution law of coal samples.

Key words: digital image correlation method; uniaxial compression; speckle number; damage evolution; speckle damage variation

收稿日期:2017-07-07;责任编辑:曾康生 DOI:10.13199/j.cnki.est.2017.11.015

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(51374236, 51374168);国家自然科学基金科学仪器基础研究资助项目(51327007)

作者简介:张天军(1971—),男,陕西临潼人,教授。Tel:18729521194, E-mail:tianjun_zhang@126.com

引用格式:张天军,董晓刚,潘红宇,等.基于散斑点数的松软型煤单轴压缩损伤演化研究[J].煤炭科学技术,2017,45(11):88-94.

ZHANG Tianjun, DONG Xiaogang, PAN Hongyu, et al. Study on uniaxial compression damage evolution of soft coal briquette based on speckle number [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(11): 88-94.

0 引言

数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)方法,别称为数字散斑相关方法(Digital Speckle Correlation Method, DSCM),是一种大规模用于试验固体力学试件表面变形场的光测力学试验方法^[1]。我国很多学者将数字图像相关方法应用于岩石体的破坏损伤研究,其中马少鹏等^[2]、宋义敏等^[3]利用试件表面的数字图像为信息载体,用数字图像的灰度相关性描述岩石的损伤演化;马永尚等^[4]、毛灵涛等^[5]研究表明3D-DIC技术在岩土力学试验中有其独特的优势,岩石材料破坏过程中应变场的演化能较好地反映其内部裂纹的产生和扩展规律;陈新等^[6]、江天云等^[7]用表面裂纹图像分析对石膏模型试件在单轴压缩过程中得到的数字图像,可得到节理岩石体试件的各向异性损伤演化特性;马少鹏等^[8]、曹树刚等^[9]用数字图像相关方法研究了岩石破坏过程中表面应变场的演化特征,得到了最大剪切应变场的方差随加载的变化趋势,将变形破坏过程分为5个阶段;许多的试验研究说明数字散斑相关方法可作为描述岩石材料损伤演化的一种工具,三维数字散斑测量方法是研究材料变形细观机理的一种有效手段,对散斑图像的研究,核心在于数字图像处理及图像特征分析。在岩石破坏图像特征分析领域,有学者在CT图像处理中提出数字图像特征与损伤变量结合的思想,杨更社等^[10]、刘慧等^[11]最先利用CT数的空间分布规律对岩石的损伤演化情况进行了研究,提出了以CT数为基准量的损伤变量;任建喜等^[12-13]确定了应力损伤阈值,提出了单轴压缩条件下岩石的峰前分段损伤演化方程和本构关系及其适用条件;卢再华等^[14]在前人的基础上,针对CT数的分布提出了裂纹损伤增量,用以描述裂隙损伤变量随累计干缩体变的变化规律;大多学者都是以CT数为基准提出损伤变量来描述岩石的损伤特性,以其他基准提出的损伤变量却很少见到,而CT图像获取代价较高,研究其他基准的损伤变量具有较高的经济意义。

为了探究松软煤岩在自重及各种自然荷载下的形变过程和特点,以及在形变过程中的损伤演化,采用相似材料模拟的方法在实验室对自制松软正方体型煤进行了单轴压缩,采用VIC 3D系统连续记录煤样表面的散斑图像,并用数字图像相关方法对图像进行分析,研究煤样在加载过程中的损伤演化规律。

在散斑图像的基础上,借鉴前人针对CT图像特征提取的思想,对损伤区域的散斑点数进行了统计分析,基于损伤力学的理论,定义以散斑点数为基准量的损伤变量来反映损伤演化过程,得到煤样损伤演化特性。

1 单轴压缩下煤样表面损伤演化试验

1.1 VIC 3D 系统及原理

数字图像相关技术是一种对全场变形进行非接触、高精度测量的现代光测力学手段。散斑图像相关技术是根据试件表面散斑图像在变形前后的相关性来确定试件位移和变形的非接触式全场应变测量技术,即散斑图像相关分析是选取变形前1个数字散斑图像作为样本散斑即参考图,将变形后的散斑图像作为目标图与参考图进行系统对比,样本散斑因试件变形而运动到目标散斑的位置时,二者重心的坐标差就是试件表面的位移^[15-16]。三维数字图像相关技术,首先通过2个数字CCD相机捕捉散斑图像,并据双目立体视觉原理,运用立体视觉成像技术,获取试件表面的三维曲面形貌,然后将三维曲面作为数字图像相关匹配的参考图和目标图,采用计算视觉原理,通过差分法、模式匹配等算法,匹配采集区域的数字散斑,从而获得试件表面几何点的空间坐标的变化,进而得到物体表面的应变场分布。

在试验过程中采用人工散斑,是保证散斑相关性的1个必要条件,是为散斑位移计算提供物理依据^[17]。在实用中便于分析,试件测量表面经常被网格化,如图1所示。

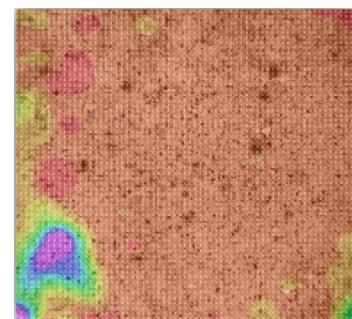


图1 煤样表面散斑点网格

Fig. 1 Coal sample surface scattered spots on grid

图1中所示网格化散斑,每2个网格之间均存在3个散斑点,表面斑化的目的在于使散斑斑粒在研究区域内均匀分布,从而使散斑位移能充分描述表面位移,散斑点网格化都是具有相等的尺寸,所有网格相加就是煤样表面的表面积。鉴于在网格区域

内任意样本斑粒一经斑化即可识别,从而确保与目标斑粒的相关性。

1.2 试验装置及试验方法

基于 VIC 3D 方法的单轴压缩试验装置如图 2 所示,主要包括 2 个 Pointgrey[®]30fps 的 CCD(电荷耦合器件图像传感器,Charge Coupled Device,简称 CCD)相机(像素为 1 642 像素×1 224 像素)、2 个 Pentax[®]75 mm 镜头、1 个 ADDA[®]光纤冷光源、DNS600 电子万能试验机和计算机。光纤冷光源为测量提供照明,将照明光束投射到煤样表面,CCD 相机负责采集压缩过程中的煤样表面图像,计算机是整个系统的控制中心,由其发出指令协调各部分工作,保存和处理图像并输出结果。



图 2 VIC 3D 试验系统

Fig. 2 VIC 3D experimental system

试验方法可简述如下: 煤样按照煤粉: 粉煤灰: 水=11:2:7 的比例配制, 制作成大小为边长 70 mm 的正方体, 共制备了 6 个煤样, 依次为 1—6 号。人工制备散斑: 先在煤样的表面均匀喷涂一层白色哑光漆, 待白色底漆自然风干后, 将黑色哑光漆均匀喷涂到煤样表面, 以此得到散斑, 如图 3 所示。



图 3 煤样散斑特征

Fig. 3 Characteristics of coal speckle speckle

试验加载装置选用了 DNS600 电子万能试验机, 加载方式为按位移加载, 加载速度为 2 mm/min, 为使煤样尽可能受力均匀, 在煤样与万能试验机压

头之间放置一块铁片; 由光纤冷光源提供照明照射到煤样表面, 用相机拍摄煤样表面图像。调整相机方位, 使相机镜头与煤样表面近似平行, 调整焦距, 使图像清晰。采用 SNAP 软件实现双相机图像的同步采集, 图像采集频率为 1 幅/s。试验同时采集应力-应变曲线, 由于图像和压缩曲线是采用不同采集系统, 所以需要提前对时, 使得 2 个系统的绝对时间保持一致。试验结束后, 利用 VIC 3D 系统软件对散斑图像进行相关运算, 得到分析所需的数据。

2 试验结果及分析

6 个松软型煤在加载过程中, 用 CCD 相机全程采集其散斑图像, 结合电子万能试验机的压缩曲线, 可得到如图 4 所示的全应力-应变曲线, 图中 3 条曲线分别代表编号为 1、2、5 号煤样, 其中为 1 号煤样强度最大, 2 号煤样强度最小, 煤样 5 的强度居中; 虽然不同煤样的强度有别, 应力应变曲线也有所不同, 但从整体上具有相似的规律和特性, 可以将全应力应变曲线即加载过程分为 5 个阶段, 选取 1 号煤样进行说明。

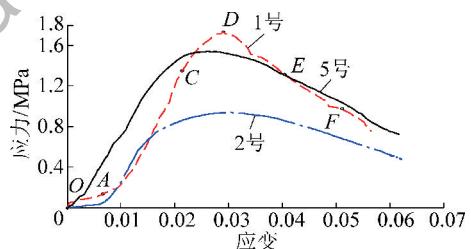


图 4 煤样单轴压缩全应力-应变曲线

Fig. 4 Strain-stress curves under uniaxial compression of coal sample

在散斑图像表面选取 60 mm×60 mm 的区域, Vic 系统自动选取区域中心为坐标原点, 在系统默认情况下, X 轴为水平轴(向右为正), 垂直方向为 Y 轴(向上为正), 面外垂直方向为 Z 轴, 应变值正数表示拉伸, 负数表示压缩; 运用 VIC 软件系统对采集到的散斑图像进行处理分析, 得到如图 5 所示的 1 号煤样在不同阶段下(如图 4 中各分段)煤样表面的轴向应变图像, 其中图 5a 所示为煤样表面未加载时的三维图像, 即参考图像, 图中全部呈现为同色即应变为 0, 与图 4 中原点 O 相对应; 图 4 中 OA 段与图 5b 相对应, 表示煤样的压密阶段, 煤样中原有微裂隙逐渐闭合, 从图 5b 中可以观察到煤样表面产生微应变, 并有局部发生微小形变, 2 号煤样在此阶段其应力增长较为平缓, 主要是煤样内部原生裂隙较

多,闭合较慢;图5c对应于图4中的AC段,为煤样的弹性形变破坏阶段,可以发现煤样整体产生较大形变,最大形变量为0.956 mm,微损伤逐渐发育和增长,微裂纹逐渐增多;图4中CD段对应为图5d,为煤样的弹塑性变形过渡阶段,C点是煤样从弹性变形变成塑性变形的转变点,一般称为屈服点,通常认为该点对应的应力水平为屈服应力,其值约为峰值强度(D点)的 $2/3$ ^[18-21],笔者选取的C点值约为峰值强度的60%,发生了非稳定的破裂,应变逐渐由负值变为正值,煤样由体积压缩转为扩容;图5e为峰值强度点,与图4中的D点对应,煤样发生了

较大的破坏和产生了明显的裂纹,在裂纹产生处,有较为直观的局部变形;图5f对应于图4中F点为载荷达到峰值强度后,裂纹继续扩张,煤样表面有小部分的掉落,应变增加,载荷下降。煤样有整体的变形和部分的垮落,应变达到最大为7.354,其内部结构遭到破坏,但煤样基本保持整体状,煤样承载力随变形增大而快速降低,但并不降为零,破裂的煤样仍有一定的承载能力^[20-21]。煤样在整个加载过程中,可以很明显地观察到微裂纹的产生和扩展首先发生在应变最大处,因此,应变最大处是局部变形的初始点。

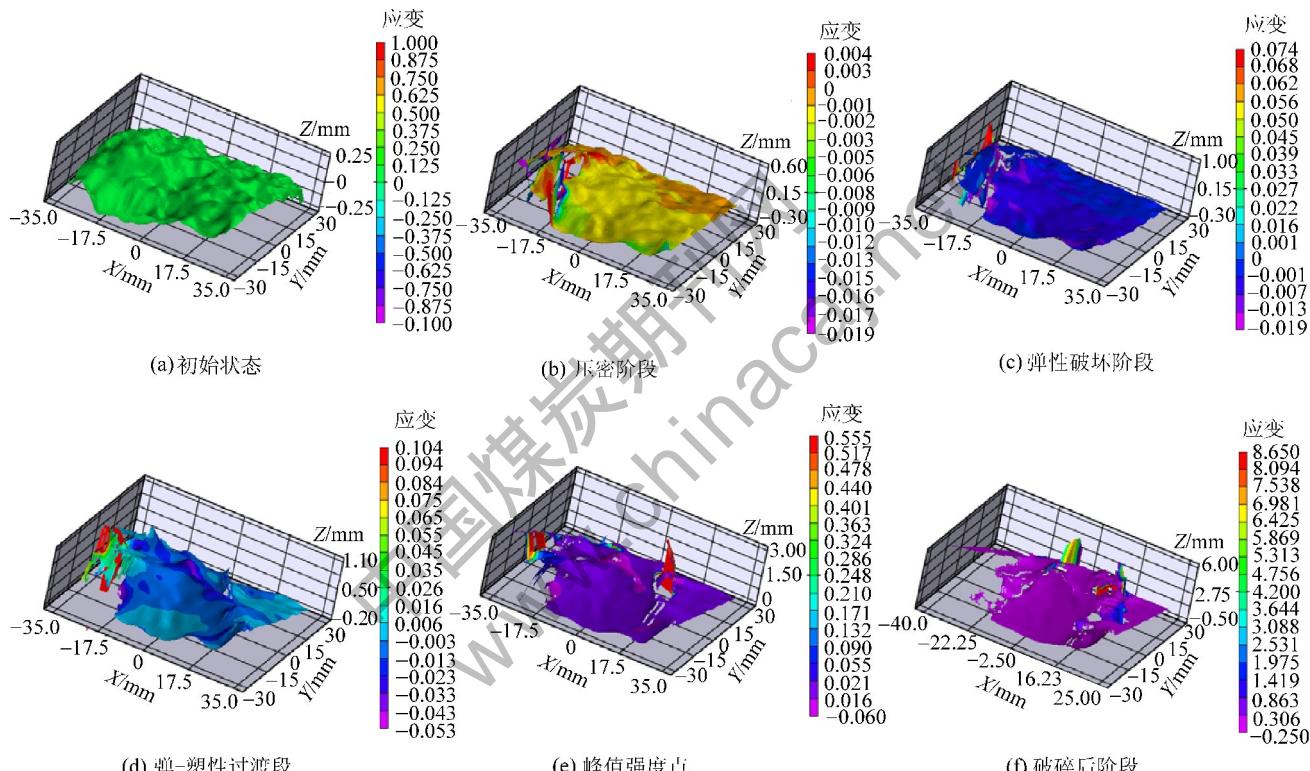


图5 煤样表面不同加载阶段的轴向应变图像

Fig. 5 Axial strain image of coal sample surface in different loading stages

笔者借助细观损伤力学的思想,参考损伤变量的一般定义式,利用数字图像处理的方法架起细观和宏观的桥梁。在散斑图像的基础上,运用Matlab软件中的图像处理工具对得到的散斑图像进行图像处理,主要包括滤波、二值化、边界提取、特征提取等,提取到煤样的特征斑,在Matlab中,系统默认像素点的分布面积即图像的表面积,故而对散斑图像的像素点进行统计,图像不连续或中断处不予统计,进而得到煤样表面积(包括损伤区域面积及未损伤面积);类比于煤岩的CT数,在VIC中利用系统软

件统计损伤区域散斑点数,定义以散斑点数为基准量的散斑损伤变量 D_1 来描述煤样损伤演化过程,并与以破损面积为基准量的面积损伤变量 D_s 值进行比较,如式(1)所表述为

$$D_1 = \frac{N - N^*}{N}, D_s = \frac{S - S^*}{S} \quad (1)$$

式中: D_1 为散斑损伤变量; N 为煤样表面选定区域初始散斑点数; N^* 为煤样表面选定区域任意时刻的散斑点数; D_s 为面积损伤变量; S 为煤样表面选定区域的初始面积; S^* 为煤样表面选定区域任意时刻未损

伤面积。

在试验过程中,由于试验机的设定煤岩破坏条件即断裂阈值的不同,煤岩还没有完全破坏即损伤变量未达到 1 时,煤样还具有一定的残余强度,试验默认结束。因此损伤变量可修正为

$$D_1 = \left(1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_p}\right) \frac{N - N^*}{N} \quad (2)$$

$$D_s = \left(1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_p}\right) \frac{S - S^*}{S}$$

式中: σ_p 为煤样的峰值强度; σ_c 为残余强度。

将 3 个煤样的应力应变曲线与散斑损伤变量关系如图 6 所示。

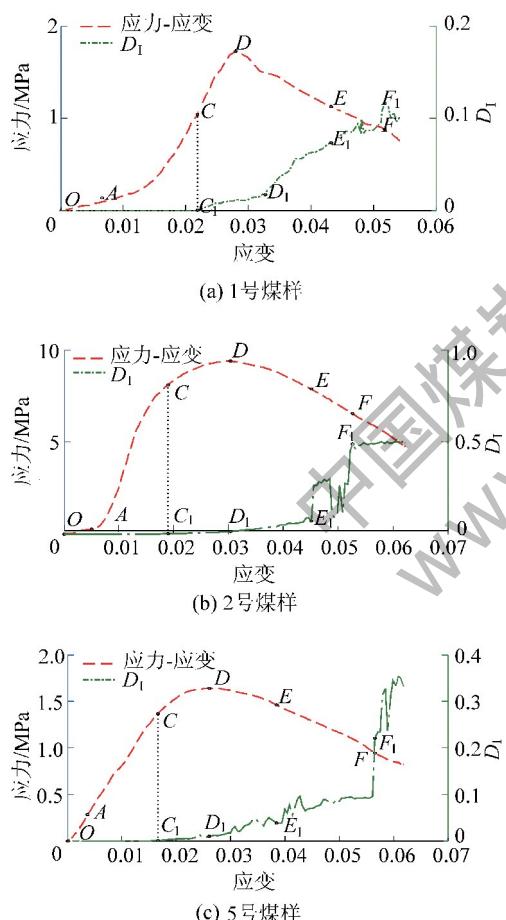


图 6 3 个煤样的散斑损伤变量与加载曲线关系

Fig. 6 Relationship diagram between speckled damage variable and loading curves of three coal samples

加载曲线与散斑损伤变量曲线在加载过程中具有相互对应关系;3 个煤样的应力应变曲线有所不同,与其对应的散斑损伤变量也各有其特点:1 号煤

样由于其强度较大,承载能力比其他 2 个煤样较大,故其损伤程度较低,损伤变量较小,其最大损伤变量为 0.118;2 号煤样强度最小,承载能力弱,其损伤程度较大,其断裂时的损伤变量为 0.512,是 3 个煤样中损伤变量最大的;5 号煤样的强度居于三者中间,故其损伤程度也是居于中间,其最大损伤变量为 0.346。煤样的强度越高,其损伤程度越低,损伤变量越小,反之,强度越低,损伤程度越高,损伤变量越大。

由图 6 可知,虽然 3 个煤样的加载曲线和散斑损伤变量曲线有所不同,但由于加载曲线与散斑损伤变量存在相互对应关系,在散斑损伤变量 D_1 曲线上,可以将煤样的损伤演化过程表示为 5 个阶段:煤样的初始损伤变量为 0,在初始加载阶段直到弹性变形阶段(OC_1 阶段),微损伤孕育,但散斑损伤变量未发生变化,保持为 0;当煤样加载到由弹性形变向塑性形变的转折点(C_1 点)时,此时损伤萌生, C_1 点时的散斑损伤变量 D_{1C_1} 开始增大,表明细观损伤开始演化,也是煤样由细观破坏到宏观破坏的表征特征,3 个煤样均在应变约为 0.02 是达到弹塑性转折点;当加载到 C_1D_1 段,煤样微裂纹逐渐扩张,散斑损伤变量稳定增大,是损伤演化稳定发展的阶段,也是煤样整体发生破坏的前兆;当加载到 D_1E_1 和 E_1F_1 阶段时,裂纹扩张加快,煤样有局部掉落,散斑损伤变量持续增大,而煤样的强度降低,承载能力也加剧下降;到 F_1 阶段后,散斑损伤变量达到最大,煤样整体发生破坏,整体或部分垮落,造成散斑数目剧减,散斑损伤变量剧增,如图 6 的 F_1 点。在 D_1 曲线上,有局部的跳跃和回落,特别是 E_1 到 F_1 之间,主要是由于煤样表面局部变形和垮落,使原有的散斑点错位或紊乱,3 个煤样中,尤以 2 号煤样为最,强度越低,在加载后期损伤程度越高,损伤变量的跳跃和回落也越明显,如图 6b 所示。

散斑损伤变量曲线准确地反映了随着加载的进行煤样经历的损伤孕育阶段(OC_1)、损伤萌生阶段(C_1D_1)、损伤发展阶段(D_1E_1)、损伤增长阶段(E_1F_1)至完全破损阶段(F_1 后)的全过程, D_1 曲线与加载曲线存在相互对应的关系,能够表示煤样在加载过程中的损伤演化特性。

选取煤样在加载过程中的 7 个不同阶段,计算出煤样在不同阶段的损伤变量见表 1。

表1 3个煤样在不同加载阶段的损伤变量

Table 1 Three coal samples damage variables in different loading stages

煤样	应变	面积损伤变量 D_s	散斑损伤变量 D_1
1号	0	0	0
	0.01	0	0
	0.02	0	0
	0.03	0.007	0.012
	0.04	0.035	0.053
	0.05	0.047	0.079
	0.06	0.071	0.102
2号	0	0	0
	0.01	0	0
	0.02	0.001	0.001
	0.03	0.005	0.009
	0.04	0.026	0.036
	0.05	0.204	0.243
	0.06	0.364	0.461
5号	0	0	0
	0.01	0	0
	0.02	0.001	0.002
	0.03	0.016	0.019
	0.04	0.048	0.054
	0.05	0.065	0.084
	0.06	0.224	0.316

根据作者提出的散斑损伤变量 D_1 比面积损伤变量 D_s 在应变相等时要大,且随着加载的进行,煤样损伤程度的加剧, D_1 与 D_s 的差值越来越大,这是由于在选定区域计算损伤面积时,Matlab 程序在进行面积计算时将损伤边界以及微损伤区域计算在内,而 VIC 3D 系统默认已有损伤,不再对损伤边界和微损伤区域的散斑点进行统计,随着煤样的破坏增大,导致散斑损伤变量更大,这样更能够真实和细致的描述煤样的细观损伤程度。

3 结 论

通过对松软正方体型煤进行单轴压缩试验,并利用 VIC 3D 系统采集和分析煤样表面数字图像,对比分析不同煤样的损伤演化特征,提出了以散斑点数为基准量的散斑损伤变量 D_1 ,分阶段探究了煤样在压缩过程中的损伤特性,结果如下:

1) 不同强度的煤样在加载过程中表现出有所差异的加载曲线,但整体上具有相似的规律和特性;不同强度的煤样其损伤变量不同,强度越高,损伤变量越小,强度越低,损伤变量越大。

2) 以散斑点数为基准量的散斑损伤变量 D_1 比面积损伤变量 D_s 在应变相等时要大,VIC 系统默认

对损伤边界和微损伤区域的散斑点不予统计,能够更细致和真实的描述煤样的细观损伤程度。

3) 散斑损伤变量 D_1 曲线与煤样的加载曲线存在相互对应的关系,在煤样的压缩过程中表现为 5 个阶段,曲线能够反映煤样经历的损伤孕育阶段 (OC_1)、损伤萌生阶段 (C_1D_1)、损伤发展阶段 (D_1E_1)、损伤增长阶段 (E_1F_1) 至完全破损阶段 (F_1 后) 的全过程,散斑损伤变量 D_1 曲线的 C_1 点可以作为煤样在压缩过程中由弹性到塑性的标志。

参考文献(References):

- [1] HIROFUMI Minomo, KENGO Inoue, SHOKO Sakaki, et al. Establishment of disseminated intravascular coagulation (DIC) model by a single iv administration of Escherichia coli-derived lipopolysaccharide (LPS) to cynomolgus monkeys and evaluation of its pathophysiological status [J]. Journal of Pharmacological Sciences, 2017, 133 : 88–95.
- [2] 马少鹏,刘善军,赵永红.数字图像灰度相关性用以描述岩石试件损伤演化的研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(3):591–595.
MA Shaopeng, LIU Shanjun, ZHAO Yonghong. The gray correlation of digital images to describe the damage evolution of rock specimen [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (3) :591–595)
- [3] 宋义敏,马少鹏,杨小彬,等.岩石变形破坏的数字散斑相关方法研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(1):171–175.
SONG Yimin, MA Shaopeng, YANG Xiaobin et al. Experimental investigation on failure of rock by digital speckle correlation methods [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30 (1) ;171–175.
- [4] 马永尚,陈卫忠,杨典森,等.基于 3D-DIC 技术的脆性岩石破坏试验研究[J].岩土力学,2017,38(1):1–8.
MA Yongshang, CHEN Weizhong, YANG Diansen, et al. Experimental study of brittle rock failure based on three-dimensional digital image correlation technique [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017,38(1);1–8.
- [5] 毛灵涛,连秀云,郝耐,等.基于数字体散斑法煤样内部三维应变场的测量[J].煤炭学报,2015,40(1):65–72.
MAO Lingtao, LIAN Xiuyun, HAO Nai, et al. 3D strain measurement in coal using digital volumetric speckle photography [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40 (1) :65–72.
- [6] 陈新,吕文涛,孙靖亚.基于图像分析的节理岩体单轴压缩损伤演化研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33 (6):1150–1157.
CHEN Xin, LU Wentao, SUN Jingya. Damage evolution of jointed rock masses under uniaxial compression based on digital image analysis [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014,33 (6) :1150–1157.
- [7] 江天云,潘兵,夏勇,等.三维数字图像测量系统稳定性的

- 实验研究[J].实验力学,2014,29(6):704-710.
- JIANG Tianyun, PAN Bing, XIA Yong, et al. Experimental study of the stability of three-dimensional digital image processing system [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29 (6) : 704-710.
- [8] 马少鹏,周 辉.岩石破坏过程中试件表面应变场演化特征研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(8):1668-1673.
- MA Shaopeng, ZHOU Hui. Surface strainfield evolution of rock specimen during failure process [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (8) : 1668-1673.
- [9] 曹树刚,孙传猛,郭 平,等.基于改进的 C-V 模型煤岩细观裂隙图像处理及其应用[J].岩石力学与工程学报,2015,34 (S1):3075-3081.
- CAO Shugang, SUN Chuanmeng, GUO Ping, et al. Image processing and its applications of meso-crack of coal based on modified C-V model [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34 (S1):3075-3081.
- [10] 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.
- [11] 刘 慧,杨更社,叶万军,等.基于 CT 图像直方图技术的冻结岩石未冻水含量及损伤特性分析[J].冰川冻土,2015,37 (6):1592-1598.
- LIU Hui, YANG Gengshe, YE Wanjun, et al. Analysis of unfrozen water content and damage characteristics based on histogram technique of CT images [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37 (6) : 1592-1598.
- [12] 任建喜.单轴压缩岩石损伤扩展细观机理 CT 实时试验[J].岩石力学,2001,22(2):131-133.
- REN Jianxi. CT real-time testing on damage propagation microscopic mechanism of rock under uniaxial compression [J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22 (2) : 131-133.
- [13] 任建喜,葛修润.单轴压缩岩石损伤演化细观机理及其本构模型研究[J].岩石力学与工程学报,2001,20(4):425-431.
- REN Jianxi, GE Xiurun. Study of rock meso-damage evolution law and its constitutive model under uniaxial compression loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20 (4) : 425-431.
- [14] 卢再华,陈正汉,蒲毅彬.膨胀土干湿循环胀缩裂隙演化的 CT 试验研究[J].岩土力学,2002,23(4):417-422.
- LU Zaihua, CHEN Zhenghan, PU Yibin. Test study on the crack evolution of expansive soil during drying and wetting cycles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23 (4) : 417-422.
- [15] 冯 秀,陈 旭,徐 楠,等.双目视觉 DIC 测量系统的离面位移测量精度[J].应用光学,2013,34(3):458-462.
- FENG Xiu, CHEN Xu, XU Nan, et al. Measurement accuracy of out-of-plane displacement for binocular vision DIC system [J]. Journal of Applied Optics, 2013, 34 (3) : 458-462.
- [16] 代树红,宋维源,孙可明.数字图像相关方法应用于力学参数测试[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2014,33(2):222-225.
- DAI Shuhong, SONG Weiyuan, SUN Keming. Application of digital image correlation method in mechanical parameters testing [J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2014, 33 (2) : 222-225.
- [17] 王 博,俞立平,潘 兵.数字图像相关方法中匹配及过匹配形函数的误差分析[J].实验力学,2016,31(3):292-298.
- WANG Bo, YU Liping, PAN Bing. On error analysis of matched and overmatched shape function in digital image correlation method [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2016, 31 (3) : 292-298.
- [18] 薛东杰,周宏伟,王子辉,等.不同加载速率下煤岩采动力学响应及破坏机制[J].煤炭学报,2016,41(3):595-602.
- XUE Dongjie, ZHOU Hongwei, WANG Zihui, et al. Failure mechanism and mining-induced mechanical properties of coal under different load-ing rates [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41 (3) : 595-602.
- [19] 蔡美峰,何满潮,刘东燕.岩石力学与工程[M].北京:科学出版社,2002.
- CAI Meifeng, HE Manchao, LIU Dongyan. Rock mechanics and engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [20] 王云飞,黄正均,崔 芳.煤岩破坏过程的细观力学损伤演化机制[J].煤炭学报,2014,39(12):2390-2396.
- WANG Yunfei, HUANG Zhengjun, CUI Fang. Damage evolution mechanism in the failure process of coal rock based on mesomechanics [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39 (12) : 2390-2396.
- [21] 张 行,崔德渝,赵 军,等.断裂与损伤力学[M].2 版.北京:北京航空航天大学出版社,2009.