



DOI: 10.13347/j.cnki.mkaq.2022.07.001

郭亚玲, 江泽标, 彭鑫, 等. 二氧化碳致裂对煤孔隙结构影响的试验研究[J]. 煤矿安全, 2022, 53(7): 20-26.

移动扫码阅读

GUO Yaling, JIANG Zebiao, PENG Xin, et al. Experimental study on the influence of carbon dioxide cracking on coal pore structure[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(7): 20-26.

二氧化碳致裂对煤孔隙结构影响的试验研究

郭亚玲¹, 江泽标^{1,2}, 彭鑫³, 扶祥祥¹, 吴少康¹, 权西平¹, 杨希法¹

(1. 贵州大学 矿业学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州省非金属矿产资源综合利用重点实验室, 贵州 贵阳 550025; 3. 贵州省煤矿设计院有限公司, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 为了定量表征二氧化碳致裂对煤岩孔隙结构的作用影响, 以大运煤矿 M8 煤层作为研究对象开展二氧化碳致裂研究, 基于压汞法和电镜扫描试验对 4 组煤样进行试验并结合分形特征对致裂前后煤样进行分析。结果表明: 二氧化碳致裂对煤孔隙有着明显的作用效果, 压汞试验结果表现为煤样的孔容、平均孔直径、孔隙率都有所增加, 会使孔隙比表面积在接近致裂孔 1 m 左右范围增加, 然后随距致裂冲击的传播致裂效果会减弱; 将 4 组煤样按压汞试验与电镜扫描试验分别计算其分形维数, 致裂后分形维数均小于原煤分形维数, 4 组煤样分形维数由小到大为 $1^{\#} < 2^{\#} < 3^{\#} < \text{YM}$, 说明二氧化碳致裂有助于促进煤样内部孔隙结构发育及孔隙之间的连通性。

关键词: 二氧化碳致裂; 煤孔隙; 压汞法; 电镜扫描; 分形维数

中图分类号: TD713

文献标志码: A

文章编号: 1003-496X(2022)07-0020-07

Experimental study on the influence of carbon dioxide cracking on coal pore structure

GUO Yaling¹, JIANG Zebiao^{1,2}, PENG Xin³, FU Xiangxiang¹, WU Shaokang¹, QUAN Xiping¹, YANG Xifa¹

(1. College of Mining, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Nonmetallic Mineral Resources in Guizhou, Guiyang 550025, China; 3. Guizhou Coal Mine Design Institute, Guiyang 550025, China)

Abstract: In order to quantitatively characterize the effect of carbon dioxide fracturing on the pore structure of coal, the M8 coal seam of Dayun Coal Mine was used as the research object to carry out carbon dioxide fracturing. Four groups of coal samples were tested by mercury injection and scanning electron microscope, and fractal characteristics were combined to analyze the coal samples before and after cracking. The results show that carbon dioxide fracturing has a significant effect on coal pores. Mercury injection test results show that the pore volume, average pore diameter and porosity of coal samples all increase, and the specific pore surface area will increase within the range of about 1 m close to the cracking hole, and then the cracking effect will be weakened with the propagation of the cracking impact. The fractal dimensions of the four groups of coal samples were calculated by the mercury pressing experiment and the electron microscope scanning experiment. After cracking, the fractal dimensions were all smaller than that of the raw coal. The fractal dimension of 4 groups of coal samples is $1^{\#} < 2^{\#} < 3^{\#} < \text{YM}$ from small to large. The results indicate that carbon dioxide cracking can promote the development of pore structure and the connectivity between pores in coal samples.

Key words: carbon dioxide cracking; coal pores; mercury injection; scanning electron microscope(SEM); fractal dimension

煤是一种复杂的天然多孔隙物质^[1], 其透气性是影响煤矿瓦斯抽采安全的重要因素。目前随着我国煤矿开采深度的增加, 瓦斯含量增加, 煤层透气性越低。二氧化碳致裂作为一种煤层增透的物理爆

破消突方法, 通过致裂产生的冲击对煤岩体孔隙会产生一定作用^[2], 对治理煤与瓦斯突出具有重要意义。目前, 针对二氧化碳致裂对煤岩孔隙的研究, 众多学者^[3-4]通过试验研究发现二氧化碳致裂对煤岩

基金项目: 贵州省科技厅资助项目(黔科合支撑[2020]4Y050号)

孔隙的发育具有一定促进作用。岳立新等^[5]利用自制三轴渗透仪进行二氧化碳在常规和超临界状态宏观增透试验,发现超临界二氧化碳有明显增透作用,并结合微观成像试验研究二氧化碳增透的微观机理;江泽标等^[6]通过低温氮吸附、压汞及电镜扫描试验从宏微观结合研究二氧化碳致裂对煤样孔径分布和孔隙结构特征的影响;在利用分形理论对孔隙结构分析上,陈恋等^[7]通过电镜扫描和低温氮吸附试验对贵州 4 个不同矿区煤样进行分析,结合分形理论研究各煤样孔隙结构发育程度及连通性;薛海腾等^[8]以贵州某矿为对象对 5 组煤样通过压汞试验测试其孔隙结构及参数,并计算分形维数分析其结构参数对瓦斯吸附能力的影响。现阶段,研究人员将试验方法与分形理论相结合运用在二氧化碳致裂研究上还处于起步阶段。因此,通过压汞试验与电镜扫描试验分析二氧化碳致裂对煤岩孔隙结构发育的有效作用,结合分形特征研究致裂前后煤样孔隙表面分形维数变化,利用分形维数大小的变化来定量评价二氧化碳致裂对消除煤与瓦斯突出的作用效果,对二氧化碳致裂增透煤层机理具有一定意义。

1 样品采集及试验测试

试验所使用的煤样取自贵州大运煤矿 M8 煤层,属于二叠系上统龙潭组,该煤层以无烟煤为主,平均厚度为 2.49 m,为全区可采中厚煤层。将从现场取得的 1 份大块原煤煤样以及 3 份致裂后不同位置所取的煤样在制样室经破碎筛选粒径范围在 0.4~0.5 mm 左右并编号。将原煤与致裂后在 1、2、3 m 位置取得的煤样编号为 YM、1[#]、2[#]、3[#]。

试验采用压汞法和电镜扫描。压汞法是通过通过对汞液施加压力使其克服煤岩内孔隙的毛管压力,从而通过压力与侵入的汞液量来描述孔隙内部结构,同时压汞法可自纳米级微孔到介孔再到大孔等连续测定孔隙结构,具有较高的可信度。所采用的仪器为 AutoPore9510 全自动压汞仪,测试孔径范围在 3~100 000 nm 之间,试验前样品在 200 °C 下烘干 4 h。扫描电镜采用德国蔡司 SIGA 电子扫描显微镜能谱仪,最小分辨率 3 nm。

2 试验测试结果

2.1 压汞试验结果

2.1.1 试验结果

对致裂前后的 4 组煤样进行压汞试验测试,压汞试验结果见表 1。

表 1 压汞试验结果

Table 1 Results of mercury intrusion experiment

煤样编号	孔容/ (mL·g ⁻¹)	平均孔直径/ nm	样本孔隙率/ %	比表面积/ (m ² ·g ⁻¹)
YM	0.068 5	17.0	11.575 1	16.160
1 [#]	0.205 0	43.5	28.493 1	18.840
2 [#]	0.100 9	27.7	22.448 5	14.550
3 [#]	0.096 3	26.1	15.957 8	14.746

从表 1 可以看出,测得的孔容范围在 0.068 5~0.205 0 mL/g 之间,平均孔直径所测得的范围在 17.0~43.5 nm 之间,样本的孔隙率在 11.575 1%~28.493 1%之间,且致裂后煤样的孔容、平均孔直径、样本孔隙率均大于原煤。根据表 1 的孔容、平均孔直径与孔隙率的变化趋势,可以判断二氧化碳致裂效果随距离增加而逐渐减弱。从比表面积来看,所测的范围在 14.550~18.840 m²/g 之间;致裂后 1[#]煤样的比表面积 18.840 m²/g,最大大于原煤的比表面积 16.160 m²/g;而 2[#]、3[#]煤样的比表面积均小于原煤比表面积。比表面积的大小可粗略的判断出微孔含量的多少,1[#]煤样出现比表面积大于原煤比表面积的情况是由于致裂产生的冲击能量在 1 m 位置时,不仅能使原有孔隙通道发育扩张,还能促使发育新的微孔生成发育。

2.1.2 煤样孔容

二氧化碳致裂前后煤样进汞-退汞曲线如图 1。

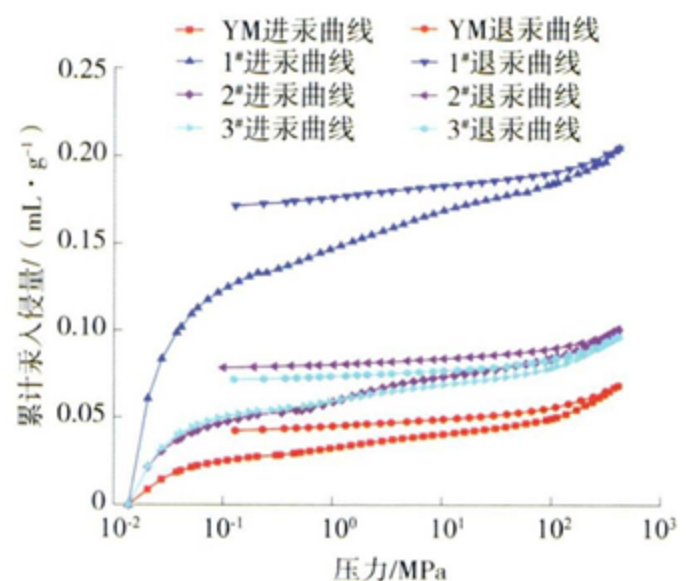


图 1 二氧化碳致裂前后煤样进汞-退汞曲线

Fig.1 Mercury-dehydration curves of coal samples before and after carbon dioxide cracking

由图 1 可知,当压力大于 130 MPa 后,YM 煤样进汞曲线相较于小于 1[#]、2[#]、3[#]煤样,有较为明显的上扬趋势,即是发生突变,进汞曲线发生突变说明存

在墨水瓶孔隙,而压力范围在 100~400 MPa 时所测试的孔径范围在 3~10 nm 之间,将孔隙按微孔(<8 nm),介孔(8~100 nm),大孔(>100 nm)划分^[9],说明原煤中微孔含量较多,孔隙较为复杂。

当压力范围在 130~400 MPa 时,对比 4 组煤样的进退汞曲线,发现均有“滞后”现象的出现,说明在退汞阶段开始进行时就有汞液受“口小肚大”的墨水瓶孔孔隙结构影响被滞留在样本内部,煤岩中墨水瓶孔的特点是有利于瓦斯储集而不利于瓦斯运输。不过 YM 煤样的退汞曲线与进汞曲线较 1[#]、2[#]、3[#] 煤样更为分离,退汞效率均低于 1[#]、2[#]、3[#] 煤样,而受二氧化碳致裂效果作用,1[#]、2[#]、3[#] 煤样的进汞曲线与退汞曲线较为接近,说明其退汞效率高。退汞效率高又说明致裂后煤样中孔隙连通,孔隙开放较好所以能有效退汞。结合来看,致裂前原煤煤样微孔含量较多、孔隙结构较为复杂,孔隙连通性差,其中墨水瓶微孔结构又有利于瓦斯的储集,易于导致煤与瓦斯突出事故的发生。在采取二氧化碳致裂措施后,煤样中的墨水瓶状等微孔转变为介孔与大孔,孔隙间相互连通,这有利于瓦斯的运移而不利于其储集,所以二氧化碳致裂对消除煤与瓦斯突出具有一定作用。

2.1.3 煤样孔径

为了更进一步分析二氧化碳致裂效果,绘制了致裂前后 4 份煤样的阶段孔容与孔径关系图,二氧化碳致裂前后煤样孔容孔径关系图如图 2。

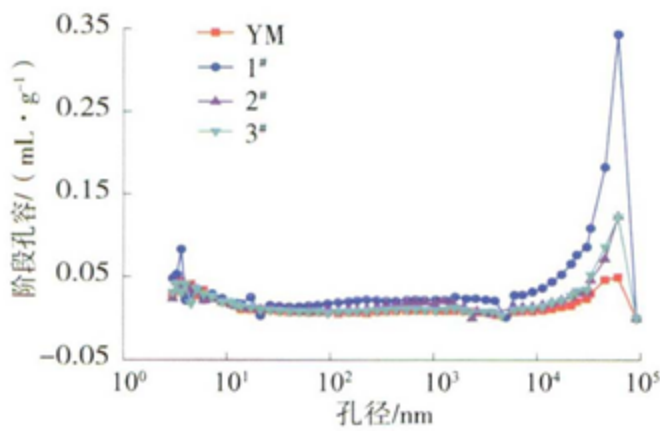


图 2 二氧化碳致裂前后煤样孔容关系图

Fig.2 Relationship between pore volume and pore diameter of coal samples before and after carbon dioxide cracking

从图 2 可以看出,原煤呈现明显的双峰结构,峰值出现范围在 1~10 nm 与 10 000~100 000 nm 2 个范围,结合图 1 中 YM 的进汞曲线上升趋势来看,峰值出现的范围也是进汞曲线上升速度较快的范围。对比图 2 中 1[#]、2[#]、3[#] 煤样曲线,都只是单峰结构,峰

值出现范围在 10 000~100 000 nm 之间,同时 1[#]、2[#]、3[#] 煤样曲线峰值阶段孔容分别为 0.343 4、0.122 8、0.122 4 mL/g,比原煤同范围峰值 0.042 6 mL/g 都有所增大,且 1[#] 最大,2[#]、3[#] 逐渐减小。再者,孔径范围在 10~10 000 nm 之间的阶段孔容也存在相同趋势,由原来 YM 煤样的 0.03 mL/g 范围上升到 1[#] 的 0.08 mL/g 左右,在 2[#] 与 3[#] 中则逐渐下降到 0.04 mL/g 左右,这说明二氧化碳致裂作用主要使孔径范围在 10~100 000 nm 之间的孔隙进一步发育连通。也可从侧面反应出二氧化碳致裂对促使煤岩孔隙发育有较好的效果。

2.2 电镜扫描试验结果

为了更好的观测致裂前后煤样孔隙的增长发育情况,对致裂前后 4 个试验煤样进行扫描电镜试验,并对其表面孔隙的发育情况进行定性描述。试验所用设备可将煤样放大倍率在 1~5 000 之间,选择 3 000 倍的扫描结果,二氧化碳致裂前后煤样表面 SEM 图如图 3。

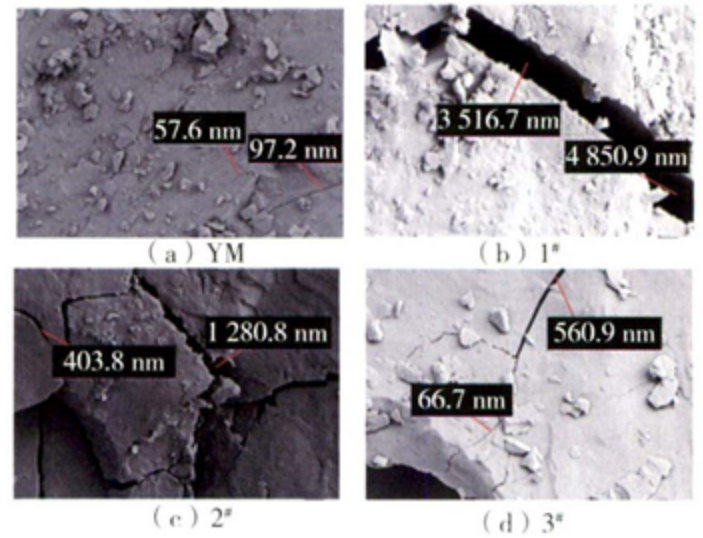


图 3 二氧化碳致裂前后煤样表面 SEM 图

Fig.3 SEM images of coal samples surface before and after carbon dioxide cracking

由图 3 对比可知,4 组煤样表面均有宽度不同数量不等的裂隙存在。致裂前原煤煤样表面结构致密(图 3(a)),可观察到少量 56.7~97.2 nm 的裂隙,孔裂隙连通性较差,不利于瓦斯扩散;致裂 1 m 处煤样可清晰观察到 1 条宽度 3 516.7~4 850.9 nm 的较大裂缝(图 3(b)),有利于瓦斯渗流;致裂 2 m 处煤样结构破坏较严重(图 3(c)),可观察到宽度为 403.8~1 280.8 nm 的裂隙,并伴有微裂隙发育,孔裂隙之间相互贯通可形成渗流通道;致裂 3 m 处煤样存在较多微小孔裂隙(图 3(d)),可观察到 66.7~560.9 nm 的裂隙。从 SEM 图结果可知,二氧化碳致

裂对煤岩孔裂隙发育有促进效果,有利于进行瓦斯治理,其作用效果随距离增大逐渐减弱。

3 孔隙结构分形维数计算

3.1 压汞试验分形维数计算

分形理论区别于传统欧式几何的特征是其可以用分形维数表述复杂曲面的复杂程度。目前适用于压汞法的分形模型有 Sierpinski 模型、Menger 海绵模型与热力学分形模型等^[10],其中 Menger 海绵模型被广泛用于多孔介质的分形维数计算。利用 Menger 分

形模型对孔隙结构分形维数进行计算^[11]:

$$\ln\left(\frac{dv}{dp}\right)=A\ln(p)+c \quad (1)$$

式中: v 为孔隙体积, mL; p 为进汞压力, MPa; c 为常数; A 为以 $\ln(dv/dp)$ 与 $\ln(p)$ 做双对数曲线的斜率。

$$D=A+4 \quad (2)$$

式中: D 为分形维数。

根据图 1 的压汞试验进汞阶段数据绘制出的 $\ln(dv/dp)$ 与 $\ln(p)$ 的双对数散点图如图 4。

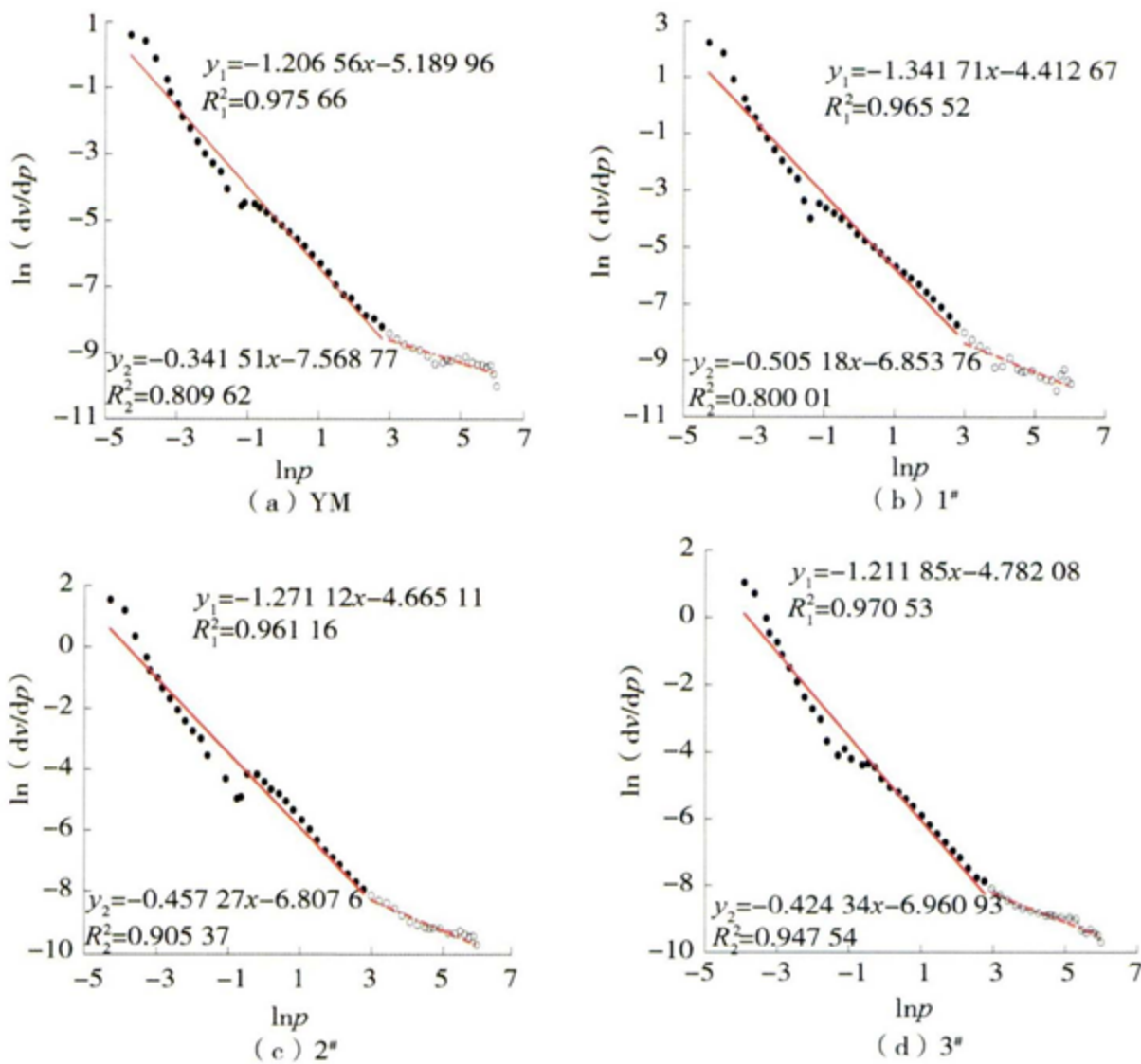


图 4 二氧化碳致裂前后煤样分形维数计算

Fig.4 Calculation of fractal dimension of coal samples before and after carbon dioxide cracking

傅雪海等^[12]根据煤岩中瓦斯的渗流与扩散特性对大量的煤样进行压汞试验与分形研究,发现煤岩内部孔隙孔径在 65 nm 时有明显的分形维数变化,所以将孔径大于 65 nm 的孔隙划分为渗流孔,而将孔径小于 65 nm 孔隙划分为扩散孔。因此,试验以 65 nm 为界,分段拟合渗流孔与扩散孔,其中 y_1 为拟合渗流孔方程, y_2 为拟合扩散孔方程。

在分形理论中,分形维数的大小可以近似表征 1 个曲面的构造复杂程度,在 Menger 分形模型下煤

岩的孔隙表面分形维数在 2~3 之间,在这个范围内具有实际表征意义,其中分形维数越接近 2 表示孔隙表面越趋于光滑,而分形维数越接近 3 表示孔隙表面越粗糙。

基于 Menger 分形模型的致裂前后煤样分形维数见表 2。根据表 2 的计算结果可知,渗流孔的拟合结果较好,其 R_1^2 均大于 0.95,同时其分形维数 D_i 在 2.65~2.83 左右,原煤的分形维数最大为 2.827 66,1# 煤样的分形维数最小为 2.658 29,2# 与 3# 煤样的分

形维数则依次增加。再看扩散孔,发现其拟合结果对比渗流孔来说较差,其 R_2^2 均小于 0.95。扩散孔的分形维数 D_k 均大于 3,所以其实际意义并不明显,造成这种情况的原因是汞液在外部压力的作用下会迫使煤岩孔隙内部开裂形成新的裂缝,造成孔隙内部表面粗糙,以至于分形维数增加。

表 2 基于 Menger 分形模型的致裂前后煤样分形维数
Table 2 Fractal dimension of coal samples before and after cracking based on Menger fractal model

煤样 编号	渗流孔(孔径>65 nm)			扩散孔(孔径<65 nm)		
	R_1^2	A_s	D_s	R_2^2	A_k	D_k
YM	0.975 66	-1.172 34	2.827 66	0.809 62	-0.341 51	3.658 49
1 [#]	0.965 52	-1.341 71	2.658 29	0.800 01	-0.505 18	3.494 82
2 [#]	0.961 16	-1.271 12	2.728 88	0.905 37	-0.457 27	3.542 73
3 [#]	0.970 53	-1.211 85	2.788 15	0.947 54	-0.424 34	3.575 66

注: R_1^2 、 R_2^2 分别为渗流孔和扩散孔方程的拟合相关系数; A_s 、 A_k 分别为渗流空和扩散孔的拟合斜率; D_s 、 D_k 分别为渗流孔和扩散孔的分形维数。

3.2 电镜扫描试验分形维数计算

3.2.1 图像二值化处理

二值化处理的目的是通过阈值分割将电镜扫描图像中的孔裂隙与煤体表面呈现出非黑即白的对比颜色,其阈值的合理取值决定了图像的处理效果。图像二值化方法可分为局部阈值法和全局阈值法 2 大类^[13],本文采用全局阈值法中的最大类间方差法(OTSU)^[14]对灰度图像进行二值化处理。该方法又称大津法,它算法简单不受图像亮度和对比度的影响,被认为是图像阈值分割的最佳算法。最大类间方差法二值化图像处理如图 5。

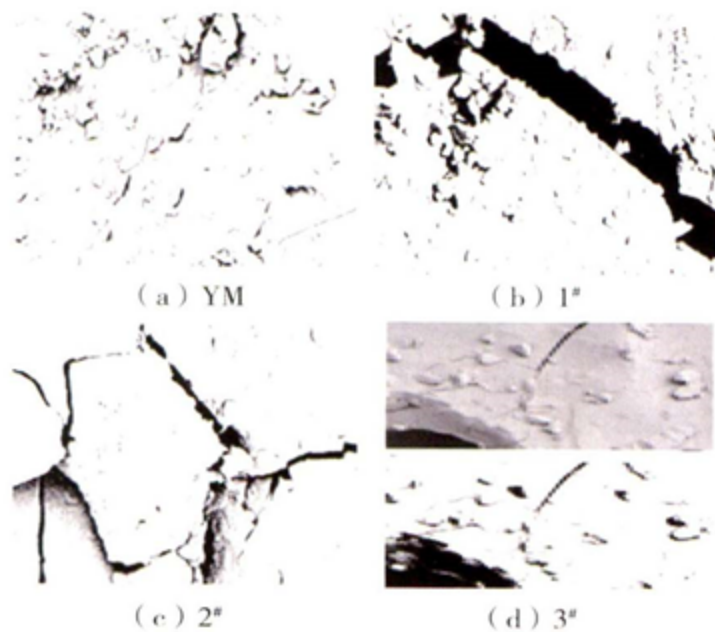


图 5 最大类间方差法二值化图像处理
Fig.5 OTSU method binary image processing

3.2.2 Image-pro-plus 测量参数

Image-pro-plus 参数测量图如图 6。将二值化处理过后的图片在 Image-pro-plus 软件中打开,首先根据图片左下角的标尺进行比例尺校准,然后点击 Measure 选项中的 count/Size 就得到测量界面,点击 Select Ranges 可以自动选择测量的范围,在 Select Measurements 选项中选择需要测量的参数,需要测量其面积与周长,所以选择 Area 和 Perimeter,最后点击 Count 即可得出测量结果。可以从 View 选项中的 Measurement Data 将数据导出到 excel 进行数据分析。

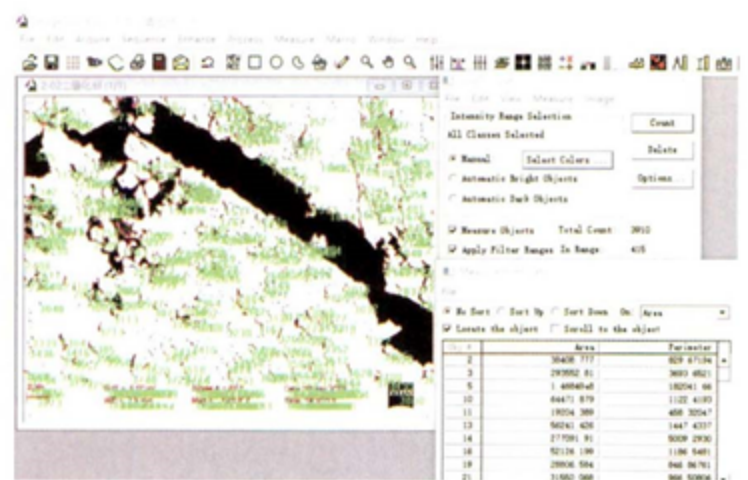


图 6 Image-pro-plus 参数测量图

Fig.6 Image-pro-plus parameter measurement chart

3.2.3 电镜扫描试验分形维数计算

利用电镜扫描微观图像分析分形特征是由 Moore C A 与 Donaldson C F^[15]首次提出。扫描电镜试验是研究孔隙平面特征,其得到的分形维数在 1~2 之间。分形维数越接近于 2 表示孔隙结构越复杂,孔隙连通性差,反之越接近于 1 其孔隙连通性越好。根据上述利用 Image-pro-plus 软件测量出的面积与周长参数,对面积与周长取对数进行线性拟合可求解孔隙形态分形维数,具体公式如下:

$$\ln C = \left(\frac{D}{2}\right) \ln S + e \quad (3)$$

式中: C 为孔隙周长, nm; S 为孔隙面积, nm^2 ; e 为常数。

电镜扫描煤样分形维数如图 7。电镜扫描煤样分形维数计算结果见表 3。

由图 7 及表 3 可知,4 组煤样的拟合相关系数 R^2 均在 0.93 以上,说明 4 组煤样具有较明显的分形特征。4 组煤样的分形维数在 1.558 2~1.807 1 之间,其中 YM 煤样的分形维数最大为 1.807 1,说明 YM 煤样的孔隙结构最复杂,孔隙连通性最差;1[#] 煤样的分形维数最小为 1.558 2,说明致裂后 1 m 煤样

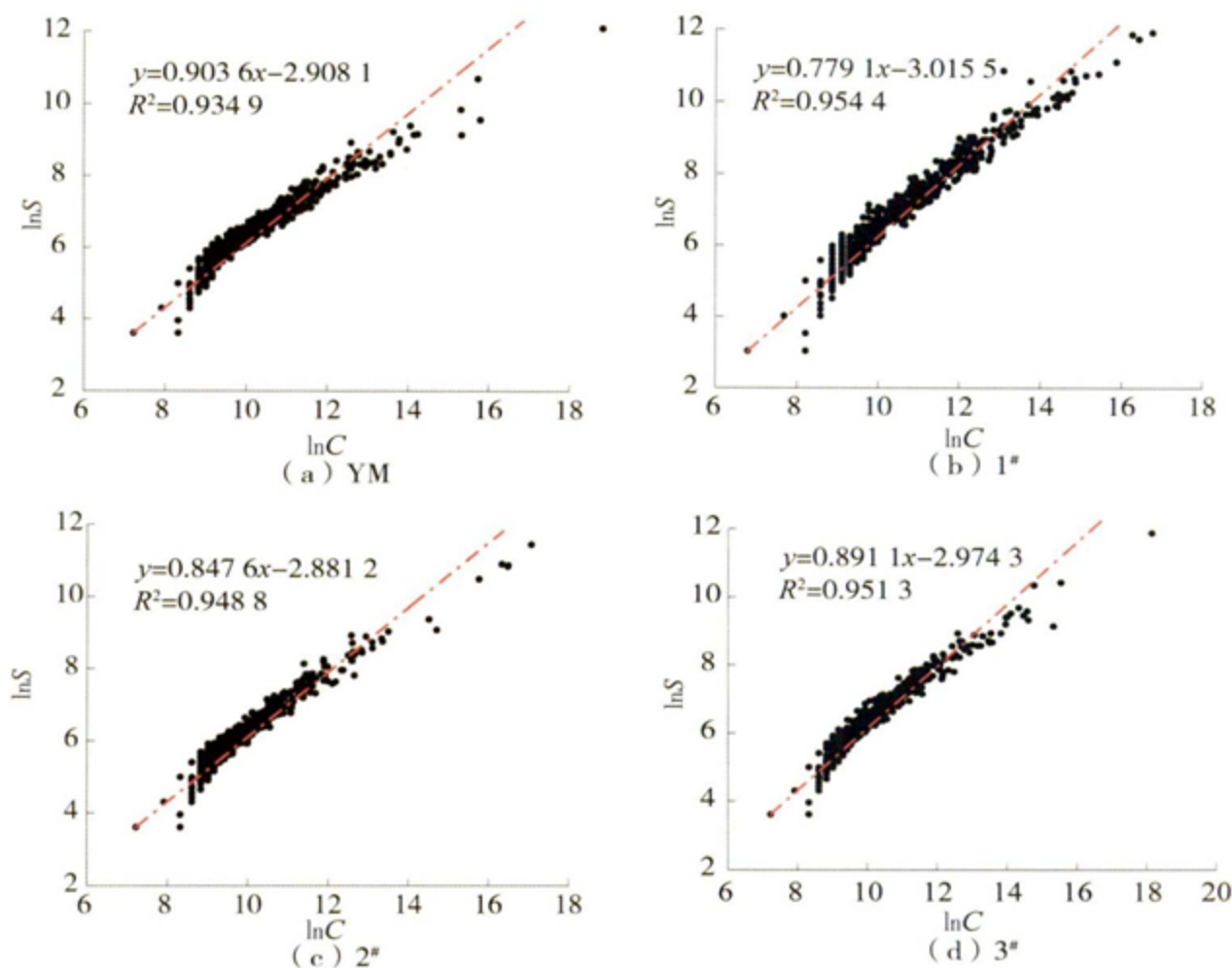


图7 电镜扫描煤样分形维数

Fig.7 Fractal dimension of coal samples by SEM

表3 电镜扫描煤样分形维数计算结果

Table 3 Calculation results of fractal dimension of coal samples by SEM

煤样编号	$D/2$	D	R^2
YM	0.903 6	1.807 1	0.934 9
1 [#]	0.779 1	1.558 2	0.954 4
2 [#]	0.847 6	1.695 2	0.948 8
3 [#]	0.891 1	1.782 2	0.951 3

孔隙结构最简单,孔隙连通性最好;2[#]、3[#]煤样分形维数逐渐增大但均小于原煤分形维数,说明二氧化碳致裂有助于煤岩孔隙结构发育,与电镜扫描试验结果分析一致。

4 结 语

1)根据压汞试验结果得到二氧化碳致裂使煤样的孔容、比表面积、平均孔直径与孔隙率等孔隙参数的变化趋势,以及对电镜扫描试验的结果分析,可以得出二氧化碳致裂效果作用明显,并随致裂距离的增加而减弱。同时二氧化碳致裂主要使介孔与大孔进一步发育扩张。

2)通过压汞试验和电镜扫描试验分别对4组煤样分形维数进行计算,致裂后分形维数均小于原煤分形维数,4组煤样分形维数由小到大为1[#]<2[#]<3[#]<YM,说明二氧化碳致裂能够促进煤样内部孔隙结构发育及孔隙之间的连通性,有助于瓦斯在煤孔隙内的运移。

3)根据分形维数的大小变化可以判断二氧化碳致裂对煤岩孔隙表面的作用,并揭示二氧化碳致裂作用机理,有利于抽采煤层瓦斯从而降低煤与瓦斯突出事故的危险性。

参考文献(References):

- [1] 郝晋伟,李阳.构造煤孔隙结构多尺度分形表征及影响因素研究[J].煤炭科学技术,2020,48(8):164-174.
HAO Jinwei, LI Yang. Research on multi-scale fractal characteristics of pore structure in tectonic coal and analysis of its influence factors[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(8): 164-174.
- [2] 张东明,白鑫,尹光志,等.低渗煤层液态CO₂相变射孔破岩及裂隙扩展力学机理[J].煤炭学报,2018,43(11):3154-3168.
ZHANG Dongming, BAI Xin, YIN Guangzhi, et al.

- Mechanism of breaking and fracture expansion of liquid CO₂ phase change jet fracturing in low-permeability coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(11): 3154-3168.
- [3] 郝志勇,岳立新,孙可明,等.超临界 CO₂ 温变对低渗透煤层孔渗变化的实验研究[J].煤田地质与勘探, 2018, 46(3): 64.
HAO Zhiyong, YUE Lixin, SUN Keming, et al. Experiment study on the porosity and permeability of low permeability coal by supercritical CO₂ temperature variation [J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(3): 64.
- [4] 彭鑫.贵州松软煤层基于分形理论的 CO₂ 致裂增透机理实验研究[D].贵阳:贵州大学, 2020.
- [5] 岳立新,孙可明,郝志勇.低渗透煤层注超临界 CO₂ 增透微观机理研究[J].煤炭科学技术, 2016, 44(12): 85-90.
YUE Lixin, SUN Keming, HAO Zhiyong. Study on micro-mechanism of permeability improvement with supercritical CO₂ injection in low permeability seam [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(12): 85-90.
- [6] 江泽标,彭鑫,韦善阳,等.基于氮吸附、压汞联合试验的 CO₂ 致裂对煤岩孔隙的影响[J].安全与环境学报, 2021, 21(1): 101-108.
JIANG Zebiao, PENG Xin, WEI Shanyang, et al. Influence CO₂ cracking on the coal and rock pore based on the nitrogen adsorption and mercury press combined experiment [J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21(1): 101-108.
- [7] 陈恋,袁梅,许石青,等.数字图像技术结合小岛法在煤分形特征中的应用[J].中国安全生产科学技术, 2021, 17(3): 77-83.
CHEN Lian, YUAN Mei, XU Shiqing, et al. Application of digital image technology combined with island method in coal fractal characteristics [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17(3): 77-83.
- [8] 薛海腾,李希建,陈刘瑜.含瓦斯煤吸附特性影响因素研究[J].矿业研究与开发, 2021, 41(3): 75-79.
XUE Haiteng, LI Xijian, CHEN Liuyu. Study on the influencing factors of gas-containing coal adsorption characteristics [J]. Mining Research and Development, 2021, 41(3): 75-79.
- [9] 祝捷,张博,王全启,等.煤的孔隙结构与煤岩动力失稳特征的相关性[J].中国矿业大学学报, 2018, 47(1): 97-103.
ZHU Jie, ZHANG Bo, WANG Quanqi, et al. The interdependency of pore structures and coal dynamic failures [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(1): 97-103.
- [10] Katz A, Thompson A. Fractal Sandstone Pores: Implications for Conductivity and Pore Formation [J]. Physical Review Letters, 1985, 54(3): 1325-1328.
- [11] Washburn E W. The Dynamics of Capillary Flow [J]. Physical Review, 1921, 17(3): 273-283.
- [12] 傅雪海,秦勇,张万红,等.基于煤层气运移的煤孔隙分形分类及自然分类研究[J].科学通报, 2005(S1): 51-55.
- [13] 王兴东,杨雅伦,孔建益,等.基于区域优化的等厚对接焊缝图像二值化方法[J].中国机械工程, 2019, 30(14): 1756-1763.
WANG Xingdong, YANG Yalun, KONG Jianyi, et al. Image binarization method of equal-thickness butt welds based on regional optimization [J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(14): 1756-1763.
- [14] 齐继阳,李金燕,陆震云,等.改进的 Otsu 法在焊接图像分割中的应用[J].焊接学报, 2016, 37(10): 97.
QI Jiyang, LI Jinyan, LU Zhenyun, et al. Application of improved Otsu algorithm to welding image segmentation [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(10): 97.
- [15] Moore C A, Donaldson C F. Quantifying soil microstructure using fractals [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1995, 32(6): 105-116.
-
- 作者简介:郭亚玲(1995—),女,贵州遵义人,在读硕士研究生,研究方向为矿山灾害防治。
- 通讯作者:江泽标(1972—),贵州贵阳人,副教授,硕士研究生导师,硕士,2011年毕业于贵州大学,贵州大学矿业学院安全教研室主任,主要从事矿山灾害防治方面的研究。
-
- (收稿日期:2021-09-17;责任编辑:兰莹)

