



推荐阅读:

[综采工作面上隅角瓦斯流动活跃区形成机理研究](#)

[高瓦斯突出煤层综采工作面注水降尘技术应用研究](#)

[超大直径钻孔采空区瓦斯抽采技术研究](#)

[风速对近距离煤层采空区漏风及煤自燃影响研究](#)

[深部高瓦斯矿井大采高工作面立体抽采瓦斯技术](#)

[水力冲孔压裂卸压增透抽采瓦斯技术研究](#)

[巷道火灾时期流场及瓦斯浓度变化规律数值模拟研究](#)

[高突低渗透煤层超高压水力割缝卸压增透研究](#)

[高瓦斯综采工作面定向高位钻孔瓦斯抽采技术研究](#)

[寺河井田煤层气产能分布特征及影响因素分析](#)

[我国煤矿覆岩采动裂隙带卸压瓦斯抽采技术研究进展](#)

[基于高位定向长钻孔的上隅角瓦斯治理研究](#)

[松软突出煤层瓦斯抽采钻孔施工技术及发展趋势](#)

[综采工作面煤层注水防尘优化及效果研究](#)

[我国煤层气钻井技术及装备现状与展望](#)

[高瓦斯矿井高抽巷合理布置及终巷位置确定研究](#)

[原生结构煤与构造煤孔隙结构与瓦斯扩散特性研究](#)

[不同孔间距抽采孔对深孔预裂爆破增透效果影响研究](#)

[顺层瓦斯抽采钻孔封隔一体化封孔工艺研究](#)

[煤层瓦斯赋存特征及其关键地质因素影响研究](#)



移动扫码阅读

李希建,薛海腾,陈刘瑜,等.贵州地区突出煤层微孔结构及对瓦斯流动特性的影响[J].煤炭科学技术,2020,48(10):67-74. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.10.007

LI Xijian, XUE Haiteng, CHEN Liuyu, et al. Micropore structure of outburst coal seam in Guizhou Area and its effect on gas flow[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(10):67-74. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.10.007

## 贵州地区突出煤层微孔结构及对瓦斯流动特性的影响

李希建<sup>1,2,3</sup>,薛海腾<sup>1,2,3</sup>,陈刘瑜<sup>4</sup>,沈仲辉<sup>5</sup>,徐明智<sup>1,2,3</sup>,许石青<sup>1</sup>

(1.贵州大学 矿业学院,贵州 贵阳 550025;2.复杂地质矿山开采安全技术工程中心,贵州 贵阳 550025;

3.贵州大学 瓦斯灾害防治与煤层气开发研究所,贵州 贵阳 550025;4.中国电建集团贵州电力设计研究院有限公司,贵州 贵阳 550003;

5.重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室,重庆 400044)

**摘要:**煤层瓦斯流动规律与煤的孔隙结构密切相关。为揭示贵州地区突出煤层微观孔隙结构特征及其对瓦斯流动特性的影响,以贵州地区 6 个典型矿井突出煤层为研究对象,采用高压容量法测试了 6 个煤样的吸附能力。同时,根据高压压汞试验,利用分形方法获得煤样分形维数,并分析样品的微观孔隙结构分形特征及其与煤质参数的关系。在此基础上,探讨多尺度孔隙中瓦斯流动规律,分析吸附作用对瓦斯流动特性的影响。结果表明,贵州突出煤层以微孔为主,微孔为比表面积和孔隙体积的主要贡献者。同一煤样微孔分形维数  $D_1$ 、小孔分形维数  $D_2$  和中孔分形维数  $D_3$  依次增大,且分形特征明显。 $D_1$  和综合分形维数  $D_k$  与水分呈负相关,挥发分与  $D_2$ 、 $D_3$  呈负相关,灰分与  $D_3$  呈负相关。突出煤层中瓦斯扩散模式主要为 Knudsen 型和过渡型。在 Knudsen 扩散区和过渡扩散区,渗透率受温度和压力影响较小;Fick 扩散区,在相同  $K_n$  和温度条件下,渗透率随压力增大而减小,随温度增高而降低;压力越高,孔径越小,渗透率受吸附作用影响越大。

**关键词:**突出煤层;瓦斯吸附;孔隙结构;煤层渗透率;煤层分形维数

中图分类号:TD712

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2020)10-0067-08

### Micropore structure of outburst coal seam in Guizhou Area and its effect on gas flow

LI Xijian<sup>1,2,3</sup>, XUE Haiteng<sup>1,2,3</sup>, CHEN Liuyu<sup>4</sup>, SHEN Zhonghui<sup>5</sup>, XU Mingzhi<sup>1,2,3</sup>, XU Shiqing<sup>1</sup>

(1. Mining College, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Engineering Center for Safe Mining Technology Under Complex

Geologic Condition, Guiyang 550025, China; 3. Institute of Gas Disaster Prevention and Coalbed Methane Development of Guizhou

University, Guiyang 550025, China; 4. State Key Laboratory for the Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University,

Chongqing 400044, China; 5. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044)

**Abstract:** The gas flow law of coal seam is closely related to the pore structure of coal. In order to reveal the microscopic pore structure characteristics of outburst coal seams in Guizhou and its effect on gas flow, six outburst coal seams in typical mines in Guizhou area were taken as the research objects, and the adsorption capacity of six coal samples was tested by the high pressure capacity method. At the same time, according to the high-pressure mercury test, the fractal dimension of the coal sample was obtained by the fractal method, and the fractal characteristics of the microscopic pore structure of the coal and its relationship with the coal material composition were analyzed. On this basis, the law of gas flow in multi-scale pores was discussed, and the effect of adsorption on gas flow was analyzed. The results show that Guizhou outburst coal seams are dominated by micropores, which are the main contributors to the specific surface area and pore volume. The micropore fractal dimension  $D_1$ , small pore fractal dimension  $D_2$  and mesopore fractal dimension  $D_3$  of the same coal sample increase sequentially, and the fractal characteristics are obvious.  $D_1$  and the integrated fractal dimension  $D_k$  are negatively correlated with moisture, the volatile matter is negatively correlated with  $D_2$  and  $D_3$ , and the ash content is negatively correlated with  $D_3$ . The gas diffusion mode in outburst coal is mainly Knudsen type and transition type. In the Knudsen diffusion zone and transition diffusion zone, the permeability is less affected by temperature and pressure; in the Fick diffusion zone, under the same Knudsen number ( $K_n$ ) and tempera-

收稿日期:2020-06-21;责任编辑:郭鑫

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51874107);贵州省科技计划资助项目(黔科合平台人才[2018]5781号)

作者简介:李希建(1967—),男,土家族,湖南张家界人,教授,博士生导师,博士。E-mail:575914635@qq.com

通讯作者:薛海腾(1994—),男,山西大同人,硕士研究生。E-mail:1014132071@qq.com

ture, the permeability decreases with increasing pressure and decreases with increasing temperature. The higher the pressure, the smaller the pore size, and the more the permeability is affected by adsorption.

**Key words:** outburst coal seam; gas adsorption; pore structure; coal seam permeability; coal seam fractal dimension

## 0 引言

煤储层具有复杂的孔隙结构,含有大量的吸附态瓦斯<sup>[1]</sup>。煤孔隙结构是影响煤层气开采及瓦斯运移的主要因素之一<sup>[2]</sup>,而煤层瓦斯的赋存与运移和煤与瓦斯突出密切相关。煤岩孔隙结构十分复杂,大量学者对煤的孔隙结构特征开展了研究。李振等<sup>[3]</sup>、张松航等<sup>[4]</sup>、姜文等<sup>[5]</sup>基于高压压汞试验分析了高阶煤、鄂尔多斯盆地东缘煤储层和高变质煤的孔隙结构及其分形特征。林海飞等<sup>[6]</sup>研究了煤的吸附孔特征参数对瓦斯放散初速度的影响,表明瓦斯放散初速度随着分形维数的增大而减小。李子文等<sup>[7]</sup>基于分形理论,建立了煤体多孔介质孔隙度和分形维数的关系。聂百胜等<sup>[8]</sup>利用小角 X 射线、液氮吸附和扫描电镜研究了不同煤阶煤的纳米孔隙分布及对其瓦斯扩散特征的影响,得出压强越大,瓦斯扩散越容易。罗磊等<sup>[9]</sup>分析了准东低阶煤的孔隙特征及对气体传质方式的影响。结果表明,相比与褐煤滑脱效应和吸附层对长焰煤瓦斯渗流能力改善更为显著。虽然利用分形维数反映煤孔隙结构特征的研究较多,但孔隙半径划分不同,得到的孔隙分形维数也不相同。如文献[10]将孔隙半径以 73 nm 为界限, <73 nm 为微孔, 73~6 000 nm 为中孔, >6 000 nm 为大孔;而文献[2]将孔隙半径 >5.00 μm 时划为超大孔, 0.50~5.00 μm 划为大孔, 0.05~0.50 μm 划为中孔, <0.05 μm 划为微小孔,故所得分形维数对孔隙参数的影响也不尽相同。近年

来,孔隙气体流动特征成为研究热点,葛洪魁等<sup>[11]</sup>分析了纳米孔隙气体流动的滑脱效应。徐鹏等<sup>[12]</sup>基于分形理论建立了气体输运的微观物理模型。邱淑霞等<sup>[13]</sup>基于分形理论建立了多孔介质气体渗流的孔隙尺度模型。贵州地区矿井地质条件复杂,瓦斯含量大、难抽采,且多为突出煤层,使得该地区煤的孔隙结构特征及其对气体流动方式的影响与其他地区不尽相同。目前,对贵州地区突出煤层的微观孔隙特征及其对气体流动特性的影响鲜有报道。因此,笔者基于高压压汞试验,利用分形方法计算贵州地区 6 个典型突出矿井的 6 个煤样的分形维数,分析突出煤层煤的微观孔隙结构分形特征,结合等温吸附试验研究吸附作用对瓦斯流动特性的影响,以期对贵州地区煤层气开采和矿井瓦斯灾害防治提供理论指导。

## 1 等温吸附和高压压汞试验

### 1.1 样品采集

试验采集的 6 组煤样分别来自贵州地区 6 个不同突出矿井:金佳煤矿 1293 运输巷掘进工作面的 9 煤,五轮山煤矿 1803 运输巷掘进工作面的 8 煤,安顺煤矿 9101 工作面的 9 煤,发耳煤矿 10701 回风巷掘进工作面的 7 煤,小屯煤矿 16<sub>中</sub>05 轨道巷掘进工作面里程 560 m 处的 6<sub>中</sub>煤和青龙煤矿 21602 运输巷里程 783 m 处的 16 煤。根据 GB/T 212—2002《煤的工业分析方法》对煤样进行工业分析,煤样的基础参数见表 1。

表 1 样品的基本参数

Table 1 Basic parameters of samples

煤样	$M_{ad}/\%$	$A_{ad}/\%$	$V_{dat}/\%$	视密度/( $g \cdot cm^{-3}$ )	真密度/( $g \cdot cm^{-3}$ )	孔隙率/%
金佳煤样	0.98	7.65	10.81	1.36	1.43	4.90
安顺煤样	2.50	11.12	6.32	1.44	1.53	5.88
五轮山煤样	0.77	7.18	6.14	1.41	1.47	4.08
发耳煤样	0.83	14.70	15.44	1.40	1.42	1.41
小屯煤样	1.66	12.86	6.59	1.48	1.57	5.73
青龙煤样	2.18	10.06	7.14	1.43	1.51	5.30

### 1.2 等温吸附和高压压汞试验方案

选用 HCA 型高压容量法瓦斯吸附装置,按照 MT/T 752—1997《煤的甲烷吸附量测定方法》,将煤样粉碎到粒径 3 mm,在 45~50 °C 下干燥后进行

试验。

30 °C 条件下对 6 组煤样进行高压压汞吸附试验,试验采用 AutoPore IV 9510 全自动压汞仪,测试孔径范围为 0.000 5~360 μm。

## 2 结果与分析

### 2.1 等温吸附试验结果

煤体吸附特征模型常用 Langmuir 等温吸附方程表征,见式(1)<sup>[14]</sup>即

$$V = \frac{V_L P}{P + P_L} \quad (1)$$

式中: $V$ 为压力 $P$ 时的瓦斯吸附量, $\text{cm}^3/\text{g}$ ;  $V_L$ 为 Langmuir 体积,表示单分子层最大吸附能力, $\text{m}^3/\text{t}$ ;  $P_L$ 为吸附量达到 $V_L/2$ 时的压力, $\text{MPa}$ 。

各煤样的瓦斯吸附试验结果如图1所示,将试验结果根据式(1)进行拟合,拟合结果见表2。由图1可知,6组煤样的瓦斯吸附曲线都符合I型等温吸附曲线<sup>[14]</sup>。在相同温度下,所有煤样的吸附量随瓦斯压力的增大而增大。当瓦斯压力增大到一定程度后趋于平缓,达到瓦斯吸附极限。随瓦斯压力增大不同煤样吸附瓦斯的难易程度不同。

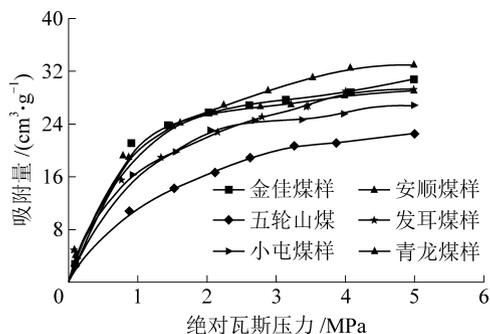


图1 不同煤样的等温吸附曲线

Fig.1 Isothermal adsorption curves of different coal samples

### 2.2 高压压汞试验结果

表3为高压压汞试验结果,由表3可知,6组煤

表3 高压压汞试验测试结果

Table 3 Test results of high-pressure mercury intrusion experiment

煤样	孔容 $V_c/(\text{mL} \cdot \text{g}^{-1})$	比表面积 $S/(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	平均孔径 $d/\text{nm}$	各孔隙下的比表面积占比/%		
				<10 nm	10~100 nm	>100 nm
金佳煤样	0.153 7	15.824	38.8	99.8	0.19	0.01
安顺煤样	0.228 9	18.260	50.1	99.8	0.11	0.09
五轮山煤样	0.163 9	18.441	35.6	99.6	0.30	0.10
发耳煤样	0.146 8	17.606	33.4	99.8	0.19	0.01
小屯煤样	0.198 2	15.434	51.4	99.1	0.82	0.08
青龙煤样	0.206 5	18.895	43.7	99.1	0.88	0.02

### 2.3 分形维数计算

基于压汞试验数据计算孔隙结构分形维数,其表达式<sup>[15]</sup>即

表2 高压容量法瓦斯吸附试验结果

Table 2 High-pressure capacity method gas adsorption experiment results

矿井	$V_L/\text{MPa}$	$P_L/\text{MPa}$	相关系数 $R^2$
金佳煤矿	36.5	0.898	0.994 0
安顺煤矿	38.5	0.839	0.997 6
五轮山煤矿	32.6	0.608	0.999 2
发耳煤矿	28.0	1.234	0.990 5
小屯煤矿	34.8	0.951	0.992 7
青龙煤矿	31.0	0.766	0.998 5

样的孔容体积为 $0.146\ 8 \sim 0.228\ 9\ \text{mL}/\text{g}$ ,比表面积为 $15.434 \sim 18.895\ \text{m}^2/\text{g}$ ,平均孔径为 $33.4 \sim 51.4\ \text{nm}$ 。其中,青龙煤样的比表面积最大,安顺煤矿的孔容体积最大。但从煤样相同孔径段的比表面积占比来看,6组煤样微孔( $<10\ \text{nm}$ )的比表面积占整个比表面积的 $99.1\% \sim 99.8\%$ ,小孔和中孔仅占 $0.11\% \sim 0.80\%$ 。虽然各个煤样孔隙参数差异较大,但各煤样相同孔径段比表面积占比相似。图2为煤样进退汞曲线,由图2可知,在较小压力阶段( $0 \sim 0.7\ \text{MPa}$ ),进汞量急增,最大进汞饱和度为 $12.92\%$ ,排驱压力较低,说明在此阶段孔隙以大孔为主。压力为 $0.70 \sim 68.95\ \text{MPa}$ 时,排驱压力较大,进汞量缓慢,最大汞饱和度为 $13.89\%$ ,说明在此阶段以小孔、中孔为主,包含少量大孔。当压力大于 $68.95\ \text{MPa}$ 时,进汞量再次增大,最大汞饱和度为 $16.39\%$ ,说明煤中微孔体积占比也较大。所有煤样的进汞、退汞体积差较少,滞后环较窄,表明压汞所测煤样半封闭孔较多、开放孔较小,孔隙连通性较差,不利于瓦斯扩散和渗流,进而使瓦斯突出危险性增大。

$$\lg(1 - S_{\text{Hg}}) = (D - 3) \lg P_c + (3 - D) \lg P_{\text{min}} \quad (2)$$

其中: $S_{\text{Hg}}$ 为汞的饱和度, $\%$ ;  $D$ 为分形维数; $P_c$

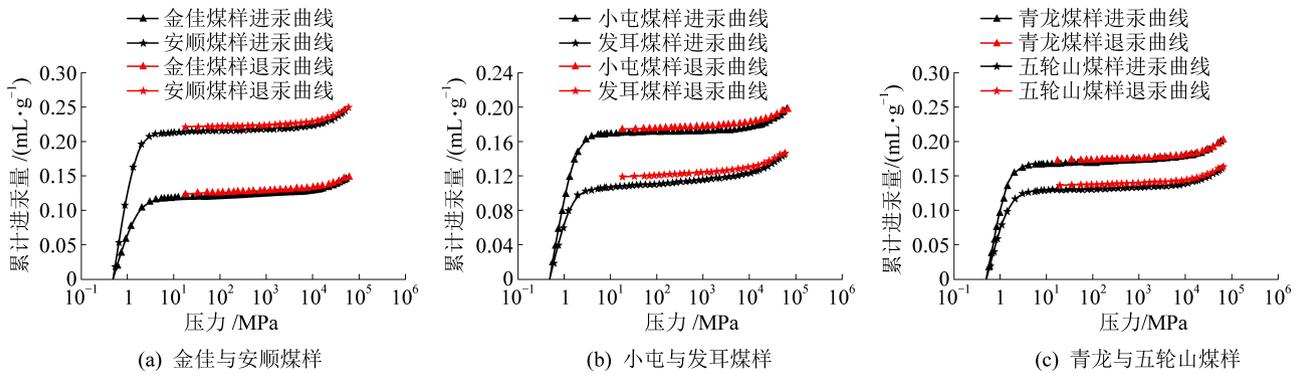


图2 煤样进退汞曲线

Fig.2 Mercury feeding and withdrawal curves of coal samples

为毛细管压力,MPa; $P_{\min}$ 为入口毛细管压力(最大孔径对应的毛细管压力),MPa。由式(2)可知,通过对 $\lg(1 - S_{\text{Hg}})$ 和 $\lg P_c$ 的线性拟合,可得到该直线的斜率 $A$ ,则分形维数 $D$ 可表示为

$$D = 3 + A \quad (3)$$

由于煤的非均质性较强,不同孔径段孔隙分形维数存在差异,难以代表煤储层整体的复杂性。为更好反映孔隙结构的复杂程度,根据霍多特孔隙分

类,取孔隙半径 $r$ 界限点为10、100、1 000 nm,将孔隙划分为微孔( $r < 10$  nm)、小孔( $10 \text{ nm} < r < 100$  nm)、中孔( $100 \text{ nm} < r < 1\,000$  nm)和大孔( $r > 1\,000$  nm)。以金佳煤矿为例,做 $\lg(1 - S_{\text{Hg}})$ 和 $\lg P_c$ 的线性拟合曲线(图3a、图b)。采用式(2)计算各孔径段分形维数 $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$ 和 $D_4$ ,并以各分形区间的体积分数为权重计算综合分形维数 $D_k$ ,结果见表4。

表4 分形维数计算结果

Table 4 Fractal dimension calculation results

煤样	孔隙半径/nm	斜率 $A$	分形维数	$R^2$	孔隙体积占比/%	综合分形维数 $D_k$
金佳煤样	$r < 10$	-0.010 91	2.989 09	0.93	87.70	2.990 210
	$10 < r < 100$	-0.001 59	2.998 41	0.94	10.90	
	$100 < r < 1\,000$	-0.001 56	2.998 44	0.97	1.04	
	$r > 1\,000$	-0.010 91	2.989 09	0.69	0.36	
安顺煤样	$r < 10$	-0.015 54	2.984 46	0.91	87.30	2.959 973
	$10 < r < 100$	-0.001 42	2.998 58	0.89	11.50	
	$100 < r < 1\,000$	-0.001 06	2.998 94	0.88	1.01	
	$r > 1\,000$	-0.057 55	2.942 45	0.60	0.19	
五轮山煤样	$r < 10$	-0.001 24	2.986 80	0.94	91.70	2.987 738
	$10 < r < 100$	-0.001 73	2.998 27	0.93	7.30	
	$100 < r < 1\,000$	-0.013 20	2.998 76	0.93	0.80	
	$r > 1\,000$	-0.025 00	2.975 00	0.66	0.20	
发耳煤样	$r < 10$	-0.012 39	2.987 61	0.94	89.50	2.988 598
	$10 < r < 100$	-0.002 96	2.997 04	0.99	9.60	
	$100 < r < 1\,000$	-0.002 39	2.997 61	0.99	0.80	
	$r > 1\,000$	-0.020 35	2.988 02	0.66	0.10	
小屯煤样	$r < 10$	-0.011 98	2.988 02	0.92	90.0	2.989 098
	$10 < r < 100$	-0.001 14	2.998 86	0.84	8.84	
	$100 < r < 1\,000$	-0.000 67	2.999 33	0.82	1.08	
	$r > 1\,000$	-0.035 12	2.964 88	0.69	0.08	
青龙煤样	$r < 10$	-0.013 91	2.986 09	0.91	90.10	2.987 270
	$10 < r < 100$	-0.001 63	2.998 37	0.94	8.77	
	$100 < r < 1\,000$	-0.001 66	2.998 34	0.95	0.98	
	$r > 1\,000$	-0.034 81	2.965 19	0.67	0.15	

由表4可知:6组煤样的微孔、小孔和中孔阶段分形维数( $D_1$ 、 $D_2$ 和 $D_3$ )及综合分形维数 $D_k$ 较高,均大于2.5,且拟合度较高,分形特征明显。微孔、小

孔、中孔分形维数依次增大。各样品的综合分形维数 $D_k$ 与微孔分形维数接近(图4),这是因为突出煤层的比表面积和孔容体积的主要贡献者为微孔,而

微孔发育也是贵州地区突出煤层的特点,所以突出煤层的综合分形维数主要反映了微孔分形维数大小。在大孔阶段  $\lg P_c$  和  $\lg(1-S_{Hg})$  相关性较差,且拟合度较低,这主要与压汞仪的测试孔径范围有关;说明只有当孔径小于 1 000 nm 时,以压汞法测得的孔隙才具有明显的分形特征。

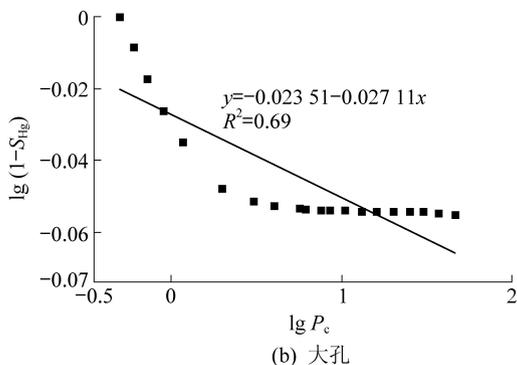
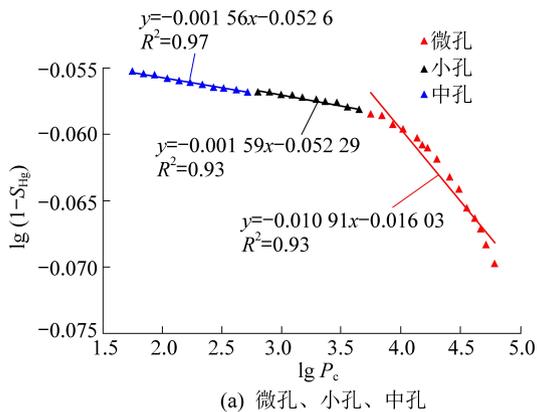


图3  $\lg(1-S_{Hg})$  和  $\lg P_c$  的线性拟合  
Fig.3 Linear fitting curves of  $(1-S_{Hg})$  and  $\lg P_c$ .

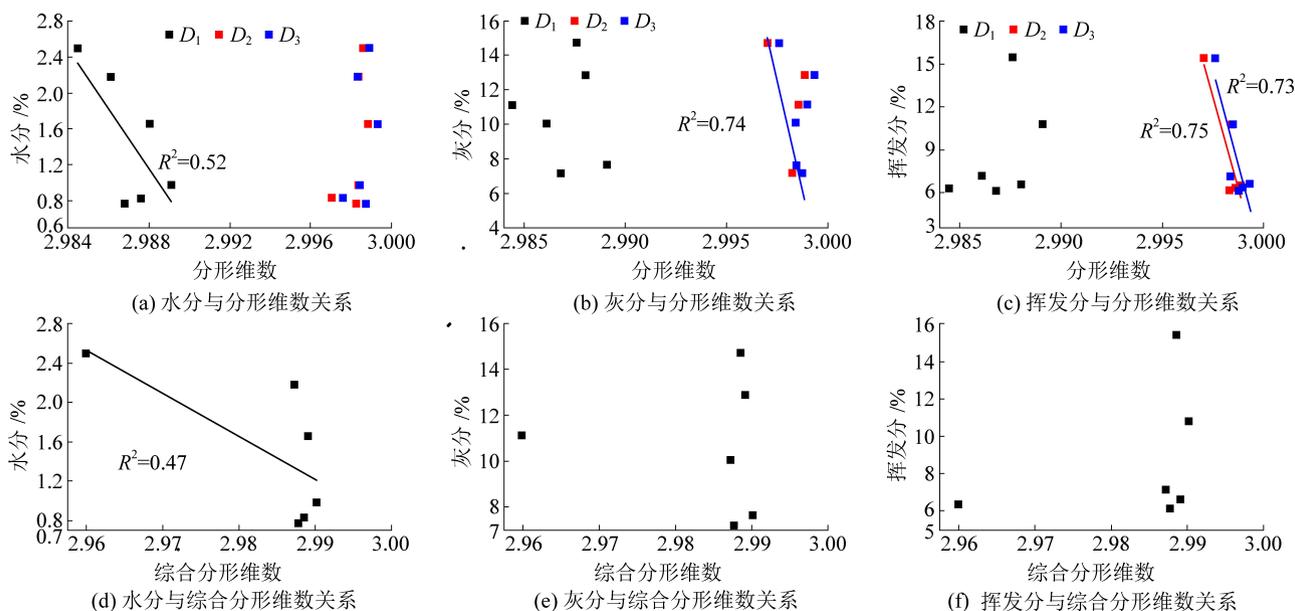


图5 分形维数和煤质参数之间的关系

Fig.5 Relationship between fractal dimension and coal quality parameters

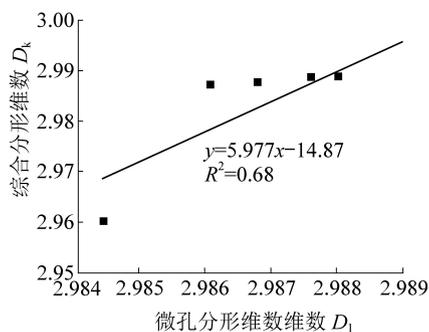


图4  $D_k$  与  $D_1$  关系图

Fig.4 Relationship between  $D_k$  and  $D_1$

### 2.4 分形维数与煤质参数的关系

分形维数和煤样水分、灰分、挥发分之间的关系如图5所示。由图5可知,  $D_k$  与水分呈负相关,与灰分和挥发分产率相关性不明显。  $D_1$  与水分呈负相关,  $H_2O$  分子比甲烷更容易吸附在煤中微孔孔隙<sup>[16]</sup>,引起固液界面形成表面张力。水分越高,气体和液体分子间的间距越小,分子间的引力越大,表面张力越大,在一定程度上增大了孔径,使微孔阶段孔隙相对减少,因此  $D_1$  减小。挥发分与  $D_2$ 、 $D_3$  呈负相关,说明挥发分会使小孔和中孔的分形维数增加,主要是因为挥发分越高孔隙的比表面积越小<sup>[17]</sup>,孔隙表面越光滑,分形维数越小。灰分和  $D_3$  呈负相关,但与  $D_1$ 、 $D_2$  的相关性不明显,说明灰分和挥发分会使中孔分形维数增加,主要是因为矿物质的填充会改变煤体表面的粗糙程度<sup>[3]</sup>。煤体中灰分越高,煤中所含矿物越高,矿物填充煤中部分孔隙,使煤体孔隙结构相对简单从而使分形维数降低<sup>[7]</sup>。

### 3 突出煤层瓦斯流动特性与影响因素分析

#### 3.1 瓦斯扩散模式

瓦斯在煤体内部的扩散模式与煤体内孔隙大小直接相关<sup>[6]</sup>,煤的孔隙尺度范围极广,从常规尺度到纳米尺度形成了多尺度并存的物理结构<sup>[11]</sup>,因此瓦斯在煤体内的扩散模式复杂多变。煤体中气体扩散模式划分可用努森数表征<sup>[5]</sup>:

$$K_n = d/\lambda \quad (4)$$

式中: $K_n$ 为努森数; $d$ 为孔隙直径, nm; $\lambda$ 为气体分子平均自由程。

$$\lambda = kT/(\sqrt{2}\pi d_0^2 p) \quad (5)$$

式中: $k$ 为 Boltzmann 常数,  $1.38 \times 10^{-23}$  J/K; $T$ 为绝对温度, K; $d_0$ 为气体分子直径, 甲烷取 0.38 nm; $p$ 为气体压力, MPa。

将式(5)代入式(4),可得:

$$K_n = \sqrt{2}\pi d_0^2 pd/kT \quad (6)$$

林海飞等<sup>[6]</sup>根据  $K_n$  对气体扩散模式进行划分: $K_n \geq 10$  为菲克 (Fick) 型; $K_n \leq 0.1$  为 Knudsen 型,  $0.1 < K_n < 10$  为过渡型。根据式(6),以安顺煤矿煤样为例计算不同温度 (303.15、313.15、323.15 K) 和压力 (0.74、1.00、1.50 MPa) 下煤样的  $K_n$  (如图 5 所示)。

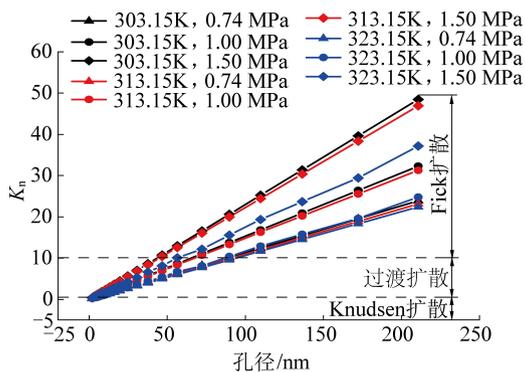


图6  $K_n$  在不同温度及压力下随孔径变化

Fig.6 Knudsen number changes with pore diameter under different temperature and pressure conditions

由图 6 可知,贵州地区突出煤层瓦斯扩散模式 3 种模式共存,瓦斯扩散模式主要是 Knudsen 型和过渡型。相同温度条件下, $K_n$  随孔径和压力的增大而增大,且变化率较大;相同压力条件下, $K_n$  随孔径的变化与温度呈负相关,但变化率较小。贵州地区突出煤层以微孔为主 (<10 nm),在此阶段气体的扩散模式主要为 Knudsen 扩散,气体流通较为困难<sup>[5]</sup>,瓦斯易聚集,这是贵州地区煤矿容易发生煤与瓦斯突出的原因之一。

#### 3.2 不同扩散模式下瓦斯流动影响因素分析

由 3.1 节分析可知,不同孔径下的气体扩散模式不同。不同扩散模式下气体的表观渗透率可表示<sup>[18]</sup>:

$$K = \frac{r^2}{8} \left[ 1 + \frac{128}{15\pi^2} \arctan(4 K_n^{0.4}) K_n \right] \left( 1 + \frac{4K_n}{1 + K_n} \right) \quad (7)$$

式中: $K$ 为表观渗透率,  $\text{mm}^2$ 。

由式(7)计算出不同扩散区内气体的表观渗透率  $K$ ,如图 7 所示。

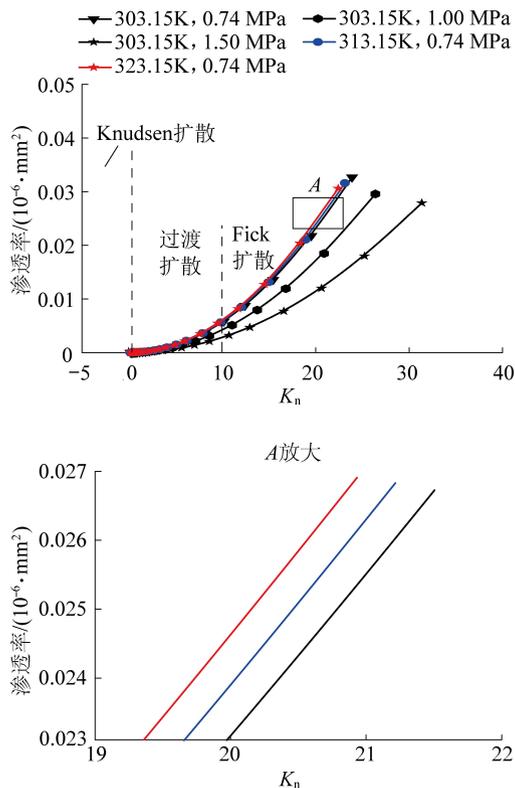


图7  $K$  随压力和温度变化

Fig.7  $K$  changes with pressure and temperature

由图 7 知,在 Fick 扩散区,当  $K_n$  与温度相同时,压力越大渗透率越小。压力大会导致煤体孔隙受压力作用而收缩闭合,使气体流通更为困难。压力小时,吸附气体解吸速度加快,煤体基质收缩效应加强,使气体渗流通道变宽,渗透率增加。当  $K_n$  和压力相同时,渗透率随温度增高而增大,这是因为温度越高,气体活性越强,越易获得动能<sup>[2]</sup>,使气体流动速度加快,渗透率增大。渗透率变化受温度影响较小说明贵州地区突出煤层瓦斯渗流对温度的敏感性较差。在 Knudsen 和过渡扩散区,渗透率低且受温度和压力影响较小,这与第 3.1 节中温度和压力对  $K_n$  的影响相似,此为贵州地区低渗透、高瓦斯和难抽采的重要原因。

### 3.3 吸附作用对气体流动的影响

气体吸附/解吸受温度和压力影响较大,导致吸附层厚度变化。研究表明<sup>[19]</sup>,吸附层厚度主要受压力和 Langmuir 压力控制,可表示:

$$r_e = r - \sigma \frac{P/P_L}{1 + P/P_L} \quad (8)$$

式中: $r_e$ 为有效孔隙半径,nm; $r$ 为孔隙半径,nm; $\sigma$ 为气体分子直径,甲烷取0.38 nm。

结合达西定律和 Hagen-Poiseuille 方程,得到单毛细管气体渗透率<sup>[20]</sup>:

$$K_g = r^2/8 \quad (9)$$

式中: $K_g$ 为不考虑滑脱效应时的达西渗透率。

将式(8)代入式(9)得到考虑吸附层厚度的渗透率  $K_0$ ,可表示:

$$K_0 = r_e^2/8 \quad (10)$$

用  $K_0/K_g$  作为吸附作用对煤储层气体渗透率影响指标。以安顺煤矿煤样为例,分析不同压力下吸附作用对煤储层气体渗透率的影响,如图8所示。

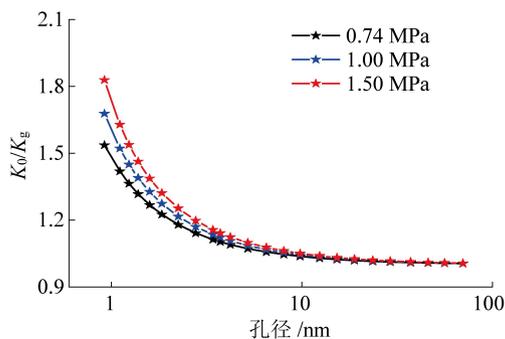


图8 不同压力下吸附作用对渗流能力的影响  
Fig.8 Influence of adsorption on seepage capacity under different pressures

由图8可知,在孔隙半径较小阶段(0~5 nm),压力越高吸附层作用对气体渗流影响越显著。随着孔径半径增加,吸附作用对气体渗流的影响越来越弱,当孔隙半径大于20 nm时, $K_0/K_g$ 相等,即压力越高,气体渗流受吸附作用影响越显著。对贵州地区煤储层孔隙分布来说,大量的微孔为瓦斯吸附提供了更多的吸附位点,增大了吸附层所占的空间比例,阻碍了瓦斯流动,降低了瓦斯渗流能力,导致煤层瓦斯大量积聚在储层内部,进而增大了该地区发生煤与瓦斯突出的可能性,该现象也解释了图7中在孔径较小阶段的 Knudsen 和过渡扩散区瓦斯渗透率低的原因。

## 4 结 论

1) 微孔是贵州地区突出煤层孔隙结构比表面

积孔隙和体积的主要贡献者,占比为99.1%~99.8%。贵州地区突出煤层分形维数  $D_1$ 、 $D_2$ 和  $D_3$ 依次增大; $D_1$ 和综合分形维数  $D_k$ 与水分呈负相关, $D_2$ 、 $D_3$ 与挥发分呈负相关, $D_3$ 和灰分呈负相关。

2) 贵州地区突出煤瓦斯扩散模式主要是 Knudsen 扩散。在 Knudsen 扩散区和过渡扩散区,渗透率受温度和压力影响较小;在 Fick 扩散区, $K_n$ 和温度相同时,渗透率和压力呈负相关,与温度呈正相关。

3) 压力越高,贵州地区突出煤层孔径越小,渗透率受吸附作用影响越大。突出煤层广泛发育的微孔导致其渗透率低,这与吸附作用对渗透率的影响大是贵州地区瓦斯难抽采和易发生煤与瓦斯突出的重要原因。

### 参考文献 (References):

- [1] 李子文,郝志勇,庞源,等.煤的分形维数及其对瓦斯吸附的影响[J].煤炭学报,2015,40(4):863-869.  
LI Ziwen, HAO Zhiyong, PANG Yuan, et al. Coal fractal dimension and its effect on gas adsorption. [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(4): 863-869.
- [2] 李波波,杨康,李建华,等.力热耦合作用下煤岩吸附及渗透特性的试验研究[J].煤炭学报,2018,43(10):2857-2865.  
LI Bobo, YANG Kang, LI Jianhua, et al. Experimental research on coal rock adsorption and permeability characteristics under the coupling of force and heat [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(10): 2857-2865.
- [3] 李振,邵龙义,侯海海,等.高煤阶煤孔隙结构及分形特征[J].现代地质,2017,31(3):595-605.  
LI Zhen, SHAO Longyi, HOU Haihai, et al. Pore structure and fractal characteristics of high rank coal [J]. Geoscience, 2017, 31(3): 595-605.
- [4] 张松航,唐书恒,汤达祯,等.鄂尔多斯盆地东缘煤储层渗流孔隙分形特征[J].中国矿业大学学报,2009,38(5):713-718.  
ZHANG Songhang, TANG Shuheng, TANG Dazhen, et al. Fractal characteristics of coal reservoir seepage pores in the eastern margin of the Ordos Basin [J]. Journal of China University of Mining Technology, 2009, 38(5): 713-718.
- [5] 姜文,唐书恒,张静平,等.基于压汞分形的高变质石煤孔渗特征分析[J].煤田地质与勘探,2013,41(4):9-13.  
JIANG Wen, TANG Shuheng, ZHANG Jingping, et al. Analysis of porosity and permeability characteristics of highly metamorphic coal based on mercury intrusion fractal [J]. Coal Geology and Exploration, 2013, 41(4): 9-13.
- [6] 林海飞,程博,李树刚,等.煤的吸附孔结构对瓦斯放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 influence of coal adsorption pore structure on gas emission characteristics [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2016, 33(3): 557-563.

- 2016,33(3):557-563.
- [7] 李子文,林柏泉,郝志勇,等. 煤体多孔介质孔隙度的分形特征研究[J]. 采矿与安全工程学报,2013,30(3):437-448.  
LI Ziwen, LIN Baiquan, HAO Zhiyong, *et al.* Fractal characteristics of porosity in coal porous media [J]. Journal of Mining and Safety Engineering,2013,30(3):437-448.
- [8] 聂百胜,伦嘉云,王科迪,等. 煤储层纳米孔隙结构及其瓦斯扩散特征[J]. 地球科学,2018,43(5):1755-1762.  
NIE Baisheng, LUN Jiayun, WANG Kedi, *et al.* Nanopore structure of coal reservoir and its gas diffusion characteristics [J]. Earth Science,2018,43(5):1755-1762.
- [9] 罗磊,汤达祯,陶树,等. 准东低阶煤孔隙特征及对气体传质方式的影响[J]. 煤炭学报,2016,41(4):941-947.  
LUO Lei, TANG Dazhen, TAO Shu, *et al.* Pore characteristics of Zhundong low-rank coal and its influence on gas mass transfer method [J]. Journal of China Coal Society,2016,41(4):941-947.
- [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. Fractal characteristics of pores in coal reservoirs of different scales in Bide-Santang Basin [J]. Coal Science and Technology,2016,44(2):33-38,67.
- [11] 葛洪魁,申颖浩,宋岩,等. 页岩纳米孔隙气体流动的滑脱效应[J]. 天然气工业,2014,34(7):46-54.  
GE Hongkui, SHEN Yinghao, SONG Yan, *et al.* Slippage effect of shale nanopore gas flow [J]. Natural Gas Industry,2014,34(7):46-54.
- [12] 徐鹏,李翠红,柳海成,等. 多尺度多孔介质有效气体运输参数的分形特征[J]. 地球科学,2017,42(8):1373-1378.  
XU Peng, LI Cuihong, LIU Haicheng, *et al.* Fractal characteristics of effective gas transport parameters in multi-scale porous media [J]. Earth Science,2017,42(8):1373-1378.
- [13] 邱淑霞,徐鹏,杨茉. 多尺度多孔介质的有效气体渗透率研究[J]. 工程热物理学报,2019,40(6):1375-1379.  
QIU Shuxia, XU Peng, YANG Mo. Research on effective gas permeability of multi-scale porous media [J]. Journal of Engineering Thermophysics,2019,40(6):1375-1379.
- [14] 宋昱,姜波,李明,等. 低中煤级构造煤超临界甲烷吸附特性及吸附模型适用性[J]. 煤炭学报,2017,42(8):2063-2073.  
SONG Yu, JIANG Bo, LI Ming, *et al.* Adsorption characteristics and applicability of adsorption model of supercritical methane of low-to-medium coal rank structure coal [J]. Journal of China Coal Society,2017,42(8):2063-2073.
- [15] 贺伟,钟孚勋,贺承祖,等. 储层岩石孔隙的分形结构研究和应用[J]. 天然气工业,2000,20(2):67-70.  
HE Wei, ZHONG Fuxun, HE Chengzu, *et al.* Research and application of fractal structure of reservoir rock pores [J]. Natural Gas Industry,2000,20(2):67-70.
- [16] 付学祥,张登峰,降文萍,等. 煤体理化性质对其孔隙结构和甲烷吸附性能影响的研究进展[J]. 化工进展,2019,38(6):2714-2725.  
FU Xuexiang, ZHANG Dengfeng, JIANG Wenping, *et al.* Research progress of the influence of coal physical and chemical properties on its pore structure and methane adsorption performance [J]. Chemical Industry and Engineering Progress,2019,38(6):2714-2725.
- [17] 袁镭. 中高煤级煤孔隙结构特征及其主控因素[D]. 焦作:河南理工大学,2014.  
YUAN Lei. Pore structure characteristics and main controlling factors of medium-high coal rank coal [D]. Jiaozuo:Henan University of Science and Technology,2014.
- [18] ESKOK A, KARNIADAKIS G E. Report: A model for flows in channels, pipes, and ducts at micro and nano scales[J]. Microscale Thermophysical Engineering,1999(1):43-77.
- [19] XIONG X, DEVEGOWDA D, VILLAZON G G M, *et al.* A fully-coupled free and adsorptive phase transport model for shale gas reservoirs including non-darcy flow effects [J]. Society of Petroleum Engineers,2012,10,1-14.
- [20] 王瑞,张宁生,刘晓娟,等. 页岩气扩散系数和视渗透率的计算与分析[J]. 西北大学学报(自然科学版),2013,43(1):75-88.  
WANG Rui, ZHANG Ningsheng, LIU Xiaojuan, *et al.* Calculation and analysis of shale gas diffusion coefficient and apparent permeability [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition),2013,43(1):75-88.