

高压物理学报

冲击荷载对无烟煤微观孔隙影响的分形研究

王以贤 梁为民

Fractal Study on Influence of Impact Load on Microscopic Pore of Anthracite

WANG Yixian, LIANG Weimin

引用本文:

王以贤, 梁为民. 冲击荷载对无烟煤微观孔隙影响的分形研究[J]. 高压物理学报, 2020, 34(5):054203. DOI: 10.11858/gywlxb.20200528

WANG Yixian, LIANG Weimin. Fractal Study on Influence of Impact Load on Microscopic Pore of Anthracite[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2020, 34(5):054203. DOI: 10.11858/gywlxb.20200528

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20200528>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[孔隙率对铌硅粉末混合物冲击反应的影响](#)

Influence of Initial Porosity on Shock Chemical Reaction of Niobium–Silicon Powder Mixture

高压物理学报. 2020, 34(3): 034101 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20190851>

[钢纤维混凝土板在冲击与爆炸荷载下的K&C模型](#)

K&C Model of Steel Fiber Reinforced Concrete Plate under Impact and Blast Load

高压物理学报. 2020, 34(3): 034205 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20190853>

[GFRP增强圆钢管在低速冲击荷载作用下的应变率效应](#)

Strain Rate Effect of GFRP–Reinforced Circular Steel Tube under Low–Velocity Impact

高压物理学报. 2019, 33(4): 044203 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20180653>

[煤尘层最低着火温度变化规律实验研究](#)

Variation Law for Minimum Ignition Temperature of Coal Dust Layer

高压物理学报. 2018, 32(3): 035206 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20170649>

[面内冲击荷载下半凹角蜂窝的抗冲击特性](#)

Impact Resistance of Semi Re–Entrant Honeycombs under in–Plane Dynamic Crushing

高压物理学报. 2019, 33(6): 064104 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20190759>

[激波冲击V形界面的RM不稳定性实验研究](#)

Experimental Investigation on Richtmyer–Meshkov Instability of a "V" Shaped Interface Subjected to Shock Wave

高压物理学报. 2017, 31(6): 718 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.2017.06.006>

冲击荷载对无烟煤微观孔隙影响的分形研究

王以贤^{1,2}, 梁为民¹

(1. 河南理工大学土木工程学院, 河南 焦作 454000;
2. 河南建筑职业技术学院, 河南 郑州 450064)

摘要:为了揭示冲击荷载对无烟煤微观孔隙结构的影响规律,利用分离式霍普金森压杆(SHPB)冲击实验系统模拟了冲击应力在不同衰减过程中的冲击波和应力波,基于冲击前后压汞实验及低温液氮实验测试数据,运用分形理论,研究了赵固二矿不同方向煤体(与层理方向分别呈垂直、平行、45°斜交)冲击前后孔隙结构的分形特征。结果表明:对于渗流孔,冲击荷载提高了瓦斯的渗流与运移速度,对于吸附孔,冲击荷载减小了吸附孔的吸附能力,促进了瓦斯的解吸;分形维数具有明显的冲击方向性,且吸附孔的分形维数明显小于渗流孔;不同方向无烟煤的最佳冲击荷载不同,垂直和斜交层理方向的最佳冲击荷载为51.80 MPa,平行层理方向的最佳冲击荷载为28.46 MPa。研究结果可为冲击荷载促进瓦斯抽采机理的探讨提供参考。

关键词:冲击荷载;无烟煤;分形理论;微观孔隙;压汞;低温液氮

中图分类号:O347.2

文献标识码:A

煤体孔隙是煤层气(煤矿瓦斯)赋存、扩散、运移的主要场所^[1]。通过外部扰动优化煤体孔径配置、改善煤体孔隙结构是促进煤层气解吸、增强煤层气扩散和运移的主要手段。目前,通过外部扰动改善煤体孔隙结构主要有3种方式:(1)流体冲载,主要包括水力、高能气体压裂等^[2-3];(2)物理场激励,主要有静电场、交变电场、电磁场、声场激励等^[4-5];(3)冲击荷载,如爆破^[6-7]、脉冲冲击波^[8]等。

我国无烟煤煤层气储层孔隙主要发育在纳米级别^[9],煤层气含量高,但吸附性强、渗透率低,制约着我国煤层气的产量。因此,要实现煤层气的有效开采,需要在了解煤体微观孔隙形态与分布的基础上,深入探讨外载促进煤体孔隙改变及增强瓦斯渗透性的机理。目前,对于煤体微观孔隙结构的研究大多是针对自然状态下的不同类型煤体,对于冲击荷载作用下煤体微观孔隙结构的研究还鲜见报道。

分形几何学是由Mandelbrot等^[10]于1982年提出和建立的,该理论能够为研究复杂的不规则事物的变化规律提供强有力的工具和途径。大量科研人员应用分形理论研究了土和岩石的孔隙分形^[11-13],并得出了不同岩性的孔隙度、比表面积、吸附性及孔隙表面粗糙度、不均匀性等与分形维数的定量关系^[14-17],而对于煤体孔隙,特别是外载扰动后煤体孔隙的分形研究相对较少。事实上煤体是具有基质孔隙和裂隙的多孔介质,其复杂的孔隙结构满足自相似性,符合分形几何规律^[18-20]。因此,可以将分形参数作为煤体内部复杂孔隙结构的定量表征^[21-22],通过对比煤体受载前后的分形参数,探讨煤体外载作用对其孔隙结构的影响规律。

本研究利用霍普金森冲击实验系统(SHPB)模拟冲击应力在不同衰减过程中的冲击波和应力波,对赵固二矿无烟煤实施不同方向(分别与层理呈垂直、平行、45°斜交方向)、不同速度的冲击加载,利

* 收稿日期: 2020-03-12; 修回日期: 2020-03-26

基金项目: 国家自然科学基金(41772163)

作者简介: 王以贤(1981-),男,博士研究生,讲师,主要从事爆破工程及岩土工程研究.

E-mail: 56653648@qq.com

通信作者: 梁为民(1967-),男,博士,教授,主要从事爆破工程及岩土工程研究.

E-mail: liangwm@hpu.edu.cn

用压汞实验及低温液氮实验测试数据,对冲击前后无烟煤的微观孔隙进行分形研究,力图得出冲击荷载对无烟煤微观孔隙的破坏特征及规律,以期为冲击荷载促进瓦斯抽采规律的研究提供参考。

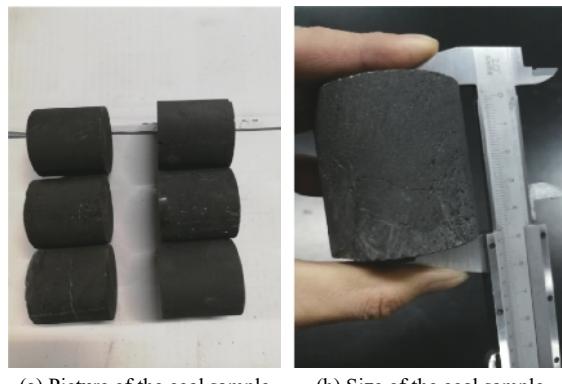
1 样品制备与实验过程

1.1 样品制备

实验样品取自河南省焦作矿区赵固二矿,属于无烟煤,其显微组分、工业分析结果及基本力学参数如表1所示,其中:C、P、X分别表示垂直、平行、45°斜交层理的煤样,下标0代表冲击前原煤样,ρ为样品密度,f_c为单轴抗压强度,C_L为纵波声速,R_{0,max}为最大镜质组反射率。为了尽量减小煤样间的差异,在矿井采煤工作面同一煤层同一地点采集大块完整煤岩。按照GB/T50266—2013《工程岩体实验方法标准》^[23]及GB/T23561.7—2009《煤和岩石物理力学性质测定方法》^[24]钻取直径和高度均为50 mm的圆柱体,如图1所示。利用双端面磨床打磨试件,确保煤样两端面的平整度小于或等于0.05 mm,两端面平行度小于或等于0.02 mm。

表1 煤样基本参数
Table 1 Basic parameters of coal samples

No.	$\rho/(g\cdot cm^{-3})$	f_c/MPa	$C_L/(km\cdot s^{-1})$	$R_{0,max}/\%$	Mass fraction/%					
					Ash	Volatile component	Fixed carbon	Exinite	Vitrinite	Inertinite
C ₀	1.423	17.29	1.381							
P ₀	1.461	15.13	1.852	3.32	5.62	6.05	83.98	1	98	1
X ₀	1.422	11.65	1.653							



(a) Picture of the coal sample (b) Size of the coal sample

图1 煤样图片及尺寸

Fig. 1 Picture and size of the coal sample

1.2 实验方案与步骤

本实验方案如图2所示。实验步骤分为4部分。

(1)SHPB冲击实验。采用入射杆和透射杆均为变截面杆的SHPB冲击实验系统,杆端直径均为50 mm,入射杆长2 400 mm,透射杆长1 200 mm,杆件材质为钢材,密度为7 800 kg/m³,弹性波速为5 190 m/s,弹性模量为210 GPa。根据冲击波(应力波)随距离衰减规律,结合样品的基本力学参数及试冲情况,设定冲击气压p_i分别为0.10、0.15、0.20、0.30和0.50 MPa,利用河南理工大学土木工程学院的SHPB冲击加载系统进行冲击加载实验。首先,调整子弹、入射杆、透射杆呈一条直线,将试件涂抹耦合剂以后装在入射杆与透射杆之间;其次,将尺寸为1 cm×1 cm的铜整形片粘贴至入射杆靠近子弹一端,按照设定的冲击气压驱动子弹撞击入射杆;最后,采集信号,保存数据。

(2) 取样并干燥处理。为了保证冲击前后压汞实验和低温液氮实验数据的可对比性, 实验样品均取自冲击前后圆柱体中轴线附近的煤颗粒, 将实验样品放入烘干箱, 在110℃条件下恒温干燥8 h以后放入干燥器皿中冷却至室温。

(3) 压汞实验。将3 g左右4~6 mm的煤颗粒放入膨胀计中, 抽真空以后将膨胀计装入低压站进行低压实验, 低压压汞实验结束后将膨胀计移入高压仓进行高压实验, 然后结合压汞分析软件记录数据。压汞仪采用美国麦克仪器公司Autoprep IV 9520型全自动压汞仪, 工作压力介于0.1~60 000.0 psi(1 psi=0.006 895 MPa), 测定孔径范围为3 nm~1 100 μm。

(4) 低温液氮实验。将3 g左右60~80目的煤粉脱气8 h后放入分析站进行低温液氮吸附实验。低温液氮仪为美国麦克仪器公司TriStar II 3020型全自动比表面积与孔隙度分析仪, 测定孔径范围为0.35~500 nm。

本实验的孔径划分采用Hodot的十进制划分法^[25], 即微孔、小孔、中孔、大孔对应的孔径依次为小于10 nm、介于10~100 nm之间、介于100~1 000 nm之间、大于1 000 nm。

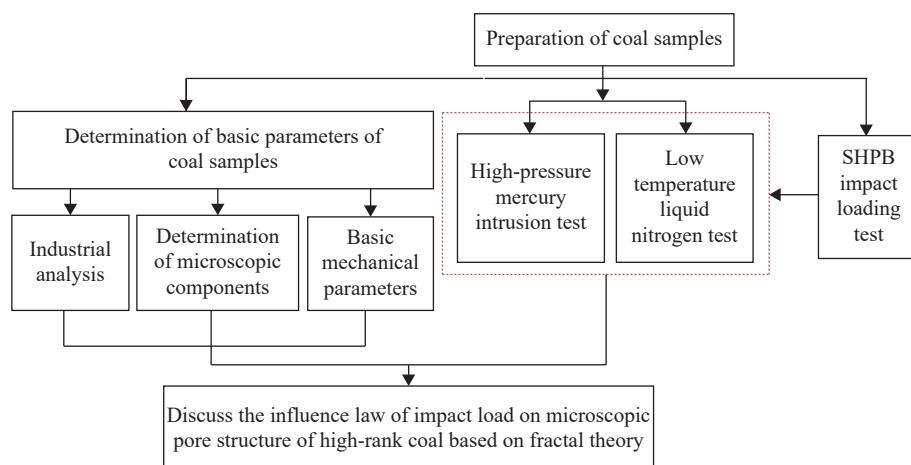


图2 实验方案

Fig. 2 Experimental scheme

2 实验结果与分析

2.1 SHPB冲击实验

根据一维弹性应力波和应力均匀的假设, 采用三波法^[26-27]计算煤样的动态应力、应变及应变速率。子弹以一定速度冲击入射杆撞击试件, 首先使试件产生应力、应变并对试件造成一定的损伤, 然后形成透射波, 最后由吸收系统吸收透射波。该过程中能量传递和转化的表达式为

$$W = \frac{A_c}{E} \int \sigma^2 dt = A_0 Ec \int \varepsilon^2 dt \quad (1)$$

$$w = W/V \quad (2)$$

式中: W 、 σ 、 ε 分别为3种波对应的能量、应力和应变, V 为试样体积, A_0 为压杆的横截面积, E 为弹性模量, c 为波速。

损伤是外界能量作用于物体的一种客观存在, 其量化指标为损伤变量, 一般来讲, 可以从面积、密度、弹性模量和能量等不同角度定义损伤变量。冲击能量对试件造成的损伤可以通过能量公式计算其损伤变量

$$d = w/u \quad (3)$$

式中: d 为损伤变量; u 为试件的总吸收能密度, 即试件的冲击应力-应变曲线所围成的面积, 表示为

$$u = \int \sigma d\varepsilon \quad (4)$$

鉴于煤体的非均质性及各向异性, 同等实验条件下冲击3个试件, 取各个参数的平均值进行分析, 其中损伤变量为总耗散能密度与总吸收能密度的比值。

利用式(1)~式(4)可以计算出煤样受冲击后的损伤值^[28~30], 如表2所示, 其中: p_l 为冲击气压; p_L 为冲击荷载; 煤样尺寸为圆柱体的直径与高度; D_s 、 \bar{D}_s 分别为渗流孔分形维数和渗流孔分形维数平均值; D_x 、 \bar{D}_x 分别为吸附孔分形维数和吸附孔分形维数平均值; R_s^2 、 R_x^2 分别为渗流孔和吸附孔分形维数相关系数; d 、 \bar{d} 分别为损伤变量和平均损伤变量; YC、YP、YX 分别代表冲击前垂直、平行和 45° 斜交层理方向的煤样, 下标分别代表不同层理方向的煤样序号。原煤压汞实验和低温液氮实验中的煤样取自冲击前煤块颗粒, 不存在煤样尺寸。

表2 实验数据表
Table 2 Impact test data

Direction	p_l/MPa	p_L/MPa	No.	Size/mm × mm	D_s	\bar{D}_s	R_s^2	D_x	\bar{D}_x	R_x^2	d	\bar{d}
Vertical bedding	0	0	YC ₁		2.99		0.97	2.75		0.95		
			YC ₂		2.99	2.98	0.99	2.78	2.78	0.96		
			YC ₃		2.95		0.98	2.81		0.98		
	0.10	28.46	C ₁	∅49.75 × 50.33	2.85		0.95	2.31		0.95	0.14	
			C ₂	∅49.33 × 49.89	2.92	2.85	0.96	2.21	2.23	0.93	0.16	0.14
			C ₃	∅49.34 × 50.42	2.79		0.95	2.17		0.96	0.12	
	0.15	32.59	C ₄	∅49.42 × 49.57	2.73		0.99	2.19		0.95	0.18	
			C ₅	∅49.66 × 49.93	2.78	2.73	0.97	2.23	2.19	0.96	0.12	0.16
			C ₆	∅49.42 × 50.84	2.69		0.94	2.15		0.95	0.18	
	0.20	41.43	C ₇	∅49.39 × 49.93	2.63			2.05		0.96	0.18	
			C ₈	∅49.42 × 49.76	2.71	2.68	0.98	2.21	2.13	0.97	0.17	0.17
			C ₉	∅49.45 × 50.28	2.69		0.99	2.13		0.98	0.15	
	0.30	51.80	C ₁₀	∅49.52 × 50.47	2.56		0.99	2.05		0.99	0.17	
			C ₁₁	∅49.36 × 49.78	2.64	2.51	0.96	2.09	2.05	0.96	0.19	0.19
			C ₁₂	∅49.27 × 50.27	2.34		0.94	2.01		0.96	0.22	
	0.50	58.70	C ₁₃	∅49.38 × 50.47	2.74		0.92	2.11		0.92	0.33	
			C ₁₄	∅49.45 × 50.21	2.79	2.73	0.94	2.17	2.12	0.93	0.57	0.44
			C ₁₅	∅49.49 × 49.44	2.67		0.95	2.07		0.98	0.42	
Parallel bedding	0	0	YP ₁		2.84		0.99	2.89		0.95		
			YP ₂		2.91	2.87	0.96	2.86	2.86	0.94		
			YP ₃		2.87		0.97	2.83		0.96		
	0.10	28.46	P ₁	∅49.29 × 50.11	2.57		0.99	2.03		0.98	0.13	
			P ₂	∅49.36 × 50.37	2.65	2.57	0.98	2.05	2.03	0.95	0.11	0.13
			P ₃	∅49.47 × 49.88	2.50		0.99	2.02		0.96	0.15	
	0.15	32.59	P ₄	∅49.31 × 49.32	2.58		0.97	2.15		1.00	0.31	
			P ₅	∅49.33 × 50.28	2.61	2.58	0.98	2.19	2.15	0.95	0.22	0.25
			P ₆	∅49.31 × 49.16	2.56		0.95	2.11		0.97	0.22	

表 2 (续)
Table 2 (Continued)

Direction	p_f/MPa	p_L/MPa	No.	Size/mm × mm	D_s	\bar{D}_s	R_s^2	D_x	\bar{D}_x	R_x^2	d	\bar{d}
Parallel bedding	0.20	41.43	P ₇	Ø49.33 × 50.33	2.64		0.92	2.20		0.95	0.18	
			P ₈	Ø49.60 × 49.85	2.68	2.64	0.93	2.14	2.19	0.96	0.22	0.28
			P ₉	Ø49.31 × 50.11	2.61		0.95	2.24		0.98	0.44	
	0.30	51.80	P ₁₀	Ø49.31 × 50.40	2.81		0.94	2.21		0.95	0.37	
			P ₁₁	Ø49.05 × 49.87	2.85	2.81	0.95	2.16	2.18	0.97	0.30	0.34
			P ₁₂	Ø49.42 × 49.87	2.78		0.94	2.18		0.96	0.35	
	0.50	58.70	P ₁₃	Ø49.40 × 49.93	2.89		0.95	2.82		0.97	0.54	
			P ₁₄	Ø49.62 × 49.96	2.81	2.81	0.99	2.73	2.73	0.96	0.49	0.50
			P ₁₅	Ø49.32 × 49.79	2.73		0.95	2.63		0.96	0.47	
45° oblique bedding	0	0	YX ₁		2.81		0.94	2.77		0.95		
			YX ₂		2.85	2.81	0.95	2.71	2.78	0.95		
			YX ₃		2.78		0.97	2.85		0.96		
	0.10	28.46	X ₁	Ø49.49 × 50.03	2.75		0.99	2.38		0.97	0.17	
			X ₂	Ø49.27 × 49.63	2.81	2.75	0.98	2.28	2.38	0.95	0.19	0.16
			X ₃	Ø49.31 × 49.30	2.68		0.97	2.47		0.96	0.12	
	0.15	32.59	X ₄	Ø49.24 × 49.93	2.67		0.99	2.39		0.98	0.29	
			X ₅	Ø49.27 × 49.33	2.75	2.65	0.95	2.31	2.31	0.96	0.21	0.24
			X ₆	Ø49.27 × 49.82	2.54		0.98	2.23		0.95	0.22	
	0.20	41.43	X ₇	Ø49.25 × 49.90	2.76		0.95	2.08		0.94	0.20	
			X ₈	Ø49.60 × 49.38	2.71	2.70	0.92	2.17	2.12	0.92	0.21	0.22
			X ₉	Ø49.29 × 49.05	2.64		0.93	2.12		0.93	0.25	
	0.30	51.80	X ₁₀	Ø49.40 × 50.28	2.47		0.98	2.01		0.93	0.21	
			X ₁₁	Ø49.38 × 50.88	2.61	2.55	0.96	2.07	2.06	0.92	0.17	0.18
			X ₁₂	Ø49.71 × 50.02	2.58		0.97	2.11		0.95	0.16	
	0.50	58.70	X ₁₃	Ø49.66 × 50.44	2.79		0.98	2.26		0.96	0.63	
			X ₁₄	Ø49.73 × 49.91	2.75	2.73	0.97	2.31	2.28	0.94	0.72	0.71
			X ₁₅	Ø49.46 × 50.05	2.64		0.96	2.28		0.93	0.78	

2.2 高压压汞实验

高压压汞实验是测量固体孔隙参数的常规方法, 孔径测量范围比较大, 可以测出从微孔到大孔的所有孔隙。结合 Washburn 方程, 利用 Menger 海绵分形理论^[31]可以定量描述煤体孔隙的粗糙度和不规则程度, 从而探析煤体孔隙的吸附、解吸及渗流参数。将 Menger 模型作为压汞实验数据的分形模型, 结合压汞实验数据可以得出煤体的分形维数, 计算公式为

$$D = [\ln(dV_p/dp_H) - \ln\alpha]/\ln p_H + 4 \quad (5)$$

式中: p_H 为进汞压力, MPa; V_p 为压力 p_H 作用下的进汞量, cm^3 。以 $\ln(dV_p/dp_H)$ 和 $\ln p_H$ 的比值为斜率 K , 则分形维数 $D=K+4$ 。

2.3 低温液氮实验

低温液氮实验是将吸附于一定固体表面上的气体量记录为吸附物质的吸附量与相对压力的函数,采用等温线脱附分支上一系列逐步降低的相对压力,或等温线吸附分支上一系列逐步升高的相对压力(也可二者并用)进行计算,从而得到多孔物质材料微观孔隙参数的实验方法。低温液氮数据可以采用FHH模型得出不同冲击荷载、不同方向媒体的分形维数^[22]。

FHH模型的分形维数计算基于以下公式

$$\ln(V/V_0) = n + A \ln[\ln(p_0/p)] \quad (6)$$

式中: V 为平衡压力 p 下吸附的气体体积, cm^3 ; V_0 为单分子层吸附的气体体积, cm^3 ; p 为平衡压力, MPa; p_0 为饱和蒸汽压, MPa; A 为对数曲线的斜率; n 为常数; 分形维数 $D = 3 + A$ 。

2.4 分形数据计算与分析

2.4.1 分形维数计算

根据压汞实验及低温液氮实验的测试数据,结合式(1)、式(2)可以得出不同方向、不同冲击荷载作用下的分形维数(分形维数大小见表2)。通过计算发现:当孔径小于或等于100 nm时,基于压汞实验测试数据的分形维数不在2~3之间;而当孔径大于或等于100 nm时,基于液氮实验测试数据的分形维数也不在2~3之间。根据相关研究^[32],以上数据不具有分形意义。这可能与两种方法的测试原理有关,压汞法是根据汞的不浸润性进行孔隙参数测试,进入孔隙直径越小,所需要汞的压力越大,而较大的汞压力会破坏孔隙结构,因此,压汞法对孔径小于或等于100 nm的孔隙参数测量不准确。而低温液氮的测试原理是吸附与凝聚理论,根据孔吸附液氮的体积计算孔隙参数,该方法对孔径大于或等于100 nm的孔隙参数测量不准确^[33~34]。所以表2只统计了基于压汞实验数据、孔径大于100 nm孔隙的分形维数和基于液氮实验数据、孔径小于100 nm孔隙的分形维数(为了保证数据的有效统计意义,降低媒体离散性对结果的影响,表2中所有数据均取同等条件下4个煤样数据的平均值)。根据Yao等^[20,35]、宋晓夏等^[36]的研究结果,将孔径大于100 nm的孔隙称为渗流孔,孔径小于100 nm的孔隙称为吸附孔。

不同方向典型分形维数拟合曲线的对比如图3~图8所示,相关系数均在0.90以上,拟合效果较好,数据可靠,符合分形规律。

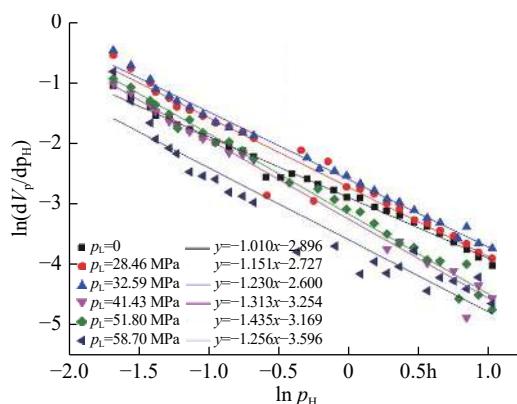


图3 垂直层理方向渗流孔分形维数的对比

Fig. 3 Fractal dimension of the seepage hole in the vertical bedding direction

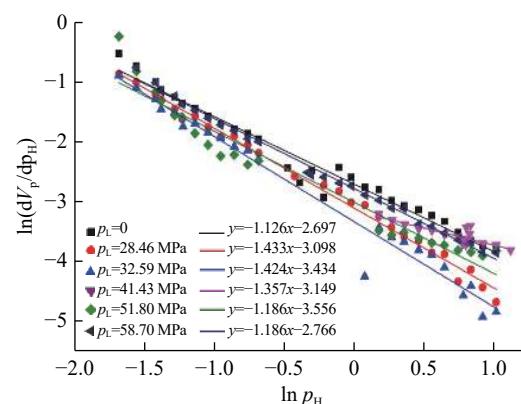


图4 平行层理方向渗流孔分形维数的对比

Fig. 4 Fractal dimension of the seepage hole in the parallel bedding direction

从分形统计数据可知:垂直层理方向渗流孔的分形维数介于2.51~2.98之间,平均值为2.75,最小值2.51对应的冲击荷载为51.80 MPa,冲击前分形维数最大;平行层理方向渗流孔的分形维数介于2.57~2.87之间,平均值为2.71,最小值对应的冲击荷载为28.46 MPa,冲击前分形维数最大;斜交层理方向渗流孔的分形维数介于2.55~2.81之间,平均值为2.70,最小值对应的冲击荷载为51.80 MPa,冲击

前分形维数最大。这说明冲击前无烟煤煤样渗流孔的分形维数大, 孔隙结构复杂, 孔隙内部表面粗糙, 孔壁摩阻力大^[37], 不利于瓦斯的渗流与运移; 冲击后分形维数均小于冲击前, 说明冲击荷载改善了孔隙内部结构, 降低了孔隙表面粗糙度, 减小了孔壁摩阻力, 提高了瓦斯的渗流与运移速度。

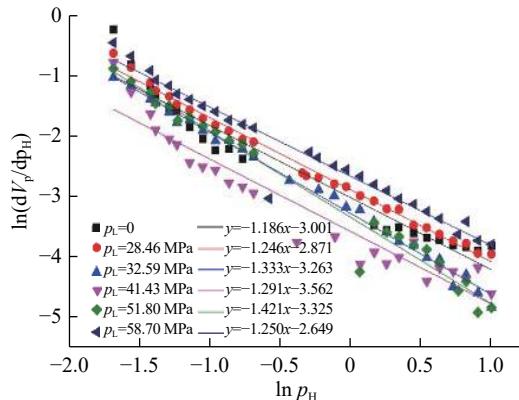


图5 斜交层理方向渗流孔分形维数的对比

Fig. 5 Fractal dimension of the seepage hole in the oblique bedding direction

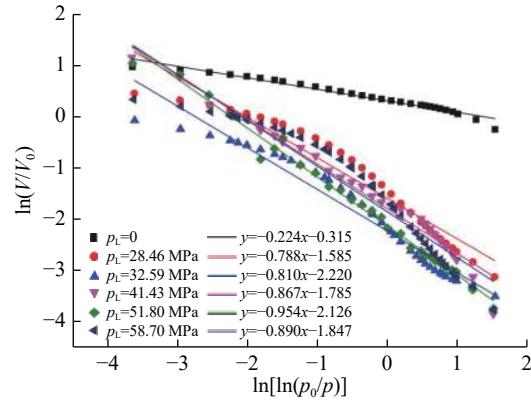


图6 垂直层理方向吸附孔分形维数的对比

Fig. 6 Fractal dimension of the adsorption hole in the vertical bedding direction

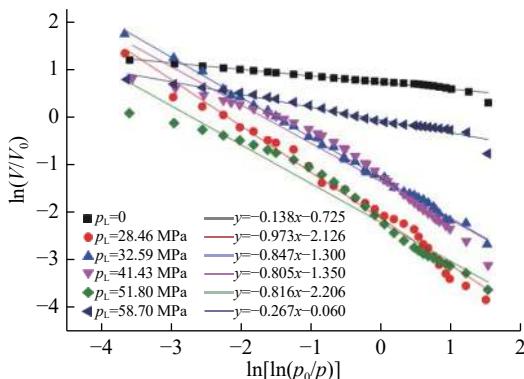


图7 平行层理方向吸附孔分形维数的对比

Fig. 7 Fractal dimension of the adsorption hole in the parallel bedding direction

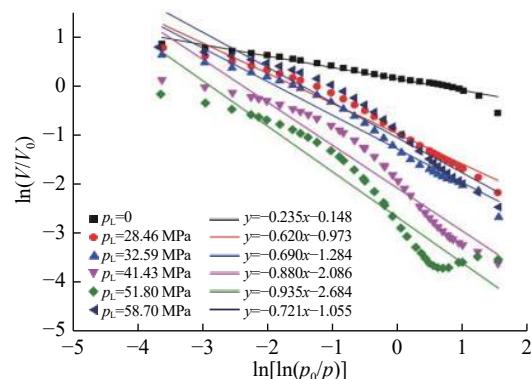


图8 斜交层理方向吸附孔分形维数的对比

Fig. 8 Fractal dimension of the adsorption hole in the oblique bedding direction

吸附孔分形维数存在以下特点: 垂直层理方向吸附孔分形维数介于 2.05~2.78 之间, 平均值为 2.25, 最小值 2.05 对应的冲击荷载为 51.80 MPa, 冲击荷载作用前分形维数最大; 平行层理方向吸附孔分形维数介于 2.03~2.86 之间, 平均值为 2.36, 冲击荷载为 28.46 MPa 时分形维数最小, 冲击前分形维数最大; 斜交层理方向吸附孔分形维数介于 2.06~2.78 之间, 平均值为 2.32, 最小值 2.06 对应的冲击荷载为 51.80 MPa, 冲击前分形维数最大。这与渗流孔分形规律相似, 说明冲击后吸附孔的分形维数均小于冲击前, 冲击荷载减小了吸附孔的复杂程度、不规则程度及孔隙表面粗糙度, 大大降低了吸附孔的吸附能力, 冲击荷载能够将大量的瓦斯由吸附态转化为游离态, 从而促进瓦斯的有效解吸。

2.4.2 综合分析

定义分形维数减小率 δ 为

$$\delta = \frac{|D_1 - D_0|}{D_0} \times 100\% \quad (7)$$

式中: D_1 为冲击后分形维数, D_0 为冲击前分形维数。

分形维数减小率可以表征冲击荷载对孔隙的改造程度, 其值越大说明冲击荷载对该孔隙的改造程度越大, 改造效果越好。图9表征的是 3 个方向渗流孔和吸附孔分形维数减小率与冲击荷载的关系曲

线。从图9可以看出,对于渗流孔,在冲击后分形维数最小值相近的前提下(垂直、平行及斜交层理方向的分形维数的最小值分别为2.51、2.57和2.55),垂直和斜交层理方向的分形维数减小率随冲击荷载变化呈波动增加状态,平行层理方向的分形维数减小率随冲击荷载增加呈减小态势,吸附孔的分形维数减小率具有相同的变化规律。这说明冲击荷载改造煤体孔隙具有明显的冲击方向性,对于垂直和斜交层理方向煤体,需要较大冲击荷载才能达到较好的促解增渗效果,而对于平行层理方向煤体,较小冲击荷载就能达到很好的效果。因此,在实际抽采瓦斯过程中,应尽量沿平行层理方向布置炮孔,以达到消耗较少能量就能获得较好促解增渗的目的。

进一步对比吸附孔与渗流孔的分形维数减小率发现,同一方向、同一冲击荷载下吸附孔的分形维数减小率始终大于渗流孔的分形维数减小率(见图9),说明冲击荷载对吸附孔的改造程度较渗流孔大,即相对于冲击荷载提高瓦斯渗流与运移速度来说,冲击荷载能够更大程度地促进瓦斯的解吸,从而促进大量吸附瓦斯转化为游离瓦斯。这也解释了外载扰动过程中会产生超量煤层气^[38]、更容易发生瓦斯爆炸与瓦斯突出的原因。

图10为不同方向煤体分形维数与冲击荷载关系曲线。从图10可以看出,冲击后渗流孔与吸附孔的分形维数并不随着冲击荷载的增加持续减小,而是存在一个最小值,且不同方向的最小值所对应的冲击荷载不同,但两种孔隙同一方向分形维数最小值所对应的冲击荷载却完全一致,即垂直与斜交层理方向,渗流孔与吸附孔分形维数最小值对应的冲击荷载均为51.80 MPa,平行层理方向分形维数最小值对应的冲击荷载均为28.46 MPa。这说明无论是渗流孔还是吸附孔,同一方向的最佳冲击荷载是相同的,且对应的损伤值均介于0.10~0.20之间(见表2),根据刘运通等^[39]、唐红梅等^[40]的研究,该损伤值范围正好属于爆破裂隙区,即不管哪个冲击方向,爆破裂隙区是最佳的致裂增渗区。

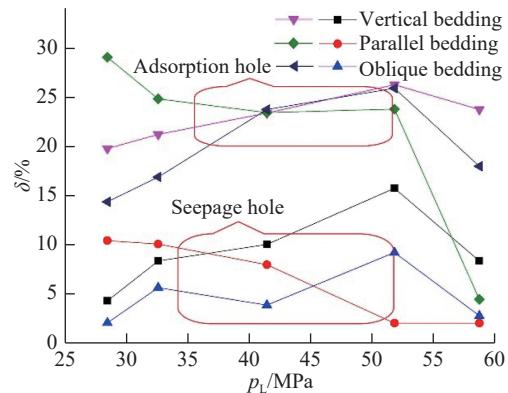


图9 不同方向煤体渗流孔与吸附孔分形维数减小率随冲击荷载的变化

Fig. 9 Fractal dimension reduction rates of the seepage hole and adsorption hole vary with the impact load

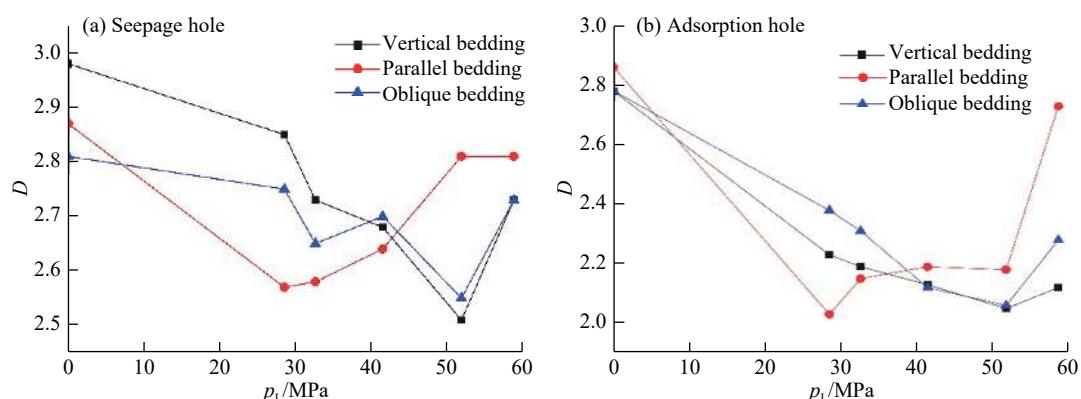


图10 不同方向煤体的分形维数与冲击荷载之间的关系

Fig. 10 Relationship between the fractal dimension and the impact load of coal bodies in different directions

3 结 论

采用压汞实验及低温液氮实验测试方法,研究了冲击荷载对无烟煤微观孔隙分形参数的影响规律,对比分析了冲击前后无烟煤的分形特征,得出以下主要结论。

(1) 孔径小于或等于100 nm的压汞实验数据及孔径大于或等于100 nm的低温液氮实验数据不具有分形规律, 获得了孔径大于100 nm(渗流孔)、基于压汞实验数据的孔隙分形特征和孔径小于100 nm(吸附孔)、基于低温液氮实验数据的孔隙分形特征, 且冲击荷载作用后吸附孔的分形维数明显小于渗流孔, 说明冲击荷载改善吸附孔的能力较渗流孔强。

(2) 冲击荷载作用后的分形维数明显小于冲击前, 说明冲击荷载改善了孔隙内部结构, 降低了孔隙的复杂程度、不规则程度及表面粗糙度, 减小了孔壁摩阻力。对于渗流孔, 冲击荷载提高了瓦斯的渗流与运移速度; 对于吸附孔, 冲击荷载促进了瓦斯的解吸。

(3) 分形维数减小率能够反映冲击荷载对煤体孔隙的改造程度, 不管是渗流孔还是吸附孔, 垂直和斜交层理方向的分形维数变化率随冲击荷载变化呈波动增加状态, 平行层理方向的分形维数变化率随冲击荷载增加呈减小态势, 说明冲击荷载改造煤体孔隙具有明显的冲击方向性, 平行层理方向在能量消耗较小的前提下就能达到较好的促解增渗效果。

(4) 不同方向煤体的渗流孔和吸附孔所对应的最佳冲击荷载相同, 垂直和斜交层理方向煤体的最佳荷载均为51.80 MPa, 平行层理方向煤体的最佳冲击荷载均为28.46 MPa, 且对应的损伤值均属于爆破裂隙区。

参考文献:

- [1] 高为, 易同生, 金军, 等. 黔西地区煤样孔隙综合分形特征及对孔渗性的影响 [J]. 煤炭学报, 2017, 42(5): 1258–1265.
GAO W, YI T S, JIN J, et al. Pore integrated fractal characteristics of coal sample in western Guizhou and its impact to porosity and permeability [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(5): 1258–1265.
- [2] 秦勇, 邱爱慈, 张永民. 高聚能重复强脉冲波煤储层增渗新技术试验与探索 [J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(6): 1–7.
QIN Y, QIU A C, ZHANG Y M. Experiment and discovery on permeability improved technology of coal reservoir based on repeated strong pulse waves of high energy accumulation [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(6): 1–7.
- [3] WEI G Y, SHAN Z Y, ZHANG Z M. Research on hydraulic slotting technology controlling coal-gas outbursts [J]. *Journal of Coal Science and Engineering*, 2008, 14(1): 67–72.
- [4] 姜永东, 李业, 崔悦震, 等. 声场作用下煤储层渗透性试验研究 [J]. 煤炭学报, 2017, 42(S1): 154–159.
JIANG Y D, LI Y, CUI Y Z, et al. Experimental study on characteristics of coal reservoir permeability under acoustic wave [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(S1): 154–159.
- [5] 赵丽娟, 秦勇. 超声波作用对改善煤储层渗透性的试验分析 [J]. 天然气地球科学, 2014, 25(5): 747–752.
ZHAO L J, QIN Y. Experiment on improving the permeability of coal reservoir under ultrasound [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(5): 747–752.
- [6] FORRESTAL M J, FREW D J, HANCHAK S J, et al. Penetration of grout and concrete targets with ogive-nose steel projectiles [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1996, 18(5): 465–476.
- [7] 穆朝民, 王海露, 黄文尧, 等. 高瓦斯低透气性煤体定向聚能爆破增透机制 [J]. 岩土力学, 2013, 34(9): 2496–2500.
MU C M, WANG H L, HUANG W Y, et al. Increasing permeability mechanism using directional cumulative blasting in coal seams with high concentration of gas and low permeability [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(9): 2496–2500.
- [8] 李恒乐, 秦勇, 张永民, 等. 重复脉冲强冲击波对肥煤结构影响的实验研究 [J]. 煤炭学报, 2015, 40(4): 915–921.
LI H L, QIN Y, ZHANG Y M, et al. Experimental study on the effect of strong repetitive pulse shockwave on the pore structure of fat coal [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(4): 915–921.
- [9] CAI Y D, LIU D M, PAN Z J, et al. Pore structure and its impact on CH₄ adsorption capacity and flow capability of bituminous and subbituminous coals from Northeast China [J]. *Fuel*, 2013, 103: 258–268.
- [10] MANDELBROT B B. *The fractal geometry of nature* [M]. San Francisco: Freeman, 1982: 35.
- [11] BIRD N, DÍAZ M C, SAA A, et al. Fractal and multifractal analysis of pore-scale images of soil [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 322(1/2/3/4): 211–219.
- [12] DATHE A, EINS S, NIEMEYER J, et al. The surface fractal dimension of the soil-pore interface as measured by image analysis [J]. *Geoderma*, 2001, 103(1/2): 203–229.
- [13] HUANG S J, YU Y C, LEE T Y, et al. Correlations and characterization of porous solids by fractal dimension and porosity [J].

- Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 1999, 274(3/4): 419–432.
- [14] HILDGEN P, NEKKA F, HILDGEN F, et al. Macroporosity measurement by fractal analysis [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 1997, 234(3/4): 593–603.
- [15] YANG F, NING Z F, LIU H Q. Fractal characteristics of shales from a shale gas reservoir in the Sichuan Basin, China [J]. Fuel, 2014, 115: 378–384.
- [16] LIU X J, XIONG J, LIANG L X. Investigation of pore structure and fractal characteristics of organic-rich Yanchang formation shale in central China by nitrogen adsorption/desorption analysis [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 22(1): 62–72.
- [17] 朱汉卿, 贾爱林, 位云生, 等. 蜀南地区五峰-龙马溪组页岩微观孔隙结构及分形特征 [J]. 科学技术与工程, 2018, 18(10): 12–19.
- ZHU H Q, JIA A L, WEI Y S, et al. Microscopic pore structure and fractal characteristics of Wufeng-Longmaxi shale, south Sichuan [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(10): 12–19.
- [18] GARBACZ J K. Fractal description of partially mobile single gas adsorption on energetically homogeneous solid adsorbent [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 1998, 143(1): 95–101.
- [19] LEE G J, PYUN S I, RHEE C K. Characterization of geometric and structural properties of pore surfaces of reactivated microporous carbons based upon image analysis and gas adsorption [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2006, 93(1/2/3): 217–225.
- [20] YAO Y B, LIU D M, TANG D Z, et al. Fractal characterization of adsorption-pores of coals from North China: an investigation on CH₄ adsorption capacity of coals [J]. International Journal of Coal Geology, 2008, 73(1): 27–42.
- [21] XU L J, ZHANG D J, XIAN X F. Fractal dimensions of coals and cokes [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1997, 190(2): 357–359.
- [22] 宋昱, 姜波, 李凤丽, 等. 低-中煤级构造煤纳米孔分形模型适用性及分形特征 [J]. 地球科学, 2018, 43(5): 1611–1622.
- SONG Y, JIANG B, LI F L, et al. Applicability of fractal models and nanopores' fractal characteristics for low-middle rank tectonic deformed coals [J]. Earth Science, 2018, 43(5): 1611–1622.
- [23] 王登科, 刘淑敏, 魏建平, 等. 冲击载荷作用下煤的破坏特性试验研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(3): 594–600.
- WANG D K, LIU S M, WEI J P, et al. The failure characteristics of coal under impact load in laboratory [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(3): 594–600.
- [24] 刘晓辉, 张茹, 刘建锋. 不同应变率下煤岩冲击动力试验研究 [J]. 煤炭学报, 2012, 37(9): 1528–1534.
- LIU X H, ZHANG R, LIU J F. Dynamic test study of coal rock under different strain rates [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(9): 1528–1534.
- [25] XODOT B B. 煤与瓦斯突出 [M]. 宋世钊, 王佑安, 译. 北京: 中国工业出版社, 1966: 310–318.
- [26] YUAN J, TAKEDA N, WAAS A M. A note on data processing in the split Hopkinson pressure bar tests [J]. Experimental Techniques, 1998, 22(5): 21–24.
- [27] SHAN R L, JIANG Y S, LI B Q. Obtaining dynamic complete stress-strain curves for rock using the split Hopkinson pressure bar technique [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(6): 983–992.
- [28] 陈俊宇, 裴向军, 杜瑞锋, 等. 冲击载荷作用下砂岩的动力学特性及能耗规律 [J]. 科学技术与工程, 2019, 19(31): 304–310.
- CHEN J Y, PEI X J, DU R F, et al. Dynamic characteristics and energy consumption of sandstone under impact loading [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(31): 304–310.
- [29] KOLSKY H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading [J]. Proceedings of the Physical Society (Section B), 1949, 62: 676–700.
- [30] LUNDBERG B. A split Hopkinson bar study of energy absorption in dynamic rock fragmentation [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1976, 13(6): 187–197.
- [31] 赵迪斐, 郭英海, WANG G, 等. 基于分形建模的高煤级煤孔隙结构特征量化表征-以阳泉矿区山西组煤样为例 [J]. 东北石油大学学报, 2019, 43(3): 53–67.
- ZHAO D F, GUO Y H, WANG G, et al. Quantitative characterization of pore structure characteristics of high quality coal based on fractal modeling: taking coal samples from Shanxi Formation in Yangquan Mining Area as an example [J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2019, 43(3): 53–67.
- [32] RIGBY S P. Predicting surface diffusivities of molecules from equilibrium adsorption isotherms [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2005, 262(1/2/3): 139–149.
- [33] 杨峰, 宁正福, 张世栋, 等. 基于氮气吸附实验的页岩孔隙结构表征 [J]. 天然气工业, 2013, 33(4): 135–140.

- YANG F, NING Z F, ZHANG S D, et al. Characterization of pore structures in shales through nitrogen adsorption experiment [J]. *Natural Gas Industry*, 2013, 33(4): 135–140.
- [34] 吉小峰. 煤中纳米孔隙发育特征及其对气体运移的控制机理研究 [D]. 焦作: 河南理工大学, 2018.
- JI X F. Development characteristics of nanopores in coal and its controlling mechanism on gas migration [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2018.
- [35] YAO Y B, LIU D M, TANG D Z, et al. Fractal characterization of seepage-pores of coals from China: an investigation on permeability of coals [J]. *Computers & Geosciences*, 2009, 35(6): 1159–1166.
- [36] 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 X X, TANG Y G, LI W, 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.
- [37] 林海飞, 刘静波, 严敏, 等. CO_2/CH_4 在煤储层中扩散规律的分子动力学模型 [J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(1): 84–89.
- LIN H F, LIU J B, YAN M, et al. Molecular dynamics simulation on diffusion rules of CO_2/CH_4 in coal reservoir [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2017, 13(1): 84–89.
- [38] 董怡静, 韩雨桢, 候泉林, 等. 煤变形产气的力化学机理探讨 [J]. 煤炭学报, 2017, 42(4): 942–949.
- DONG Y J, HAN Y Z, HOU Q L, et al. Mechanochemistry mechanism of gas generation during coal deformation [J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(4): 942–949.
- [39] 刘运通, 高文学. 爆炸荷载下岩石损伤的数值模拟研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20(6): 789–792.
- LIU Y T, GAO W X. Numerical simulation on rock damage under explosion loading [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(6): 789–792.
- [40] 唐红梅, 周云涛, 廖云平. 地下工程施工爆破围岩损伤分区研究 [J]. 振动与冲击, 2015, 34(23): 202–206.
- TANG H M, ZHOU Y T, LIAO Y P. Damage zone of surrounding rock of underground engineering under construction blasting [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(23): 202–206.

Fractal Study on Influence of Impact Load on Microscopic Pore of Anthracite

WANG Yixian^{1,2}, LIANG Weimin¹

(1. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, China;

2. Henan Technical College of Construction, Zhengzhou 450064, Henan, China)

Abstract: In order to reveal the influence of impact loading on the microscopic pore structure of anthracite, the shock and stress waves of the impact stress in different attenuation processes were simulated by using the split Hopkinson pressure bar (SHPB) impact loading system, and the fractal characteristics of the pore structures of anthracite in different directions of Zhaogu No.2 Mine (vertical, parallel and 45° oblique to the bedding direction) were studied by using the fractal theory based on the test data of mercury intrusion and low-temperature liquid nitrogen before and after impacting. The results show that for the seepage hole, the impact loading increases the gas seepage and migration velocity. For the adsorption hole, the impact loading reduces the adsorption capacity of the adsorption hole, which promotes the desorption of gas. Fractal dimension has obvious impact directionality, and the fractal dimension of the adsorption hole is obviously smaller than that of the seepage hole; the optimal impact loadings of anthracite in different directions are different. The optimal loading in the vertical bedding direction and the oblique bedding direction is 51.80 MPa, and the optimal impact loading in the parallel bedding direction is 28.46 MPa. The research results can provide support for the discussion of the mechanism of impact loading to promote gas drainage.

Keywords: impact loading; anthracite; fractal theory; microscopic pore; the mercury injection; low temperature liquid nitrogen