

CO₂ 致裂对煤孔隙吸解特性与分形特征影响研究*

彭鑫¹, 江泽标^{**1}副教授, 谢雄刚¹教授, 邓川^{2,3}, 许石青¹, 孙悦¹

(1 贵州大学 矿业学院, 贵州 贵阳 550025; 2 中煤科工集团 重庆研究院有限公司, 重庆 400039;
3 贵州安和矿业科技工程股份有限公司, 贵州 贵阳 550081)

学科分类与代码: 6203099(安全工程技术科学与其他学科)

中图分类号: X936

文献标志码: A

基金项目: 贵州省科技厅项目(黔科合支撑[2017]2815); 国家自然科学基金资助(51864009)。

【摘要】 煤与瓦斯突出煤层普遍具有瓦斯含量高、渗透率低的特点, 为了消除煤与瓦斯突出, 采用 CO₂ 致裂的方法, 在贵州大运煤矿取样, 开展低温氮吸附试验对比致裂前后煤的微观孔隙变化。采用静态容量法比表面及孔径分析仪测试 CO₂ 致裂前后孔径范围在 3~200 nm 之间煤样, 并运用 FHH 分形理论定量描述 CO₂ 致裂对煤岩孔隙内表面作用过程。结果表明: CO₂ 致裂在 3 m 范围内对煤层的孔隙结构有显著影响, 致裂后的煤样比表面积与最可几孔直径均明显减少, 同时平均孔直径与孔容明显增加; 致裂对微孔破坏效果显著, 致裂后微孔数量降低一个数量级, 降幅最高达到 83.93%; 原煤的分形维数由 2.705 93 降低到致裂后最低 2.553 78, 说明贵州煤层孔隙表面复杂粗糙, 利用 CO₂ 致裂能使煤层孔隙表面趋于光滑; 比表面积与分形维数具有正相关关系。

【关键词】 煤与瓦斯突出; CO₂ 致裂; 低温氮吸附; 孔隙特征变化; 分形表面

Experimental study on influence of CO₂ cracking on pore permeability and fractal characteristics of coal

PENG Xin¹, JIANG Zebiao¹, XIE Xionggang¹, DENG Chuan^{2,3}, XU Shiqing¹, SUN Yue¹

(1 College of Mining, Guizhou University, Guiyang Guizhou 550025, China; 2 Chongqing Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group, Chongqing 400039, China; 3 Guizhou Anhe Mining Technology and Engineering Company Limited, Guiyang Guizhou 550081, China)

Abstract: Coal and gas outburst seams generally have the characteristics of high gas content and low permeability. In order to eliminate coal and gas outburst, coal samples from Dayun Coal Mine, Guizhou Province were studied and the method of carbon dioxide cracking was used to carry out low temperature nitrogen adsorption experiments to compare the microscopic pore changes of coal before and after cracking. The static volumetric method was used to test the coal samples with pore size between 3 nm and 200 nm before and after CO₂ cracking. The fractal theory was used to quantitatively describe the effect of CO₂ cracking on the inner surface of coal rock pores. The results show that the carbon dioxide cracking has a significant effect on the pore structure of the coal seam within 3 m, that the coal sample after the cracking has a significant reduction in the specific surface area and the diameter of the most pores, and an obvious increase in the average pore diameter and pore volume, that the effect of cracking on microporous damage is remarkable, and the number of micropores after splitting is reduced by an order of magnitude, with a

* 文章编号: 1003-3033(2019)07-0110-07; DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2019.07.018

收稿日期: 2019-03-22; 修稿日期: 2019-05-15

** 通信作者: 江泽标(1972—), 男, 贵州贵阳人, 硕士, 副教授, 硕士生导师, 安全教研室主任, 主要从事矿山灾害防治等方面的研究。
E-mail: 327552007@qq.com。

maximum decrease of 83.93%, that the fractal dimension of raw coal is reduced from 2.705 93 to 2.553 78 after cracking, which indicates that the pore surface of Guizhou coal seam is complex and rough, and the use of carbon dioxide cracking can make the pore surface of coal seam smooth, and that specific surface area and fractal dimension have a positive correlation.

Keywords: coal and gas outburst; carbon dioxide cracking; low temperature nitrogen adsorption; characteristic change of pore; fractal surface

0 引言

煤是一种内部具有许多孔隙的物质^[1],这些孔隙是储存与运移瓦斯的场所与通道^[2]。采用煤层增透技术可以破坏瓦斯在煤岩内部的储集场所,扩展瓦斯的运移通道,达到消除煤与瓦斯突出的目的。现阶段的煤层增透技术有水力压裂、水力冲孔、水力割缝、密集钻孔泄压与 CO₂ 致裂等技术^[3]。采用 CO₂ 致裂的方法能有效降低煤层瓦斯含量,其优势有 2 个方面:一是煤层对 CO₂ 的吸附高于对 CH₄ 的吸附^[4],二是致裂产生的冲击波对煤层孔隙发育具有影响。

CO₂ 致裂后可以使煤的宏观表征参数与微观表征参数发生明显变化。在致裂效果影响微观表征参数研究方面,张东明等^[5]通过对低渗透煤层进行定向 CO₂ 射孔致裂,发现致裂后煤的孔隙度、孔容、比表面积、可见孔率有所增加;岳立新等^[6]通过三轴渗流对煤层进行超临界 CO₂ 致裂,发现微观孔隙、裂隙有所发育;林海飞等^[7]通过对新疆卓康矿区煤层孔隙进行分形研究,发现瓦斯放散初速度随分形维数的增大而线性减少;许江等^[8]等以贵州六盘水矿区煤矿为对象,研究发现原煤的分形维数越高,原煤的吸附量和孔容也越大;傅雪海等^[9]对煤样进行分形维数计算,分析了分形维数与煤层的孔、裂隙发育程度和煤变质程度的关系;刘顺喜等^[10]阐明了分形维数与煤储层物性之间的关系。前人在研究高瓦斯低渗煤层时只是单独对致裂后的煤样孔隙进行微观参数研究,或者是对原煤进行微观分形研究。

基于以上分析,笔者将在煤矿现场进行 CO₂ 致裂取样,采用全自动比表面分析仪得出致裂前后煤样的吸附等温曲线、绘制孔径分布图,并利用分形 FHH 模型计算分形维数,研究致裂前后煤层的吸解性变化。

1 样品采集与制备

氮吸附法是一种依靠氮的等温吸附曲线测定孔隙比表面积与孔径分布的一种方法。在液氮温度

下,氮气的相对压力 (P/P_0) 大小与氮气在固体表面的吸附量 V (mL/g) 成正相关关系,其中, P 代表氮气分压, MPa; P_0 代表液氮温度下氮气的饱和蒸气压, MPa。在液氮温度下,当 P/P_0 处于 0.05 ~ 0.35 之间时,氮气的吸附量与其相对压力符合多分子层吸附方程 (Brunauer-Emmett-Teller, BET), 就可得出比表面积;当 $P/P_0 \geq 0.45$ 时,就会有毛细凝聚现象出现,氮气开始在微孔中凝聚,以此为理论基础通过试验分析就可测定孔容与孔径分布。

采用静态容量法比表面及孔径分析仪测定原煤与致裂后的煤样,设备可测孔径范围在 3 ~ 200 nm 之间。试验前先将待测样品在 90 °C 下烘干 6 h。试验时,首先将样品装入试管内并在 100 °C 下进行 2 h 脱气抽真空,然后将样品试管移动至测试位置进行分析。

样品取自贵州省大运煤矿 M8 煤层,在现场分别取得大块原煤与致裂后的煤样,致裂后煤样取纵向 25 ~ 30 m 深度的煤样,此深度煤样与 CO₂ 致裂器的释放口处于同一水平范围,能体现出 CO₂ 致裂效果,同时以致裂孔水平方向为准每隔 1 m 打孔取样,取得分别距离致裂孔水平 1、2 和 3 m 的 3 组致裂后煤样。在制样室将原煤破碎并筛选孔径为 0.3 ~ 0.45 mm 之间,编号 YM;将致裂后煤样筛选同样孔径,按 1、2 和 3 m 分别编号 ZL-1, ZL-2, ZL-3。

2 测试结果与分析

2.1 比表面特征及孔径孔容分布

对致裂前后的 4 组煤样进行液氮吸附解吸试验,所得测试结果见表 1。4 组煤样的等温吸附曲线如图 1 所示。每样的比表面积范围在 2.169 9 ~ 2.810 8 m²/g 之间,孔容范围在 0.004 0 ~ 0.005 2 mL/g 之间,致裂后 3 组煤样的比表面积小于原煤,孔容均大于原煤。其中:从 BET 比表面积来看, YM 的比表面积最大为 2.810 8 m²/g, ZL-2 煤样的比表面积最小为 2.169 9 m²/g。ZL-2 煤样的比表面积相对于 YM 的比表面积减少了 22.8%, ZL-1 煤样与 ZL-3 煤样较 YM 比表面积分别减少了 16.9% 与

14.5%。致裂后3组煤样的孔容是原煤的1.175~1.3倍。致裂后煤样的平均孔直径是原煤的1.167~1.464倍。ZL-1与ZL-2的最可几孔直径小于YM的最可几孔直径,ZL-3的最可几孔直径与YM的几乎相同。

表1 液氮吸附解吸试验结果

Tab.1 Liquid nitrogen adsorption and desorption experiment results

煤样编号	BET比表面积/($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	孔容/($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$)	平均孔直径/nm	最可几孔直径/nm
YM	2.810 8	0.004 0	8.54	3.64
ZL-1	2.335 8	0.005 2	12.50	3.53
ZL-2	2.169 9	0.004 7	12.17	3.54
ZL-3	2.404 3	0.005 2	9.98	3.67

根据抚顺煤研所的定义^[11],将孔隙划分为3类:微孔($<8 \text{ nm}$),介孔($8 \sim 100 \text{ nm}$),大孔($>100 \text{ nm}$)。煤的微孔是瓦斯富集的场所,而介孔与大孔是瓦斯运移的通道。煤微孔的多少可由比表面积的大小体现,而介孔与大孔的发育趋势则可由孔容与平均孔径看出。在数据分析中,致裂后的煤样比表面积比原煤的小,是因为存在 CO_2 致裂的影响, CO_2 致裂是一种物理性爆炸^[12],在致裂后,原煤中的微孔受到冲击波作用扩张发育,进而成为介孔,说明 CO_2 致裂对煤层微孔具有显著的破坏作用,此时煤层瓦斯的富集场所减少,原本富集在微孔中的瓦斯会以游离态运移到介孔和大孔中,而原本的介孔与大孔则进一步发育,为瓦斯的运移提供更好的条件,这解释了 CO_2 致裂后更有利于煤层瓦斯的抽采的原因。但ZL-3与YM的平均孔直径与最可几孔直径几乎相同,说明 CO_2 致裂的距离只在一定的范围内。

2.2 低温氮吸附孔类型

由图1可知:在吸附阶段,当相对压力小于0.1时,煤样中的微孔开始吸附,由于微孔具有较强的吸附势,所以吸附量在开始阶段较快上升;当相对压力处于0.1~0.9时,由于微孔已经充满吸附质,介孔与大孔的孔壁开始吸附形成单分子层,并由单分子层向多分子层变化,吸附量变化缓慢;当相对压力大于0.9时,由于此时煤样中较大的孔隙发生毛细凝聚现象,孔隙的吸附量会急剧增加。在脱附阶段,随着相对压力降低,由于存在开放型的孔隙,此时凝聚与蒸发的气液界面的凹凸形状不同,所以产生了吸附回线。当相对压力降到0.5左右时,YM与ZL-3煤样有一个明显的下滑拐点,此时最小的开放孔内

凝聚液蒸发,之后微孔开始脱附,脱附速度减慢,但ZL-1与ZL-2的下滑几乎没有拐点,所以脱附速度没有明显减少。

根据是否产生吸附回线可以将固体中的孔隙划分为3种类型^[13]:第I类是两端开放型孔隙,代表结构有圆筒状通孔与平行狭缝通孔等,开放型孔的特点是有利于瓦斯的运移,同时能够产生吸附回线;第II类是一端封闭型孔隙,如有一端封闭的锥形孔与楔形孔、一端封闭的圆筒状孔与平行狭缝孔等,此类孔的特点是有利于瓦斯的储集,但不能产生吸附回线;第III类是细颈瓶状孔,也称为墨水瓶孔,这类孔与第II类孔均是一端封闭有利于瓦斯储集的孔隙,不过由于其口小肚大的结构特点,导致其能产生吸附回线,同时在解吸等温线上有一个明显的向下拐点。BRUNAUER等^[14]定义了6种吸附回线中的I—V类曲线,其中IV型与V型存在滞后环,而SING等^[15]又在大量研究的基础上将滞后环分为H1—H4等4种类型的滞后环。从滞后环上看,H2型滞后环宽大而H3型滞后环狭小;从吸附曲线上看,H2型的吸附曲线平稳上升而H3型吸附曲线则在接近饱和蒸汽压时出现毛细凝聚而陡然上升;从脱附曲线上看,H2型脱附曲线较为陡峭,而H3型脱附曲线与吸附曲线较为平行。

由图1可知:致裂前后的煤样均存在滞后环,按照滞后环的特点划分,图1a与图1d煤样可以确定为H2型,图1b与图1c煤样可以确定H3型。图1a中的脱附曲线存在明显拐点,说明原煤中存在大量的墨水瓶状微孔,它们是储集瓦斯的有力场所,这解释了贵州煤层瓦斯含量高的原因。图1b与图1c为 CO_2 致裂后距离致裂孔1与2 m处的煤样等温吸附曲线,可以看出吸附线与脱附线在低相对压力与中相对压力阶段平行,且无拐点,致裂后储集瓦斯的墨水瓶状孔被致裂产生的冲击波破坏,但是其滞后回线仍然存在,说明煤样中的孔隙受到 CO_2 致裂作用后由一端封闭的微孔转化为平行狭缝状的毛细孔。图1a—图1c反映了 CO_2 致裂前后的煤的微观孔隙变化过程,孔隙由墨水瓶孔变成了开放孔,这有利于煤层瓦斯的抽采,有利于消除煤与瓦斯突出。图1d的煤样虽然是在致裂过后取得的,但也有明显的拐点,与图1a的图像结构类似,说明图1d的煤样受到微弱的致裂影响,其孔隙结构只受到有限破坏,即 CO_2 致裂所能影响的半径有限,小于3 m。

2.3 低温液氮孔径分布

为了更好地观察煤样致裂前后孔隙的孔径变

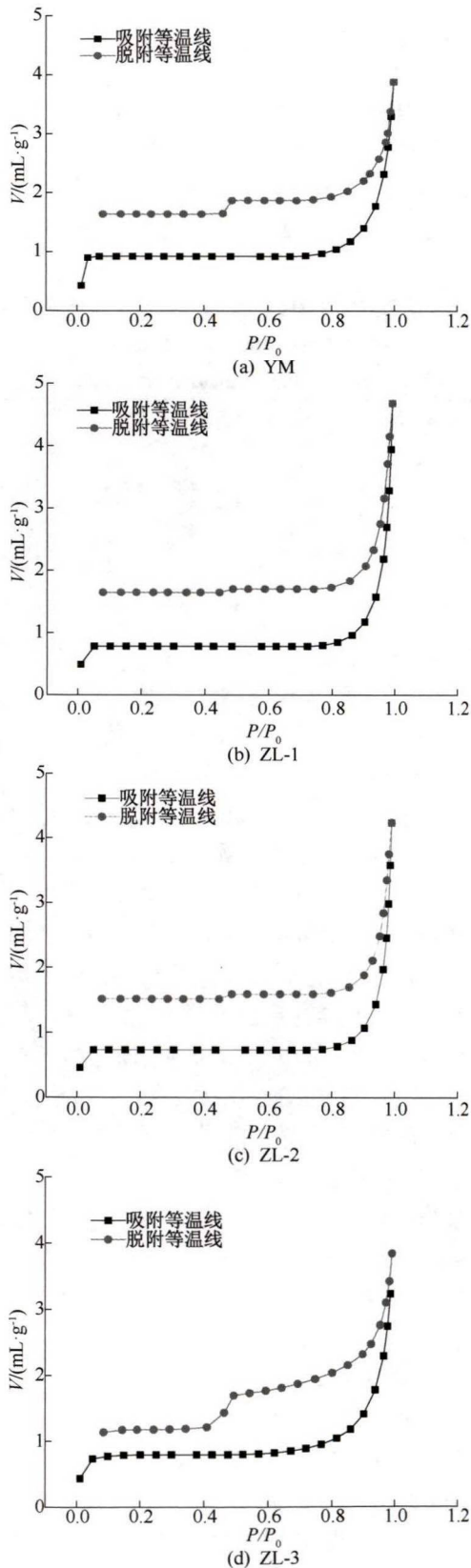


图 1 煤样液氮吸附等温曲线

Fig.1 Nitrogen adsorption isotherm curve of coal sample

化,分别对原煤与致裂后的煤样进行孔径分布测试,所得结果如图 2 所示。图中,左纵坐标 L 代表孔隙

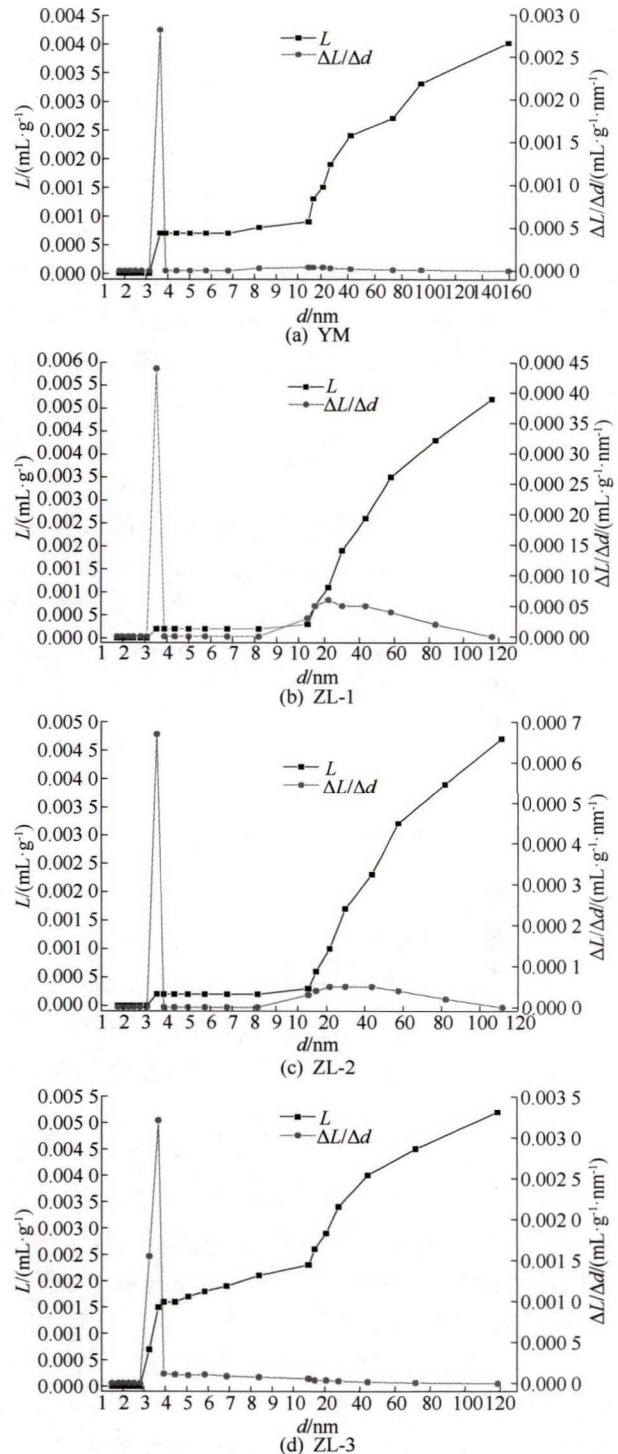


图 2 煤样孔径分布曲线

Fig.2 Pore distribution curve map of coal samples

容积, mL/g; 横坐标 d 代表孔径大小, nm; 右纵坐标 $\Delta L/\Delta d$ 代表平均质量的一定孔径范围内的孔容变化趋势, 反映了不同孔径的孔隙的发育程度, mL/(g·nm)。由图 2 可以看出, 致裂前后微孔的最可几孔直径主要集中在 3~4 nm。图 2a 中微孔的最可几孔到达 0.002 8 mL/(g·nm), 此时介孔与大孔

相对于微孔并不占优势。图 2b 与图 2c 中,微孔的最可几孔达到 0.000 45~0.000 7 mL/(g·nm),致裂后,微孔的数量大幅减少,减少幅度为 76.07%~83.93%。同时介孔与大孔受致裂效果影响,有增多趋势,对比图 2b 与图 2c,图 2a 距离致裂孔最近取得煤样微孔减少的最多,介孔与大孔也发育得最多,而图 2b 距离致裂孔较近的煤样微孔相对于图 2a 煤样减少得较少,介孔与大孔也发育较少。图 2 d 中,微孔的最可几孔又恢复到与图 2a 煤样的微孔水平,达到 0.003 2 mL/(g·nm),同时介孔与大孔的变化趋势几乎与图 2a 煤样的相同,说明 CO₂ 致裂范围有限。

由图 2 中各煤样累计孔容变化,也可以看出原煤的微孔受致裂影响。其变化趋势可以按照孔径大小划分为 2 部分。一是在微孔段孔径,原煤受致裂效果影响微孔段累计孔容先减小,而后由于致裂效果减弱,微孔累计孔容又逐步增加。而在介孔与大孔孔径段存在相反趋势,介孔与大孔累计孔容先增加后逐步减少。

3 孔隙结构分形维数计算

基于低温液氮的分形模型有分形 BET 模型、分形 Langmuir 模型、分形弗仑克-哈尔西-伊尔(Frenkel-Halsey-Hill, FHH)模型等^[16]。其中分形 FHH 模型被广泛用于煤与页岩的分形维数计算。PFEIFER 等^[17]提出基于 FHH 模型的理论计算公式如下:

$$\ln V = k + A \ln \left[\ln \left(\frac{P_0}{P} \right) \right] \quad (1)$$

式中: k 为待定常量; A 为 $\ln V$ 和 $\ln[\ln(P_0/P)]$ 的双对数曲线的斜率,它取决于煤的孔隙分形维数 D 和吸附机制。

基于分形 FHH 模型,前人认为 $\ln V$ 和 $\ln[\ln(P_0/P)]$ 关系式的斜率 A 与分形维数 D 存在明确线性关系,不过就两者之间的线性关系式仍存在争议。当气体吸附压力在较低范围时,由于吸附质在孔隙表面覆盖较少,此时范德华力为吸附质与孔隙表面间的主要作用力,同时固体表面的张力忽略不计;当气体吸附压力较高时,吸附质会在孔隙内壁表面凝聚,这种现象称为毛细凝聚现象,此时吸附质与孔隙表面间的作用力被张力取代。根据图 1 可以看出相对压力在 0.46~1 时出现滞后环,因此,以 $P/P_0=0.46$ 为分界点,分形维数 D 与斜率 A 存在以下关系式:

$$D = \begin{cases} 3A + 3 & (P/P_0 < 0.46) \\ A + 3 & (P/P_0 \geq 0.46) \end{cases} \quad (2)$$

采用 0.46~1 时的数据,按照对应关系式计算致裂前后的孔隙分形维数,以 $\ln V$ 对 $\ln[\ln(P_0/P)]$ 作图,斜率为 A ,结果如图 3 所示。作图后进行一次线性拟合,根据式(2)便可得到 D ,计算结果列于表 2。

表 2 基于分形 FHH 模型的致裂前后煤样分形维数

Tab.2 Fractal dimension of coal samples before and after cracking based on fractal FHH model

煤样 编号	相对压力 $P/P_0 : 0.45 \sim 1.0$		
	A	$D=A+3$	R^2
YM	-0.294 07	2.705 93	0.945 89
ZL-1	-0.446 22	2.553 78	0.948 28
ZL-2	-0.445 97	2.554 03	0.947 09
ZL-3	-0.376 28	2.623 72	0.979 22

根据分形维数的大小可以判断煤岩孔隙内表面的粗糙程度,一般来说三维中煤岩孔隙分形维数的大小在 2~3 之间,分形维数接近 3 代表孔隙内表面粗糙,分形维数接近 2 代表内表面光滑。

根据表 2 的计算结果,4 组煤样的分形维数 D 的范围在 2.553 78~2.705 93 之间变化,其中分维最大值 2.705 93 来源于 YM 煤样,说明致裂前原煤孔隙复杂,孔隙表面粗糙,分维最小值 2.553 78 来源于 ZL-1 煤样,说明 ZL-1 煤样的孔隙表面接近光滑。由于 ZL-1 煤样距离致裂孔最近,所以受到致裂效果最好,相应的分维也最低,ZL-2 与 ZL-3 煤样的分维,由于其逐渐远离致裂孔,致裂产生的冲击波随距离而减弱,相应的其分维也逐步增加。由这 4 个煤样分维的变化趋势来看,CO₂ 致裂不仅对煤的孔隙结构有影响,对煤的孔隙表面复杂程度也会有影响,其变化趋势可以概括为越接近致裂孔,其分形维数越低,煤内部孔隙的表面也会越光滑,随着距离的增加,煤的分形维数会逐步上升直至接近或者说恢复到原煤的分形维数。同时,考虑到分形维数的大小代表孔隙表面的复杂程度,而 CO₂ 致裂会对比表面积产生影响,将分形维数对 BET 比表面积作图,其结果如图 4 所示。

由图 4 可得,在 CO₂ 致裂作用的影响下,分形维数的大小与 BET 比表面积的大小具有正相关关系。原煤由于存在大量微孔孔隙致使其比表面积大,其分形维数也大,所以原煤的孔隙结构复杂,在致裂过后,煤层中的微孔孔隙受致裂冲击变成开放型孔隙,微孔数量与比表面积急剧减少,相应的受冲

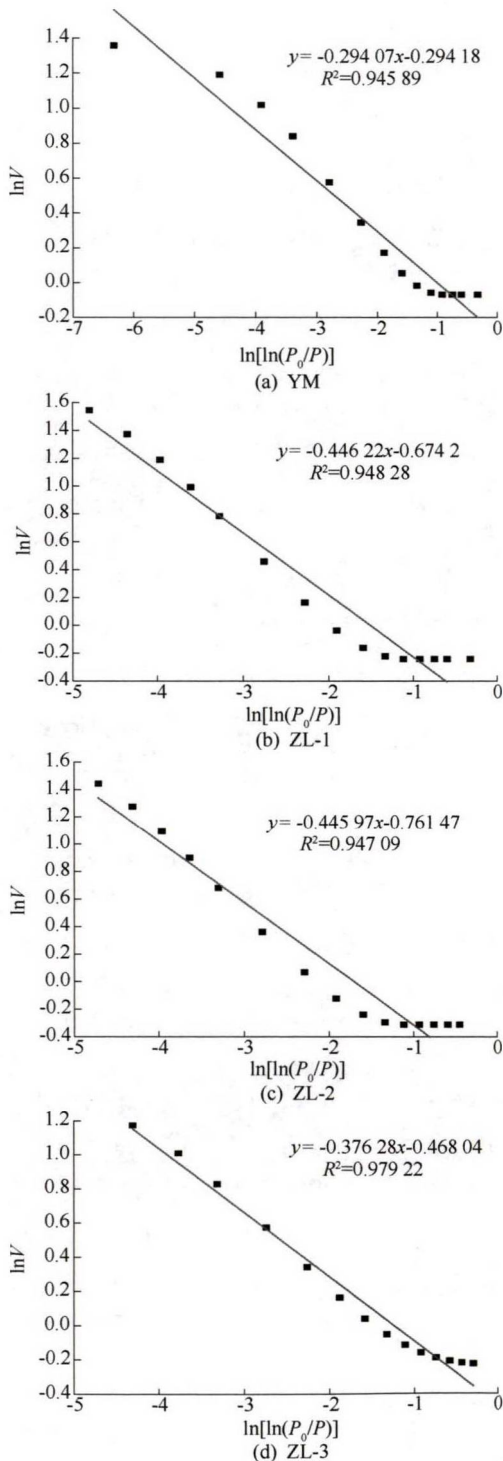


图3 吸附体积与相对压力 ($P/P_0 > 0.45$) 的双对数曲线

Fig.3 Double logarithmic curve of low temperature nitrogen adsorption volume and relative pressure ($P/P_0 > 0.45$)

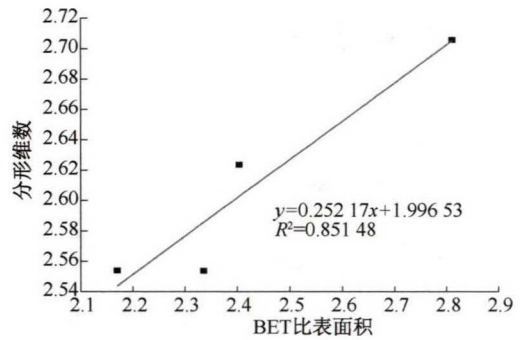


图4 分维与比表面积的关系

Fig.4 Relationship between fractal dimension and specific surface area

数也会较少,而后随着与致裂孔距离的增大,比表面积与分形维数会相应的增大,直至恢复到原煤水平。

4 结论

1) CO₂ 致裂会对煤的比表面积、孔容、平均孔直径与最可几孔直径产生明显影响。致裂后的比表面积与最可几孔直径小于致裂前的比表面积与最可几孔直径,而致裂后的孔容与平均孔直径大于致裂前的孔容与平均孔直径,说明原煤孔隙发育复杂,而CO₂ 致裂能有效降低煤层孔隙复杂程度。

2) 试验所用原煤的滞后环属于 H2 型,致裂后的煤样(在致裂效果影响范围内)属于 H3 型,说明原煤存在大量的“墨水瓶”状微孔,受致裂影响“墨水瓶”状微孔会转变为开放型孔隙。原煤受到 CO₂ 致裂影响后,最可几孔直径仍在 3~4 nm 范围,不过却由原来的 0.0028 mL/(g·nm) 降到最低 0.00045 mL/(g·nm),降低了一个数量级,降幅最大达到 83.93%。

3) 原煤的孔隙分形维数为 2.70593,在 CO₂ 致裂后,最低降到 2.55378,说明 CO₂ 致裂会减缓孔隙表面的复杂程度,有利于煤层孔隙内部的瓦斯流动。在 CO₂ 致裂作用影响下,煤的孔隙分形维数与比表面积存在正相关性。

4) 根据 CO₂ 致裂前后的煤层比表面积、孔容、平均孔直径、最可几孔直径、孔径分布与孔隙分形维数的变化趋势,可以推断 CO₂ 致裂在半径 3 m 以内有显著效果。

参考文献

[1] 陈萍,唐修义. 低温氮吸附法与煤中微孔隙特征的研究[J]. 煤炭学报, 2001, 26(5): 552-556.
CHEN Ping, TANG Xiuyi. Low temperature nitrogen adsorption method and characteristics of micropores in coal[J].

击作用孔隙的表面复杂程度也会减小,所以分形维

- Journal of China Coal Society, 2001, 26(5): 552-556.
- [2] 罗朝义, 江泽标, 郑昌盛, 等. CO₂ 相变致裂技术在顺煤层钻孔增透中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(11): 138-143.
LUO Chaoyi, JIANG Zebiao, ZHENG Changsheng, et al. Application of CO₂ phase transformation cracking technology in borehole seepage improvement in coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(11): 138-143.
- [3] 张海清. 贵州低透煤层 CO₂ 致裂增透技术的试验研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2018.
ZHANG Haiqing. A experimental study on CO₂ cracking and penetration enhancement technology in low permeability coal seams of Guizhou[D]. Guiyang: Guizhou University, 2018.
- [4] 韩俊杰, 梁卫国, 张建功, 等. 煤层处置二氧化碳模拟实验研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(3): 531-536.
HAN Junjie, LIANG Weiguo, ZHANG Jianguo, et al. Simulation experiment of carbon dioxide storage in coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(3): 531-536.
- [5] 张东明, 白鑫, 尹光志, 等. 低渗煤层液态 CO₂ 相变定向射孔致裂增透技术及应用[J]. 煤炭学报, 2018, 43(7): 1 938-1 950.
ZHANG Dongming, BAI Xin, YIN Guangzhi, et al. Research and application on technology of increased permeability by liquid CO₂ phase change directional jet fracturing in low-permeability coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7): 1 938-1 950.
- [6] 岳立新, 孙可明. 超临界 CO₂ 作用时间对煤渗透率和孔隙率的影响规律研究[J]. 应用力学学报, 2018, 35(5): 1 170-1 176, 1 194.
YUE Lixin, SUN Keming. The influence law of action time by supercritical CO₂ on permeability and porosity of coal[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2018, 35(5): 1 170-1 176, 1 194.
- [7] 林海飞, 程博, 李树刚, 等. 煤的吸附孔结构对瓦斯扩散特性影响的实验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(3): 557-563.
LIN Haifei, CHENG Bo, LI Shugang, et al. Experimental study on the effect of adsorption pore structure on gas emission characteristics [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2016, 33(3): 557-563.
- [8] 许江, 袁梅, 李波波, 等. 煤的变质程度、孔隙特征与渗透率关系的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 681-687.
XU Jiang, YUAN Mei, LI Bobo, et al. Experimental study of relationships between metamorphic grade, pore characteristics and permeability of coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(4): 681-687.
- [9] 傅雪海, 秦勇, 薛秀谦, 等. 煤储层孔、裂隙系统分形研究[J]. 中国矿业大学学报, 2001, 30(3): 11-14.
FU Xuehai, QIN Yong, XUE Xiuqian, et al. Fractal study on coal reservoir hole and fracture system[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2001, 30(3): 11-14.
- [10] 刘顺喜, 吴财芳. 比德-三塘盆地煤储层不同尺度孔隙分形特征研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(2): 33-38, 67.
LIU Shunxi, WU Caifang. Study on fractal characteristics of different scales pore coal reservoir in Bide-Santang Basin[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(2): 33-38, 67.
- [11] 李希建, 沈冲辉, 刘钰, 等. 黔西北构造煤与原生结构煤孔隙结构对吸解特性影响实验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(1): 170-176.
LI Xijian, SHEN Zhonghui, LIU Yu, et al. The experimental research on the impact of pore structure in tectonic coal and primary structure coal on gas adsorption-desorption characteristics in northwestern Guizhou[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2017, 34(1): 170-176.
- [12] 董庆祥, 王兆丰, 韩亚北, 等. 液态 CO₂ 相变致裂的 TNT 当量研究[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(11): 84-88.
DONG Qingxiang, WANG Zhaofeng, HAN Yabei, et al. Research on TNT equivalent of liquid CO₂ phase-transition fracturing[J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(11): 84-88.
- [13] 吴俊. 煤微孔隙特征及其与油气运移储集关系的研究[J]. 中国科学: B 辑, 1993, 23(1): 77-84.
WU Jun. Study on the characteristics of coal micro-pore and its relationship with hydrocarbon migration and reservoir[J]. Scientia Sinica: Chimica, 1993, 23(1): 77-84.
- [14] BRUNAUER S, DEMING L S, DEMING W E, et al. On a theory of the Vander Waals adsorption of gases[J]. Journal of the American Chemical Society, 1940, 62 (7): 1 723-1 732.
- [15] SING K S W, EVERETT D H, HAUL R A W, et al. Reporting physisorption data gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity[J]. Pure and Applied Chemistry, 1985, 57(4): 603-619.
- [16] 宋晓夏, 唐跃刚, 李伟, 等. 中梁山南矿构造煤吸附孔分形特征[J]. 煤炭学报, 2013, 38(1): 134-139.
SONG Xiaoxia, TANG Yuegang, LI Wei, et al. Fractal characteristics of adsorption pores of tectonic coal from Zhongliangshan southern coalmine[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(1): 134-139.
- [17] PFEIFER P, WU Y J, COLE M W, et al. Multilayer adsorption on a fractally rough surface[J]. Physical Review Letters, 1989, 62 (17): 1 997-2 000.

作者简介: 彭鑫 (1994—), 男, 贵州贵阳人, 硕士研究生, 研究方向为矿山灾害防治等方面的研究。E-mail: 18085082532@163.com。

