

基于 Micro-CT 技术的煤岩裂隙精细表征

王长盛^{1,2},翟培城¹,王林森¹,王春光^{1,3,4},张学朋^{1,2},吴学震^{1,2},蒋宇静¹

(1. 山东科技大学 矿山灾害预防控制国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590; 2. 长崎大学 工学部, 日本 长崎 852-8521;
3. 中国矿业大学(北京) 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083; 4. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要:为了表征完整煤样裂隙开度及空间展布,采用高精度 Micro-CT 扫描技术分析新巨龙煤矿的样品的裂隙结构。根据 CT 图像中裂隙周边 CT 数分布规律及三维可视化技术,对煤岩裂隙开度、分布和空间配置等参数进行精细表征。研究结果表明:运用高斯函数可以克服裂隙两侧 CT 数由于非均质造成波动,较为准确拟合裂隙 CT 数曲线的衰减规律;利用高斯函数的峰度(PH)与曲线面积(MA)对裂隙分布形态进行测量,当裂隙开度较小时($<0.24\text{ mm}$),利用 PH 法测量有较高的准确性;当裂隙开度较大时($>0.24\text{ mm}$),MA 法测量有较高的准确度;通过煤岩三维重建的裂隙 3D 可视化模型,可清晰识别煤中裂隙空间分布形态。根据三维裂隙区域中 197 个特征位置 CT 数分布的误差分析表明,采用参数 PH 法测量的平均误差为 14.3%,而采用 MA 法测量的平均误差为 17.1%,说明 PH 法具有较高的准确度。

关键词:煤层气;煤岩裂隙;裂隙开度;计算机断层扫描

中图分类号: TP 028.8 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2017)04-0137-06

Careful features of lithotype cracks based on Micro-CT technology

Wang Changsheng^{1,2}, Zhai Peicheng¹, Wang Linsen¹, Wang Chunguang^{1,3,4},
Zhang Xuepeng^{1,2}, Wu Xuezhen^{1,2}, Jiang Yujing¹

(1. Cultivation Base State Key Lab of Mine Disaster Prevention and Control Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;
2. Faculty of Engineering Nagasaki University, Nagasaki 852-8521 Japan; 3. State Key Lab of Deep Geomechanics and Underground Engineering,
China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 4. Research Institute of Rock and Soil Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: In order to characterize the fracture aperture and spatial distribution of the completed coal sample, the high precision Micro-CT scanning technology was applied to analyze the crack structures of the coal samples from Xinjulong Mine. According to the CT number distribution of the crack surrounding in the CT image and 3D visualization technology, a fine characterization was conducted on the coal and rock crack apertures, distribution, space allocation and the parameters. The study result showed that the application of the Gauss function could overcome the CT numbers along the two sides of the cracks due to the fluctuation caused by the heterogeneity and could well fit the attenuation law of the crack CT number curve. The kurtosis of the Gauss function and the curve area were applied to measure the crack distribution shape. When the crack aperture value was small ($<0.24\text{ mm}$), the measurement with the PH method applied would have a high accuracy. When the crack aperture was high ($>0.24\text{ mm}$), the measurement with the MA method would have high accuracy. The crack 3D visualized model could be reconstructed with the coal and rock 3D and could clearly recognize the crack space distribution shape in the coal. According to 197 feature locations in the 3D crack area, the error analysis of the CT number showed that the average error measured with the parameter PH measurements were 14.3%. The average error measured with the MA method measurement was 17.1%. The study results showed that PH method has higher accuracy.

Key words: coalbed methane; coal fracture; fracture aperture; X-ray computed tomography

收稿日期: 2016-10-13; 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2017.04.024

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41202194, 51474204, 51134005); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2012EEQ021); 中国博士后科学基金资助项目(2013M542097); 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金资助项目(SKLGDUEK1421)

作者简介: 王长盛(1990—)男, 山东聊城人, 硕士研究生。通讯作者: 王春光, 讲师, Tel: 15020041562, E-mail: chunguangkuangda@126.com

引用格式: 王长盛, 翟培城, 王林森等. 基于 Micro-CT 技术的煤岩裂隙精细表征[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(4): 137-142, 55.

Wang Changsheng, Zhai Peicheng, Wang Linsen, et al. Careful features of lithotype cracks based on Micro-CT technology [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(4): 137-142, 55.

0 引言

煤储层中裂隙系统的发育是评价煤层渗透性能及煤层气勘探条件的重要参考依据。在煤层气开采时,气体解吸后首先扩散进入割理系统,接着在压力梯度和浓度梯度驱动下渗流进入管道,从而实现煤层气的开采。在此过程中,裂隙系统是气体运移的主要通道,对煤储层渗透性起主要作用^[1-2]。但由于煤岩是一种非连续、非均质天然地质体,其裂隙的大小、开度、粗糙度等特征在空间上有较大的各向异性,对裂隙内流体的运移产生影响。因此,开展煤岩裂隙的精细表征有利于正确理解流体在煤岩中的运移规律,对构建真实流体运移模型及设计合理的煤层气开发方案有重要意义。

测量和定量描述岩石裂隙的方法很多^[3-4],但没有统一的标准。CT技术与其他研究方法相比具有无损化、定量化、精细化等优点^[5-6],被国内外许多学者采用。Karacan等^[7]通过医用CT技术、SEM电镜及光学显微镜技术对煤岩裂隙的形态、开度及所含矿物质成分进行了详细的分析。文献[8-10]应用医用CT技术和数字图像技术对煤割理开度、方位角、间距及空间分布等参数进行了精细表征。文献[11-12]基于医用CT对花岗岩的裂隙开度、二维形态进行精细表征。官伟力等^[13]利用CT技术和图像分割技术对煤岩割理的多尺度、各向异性分布

进行精细描述。

上述研究主要是基于医用CT图像的定量分析,图像分辨率小、精度低,对于开度小于分辨率尺寸的裂隙无法进行精确表征,且多只采用数学统计方法对煤岩裂隙进行定量描述,不能直观了解内部裂隙结构的真实分布。

本研究采用高分辨率的Micro-CT技术对煤岩样品进行扫描,采用高斯函数拟合的方法提高裂隙处CT数曲线图像的信噪比,分别对二维和三维裂隙的开度大小及分布、粗糙系数等参数进行精细测量;并利用CT图像分析软件,以裂隙CT数区间为阈值建模,模拟煤岩裂隙大小和空间方位等信息,以三维可视化的方式直观了解煤岩裂隙的空间发育特征。

1 Micro-CT成像

测试煤样取自山东新巨龙煤矿,在实验室内取心、打磨加工成为直径25 mm、长50 mm的圆柱状煤心。采用FXE-225X射线工业CT系统对煤岩样品进行扫描,设置的扫描工作电压120 kV,工作电流250 mA,扫描图像像素矩阵为1 128×1 128,像素分辨率为0.5 mm,层切片厚度为1 mm,图像尺寸为煤样实际尺寸的20倍,因此实际的体素尺寸为25 μm×50 μm×50 μm。图1a、1b为煤样CT扫描结果,其中黑色部分为裂隙,中等灰度部位为煤基质,亮白色部分为矿物质。

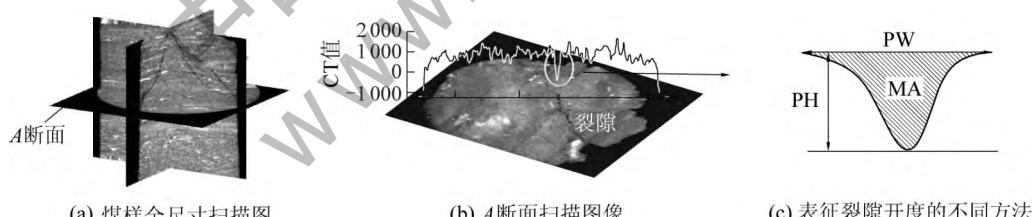


图1 所测煤样CT扫描图像以及过裂隙剖面线CT数变化曲线

Fig. 1 CT scanning image of coal sample and CT number distribution across the fracture aperture

2 图像表征方法

2.1 基于CT图像的裂隙开度表征方法

煤中不同的组分密度不同,对X射线的衰减能力也不同,通常用CT数(单位HU)的大小来表示物质的衰减能力,CT数越高表示物质的密度越高,衰减能力强;反之CT值低,衰减能力弱。其中,空气的CT值为-1 000 HU,水的CT值为0。图1b为煤样中某一层切片中剖面线p1穿过部分的CT数分布图。由于煤基质中各组分的差异,其CT数在

800~1 500 HU波动;在裂隙部分,CT值急剧降低,呈凹谷状,波谷处的CT数在0 HU以下。

一般来说,基于CT数曲线表征裂隙开度的方法有3种,PW法、MA法和PH法(图1c)。PW(Peak Width)表示裂隙处衰减曲线的宽度,MA(Missing Attenuation)表示裂隙区域CT值曲线衰减缺失的积分总量,PH(Peak Height)表示裂隙衰减曲线的高度。不同开度的裂隙CT数曲线图像不同,开度越大,CT数衰减的高度越大,衰减曲线的面积越大。因此,可总结不同开度裂隙CT数曲线的

衰减规律来计算裂隙开度的大小。笔者采用 PH 和 MA 两种参数来计算裂隙的开度。

一般情况下,如果扫描样品是各向同性的均质体,裂隙两端基质体的 CT 数曲线应为平滑直线,在计算衰减曲线面积和高度时,以平滑直线作为基准线(图 1c),但由于煤的非均质性导致裂隙两端煤基质的 CT 数波动区间大,裂隙处 CT 数曲线图像整体“噪声”较高^[14],在计算表征参数 PH 和 MA 时,不能确定统一的计算标准。因此,采用函数拟合的方法来降低 CT 数曲线的噪声影响,用拟合后的函数图像来计算 2 种表征参数。理论上,裂隙衰减图像可看成是一个矩形函数和点扩展函数卷积运算的结果,其结果是高斯型的^[15],如图 2 所示,黑点表示过裂隙剖面线不同像素点位置的真实 CT 数,其曲线可用高斯函数 $f(x) = A \exp(-x^2)$ 来拟合,图中,拟合函数曲线与真实 CT 数曲线有较好的拟合度,煤基质的非均质性“噪声”可用基质平均 CT 数来表示,其平均 CT 数与拟合函数端部直线重合。过裂隙的 CT 数衰减函数可表示为^[10]

$$Y = P \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x - x_p}{\Delta x_p}\right)^2\right] + C \quad (1)$$

MA 可用以下公式计算:

$$M = \sqrt{2\pi P \Delta x_p} \quad (2)$$

式中: M 为 MA 值; P 为 PH 值; x_p 为峰值处的位置坐标; Δx_p 为置信水平位 68% 时区间宽度; C 为裂隙两旁煤基质的平均 CT 数。

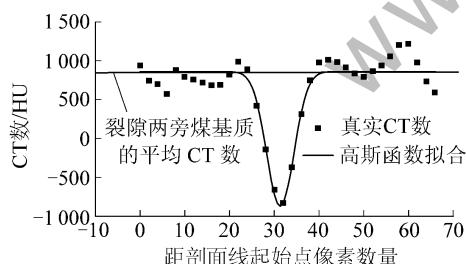


图 2 高斯函数拟合裂隙 CT 数分布曲线

Fig. 2 CT number profile fitted by Gaussian function

基于上述拟合公式,在所测 CT 图像裂隙处画剖面线测定其 CT 数分布曲线,利用 Matlab 软件对曲线进行拟合处理,运用最小二乘法计算每个测线处最佳的 MA 值和 PH 值。

总结表征参数 MA 和 PH 在不同裂隙开度下的变化规律是本文测量裂隙开度的方法,因此需要对已知开度值裂隙处 CT 数曲线进行校准,找到 MA、

PH 在不同开度下的函数关系。笔者采用 1 920×1 080 高动态解析度彩色实时画面,能实现 2D 自动测量,放大倍率在 35×至 2 500×,并采用测量精度 0.1 μm 的 Leica DVM 5000HD 光学数码显微镜对裂隙开度进行测量校准。首先对测量煤样两端面打磨光滑,调整显微镜放大倍数对打磨端面中裂隙开度进行测量,并记录裂隙位置,再进行 Micro-CT 扫描,分别对上述测量点在 CT 图像中的位置画剖面线进行 CT 数曲线分析,达到校准目的。

2.2 三维可视化建模

在煤中,矿物质、空隙和煤基质等组分在密度和衰减系数大小方面有较大的差异,这导致它们的 CT 数分布不同,一般来说:矿物质的 CT 数大约在 3 000 HU,煤基质的 CT 数为 1 000~1 600 HU,空隙的 CT 数低于 600 HU,因此,可根据 CT 数的大小来定量识别^[16]。

CT 扫描图像中的体数据是以体素(voxel)来描述整个物体,是有限个离散采样,包含物体内部的信息。三维重建就是从体数据中抽取出物体的表面^[17]。煤样的三维可视化重构的原理是:根据煤样中不同物质在 CT 扫描图像上的 CT 数不同对其进行阈值分割,把 CT 图像中阈值范围内的体数据集合起来,并赋予不同颜色蒙板,在空间上建立不同的独立模型,将它们综合到一个三维坐标中,再经过透明化处理实现三维可视化。笔者基于此方法重建煤样模型来表征煤的裂隙的三维分布及形貌特征。

3 研究结果分析

3.1 测量裂隙开度方法对比

应用第 2.1 节所述的校准方法,分别对 5 个不同裂隙位置进行测量,定位坐标后,再对比 CT 图像中对应位置所计算表征参数值大小,得到 2 种表征参数与开度关系的校准曲线。图 3 为测量参数 PH 和 MA 的校准曲线,由图 3 可知,在裂隙开度较小时,MA 和 PH 的曲线斜率较大,在裂隙开度小于 0.15 mm 的 PH 值和开度之间有较好的线性关系,在开度大于 0.15 mm 处的裂隙,MA 值和裂隙开度间有很好的线性关系;随着裂隙开度的增大,MA 和 PH 的增量逐渐减小;当裂隙开度大于 0.24 mm 时,两曲线斜率大致平行。用对数函数回归曲线拟合,PH 曲线拟合度较好($y = 45.85 \ln x + 274.3$, $R^2 = 0.981$),MA 值和裂隙开度的拟合度较差($y = 610.3 \ln x + 2695.3$, $R^2 = 0.842$)。

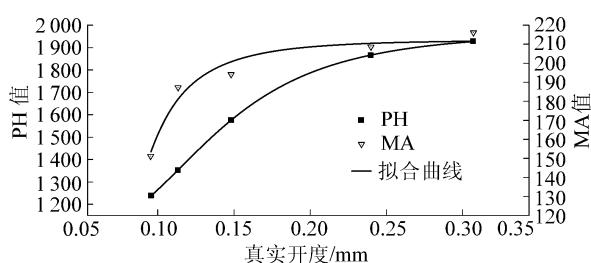


图3 PH及MA校准曲线

Fig. 3 Calibration curves for PH and MA

图4为2种表征参数变异系数CV(Coefficient of Variation)对比图。

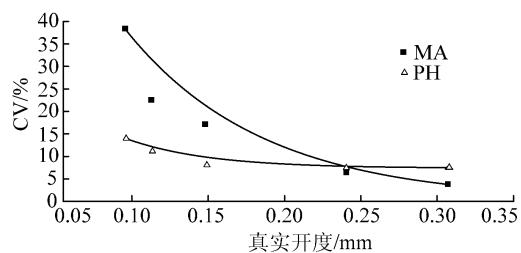


图4 PH、MA与裂隙开度间变异系数的关系

Fig. 4 Relationship between fracture aperture CV and PH, MA

当裂隙开度在0.24 mm时,MA和PH的变异系数基本相等,当裂隙开度小于0.24 mm时,MA的变异系数明显大于PH,此时,用PH值表征裂隙的开度有更高的准确性;当开度大于0.24 mm时,MA

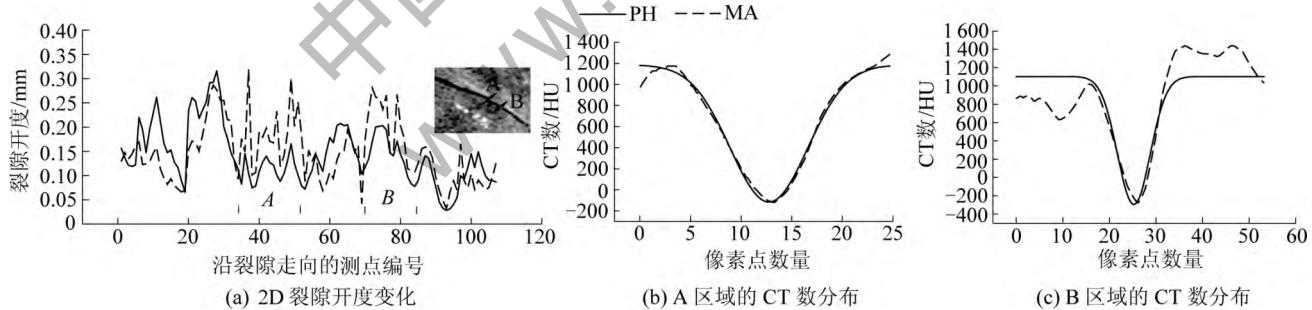


图5 不同测量方法下2D裂隙开度变化曲线

Fig. 5 Comparision of 2D fracture aperture change under different measured aperture method

表1 二维裂隙统计结果

Table 1 The statistics result of 2D fracture mm

表征方法	最大开度	最小开度	平均值	标准差
PH	0.315	0.028	0.142	0.028
MA	0.319	0.032	0.149	0.032

3.3 三维裂隙开度表征及空间配置

为表征3D裂隙的特征,在所有1 000张CT图

的变异系数小于PH,用MA值估算裂隙开度更准确。

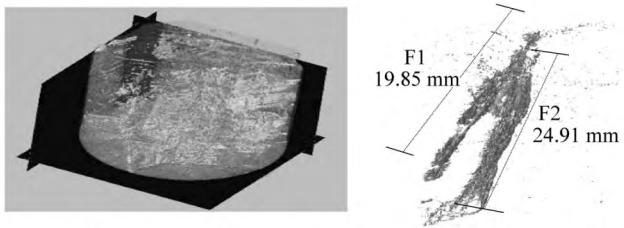
3.2 二维裂隙开度表征

通过构造参数MA和PH测量煤岩某一截面中二维裂隙的开度,在CT图像中,沿裂隙走向依次画剖面线测量其CT数变化曲线,保持测线方向垂直于裂隙走向,再通过高斯函数拟合,将计算的PH值和MA值代入相应的拟合函数中,从而得到裂隙的开度。图5为该裂隙107个测点表征开度变化的曲线,由图可知,2条曲线拟合度较好($R^2 = 0.937$),PH开度曲线和MA开度曲线有相似的起伏程度,但在A区域和B区域内,两参数拟合误差较大。A区域中,PH测量开度值在0.07~0.15 mm波动,而MA测量的开度值比PH测量值高0.05~0.10 mm;B区域中,PH测量开度值在0.12~0.20 mm,MA的测量值则比PH测量值高0.03~0.08 mm。

分析两区域中剖面线的CT数分布曲线,在A区域中,由于开度值较小,裂隙处CT数分布曲线的PW值较大,导致MA值的计算值偏高。B区域裂隙一侧煤基质中有高密度物质分布,导致裂隙两侧基质CT数差异较大(图5c),拟合后曲线PH值和PW值明显增大,导致MA值增量过大。应用统计方法,统计2种表征方法测量开度值的最大值、最小值、均值、标准差的统计结果见表1。

片中,选取其中连续500张图片进行三维可视化处理。图6为煤样重建后的模型结果,图6a中,煤基质为透明色,裂隙和大孔隙用灰白色表示,矿物质用黑灰色表示,该样的矿物质含量较少,多以颗粒状分布在基质中,在层理方向,有带状矿物质分布。图6b为煤样中分割出的2组相交的裂隙的三维可视化图,从图6中可看出,2组裂隙发育较好,连通性较强,在距顶端3.5 mm处有交叉。裂隙F1长度约

13.68 mm, 与水平面夹角约 72°, 裂隙 F2 长度约 24.91 mm, 与水平面夹角约 80°。



(a) 煤的孔裂隙和矿物质的三维立体图 (b) 煤裂隙的三维分布

图 6 煤岩裂隙空间展布模型

Fig. 6 Perspective view of 3D visualization model

为表征 3D 裂隙开度的变化, 在裂隙处, 连续选取其中 50 张图片, 利用 CT 处理软件割取分辨率为 50 mm×50 mm×100 mm 大小的图片, 在每张 CT 图片中裂隙处选取测点, 拟合曲线计算 MA 值和 PH 值, 并基于图 3 拟合函数分别计算对应的开度大小。根据本文 3.2 节开度测量图像分析结果, 当裂隙周围基质中有矿物质分布时, 该测点取消。图 7 为所测裂隙三维可视化渲染图像, 从图 7 中可明显看出裂隙的展布及粗糙起伏情况。

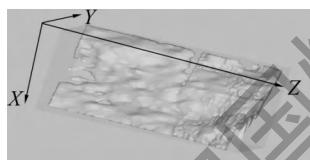
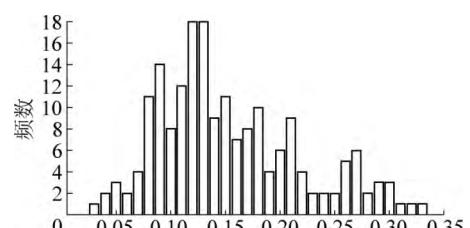


图 7 所测裂隙三维可视化图

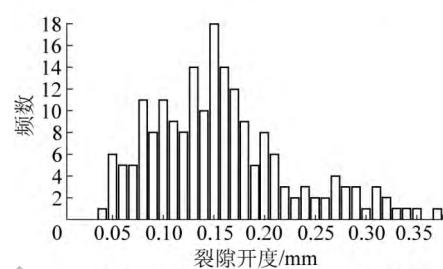
Fig. 7 3D visualization of the test fracture

图 8a、8b 分别为依据参数 PH 和 MA 测量所选裂隙的开度分布图, 两图开度分布基本服从对数正态分布, 但频数分布不同。如图 8a 所示, 利用参数 PH 测量的开度范围在 0.02~0.33 mm, 开度在 0.07~0.20 mm 内有较多的频数分布, 而 MA 法的开度测量范围在 0.04~0.37 mm, 在 0.08~0.18 mm 内有大的频数分布。如 3.1 节所讨论 2 种测量参数的对比可知, 在测量开度较低时, PH 法有较低的变异系数, 因此图 8a 的开度分布有较强的可信度。

根据文献 [18] 可知, 裂隙的粗糙系数可用标准差与力学开度的比值代替^[18], 本文中, 力学开度为平均开度。应用统计方法, 对该三维裂隙表征开度的算数平均值、最值、标准差及粗糙系数的计算结果见表 2。



(a) 依据 PH 测量三维裂隙的开度分布



(b) 依据 MA 测量三维裂隙的开度分布

图 8 煤岩裂隙开度频数分布

Fig. 8 Fracture aperture frequency distribution for coal-rock

表 2 3D 裂隙测量统计结果

Table 2 Statistics of 3D fracture measuring results

表征方法	最大开度	最小开度	平均开度	标准差	粗糙系数/%
PH	0.322	0.025	0.161	0.084	52.6
MA	0.375	0.036	0.172	0.112	65.1

3.4 误差分析

笔者利用参数 PH 和 MA 表征裂隙的开度的方法, 在试验测量及函数计算过程都存在一定程度的误差。测量计算 PH 值时, 各测点裂隙两端煤基质的平均 CT 数的差异是导致 PH 值误差的直接因素。MA 值是把拟合计算的 PH 值代入一定的函数关系式中计算得出的, 属于间接测量结果, 它依赖于变量 PH 和 Δx_p 的大小。因为 PH 值存在测量误差所以间接测量值 MA 也一定有误差^[19]。根据标准差传递公式^[8]:

$$\sigma_y = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1}\right)^2 \sigma_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2}\right)^2 \sigma_{x_2}^2 + \cdots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_n}\right)^2 \sigma_{x_n}^2} \quad (3)$$

联立式(1)和式(3), 计算得 MA 的标准差为

$$\partial M =$$

$$\sqrt{\left(\pi \frac{\Delta x_p}{\sqrt{2\pi P \Delta x_p}}\right)^2 + \left(\pi \frac{P}{\sqrt{2\pi P \Delta x_p}} \partial \Delta x_p\right)^2} \quad (4)$$

笔者对 3D 裂隙测量中所选的 197 个测点进行

C 值的误差分析,计算其平均标准差 σ_P 为 144.6, C 值的平均误差为 14.3%,误差评估结果如图 8 所示。根据 Δx_p 的统计结果,其平均偏差值 $\sigma_{\Delta x_p}$ 为 0.84 左右。基于 σ_P 、 $\sigma_{\Delta x_p}$ 的统计结果,代入式(4),计算得 MA 值的平均误差为 17.1%,其误差评估结果如图 9 所示。

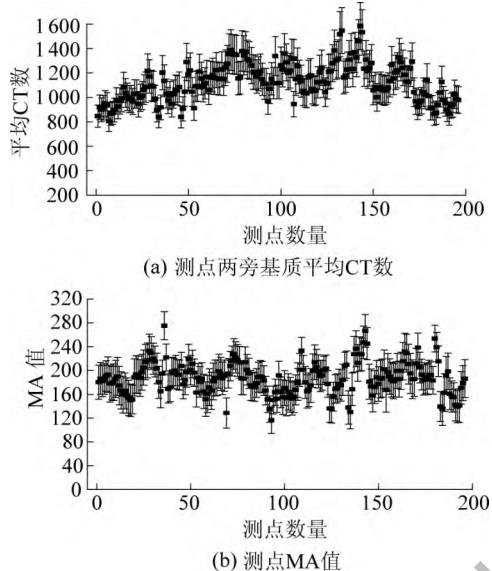


图 9 PH 法和 MA 法测量误差评估图

Fig. 9 Error estimate of PH method and MA method

利用参数 MA 表征裂隙开度,当裂隙开度值较小时,其 CT 值衰减曲线宽度 PW 值过大,PH 值正常,导致 MA 值过高,变异系数较大。表征参数 MA 依赖过裂隙剖面线的方向,需保证剖面线方向垂直裂隙的走向,当裂隙不规则时,很难保证 MA 值的准确性,且 MA 是关于 PH 和 Δx_p 的函数,而 PH 和 Δx_p 本身带有误差,通过误差传递,对 MA 值产生多重误差影响。综合上述对比,利用参数 PH 表征裂隙开度有较高的准确性。

4 结 论

1) 采用 Micro-CT 技术扫描,运用三维可视化建模方法,可直观观察煤岩原生裂隙空间展布、尺度及发育特征,实现 3D 裂隙的精细表征。

2) 基于裂隙处 CT 数曲线的变化规律,运用高斯函数拟合克服煤基质非均质性的干扰,分别运用参数 PH 和 MA 表征裂隙的开度。当裂隙开度较小时(<0.24 mm),参数 PH 测量法有较高的可靠度,当开度较大时,参数 MA 有较高的准确度。

3) 通过对 3D 裂隙表征测点统计误差分析,参数 PH 测量平均误差为 14.3%,优于参数 MA 测量

方法(平均误差 17.1%)。综合对比,参数 PH 表征方法有较高的准确度。

参考文献(References):

- [1] Wu Yu ,Liu Jishan ,Elsworth Derek Chen ,et al. Dual poroelastic response of a coal seam to CO₂ injection [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control 2010 A(4): 668–678.
- [2] Zhang Hongbin ,Liu Jishan ,Elsworth Derek ,et al. How sorption-induced matrix deformation affects gas flow in coal seams: a new FE model [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 2008 A5 (8): 1226–1236.
- [3] 宋晓晨,徐卫亚.裂隙岩体渗流模拟的三维离散裂隙网络数值模型:裂隙网络的随机生成[J].岩石力学与工程学报,2004,23(12): 2015–2020.
Song Xiaochen ,Xu Weiya. Numerical model of three-dimensional discrete fracture network for seepage in fractured rocks: generation of fracture network [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2004 23 (12): 2015–2020.
- [4] 李莉,王洪江,王贻明.岩体裂隙结构表征方法的讨论[J].金属矿山,2011(6): 1–5.
Li Li ,Wang Hongjiang ,Wang Yiming. Discussion on description methods of rock fracture structure [J]. Metal Mine 2011 (6): 1–5.
- [5] Yoshito Nakashima. The use of X-ray CT to measure diffusion coefficients of heavy ions in water-saturated porous media [J]. Engineering Geology 2000 56: 11–17.
- [6] 宋晓夏,唐跃刚,李伟,等.基于显微 CT 的构造煤渗流孔隙精细表征[J].煤炭学报,2013,38(3): 435–440.
Song Xiaoxia ,Tang Yuegang ,Li Wei ,et al. Advanced characterization of seepage pores in deformed coals based on Micro-CT [J]. Journal of China Coal Society 2013 38(3): 435–440.
- [7] Karacan E, Okandan. Fracture/cleat analysis of coals from Zonguldak Basin(northwestern Turkey) relative to the potential of coalbed methane production [J]. International Journal of Coal Geology ,2000 A4: 109–125.
- [8] Mazumder S ,Karl-Heinz A A Wolf ,Elewaut K ,et al. Application of X-ray computed tomography for analyzing cleat spacing and cleat aperture in coal samples [J]. International Journal of Coal Geology 2006 68: 205–222.
- [9] Karl Heinz A A Wolf ,Frank van Bergen ,Rudy Ephraim ,et al. Determination of the cleat angle distribution of the RECOPEL coal seams,using CT-scans and image analysis on drilling cuttings and coal blocks [J]. International Journal of Coal Geology ,2008 ,73: 259–272.
- [10] Karl Heinz A A Wolf ,Dan Bossie Cordreanu ,Rudy Ephraim ,et al. Analysing cleat angles in coal seams using image analysis techniques on artificial drilling cuttings and prepared coal blocks [J]. Geologica Belgica 2004 7(3): 105–113.
- [11] Johns R A ,Steude J S ,Castanier L M. et al. Nondestructive (下转第 55 页)

- [16] 华心祝, 李志华, 李迎富, 等. 深井大断面沿空留巷分阶段底鼓特征分析[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(9): 26–30.
Hua Xinzhу, Li Zhihua, Li Yingfu, et al. Analysis on floor heave features of large cross section gob-side entry retaining in deep mine [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(9): 26–30.
- [17] 韩昌良, 张农, 钱德雨, 等. 大采高沿空留巷顶板安全控制及跨高比优化分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(3): 348–354.
Han Changliang, Zhang Nong, Qian Deyu, et al. Optimization analysis of span-depth ratio for roof safety control in gob-side entry retaining under large mining height [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(3): 348–354.
- [18] 刘清利, 王萌. 综放工作面沿空留巷无煤柱开采技术[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(5): 122–127.
Liu Qingli, Wang Meng. Pillarless mining technology of fully-mechanized top coal caving mining face with retained gateways along goaf [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(5): 122–127.
- [19] Zhang Z, Bai J, Chen Y, et al. An innovative approach for gob-side entry retaining in highly gassy fully-mechanized long wall top-coal caving [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 80: 1–11.
- [20] Gao F, Stead D, Kang H, et al. Discrete element modeling of deformation and damage of a roadway driven along an unstable goaf: a case study [J]. International Journal of Coal and Geology, 2014, 127: 100–110.
- [21] Bierniawski Z T. In situ strength and deformation characteristics of coal [J]. Engineering Geology, 1968, 2(2): 325–340.
- [22] 张自政. 沿空留巷充填区域反复受载直接顶稳定性机理及控制技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016: 72–80.

(上接第142页)

- measurements of fracture aperture in crystalline rock cores using X-ray computed tomography [J]. Geophys Research, 1993, 98: 1889–1900.
- [12] Keller A. High resolution, non-destructive measurement and characterization of fracture apertures [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35: 1037–1050.
- [13] 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.
- [14] Verhelst F, Vervoort A, De Bosscher PH, et al. X-ray computerized tomography: determination of heterogeneities in rock samples [C]. Proceedings of the 8th International Congress on Rock Mechanics, Balkema, Rotterdam, 1995: 105–108.
- [15] Vandersteen K, Busselen B, Van D A K, et al. Quantitative char-

- acterization of fracture apertures using microfocus computed tomography [J]. Geological Society London Special Publications, 2003, 215: 61–68.
- [16] 姚艳斌, 刘大猛, 蔡益栋, 等. 基于 NMR 和 X-CT 的煤的孔隙精细定量表征[J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(11): 1598–1607.
Yao Yanbin, Liu Dameng, Cai Yidong, et al. Advanced characterization of pores and fractures in coals by nuclear magnetic resonance and X-ray computed tomography [J]. Science China: Earth Sciences, 2010, 40(11): 1598–1607.
- [17] 苏秀云, 刘蜀彬. Mimics 软件临床应用[M]. 北京: 人民军医出版社, 2011: 111–114.
- [18] Zimmerman R W, Kumar S, Bodvarsson G S. Lubrication theory analysis of the permeability of rough walled fractures [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts, 1991, 28(4): 325–331.
- [19] 吴石林, 张玘. 误差分析与数据处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010: 62–69.