

二氧化碳冲击致裂对煤中孔隙结构演化的研究

赵云霞¹, 江泽标^{1,2}, 陈思粮¹, 高世康¹, 莫桥顺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)

摘要: 为了探究二氧化碳冲击致裂对煤多维尺度孔隙结构的影响, 该文通过压汞实验、低温氮气吸附/解吸实验及二氧化碳吸附/解吸实验, 定量分析了二氧化碳冲击致裂作用下煤体的孔隙结构特性。实验结果表明, 与原煤相比, 致裂煤的大孔、中孔和微孔的比表面积分别增加了 3.957 m²/g、11.112 m²/g 和 39.182 m²/g, 孔容分别增加了 0.037 5 cm³/g、0.018 3 cm³/g 和 0.007 5 cm³/g。在 50~2 000 nm 孔径范围内, 致裂煤的进汞量明显增加; 在 1.06~50 nm 范围内, 孔隙体积为原煤的 3~8 倍; 在 0.38~1.06 nm 范围内, 总孔容增加了 26.4%。致裂煤的大孔和微孔分形维数减小, 表明结构复杂性降低。该文对致裂前后煤体多尺度孔隙结构演化的研究, 能够为煤层瓦斯治理的应用提供理论支持。

关键词: 二氧化碳致裂; 孔隙结构演化; 分形特征

中图分类号: TD712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-4956(2025)03-0094-10

二氧化碳相变冲击致裂, 作为一种新兴低透煤层改造增透技术, 逐渐引起了广泛关注, 有关学者开展了一系列研究。在现场应用方面, 张东明^[1]等在中国四川白皎煤矿的实验表明, CO₂ 相变致裂对致裂煤层瓦斯抽采量平均提高 12 倍, 致裂区域瓦斯抽采量提高 5.43 倍。Wang^[2]等在中国山西煤矿进行煤层压裂后, 瓦斯抽采量相比原来提高将近 1 倍。在理论方面, 学者们主要基于断裂力学研究二氧化碳相变致裂后裂纹扩展机理, 以及裂纹在应力波作用下的扩展半径^[3]。在设备方面, 学者们主要研究改进致裂器结构、泄能口形状及定压片厚度和强度^[4-5]。

虽然二氧化碳相变致裂研究大多为现场的实际运用效果和致裂器的改进, 但由于煤是一种多孔固体材料, 内部含有大量孔裂隙, 这些孔裂隙的结构是影响瓦斯解吸、扩散和运移的重要因素^[6-8]。而二氧化碳相变致裂可能改变煤的孔隙结构, 因此, 众多学者的研究集中于其对煤微观孔隙结构的影响。Liu 等运用压汞法和渗透性实验探究发现, 二氧化碳相变压裂技术对过渡孔的影响较小, 但是对孔径大于 100 nm 的孔有显著影响^[9]。众多学者借助压汞实验发现二氧化碳相变致裂对煤中较大孔和孔容有增大影响^[10-12], 一方面

压汞实验需在较高压力下测得较小孔隙参数, 另一方面高压会引起煤基质压缩和孔隙破坏, 所以对于较小孔隙的参数多借助物理吸附法(低压二氧化碳吸附)来获得^[13-14]。目前, 对于二氧化碳相变冲击致裂作用下煤体的孔隙结构特征, 需要在多维孔隙结构特征方面进行系统研究。

本文对不同煤矿的煤样在致裂前后分别进行实验, 采用压汞法、低压二氧化碳及低温氮气吸附法从孔隙结构特征方面, 对致裂前后煤样的微观孔隙结构进行了多维尺度定量表征, 并结合分形维数对孔隙进行定量表征, 计算了致裂前后煤体的分形维数, 分析了致裂前后煤岩孔隙的复杂特征, 对瓦斯抽采和煤层气的有效利用进行了可采性评价。

1 实验部分

1.1 煤样制备与工业分析

本研究采集的实验煤样来自贵州六盘水河边煤矿和保兴煤矿, 分别取原煤和 CO₂ 冲击致裂后的煤样, 粒径为 0.1~1 cm。原煤在打致裂孔过程中采集, 致裂煤样则在打抽采孔时取样。为研究 CO₂ 致裂对煤孔隙的影响, 依据 GB/T 212—2008 标准对所有样品进行工

收稿日期: 2024-11-15

基金项目: 贵州省科技厅资助项目(黔科合支撑[2020]4Y050号)

作者简介: 赵云霞(1999—), 女, 贵州毕节, 在读硕士研究生, 主要从事矿山安全方面的研究, 375548146@qq.com。

通信作者: 江泽标(1972—), 男, 贵州贵阳, 硕士, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事矿山灾害防治方面的研究, zbjiang@gzu.edu.cn。

引文格式: 赵云霞, 江泽标, 陈思粮, 等. 二氧化碳冲击致裂对煤中孔隙结构演化的研究[J]. 实验技术与管理, 2025, 42(3): 94-103.

Cite this article: ZHAO Y X, JIANG Z B, CHEN S L, et al. Carbon dioxide impact fracturing on the evolution of the pore structure of the coal body[J]. Experimental Technology and Management, 2025, 42(3): 94-103. (in Chinese)

业分析。六盘水煤样经两次粉碎后, 用标准振动筛筛选出所需粒径, 实验样品为原煤与 CO₂ 致裂煤, 煤样编号如表 1 所示。

表 1 煤样取样地及编号

煤样编号	煤样类型	取样位置	取样运输巷	取样煤矿
A1	原煤	6号钻场	113102	河边煤矿
A2	致裂煤	6号钻场	113102	河边煤矿
B1	原煤	下帮钻场	21106	保兴煤矿
B2	致裂煤	下帮钻场	21106	保兴煤矿

依据《GB/T212—2008》和《GB/T 23561.12—2021》标准, 对煤样进行了工业分析和坚固性系数测试, 结果如表 2 所示。

表 2 煤样基础物性参数

煤样编号	工业分析				坚固性系数 f
	Mad/%	Ad/%	Vdaf/%	FCad/%	
A1	1.88	14.97	15.55	85.04	0.49
A2	2.09	15.82	25.46	84.17	0.36
B1	1.91	15.71	24.22	84.41	0.51
B2	2.05	15.87	21.03	84.12	0.44

注: Mad 为含水率; Ad 为灰分; Vdaf 为挥发分; FCad 为固定碳。

表 2 的基础物性参数结果显示, 致裂煤的坚固系数降低且含水率比原煤高, 可能是由于裂隙和孔隙较多, 结构更为疏松, 因此更容易吸收和储存水分的缘故。灰分、挥发分及固定碳的含量在致裂前后相对稳定, 说明致裂对这些成分的影响不显著。

1.2 实验方法

(1) 高压压汞实验。采用美国麦克默瑞提克 AutoPore IV9520 型压汞仪, 对 1~2 mm 粒径的煤样 (2~3 g) 在 393.15 K 条件下干燥脱气 12 h, 然后进行大孔孔径的定量表征。

(2) 低温氮气吸附/解吸实验。采用美国麦克 ASAP 2020 设备进行低温液氮吸附/解吸测试。将约 1 g 粒径为 0.18~0.25 mm 的煤样在 393.15 K 下干燥脱气 24 h, 然后通过低温氮气吸附/解吸方法对孔隙结构进行定量分析。

(3) 低温二氧化碳吸附/解吸实验。低温二氧化碳吸附/解吸实验所用仪器以及实验原理与低温氮气吸附/解吸实验完全相同, 只是由于二氧化碳气体分子更小, 其扩散速率更快, 能够进入更小的孔隙中, 因此可以更好地表征煤样的小孔结构特征。

1.3 分析方法

1.3.1 Sierpinski 模型

Sierpinski 地毯模型是一种经典的分形结构模型,

常用于模拟自然界中的不均匀介质。其构建过程包括三个主要步骤: 首先, 从一个大正方形起步, 将其视为地毯的基础; 其次, 将这个正方形划分为 9 个大小相等的正方形, 并移除中心的正方形, 留下周围的 8 个; 最后, 对这 8 个小正方形重复这一过程, 直至完成预定的迭代次数, 从而形成最终的地毯图案。该模型的表面分形维数如式 (1) 所示^[15]

$$V = a(P - P_t)^{3-D} \quad (1)$$

式中: V 为样品进汞量, mL; P_t 为阀门压力, MPa; P 为压力, MPa; D 为分形维数; a 为常数。

对式 (1) 两边同时取对数, 即可得到式 (2)

$$\ln V = (3 - D) \ln(P - P_t) + \ln a \quad (2)$$

根据煤样的压汞数据, 计算出 $\ln V$ 与 $\ln(P - P_t)$, 绘制相应图表以确定 K 值。通过这一过程, 能够计算出煤样品孔隙的分形维数, 具体计算公式如式 (3)

$$D = 3 - K \quad (3)$$

1.3.2 FHH 模型

FHH 模型由 Pfeiferper 等提出, 其对应的方程表达式如式 (4) 所示^[16]

$$\ln V = a \ln \left[\ln \left(\frac{P_0}{P} \right) \right] + b \quad (4)$$

式中: P 、 P_0 为饱和蒸汽压和实验平衡压力, MPa; V 为当压力为 P 时, 氮气的吸附体积, cm³/g; a 、 b 为与函数相关的拟合常数。其中 a 表示 $\ln V$ 与 $\ln[\ln(P_0/P)]$ 绘制的双曲线斜率。 a 与分形维数的关系主要取决于吸附机制: 当范德华力为主时, 使用式 (5) 计算; 当气液表面张力为主时, 使用式 (6) 计算。

$$D = 3a + 3 \quad (5)$$

$$D = a + 3 \quad (6)$$

2 结果与讨论

2.1 实验结果

2.1.1 压汞实验结果

通过压汞法 (MIP) 测试原煤和致裂煤样的进汞和退汞曲线 (见图 1), 从孔隙连通性角度分析煤样的有效孔、无效孔和闭合孔特征。无效孔容易滞留汞液, 而有效孔能够有效排出汞液, 闭合孔则不接纳汞液^[17]。无效孔导致进汞与退汞曲线之间出现显著滞后, 形成滞后环, 这主要归因于“墨水瓶效应”和“接触角”理论^[18]。在进汞过程中, 汞液进入复杂孔隙网络, 但退汞时部分汞液因孔隙结构复杂性残留在孔隙中。原煤与致裂后煤的滞后环均揭示了孔隙结构的连通性和复杂度的变化情况。

比较致裂煤和原煤的进/退汞曲线, 得到前者的滞后环更大, 表明开放型孔隙显著增多。原煤与致裂后

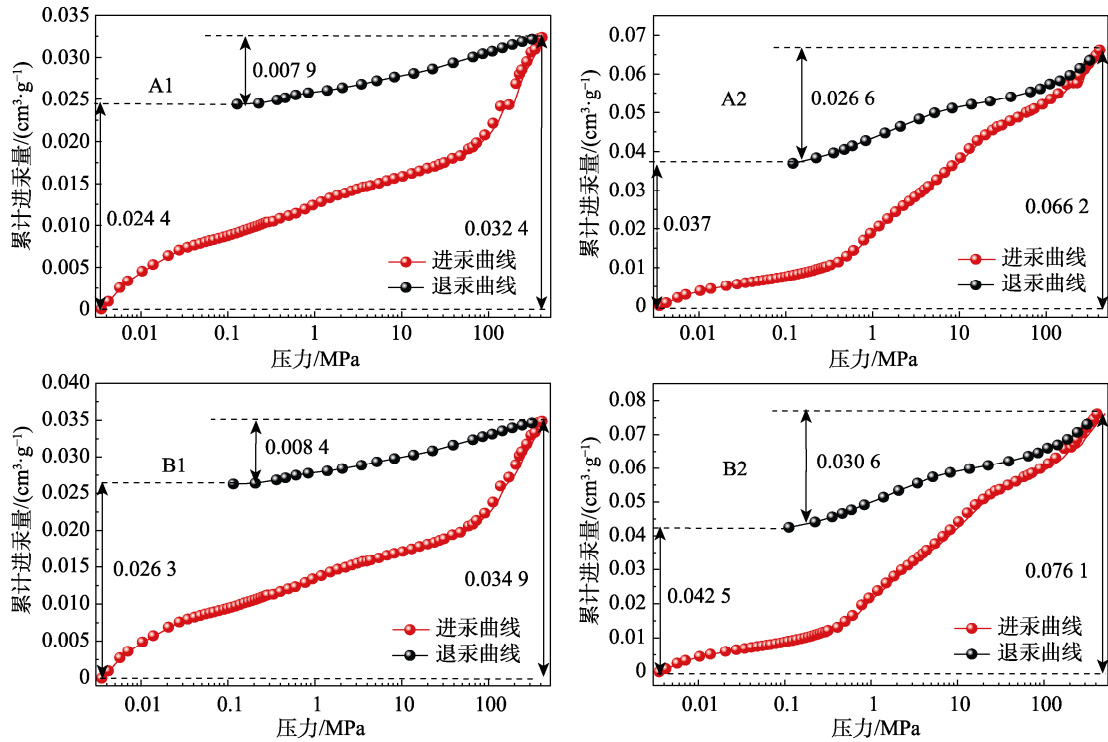


图1 致裂前后煤样的进/退汞曲线

煤的滞后环均揭示了孔隙结构的连通性和复杂度的变化情况。原煤的总孔容(A1、B1)分别为0.0324 cm³/g和0.0349 cm³/g,有效孔容分别为0.0079 cm³/g和0.0084 cm³/g,无效孔占比分别为75.30%和75.35%;致裂煤的总孔容(B2、B2)分别为0.0662 cm³/g和0.0761 cm³/g,有效孔容分别为0.0266 cm³/g和0.0370 cm³/g,无效孔占比分别降至55.89%和55.84%。二氧化碳冲击致裂显著发育了煤体中的大孔结构,提

升了瓦斯运移能力,减少了瓦斯富集区形成,从而降低了煤与瓦斯突出风险。

2.1.2 低温氮气吸附实验结果

低温氮气吸附是一种基于物理吸附来表征煤样孔隙形态和连通性的方法,测试过程中不会对煤样的孔隙结构造成破坏。在相对压力(P/P_0)介于0.0116~0.9934范围时,对不同煤矿的煤样进行致裂前后氮气吸附和解吸等温线测定,并绘制出相应的等温线图,如图2所示。

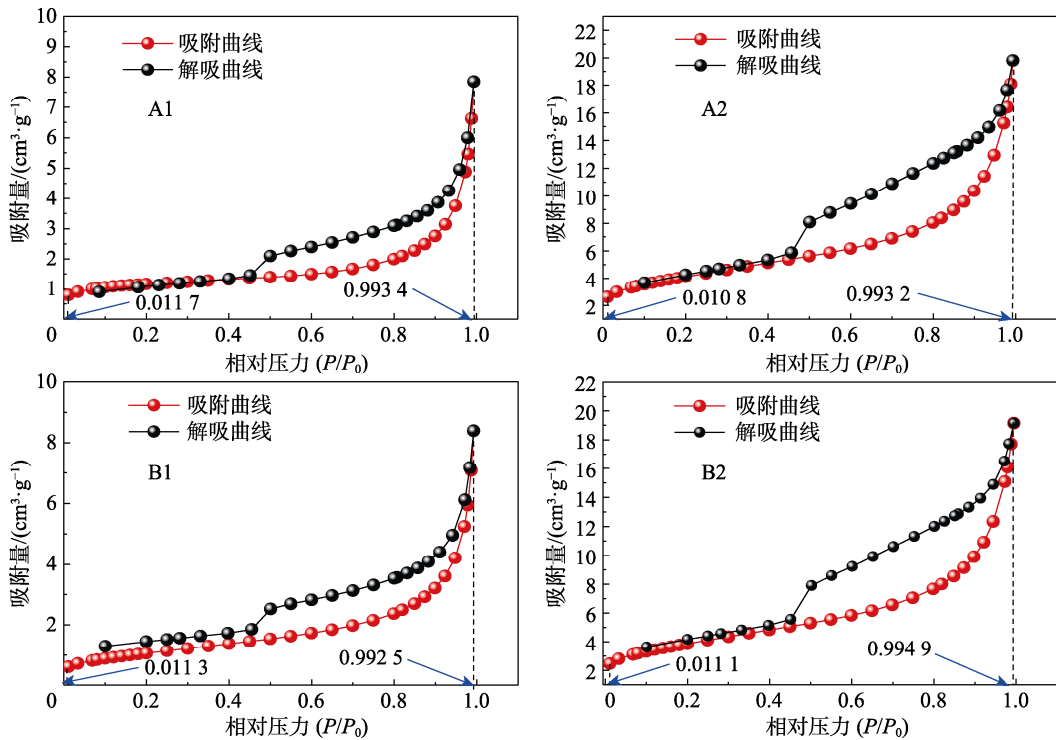


图2 致裂前后煤样的低温氮气吸附/解吸等温线

根据 IUPAC 物理吸附等温线的 8 种类型 (见图 3)^[17], 煤样在致裂前后的吸附等温线表现出 I、III 和 V 型等温线的特征组合, 揭示了煤样中微孔结构的丰富性。在相对压力低于 0.05 时, 吸附等温线急剧上升, 显示出 I 型等温线的特征, 这表明氮气迅速渗

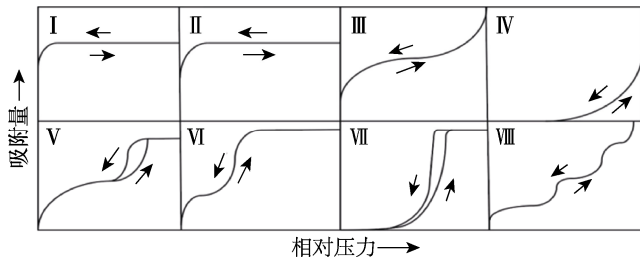


图 3 IUPAC 物理吸附等温类型图

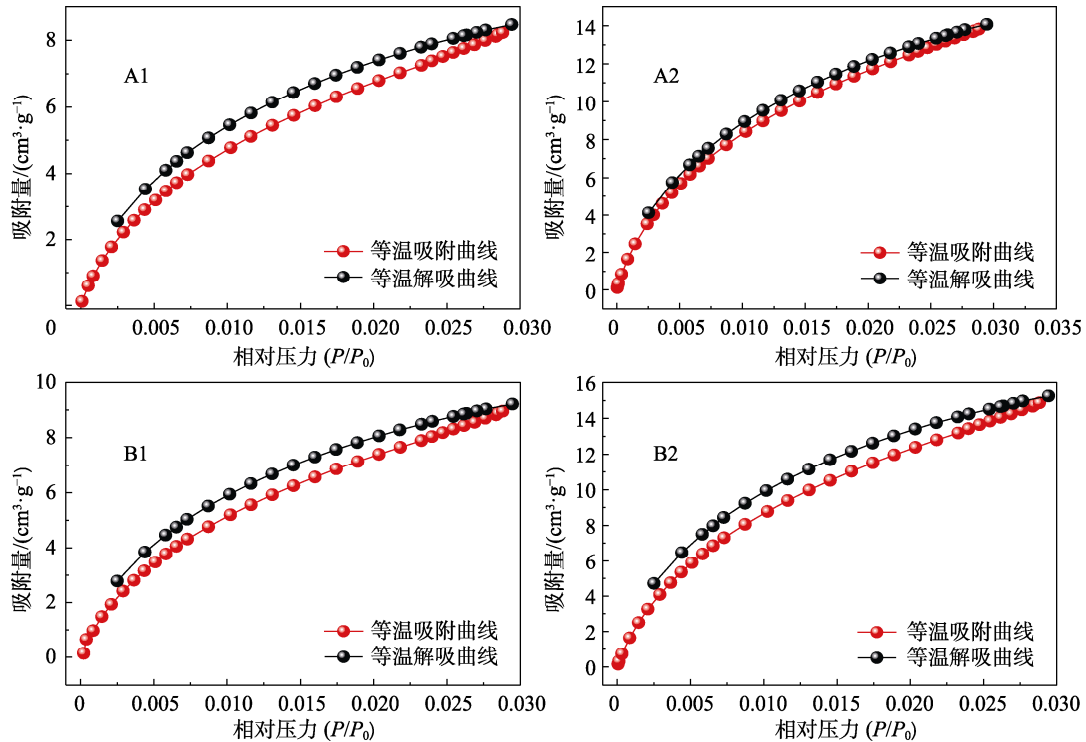


图 4 致裂前后煤样吸附/解吸等温线

在低压二氧化碳吸附/解吸测试中, 致裂前后的煤样等温线随相对压力的增大呈外凸增长趋势, 符合第 I 类吸附等温线特征, 表明煤中微孔结构较为丰富^[19]。在相对压力接近 0.029 时, 原煤 (A1、B1) 的二氧化碳吸附量分别为 8.466 7 cm³/g 和 9.220 2 cm³/g, 致裂煤 (A2、B2) 的二氧化碳吸附量分别为 14.073 2 cm³/g 和 15.255 7 cm³/g, 致裂后二氧化碳的吸附量分别增加了 66.22% 和 65.46%, 说明二氧化碳的冲击致裂让煤体孔隙结构进一步发育, 形成了更为丰富的孔隙结构。

2.2 多尺度孔隙结构的孔径分布特征

2.2.1 大孔孔径分布特征

根据致裂前后煤样的进/退汞曲线 (见图 1) 和

透并填充了微孔; 在 0.05 处出现转折。在解吸过程中, 当 $P/P_0 > 0.44$ 时, 出现滞后回线, 并在 0.45 处形成第二个转折点, 符合 V 型等温线特征, 表明样品中存在墨水瓶孔和开放孔结构。当相对压力在 $0.8 < P/P_0 < 1$ 时, 吸附/解吸快速上升, 符合 III 类等温线, 表明大孔隙的存在^[18]。该吸附揭示了煤样孔隙结构的复杂性与多样性。

2.1.3 二氧化碳吸附实验结果

低压二氧化碳吸附实验与低温氮气吸附实验使用的仪器相同, 但由于吸附气体、测试温度和压力范围的差异, 所获得的孔隙有所不同。在相对压力 (P/P_0) 为 0.000 1~0.029 4 范围内, 进行了二氧化碳吸附和解吸测试, 并绘制了低压二氧化碳吸附/解吸等温线, 如图 4 所示。

Washburn^[20]公式 (7), 即可得到致裂前后煤样的孔径分布规律, 如图 5 所示。

$$P_r = \frac{-2\sigma \cos\theta}{r} \quad (7)$$

式中: P_r 为汞液进入孔隙结构所需要的外界压力, MPa; σ 为汞的表面张力, 为 0.48 N/m; θ 为汞液与煤孔隙表面的接触角, 为 140°; r 为孔隙半径, nm。

对比致裂前后煤样的孔径与累计进汞量可见, 原煤在孔径 7~30 nm 范围内累计进汞量迅速下降, 并在约 6 nm 处达到峰值; 而致裂煤样的累计进汞量在孔径 1 000~3 000 nm 范围内才出现显著下降, 并在约 1 000 nm 处出现峰值。孔径分布曲线显示, 原煤 (A1、B1) 在

50~2 000 nm 范围内的累计进汞量明显低于致裂煤样, 表明二氧化碳冲击致裂显著增加了中大孔的数量, 进而增强了致裂后煤层的瓦斯运移性能, 相比原生煤层具有更优越的瓦斯排放与运移特性。

2.2.2 煤中中孔孔径分布特征

在低温氮气吸附实验中, 两种常用的孔隙结构分

析技术是 Barrett-Joyner-Halenda (BJH) 方法和 Density Functional Theory (DFT) 方法。BJH 法基于 Kelvin 毛细凝聚理论, 广泛应用于中孔孔径分布的计算^[10]。通过 BJH 法分析致裂前后煤样的低温氮气等温吸附数据 (见图 2), 得到孔径、累计孔容及孔隙体积的分布, 如图 6 所示。结果显示, 致裂煤的累计孔容约为

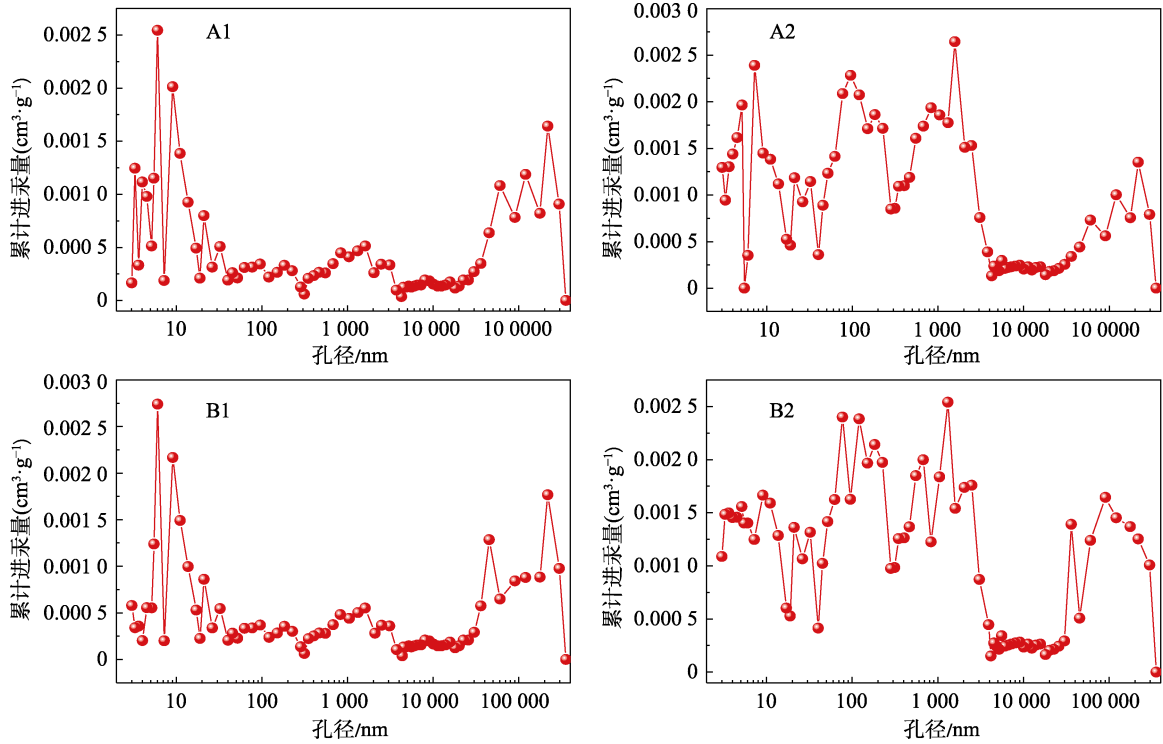


图 5 致裂前后煤样压汞测试孔径分布

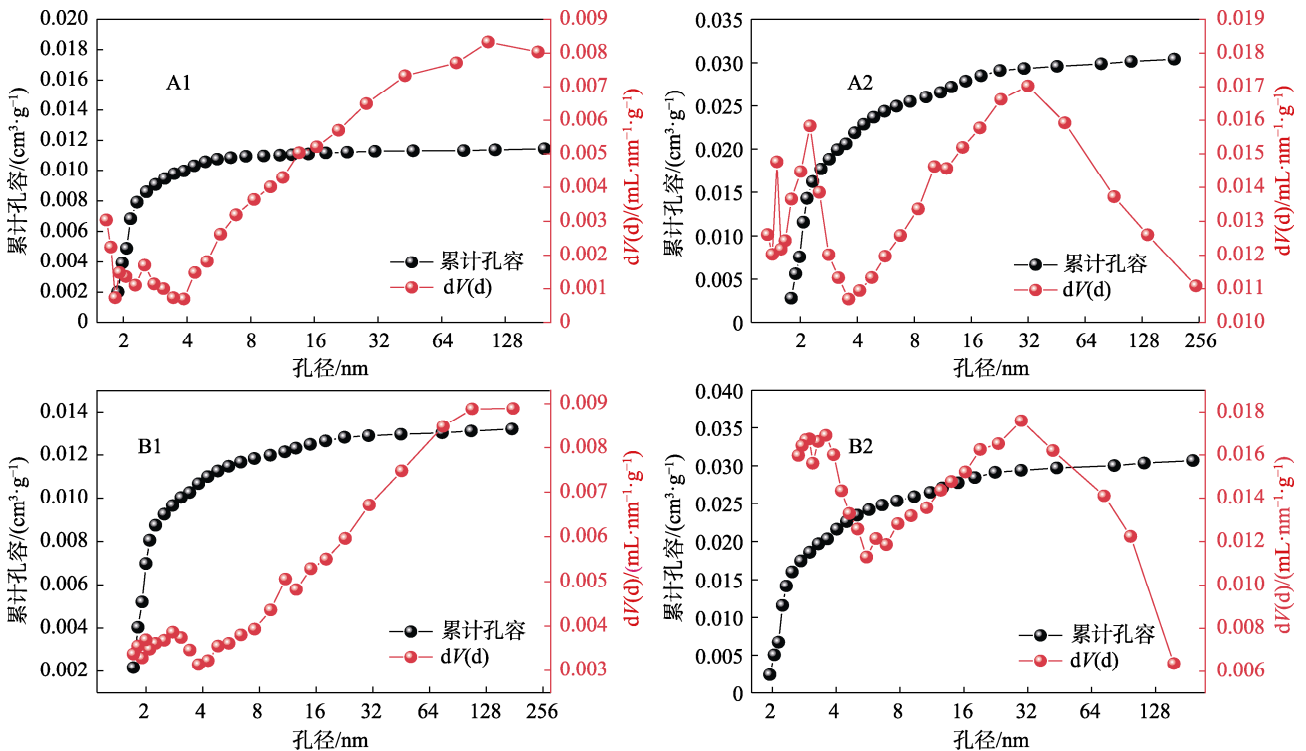


图 6 致裂前后煤样氮气吸附测试孔径分布

原煤的 3 倍, 且在孔径 1.06~50 nm 范围内, 致裂煤的孔隙体积是原煤的 3~8 倍, 验证了 CO₂ 冲击致裂显著促进了煤体中孔隙结构的发育, 且与压汞测试结果一致。

2.2.3 微孔孔径分布特征

为分析致裂前后煤样的低压二氧化碳等温吸附数据, 采用 DFT 方法得到孔径、累计孔容及孔隙体积分布特征 (见图 7)。体积分布结果表明, 煤样呈双峰分布, 峰值位于约 0.55 nm 和 0.85 nm 附近。原煤(A1、B1)的最高峰值分别为 0.153 cm³/g 和 0.163 cm³/g, 而致裂煤(A2、B2)的最高峰值分别为 0.146 cm³/g 和 0.157 cm³/g。致裂煤的体积分布曲线整体位于原煤曲线之上。累计孔容分析显示, 孔径 0.38~1.06 nm 范围内, 原煤(A1、B1)的总孔容分别为 0.026 76 cm³/g 和

0.029 16 cm³/g, 而致裂煤(A2、B2)分别为 0.035 74 cm³/g 和 0.034 78 cm³/g, 表明二氧化碳致裂使煤体微孔总孔容平均增加 26.4%。

2.3 煤中孔比表面积和孔容分布规律

二氧化碳冲击致裂改变了煤体的孔隙结构, 使致裂煤样较原煤样的孔比表面积和孔容均有明显提升 (见图 8), 其中大孔、中孔和微孔的比表面积分别增加了 3.957 m²/g、11.112 m²/g 和 39.182 m²/g, 孔容则分别增加了 0.037 5 cm³/g、0.018 3 cm³/g 和 0.007 5 cm³/g。微孔比表面积占总面积的比例超过 84%, 对比表面积的贡献最大; 而大孔的孔容占比超过 45%, 是煤体孔容的主要组成部分。研究结果显示, 二氧化碳冲击致裂有效促进了煤体孔隙结构的发展, 对提升煤层气采收具有潜在应用价值。

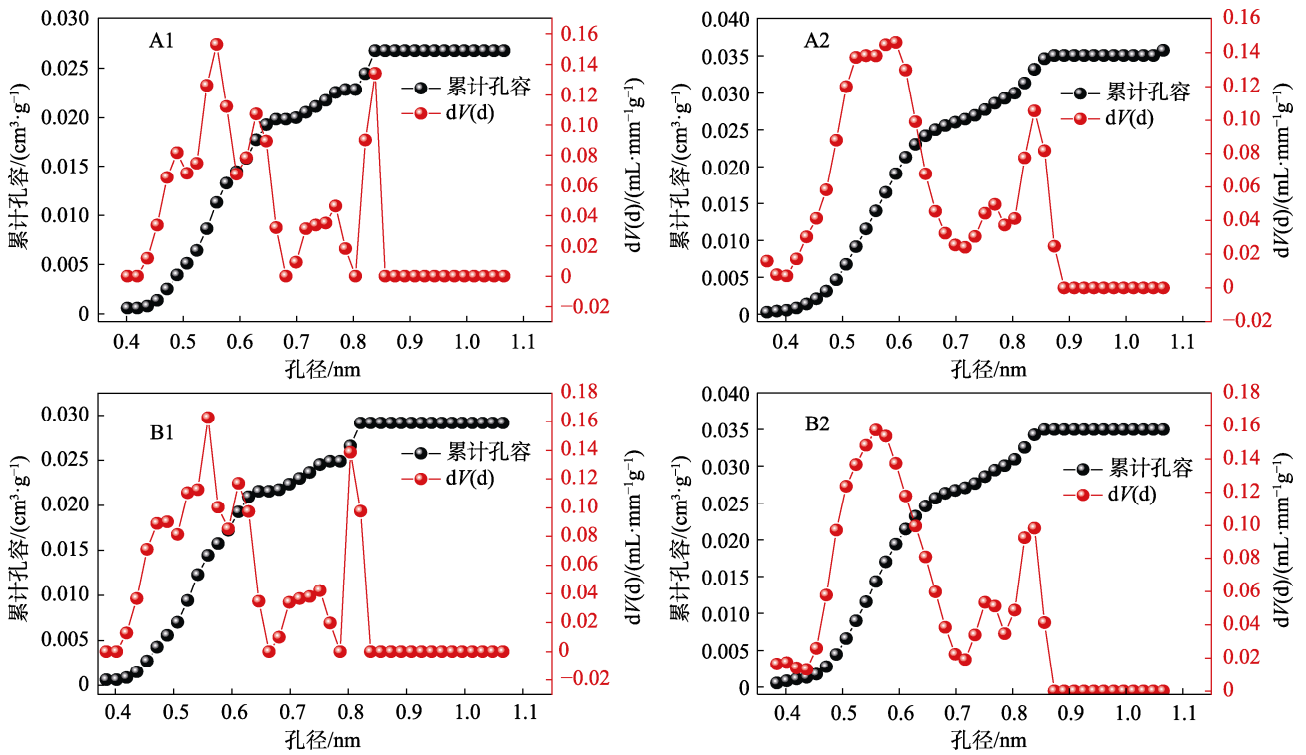


图 7 致裂前后煤样二氧化碳吸附测试孔径分布

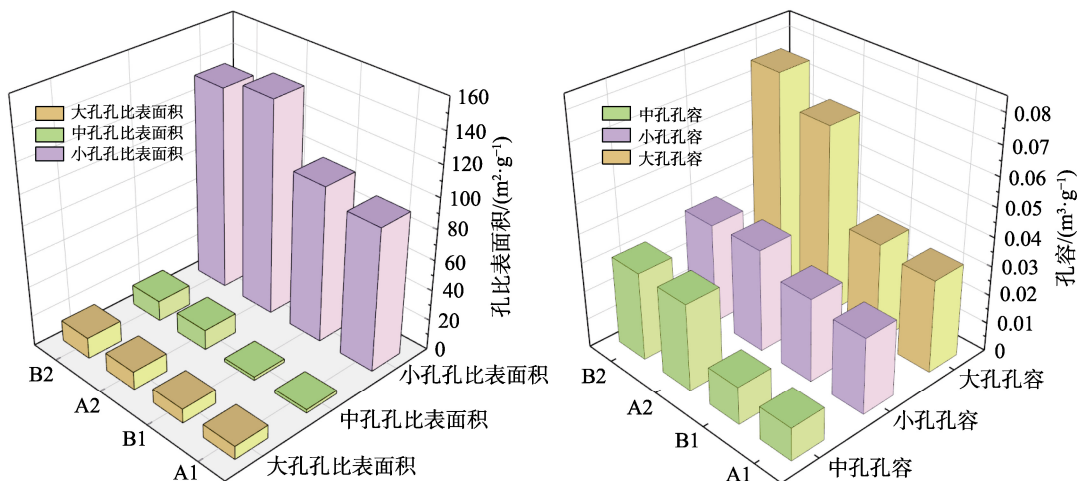


图 8 致裂前后煤中孔比表面积和孔容分布

2.4 孔隙分形特征

2.4.1 煤中大孔分形特征

在高压压汞实验中,当压力大于 10 MPa 时,煤基质的收缩会影响孔隙结构的真实表征。所以本文选择了压力小于 10 MPa 的压汞数据来计算大孔的分形维数。Gan^[21]等人的研究发现,不同压力条件下的分形曲线呈现出不同的变化趋势。因此,将小于 10 MPa 的压力范围进一步划分为低压区(0.01~0.1 MPa)和中压区(0.1~10.0 MPa)。将致裂前后煤样的进/退汞数据代入式(2),并以 $\ln V$ 与 $\ln(P-P_i)$ 作图(见图 9),分形维数的结果如表 3 所示。

整体来看,所有煤样的分形维数均在 2.641~

2.868 范围内,相关性系数在 0.953 5~0.991 9 之间。由图 9 可知,原煤的分形维数都大于致裂煤,说明二氧化碳冲击致裂能够降低煤体内部的复杂性,能使孔隙结构变得更简单,并且使其连通性增强,非均质性减弱。从压力区间来看,低压区对应的孔隙尺寸为 10 000~35 000 nm,中压区为 100~10 000 nm。比较两区间的分形维数,发现除原煤 B1 外,中压区的分形维数普遍低于低压区,表明两区间的结构特征存在显著差异。这与 Gan 等人^[21]的研究结果一致,不仅说明压力区间划分对分形维数有影响,也表明二氧化碳冲击导致的裂纹减少了煤体大孔的分形维数。

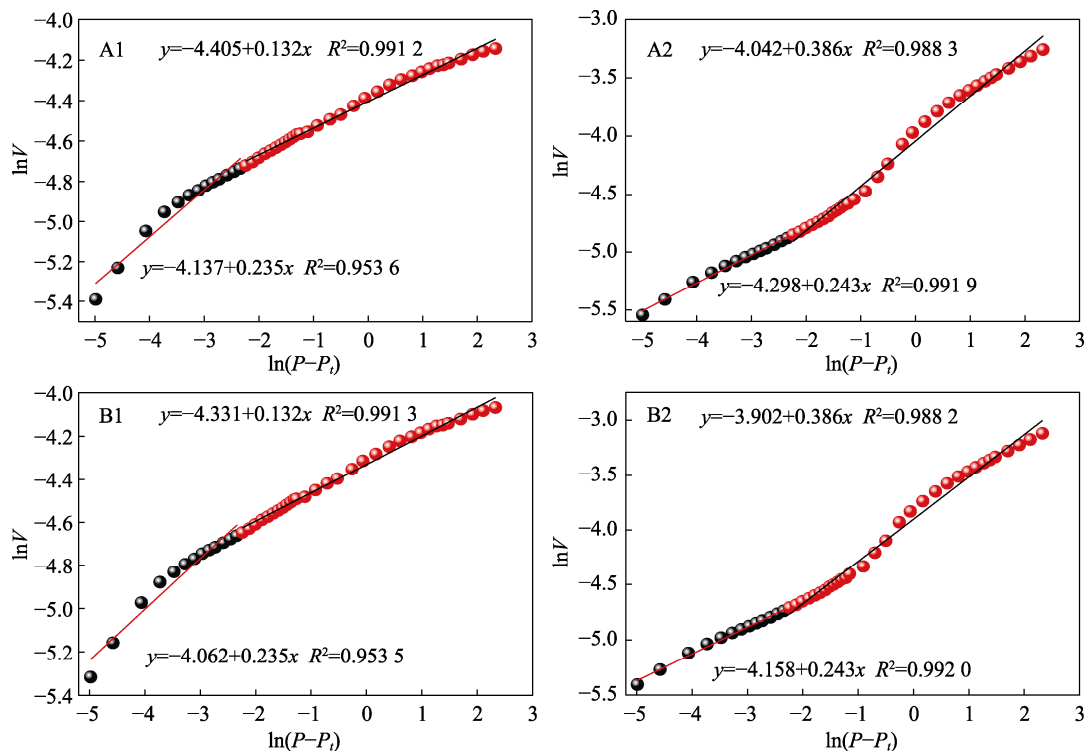


图 9 致裂前后煤样压汞数据分形特征

表 3 致裂前后压汞数据的分形维数结果

煤样编号	压力区间(0.01~0.1 MPa)		压力区间(0.1~10.0 MPa)	
	D_d	R^2	D_g	R^2
A1	2.868	0.991 2	2.765	0.953 6
A2	2.757	0.991 9	2.614	0.988 3
B1	2.765	0.953 5	2.868	0.991 3
B2	2.757	0.992 0	2.61 4	0.988 2

注: D_d 和 D_g 都代表不同孔径维数,为了区分所以用 D_d 和 D_g 表示。例如 D_d 代表图 9 中的红色线段部分, D_g 代表图 9 中黑色线段部分。下同。

2.4.2 煤中中孔分形特征

将致裂前后煤样的低温氮气吸附数据代入式(4),以 $\ln[\ln(P_0/P)]$ 对 $\ln V$ 作图,获得致裂前后煤的中孔分形曲线(见图 10)。通过计算该曲线的斜率可

以得到分形维数^[22]。由于不同压力曲线对应的孔径分布不同,压力区间被划分为 $P/P_0 < 0.5$ 和 $P/P_0 \geq 0.5$ 两个部分,其中 $P/P_0 < 0.5$ 对应的孔径范围为 1.79~10.00 nm, $P/P_0 \geq 0.5$ 对应的孔径范围为 10.00~190.00 nm。对两个区间内的低温氮气吸附数据进行分段拟合,并将所有煤样在不同压力区间的分形维数汇总至表 4 中。

致裂前后煤样在不同压力区间的分形维数介于 2.507~2.720 之间,相关系数在 0.964 1~0.998 9 之间。对比 $P/P_0 < 0.5$ 区间的分形维数,未发现显著规律;而在 $P/P_0 \geq 0.5$ 区间,原煤的分形维数均低于致裂煤。结合煤样类型与压力区间的相关性系数,原煤(A1)在 $P/P_0 < 0.5$ 区间表现出较低的相关性,而其他煤样在致裂前后的分形维数变化规律一致。这表明分形维数

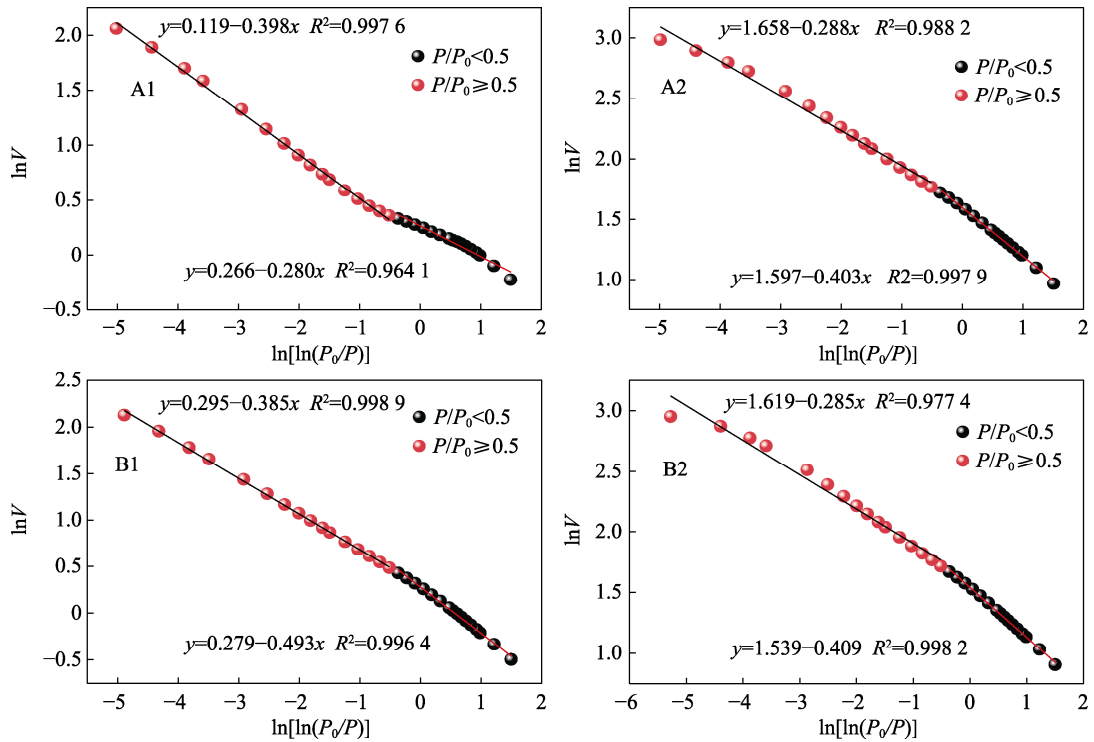


图 10 致裂前后煤样氮气吸附数据分形特征

表 4 致裂前后低温氮气吸附数据的分形维数结果

煤样编号	压力区间 (0.01~0.1 MPa)		压力区间 (0.1~10.0 MPa)	
	D_d	R^2	D_g	R^2
A1	2.720	0.9641	2.602	0.9976
A2	2.597	0.9979	2.712	0.9882
B1	2.507	0.9964	2.615	0.9989
B2	2.591	0.9982	2.715	0.9774

的变化可能受测试压力和孔隙尺寸影响, 且二氧化碳冲击致裂对不同孔隙尺寸的煤结构影响不同。

2.4.3 煤中微孔分形特征

将致裂前后煤样的低压二氧化碳吸附数据代入式 (2), 并以 $\ln(P-P_i)$ 对 $\ln V$ 作图, 获得了原煤与致裂煤的微孔分形曲线 (见图 11)。根据曲线斜率, 计算出不同煤样的分形维数 D , 结果汇总于表 5。

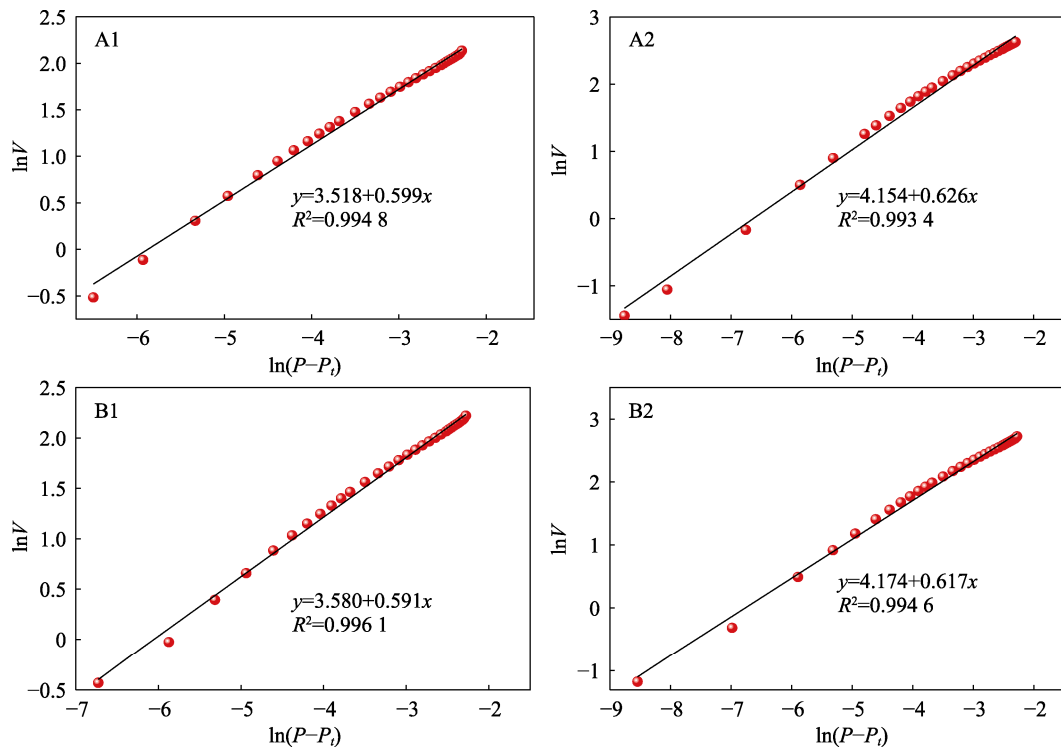


图 11 致裂前后煤样二氧化碳吸附数据分形特征

致裂前后煤样的分形维数介于 2.374~2.409 之间, 相关性系数在 0.993 4~0.996 1 范围内, 表明 Sierpinski 模型能有效反映煤样微孔结构特征。通过对比原煤和致裂煤, 得到原煤 (A1、B1) 的分形维数分别为 2.401 和 2.409, 致裂煤 (A2、B2) 分别为 2.374 和 2.383, 表明二氧化碳冲击致裂降低了煤体内部结构的复杂性。

表 5 致裂前后低压二氧化碳吸附数据的分形维数结果

煤样编号	D	R^2
A1	2.401	0.994 8
A2	2.374	0.993 4
B1	2.409	0.996 1
B2	2.383	0.994 6

3 结语

本研究综合运用压汞实验、氮气吸附实验及二氧化碳吸附实验, 并结合分形理论 (Sierpinski 模型和 FHH 模型) 探讨了二氧化碳冲击致裂对煤体中大孔、中孔和微孔的孔容、孔比表面积分布、分形维数等数据, 得出以下主要结论。

(1) 通过分析孔容和比表面积的分布, 与原煤相比, 致裂后的煤体在大孔、中孔和微孔孔比表面积平均值上分别增长了 $3.957 \text{ m}^2/\text{g}$ 、 $11.112 \text{ m}^2/\text{g}$ 和 $39.182 \text{ m}^2/\text{g}$ 。同时, 致裂煤的大孔、中孔和微孔的孔容平均值也分别提升了 $0.037 5 \text{ cm}^3/\text{g}$ 、 $0.018 3 \text{ cm}^3/\text{g}$ 和 $0.007 5 \text{ cm}^3/\text{g}$ 。

(2) 分形维数可以表征煤中孔隙结构的复杂程度。原煤大孔和微孔的分形维数均大于致裂煤, 相关性系数均大于 0.953 6; 对于中孔的分形维数结果, 在相关性系数大于 0.977 4 时, 原煤中孔的分形维数小于致裂煤的, 说明二氧化碳致裂对不同尺寸孔隙结构的影响存在差异。

参考文献 (References)

[1] 张东明, 白鑫, 尹光志, 等. 低渗煤层液态 CO_2 相变射孔破裂及裂隙扩展力学机理[J]. 煤炭学报, 2018, 43(11): 3154–3168.
ZHANG D M, BAI X, YIN G Z, et al. Mechanism of breaking and fracture expansion of liquid CO_2 phase change jet fracturing in low-permeability coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(11): 3154–3168. (in Chinese)

[2] WANG X L, LI H, LI R W. Study on the cracking and penetration effect of liquid carbon dioxide phase transition[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2022, 40(5): 1–11.

[3] ZHANG Y N, DENG H W, KE B, et al. Research on the explosion effects and fracturing mechanism of liquid carbon dioxide blasting[J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2022(39): 521–530.

[4] CHEN Y, ZHANG H W, ZHU Z J, et al. A new shock-wave test

apparatus for liquid CO_2 blasting and measurement analysis[J]. Measurement and Control, 2019, 52(5–6): 399–408.

[5] FAN Y C, QIN B T, SHI Q L, et al. Liquid CO_2 phase transition fracturing technology and its application in enhancing gas drainage of coal mines[J]. Adsorption Science & Technology, 2020, 38(9/10): 393–412.

[6] 安丰华, 贾宏福, 刘军. 基于煤孔隙构成的瓦斯扩散模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(5): 987–996.
AN F H, JIA H F, LIU J. A gas diffusion model based on the pore structure in coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(5): 987–996. (in Chinese)

[7] LIN M H, LIN B Q, LIN T, et al. Experimental study on gas emission under pressure from the coal matrix: Understanding gas patterns from an engineering scale[J]. Energy & Fuels, 2023, 37(14): 10355–10366.

[8] 李丰亮, 曹运兴, 刘高峰, 等. 玉溪煤矿 CO_2 气相压裂煤巷防突快速掘进技术[J]. 中国矿业, 2020, 29(4): 146–151.
LI F L, CAO Y X, LIU G F, et al. Rapid excavation technology for coal roadway outburst prevention using CO_2 gas-phase fracturing in Yuxi coal mine[J]. China Mining Magazine, 2020, 29(4): 146–151 (in Chinese).

[9] LIU X F, NIE B S, GUO K Y, et al. Permeability enhancement and porosity change of coal by liquid carbon dioxide phase change fracturing[J]. Engineering Geology, 2021(287): 106106.

[10] XIA B W, LIU X F, SONG D Z, et al. Evaluation of liquid CO_2 phase change fracturing effect on coal using fractal theory[J]. Fuel, 2021(287): 119569.

[11] 徐浩, 王刚, 黄启铭, 等. 煤体微观结构及瓦斯吸附特性实验与教学应用[J]. 实验技术与管理, 2024, 41(4): 193–199.
XU H, WANG G, HUANG Q M, et al. Experimental and pedagogical application of coal body microstructure and gas adsorption characteristics[J]. Experimental Technology and Management, 2024, 41(4): 193–199 (in Chinese).

[12] 赵佳佳, 田世祥, 李鹏, 等. $\text{SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 纳米流体强化煤尘润湿性的微观机理研究[J]. 化工学报, 2023, 74(9): 3931–3945.
ZHAO J J, TIAN S X, LI P et al. Study on the microscopic mechanism of $\text{SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ nanofluids enhancing the wettability of coal dust[J]. Journal of Chemical Industry, 2023, 74(9): 3931–3945 (in Chinese).

[13] 刘彦伟, 张帅, 左伟芹, 等. 典型软硬煤全孔孔隙结构差异性研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(10): 98–106.
LIU Y W, ZHANG S, ZUO W Q, et al. Study on differences of pore structure of typical soft and hard coal[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(10): 98–106 (in Chinese).

[14] 聂百胜, 马延崑, 何学秋, 等. 煤与瓦斯突出微观机理探索研究[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(2): 207–220.
NIE B S, MA Y K, HE X Q, et al. Micro-scale mechanism of coal and gas outburst: A preliminary study[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2022, 51(2): 207–220 (in Chinese).

[15] 张震, 刘高峰, 李宝林, 等. CO_2 相变致裂煤的纳米孔隙尺度改造效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(3): 672–684.
ZHANG Z, LIU G F, LI B L, et al. Effects of CO_2 phase

- transition-induced fracturing on the modification of nanopore scale in coal[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(3): 672–684 (in Chinese).
- [16] DEBELAK K A, SCHRODT J T. Comparison of structure in Kentucky coals by mercury penetration and carbon dioxide adsorption[J]. *Fuel*, 1979, 58(10): 732–736.
- [17] 程远平, 胡彪. 微孔填充: 煤中甲烷的主要赋存形式[J]. *煤炭报*, 2021, 46(9): 2933–2948.
CHENG Y P, HU B. Main occurrence form of methane in coal: Micropore filling[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(9): 2933–2948. (in Chinese)
- [18] ZHANG K Z, CHENG Y P, WANG L, et al. Pore morphology characterization and its effect on methane desorption in water-containing coal: An exploratory study mechanism of gas migration in water-injected coal seam[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020(75): 103152.
- [19] 胡彪. 煤中多尺度孔隙结构的甲烷吸附行为特征及其微观影响机制[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
HU B. Characteristics of methane adsorption behaviour of multi-scale pore structure in coal and its microscopic influence mechanism[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [20] THOMMES M, KANKO K, NEIMARK A V, et al. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report)[J]. *Pure and Applied Chemistry*, 2015, 87(9-10): 1051–1069.
- [21] GAN H, NANDI S P, WAIKER P L. Nature of porosity in American coals[J]. *Fuel*, 1972, 51(4): 272–277.
- [22] SALMAS C, ANDROUTSOPOULOS G. Mercury porosimetry: Contact angle hysteresis of materials with controlled pore structure[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2001, 239(1), 178–189.

Carbon dioxide impact fracturing on the evolution of the pore structure of the coal body

ZHAO Yunxia¹, JIANG Zebiao^{1,2}, CHEN Siliang¹, GAO Shikang¹, MO Qiaoshun¹

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

Abstract: [Objective] To investigate the influence of CO₂ impact fracturing on the multidimensional pore structure of the coal body and its potential application in coal seam gas control, this study systematically analyzed the multiscale evolution characteristics of the pore structure of the coal body before and after CO₂ impact fracturing and its influence on the permeability of the reservoir and the methane adsorption capacity using typical coal samples as the research objects. This study aims to reveal the structural response laws of macropores, mesopores, and micropores of coal bodies and provide the scientific basis and practical guidance for coal seam gas management and reservoir modification. [Methods] In this study, the multiscale modification effect of CO₂ impact fracturing on the pore network of the coal body was systematically and quantitatively analyzed using the mercury pressure method, nitrogen adsorption–desorption (BET), and CO₂ adsorption experiments and by combining several parameters, such as pore size distribution, specific surface area, pore volume, and fractal dimension. The results showed that CO₂ impact fracturing can modify the pore network of the coal body at multiple scales. The main focus was to characterize the changes in the pore properties of the coal body before and after CO₂ impact fracturing in the ranges of macropores (>50 nm), mesopores (2–50 nm), and micropores (<2 nm). The experimental data were analyzed in depth in conjunction with fractal theory to assess the pore structure complexity and its connectivity evolution trend. [Results] CO₂ impact fracturing significantly improved the pore structure properties of the coal body. The specific surface area of macropores, mesopores, and micropores of fractured coals increased by 3.957, 11.112, and 39.182 m²/g, respectively, and their pore volumes increased by 0.037 5, 0.018 3, and 0.007 5 cm³/g, respectively. In the range of 50–2,000 nm, the mercury intake of fractured coals increased significantly, indicating a significant increase in the volume and connectivity of macropores. In the range of 1.06–50 nm, the pore volume of mesopores was three to eight times that of the original coal, indicating a significant expansion effect. In the range of 0.38–1.06 nm, the total pore volume of micropores increased by 26.4%, indicating that the adsorption capacity of the micropores was significantly enhanced. In addition, the fractal analyses showed that the fractal dimensions of the macropores and micropores of the fractured coal samples were significantly reduced compared with those of the original coal, indicating that the complexity of the pore structure was reduced, and the network connectivity was further enhanced. [Conclusions] CO₂ impact fracturing can optimize the pore structure of the coal body at multiple scales, significantly improve the pore properties of mesopores and micropores, and enhance the connectivity and permeability of macropores. This multiscale evolution of pore structure provides a theoretical basis for the improvement of CBM recovery. The research results reveal the mechanism of CO₂ impact fracturing on the physical properties of coal reservoirs and provide scientific support for the optimal design of CO₂-enhanced coalbed methane recovery technology, which has considerable theoretical significance and practical application value and plays a positive role in promoting the green development and efficient utilization of coalbed methane.

Key words: carbon dioxide impact fracturing; pore structure evolution; fractal features

(编辑: 张文杰)