

# 贵州低透无烟煤分形维数表征及其影响因素

李照平, 袁梅\*, 许石青, 张锐, 杨萌萌, 徐林

(贵州大学 矿业学院, 贵州 贵阳 550025)

**摘要:**为更好表征贵州低透无烟煤孔裂隙整体复杂程度并探究其分形维数的主要影响因素,以贵州矿区 4 个低透无烟煤层煤样作为研究对象,基于孔隙分类方法,结合低温氮吸附试验和压汞试验结果分类并计算其吸附扩散孔分形维数  $D_k$ 、渗流孔分形维数  $D_s$  及裂隙孔分形维数  $D_l$ ,以渗流孔和裂隙孔体积占比作为权值对  $D_s, D_l$  进行加权计算综合分形维数  $D_c$ ,把分形维数  $D_k, D_c$  作为参考序列,将固定碳含量、灰分、挥发分、平均孔径、总孔比表面积及总孔体积作为比较序列分别进行灰色关联分析.结果表明固定碳对综合分形维数  $D_c$  影响最大,且与迂曲度及煤层透气性系数呈正相关,能更好地反映贵州低透无烟煤整体复杂程度及渗透性;平均孔径对吸附扩散孔分形维数  $D_k$  影响最大,且  $D_k$  与原始瓦斯含量呈正相关,反映贵州低透无烟煤的瓦斯吸附能力.

**关键词:**低透无烟煤;低温氮吸附;压汞实验;分形维数;灰色关联分析

**中图分类号:**X936 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2022)04-0042-07

## Fractal Dimensions and Influencing Factors of Low Permeability Anthracite in Guizhou Province

LI Zhaoping, YUAN Mei, XU Shiqing, ZHANG Rui, YANG Mengmeng, XU Lin  
(College of Mining, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** In order to better characterize the overall complexity of pores and fissures of low permeability anthracite in Guizhou Province and explore the main influencing factors of its fractal dimension, four low permeability anthracite coal samples in Guizhou mining areas are taken as the research object. Based on the pore classification method, combined with the results of low-temperature nitrogen adsorption experiment and mercury injection experiment, the fractal dimensions of adsorption diffusion pore  $D_k$ , seepage pore  $D_s$  and fracture pore  $D_l$  are classified and calculated. The comprehensive fractal dimension  $D_c$  is calculated by weighting  $D_s$  and  $D_l$  with the proportion of the volume of seepage holes and fracture holes as the weight value. The fractal dimensions  $D_k$  and  $D_c$  are taken as reference sequences, and the fixed carbon content, ash content, volatile matter, average pore diameter, total pore specific surface area and total pore volume are taken as comparison sequences for grey correlation analysis. Results show that fixed carbon has the greatest influence on the comprehensive fractal dimension  $D_c$ , and it is positively correlated with tortuosity and coal seam permeability coefficient, which can better reflect the overall complexity and permeability of low permeability anthracite in Guizhou Province. The average pore size has the greatest influence on the fractal dimension  $D_k$  of adsorption diffusion pore, and  $D_k$  is positively correlated with the original gas content, reflecting the gas adsorption capacity of low permeability anthracite.

**Keywords:** low-permeability anthracite; low-temperature nitrogen adsorption experiment; mercury injection experiment; fractal dimension; grey relational analysis

收稿日期:2021-09-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52164014);贵州省科技支撑计划资助项目(黔科合支撑[2019]2887);横向课题(H2021034)

\*通信作者, E-mail:544654583@qq.com

贵州省煤炭资源丰富,且煤炭品质优良,是我国煤炭的重要供应地区.但由于贵州地质构造复杂,许多煤层属于低透高瓦斯含量煤层,制约着贵州的煤炭安全生产.煤是一种多孔介质,内部含有大量孔裂隙,煤层孔裂隙是瓦斯赋存及运移的主要场所,孔裂隙的连通性及复杂程度控制着煤层内瓦斯含量及瓦斯流动的难易程度<sup>[1]</sup>,但由于煤层中孔裂隙具有极强的非均质性,采用传统的几何方法难以精确描述和分析其复杂性<sup>[2]</sup>.

分形反映复杂形体占有空间的有效性,是复杂形体不规则性的量度,储层分形维数是描述储层分形特征的一个重要参数,代表储层表面粗糙度或内部复杂程度<sup>[1]</sup>,已有许多国内外学者通过多种手段对砂岩、页岩及煤等低渗透储层的分形维数做了研究.Zhang等<sup>[2]</sup>通过扫描电镜、核磁共振(NMR)及CT扫描等试验分析砂岩孔隙结构分形特征及其与NMR参数及渗透率的相关关系;Zhang等<sup>[3]</sup>以分形理论为基础,建立数学模型,分析了低透储层的孔隙分形维数、迂曲度分形维数、表面润湿性及水黏度对油气运移的影响;杨峰<sup>[4-5]</sup>、朱汉卿等<sup>[6]</sup>基于低温氮吸附试验,利用FHH模型计算页岩分形维数以表征其孔隙分形特征;叶桢妮等<sup>[7]</sup>开展压汞试验及扫描电镜试验,使用Menger模型和计盒维数法计算试验煤样的分形维数;张懂<sup>[8]</sup>利用扫描电镜和低温氮吸附试验数据计算低透煤层分形维数;姜文等<sup>[9]</sup>借助压汞试验利用washburn方程计算高变质石煤的分形维数并分析其与孔渗特征的联系;李子文等<sup>[10]</sup>以低温氮吸附试验数据为基础,使用FHH模型计算煤样分形维数,依托Langmuir方程拟合分析了分形维数对煤层吸附瓦斯的影响;高为等<sup>[11]</sup>基于压汞试验计算黔西地区煤样的综合分形维数以表征煤整体复杂程度,并分析综合分形特征对煤孔渗特性的影响;贾腾飞等<sup>[12]</sup>利用低温氮吸附及压汞试验数据,使用4种模型计算煤样分形维数,探讨了多尺度分形特征综合表征的方法,并对分形模型进行优选.

以上研究或仅借助单一试验表征储层某段孔径内孔隙分形特征,或进行全孔径段孔隙分形特征表征,但未研究孔隙分形维数对储层储集物性的具体意义.基于此,笔者以贵州低透无烟煤为研究对象,利用低温氮吸附试验和压汞试验数据,采用分形模型计算不同孔径段分形维数,分析其对储层储集特性的意义;以不同孔径段的孔隙体积占比作为权值对分段分形维数进行加权求和,求取综合分形维数并分析其对瓦斯运移的影响;最后使用灰色关联分析探究对分形维数影响最大的因素及原因,为提高贵州低透无烟煤煤层气产出及瓦斯灾害防治等提供理论依据.

## 1 样品采集与制备

试验样品采自贵州六盘水、黔北、兴义及织纳矿区的突出煤层,这些煤层具有高瓦斯,低透气,难抽采等特性,将煤样分别编号为L7, Q9, X17, Z8,煤层基本参数见表1.

试验煤样均取自新暴露煤层,取样后立即密封运至实验室,经破碎筛分后挑选试验所需不同粒径的煤样.选择其中粒径小于0.15 mm的200 g左右煤样放至干燥皿,用作工业分析试验;选择粒径在0.20~0.25 mm的煤样20 g,在85℃下真空烘干6 h,放入干燥皿,用作低温氮吸附试验;选择2~5 g的煤块,在80℃下真空烘干6 h,放入干燥皿用作压汞试验.

表1 试验煤层实测参数

煤样编号	煤层原始瓦斯含量/(m <sup>3</sup> /t)	透气性系数/(m <sup>2</sup> /MPa <sup>2</sup> ·d)
L7	17.546 3	0.024 50
Q9	23.420 0	0.050 00~7.170 00
X17	10.200 0	0.009 00
Z8	14.470 0	0.000 02~0.106 19

## 2 试验与测定结果

### 2.1 工业分析试验

煤的工业分析包括水分(M)、灰分(A)、挥发分(V)、和固定碳(Fc)这4个分析项目指标的测定,其中

水分、灰分、挥发分直接测定得到,固定碳使用差减法计算.工业分析使用 WS-G818 全自动工业分析仪进行工业分析测定,测定结果见表 2.

表 2 工业分析结果

单位:%

煤样编号	水分	灰分	挥发分	固定碳
L7	1.83	9.07	10.37	78.73
Q9	2.33	8.62	4.83	84.22
X17	2.28	7.94	9.87	79.91
Z8	1.95	18.06	6.65	73.34

## 2.2 低温液氮吸附试验

低温氮吸附试验采用的是低温液氮物理吸附静态容量法,该方法原理是恒定温度条件时,在特定的吸附压力下,固体表面上吸附定量的气体,通过测定不同压力下对应的气体吸附量,可得到吸附等温线,由此可计算出比表面积与孔径分布.本次低温氮吸附试验采用 3H-2000PS1/2 型比表面积及孔径分析仪完成,测试范围为 0.35~400 nm,试验结果包括煤样孔隙孔径及孔体积、比表面积等见表 3.

表 3 孔径及孔体积和比表面积测定结果

煤样编号	平均孔径/nm	总孔体积/(mL/g)	BET 多点法比表面积(m <sup>2</sup> /g)	相关系数 r
L7	36.39	0.001 2	0.131 9	0.999 23
Q9	16.70	0.001 3	0.311 4	0.998 06
X17	21.90	0.011 7	2.136 9	0.998 99
Z8	17.03	0.002 3	0.540 1	0.999 48

## 2.3 压汞试验

压汞试验采用 Auto pore IV9510 压汞仪完成,该仪器的主要功能是测量粉末或块状固体的开放孔和裂隙的孔尺寸和孔体积及其他参数,测量范围在 0.003 5~1 000 μm;工作压力:低压段为 3.45~310 kPa,高压段最大压力为 413 685 kPa,工作温度为 15~40 ℃;高、低压传感器测量精度 ≤ ±0.11%.该仪器原理:样品颗粒间的液态汞被压入孔中时,被汞侵入的孔径是所用压力的函数.压汞试验结果见表 4.

表 4 压汞测试结果

单位:%

煤样编号	孔隙度	粒间孔隙度	粒内孔隙度	孔隙迂曲度
L7	11.506 8	10.711 0	0.795 8	2.100 0
Q9	10.477 4	9.284 0	1.193 4	2.111 6
X17	17.705 9	8.540 0	9.165 9	2.166 4
Z8	23.131 9	22.373 9	0.758 1	2.137 0

## 3 分形维数表征及其影响因素分析

### 3.1 分形维数表征

煤的孔隙结构复杂,其研究方法也较多,使用较广泛的有低温气体吸附法<sup>[13-14]</sup>、压汞法<sup>[2,11]</sup>等,有学者通过低温氮吸附试验结合压汞试验对孔隙特征进行联合表征<sup>[8,15]</sup>,将孔隙分为微小孔(吸附扩散孔)、中大孔(渗流孔)和裂隙孔,可据此将煤分形维数分为吸附扩散孔分形维数( $D_k$ )、渗流孔分形维数( $D_s$ )及裂隙孔分形维数( $D_l$ )以表征整体孔隙复杂程度.

本文采用低温氮吸附试验和压汞试验联合表征全孔径范围孔隙结构复杂程度,在霍多特孔隙分类方法的基础上,结合流体注入法测试孔径的特性<sup>[16]</sup>及瓦斯分子吸附特性<sup>[17]</sup>,参考叶祯妮等<sup>[8]</sup>的研究,具体孔径划分如下:孔径小于 0.1 μm 为吸附扩散孔,孔径 0.1~5.0 μm 为渗流孔,孔径大于 5.0 μm 为裂隙孔.

利用低温氮吸附试验,使用 FHH 模型计算吸附扩散孔分形维数:

$$\ln V_q = A + K \ln[\ln(P_o/P_q)]. \quad (1)$$

式中:  $V_q$  为在平衡压力  $P_q$  下的气体吸附量;  $P_o$  为气体的饱和蒸汽压;  $P_q$  为气体吸附的平衡压力;  $K$  为拟合直线的斜率,与吸附扩散孔分形维数  $D_k$  呈线性关系;  $A$  为常数.

作  $\ln V_q - \ln[\ln(P_o/P_q)]$  曲线并进行线性拟合,拟合度最高的直线斜率为  $K$ ,根据  $D_k = K+3$  计算出分形维数.

对大范围孔径的孔隙复杂程度表征能力最好的是 Sierpinski 综合模型<sup>[12]</sup>,故采用 Sierpinski 综合模型,基于压汞试验中煤样进汞体积与进汞压力的关系得到式(2),并利用式(2)计算渗流孔分形维数和裂隙孔分形维数:

$$\ln V_g = \ln \alpha + (3-D) \ln(P_g - P_l). \quad (2)$$

式中:  $V_g$  为进汞量, mL/g;  $\alpha$  为常数,无量纲;  $P_g$  为进汞压力,  $P_l$  为门限压力, MPa;  $D$  为煤渗流孔分形维数  $D_s$  或裂隙孔分形维数  $D_l$ , 无量纲.

根据压汞试验数据作  $\ln V_g - \ln(P_g - P_l)$  散点图进行线性拟合得到斜率  $K$ ,即可求得分形维数  $D = 3 - K$ .

渗流孔分形维数( $D_s$ )、裂隙孔分形维数( $D_l$ )能分别表征渗流孔及裂隙孔的复杂程度,但难以代表煤样整体孔隙复杂程度,高为等<sup>[11]</sup>使用魏建平<sup>[18]</sup>提出的一种煤样综合分形维数计算方法,即以不同孔径段孔体积占比作为权值,对相应孔径段分形维数进行加权求取综合分形维数,公式如式(3).

$$D_c = V_s D_s + V_l D_l. \quad (3)$$

式中:  $D_c$  为综和分形维数;  $D_s$  为渗流孔分形维数;  $D_l$  为裂隙孔分形维数;  $V_s$  为渗流孔体积占总孔体积比;  $V_l$  为裂隙体积占总孔体积比.

现有煤层孔隙裂隙研究将煤中发育的孔隙分为4类<sup>[19]</sup>如表5所示,据此分类,文中裂隙孔及少部分较大渗流孔主要为粒间孔,较小渗流孔主要为粒内孔.

表5 孔隙分类

孔隙类型		孔径分布
原生孔	植物组织孔	大于 10 $\mu\text{m}$
	粒间孔	大于 1 $\mu\text{m}$
外生孔	包括角砾孔、碎粒孔、摩擦孔	以大孔为主
变质孔	气孔	大于 0.1 $\mu\text{m}$
	差异收缩孔	以中大孔为主
	大分子结构孔	小于 10 nm
矿物质孔	包括溶蚀孔、晶间孔、铸膜孔	0.05 ~ 10 $\mu\text{m}$

综上,计算煤样吸附扩散孔分形维数、渗流孔分形维数、裂隙孔分形维数及综合分形维数,结果见表6.

表6 分形维数计算结果

煤样编号	$D_k$	$D_s$	$V_s/\%$	$D_l$	$V_l/\%$	$D_c$
L7	2.594 5	2.729	93.08	2.507 0	6.92	2.713 6
Q9	2.673 0	2.611	88.61	2.578 5	11.39	2.651 6
X17	2.569 0	2.741	48.23	2.866 5	51.77	2.806 0
Z8	2.600 0	2.791	96.72	2.699 0	3.28	2.788 0

迂曲度指流体在多孔介质中渗流时,流体质点所走过的距离与孔隙介质外形几何长度之比,反映孔隙介质内部连通孔隙弯曲程度,迂曲度越大,流体在孔隙通道中流动受到的阻力越大,因此迂曲度在一定程度上能表征煤样孔隙的复杂特征及储层渗透能力<sup>[20]</sup>.煤层中瓦斯渗流主要场所为渗流孔和裂隙孔,有研究表明,综合分形维数越大,煤层渗透率越低<sup>[11]</sup>.试验煤样综合分形维数与迂曲度间的拟合关系如图1所示.

根据图 1 可知,4 个煤层煤样迂曲度与综合分形维数呈正相关关系,这是因为煤样迂曲度增大,内部连通孔隙弯曲程度增大,使得孔隙结构变复杂.结合表 1,随着煤综合分形维数增大,煤层透气性系数减小,煤样 X17 综合分形维数最大,为 2.806 0,其煤层透气性系数仅为  $0.009 \text{ m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$ ;煤样 Q9 综合分形维数最小,为 2.651 6,其透气性系数在  $0.05 \sim 7.17 \text{ m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$ .由此可见,综合分形维数能更好表征贵州矿区低透无烟煤孔隙复杂程度,且其综合分形维数越大,煤迂曲度越大,透气性越差.

煤层原始瓦斯含量是指未受开采和抽放影响的煤体内单位质量或单位体积瓦斯含量,煤层原始瓦斯含量由煤田地质条件、煤变质程度、煤岩结构及组分等因素决定<sup>[21]</sup>,而煤吸附瓦斯的主要场所为微小孔<sup>[19]</sup>,因此煤层原始瓦斯含量在一定程度上反映煤中微小孔孔隙结构复杂程度与瓦斯吸附能力.试验煤样吸附扩散孔分形维数与原始瓦斯含量之间的拟合关系见图 2.

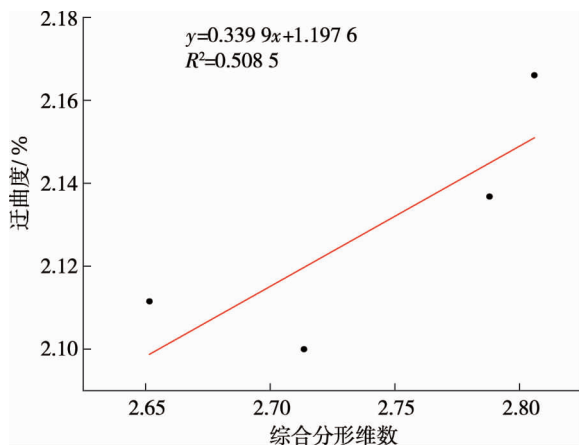


图 1 综合分形维数与迂曲度关系

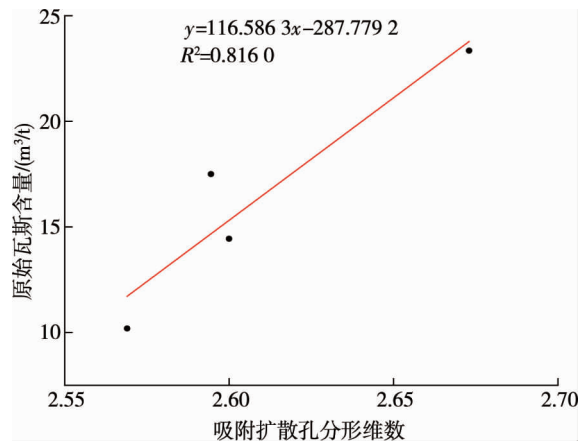


图 2 吸附扩散分形维数与原始瓦斯含量关系

由图 2 可知,吸附扩散孔分形维数与煤中原始瓦斯含量呈正相关关系,说明贵州矿区低透无烟煤吸附扩散分形维数越大,微小孔孔隙结构越复杂,煤吸附瓦斯的能力越强.

### 3.2 基于灰色关联分析的分形维数影响因素研究

灰色关联分析是灰色系统理论中一个重要的研究领域,主要根据序列曲线的几何形状来判断两序列之间的相近关系或相似性,通常采取线性插值法将观测系统离散行为的观测数据转换为分段连续线,然后根据线条的几何特征构建相应的模型以判断序列之间的相似性,包括距离、面积、斜率等特征,越为相似的观测对象,其几何特征也越相近<sup>[22-23]</sup>.灰色关联度分析作为衡量因素间关联程度的一种方法,不受样本量及样本分布规律的影响,在应用时不会出现量化结果与定性分析结果不符的情况.

灰色关联分析主要有确定参考序列和比较序列、序列无量纲处理、计算关联系数、求关联度及关联度排序几个步骤,在本文中的应用如下:

#### 1) 确定参考序列和比较序列

反映系统行为特征的数据序列,称为参考数列;影响系统行为的因素组成的数据序列,称为比较数列<sup>[23]</sup>.故选择煤样吸附扩散孔分形维数  $D_k$  作为参考序列,平均孔径、总孔体积、总孔比表面积作为比较序列;选择综合分形维数  $D_c$  作为参考序列,选择灰分、挥发分、固定碳含量作为比较序列,煤样原始数据如表 7 所示.

表 7 煤样原始数据

煤样编号	灰分/%	挥发分/%	固定碳/%	平均孔径/nm	总孔体积/(mL/g)	总孔比表面积/(m <sup>2</sup> /g)	吸附扩散孔分形维数 $D_k$	综合分形维数 $D_c$
L7	9.07	10.37	78.73	36.39	0.001 2	0.131 9	2.594 5	2.679 4
Q9	8.62	4.83	84.22	16.70	0.001 3	0.311 4	2.673 0	2.625 8
X17	7.94	9.87	79.91	21.90	0.011 7	2.136 9	2.569 0	2.682 2
Z8	18.06	6.65	73.34	17.03	0.002 3	0.540 1	2.600 0	2.740 3

## 2) 参考序列、比较序列无量纲化

由于各因素数据的单位、数量级不同,代表的意义不同,为便于比较,进行数据的无量纲化处理.采取初值法进行数据的无量纲化,即对每一组数据均用该组的第一个数据去除,得到一系列新的数据列.

## 3) 关联系数计算

$$\varepsilon_i = \frac{\min_{i_1} |x_{0i} - x_{i_1}| + \rho \max_{i_2} |x_{0i} - x_{i_2}|}{\Delta x_i + \rho \max_{i_2} |x_{0i} - x_{i_2}|} \quad (4)$$

式中: $\varepsilon_i$ 为第*i*个因素的关联系数; $\min_{i_1} |x_{0i} - x_{i_1}|$ 为两级最小差; $\max_{i_2} |x_{0i} - x_{i_2}|$ 为两级最大差; $\rho$ 为分辨系数,此处取0.5; $\Delta x_i$ 为差序列.

## 4) 关联度计算

$$r_i = r_i(x_0, x_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_{ii} \quad (5)$$

式中: $r_i$ 为第*i*个影响因素的关联度; $n$ 为影响因素的个数.

经过上述步骤,计算出的关联度如表8和表9所示.由表8可知固定碳与综合分形维数关联度最高,说明固定碳含量对综合分形维数影响最大,究其原因煤样中固定碳含量最高,当固定碳质量分数为75%~87%时,随着质量分数的增加,煤的孔隙将会减小;而当煤的固定碳质量分数在87.0%~93.4%时,由于煤大分子的芳环叠片聚集成5~10 nm的芳环束,叠片的层间距减小,其间的偏斜方位降为15°,煤大分子的排列规整,从而导致煤中孔隙增大<sup>[24]</sup>,进而影响煤中孔隙结构的复杂程度.相对固定碳含量而言,与综合分形维数关联度较低的是灰分,这是因为灰分主要是由碳酸盐、硅酸盐等盐类次生灰分和原生灰分组成<sup>[25]</sup>,而盐类矿物主要发育孔径较小的溶蚀孔,对表征渗流孔和裂隙孔的综合分形维数影响较小.

表8 综合分形维数影响因素灰色关联度

影响因素	灰分	挥发分	固定碳
关联度 $r_i$	0.758 3	0.734 0	0.909 4

当灰色关联度大于0.9时,表明比较序列的因素对参考序列的变量有十分显著的影响;当关联度在[0.8,0.9]时,该因素影响相对显著;在[0.7,0.8]时,比较序列的因素对参考序列的变量的影响比较大;当灰色关联度小于0.6时,该影响因素可以忽略不计<sup>[26]</sup>.由表9可知3种影响因素中,对吸附扩散孔分形维数影响最大的是平均孔径,影响最小的是总孔比表面积.这是因为瓦斯吸附扩散孔主要由微孔小孔提供,而根据FHH方程可知,气体吸附量、压力决定分形维数,微孔作为气体吸附的主要场所<sup>[14]</sup>,其孔隙比表面积越大,气体吸附能力越强,所以对分形维数影响最大;但根据表4,X17煤样比表面积很大说明微孔最多,符合这一规律,但该试验其余3个煤样微孔含量远少于小孔含量,贡献较少的比表面积,故对分形维数影响相对较小.总孔比表面积与吸附扩散孔分形维数呈正相关关系<sup>[10]</sup>,虽然与分形维数关联度不如平均孔径大,但关联度大于0.7的总孔比表面积也对分形维数产生较大的影响.

表9 吸附扩散孔分形维数影响因素灰色关联度

影响因素	平均孔径	总孔体积	总孔比表面积
关联度 $r_i$	0.954 0	0.837 6	0.723 8

## 4 结论

1) 吸附扩散孔分形维数可表征贵州低透无烟煤中微、小孔的孔隙复杂程度,也能反映无烟煤吸附瓦斯的能力,吸附扩散孔分形维数越大,无烟煤吸附瓦斯的能力越强.

2) 综合分形维数能更准确地表征贵州低透无烟煤的整体孔隙复杂程度,并在一定程度上反映其透气性,综合分形维数越大,透气性越差.

3) 通过灰色关联分析计算发现,对试验煤层渗流扩散孔分形维数影响最大的为平均孔径,总孔比表

面积对其影响最小;固定碳含量对试验煤层综合分形维数影响最大,挥发分对其影响最小。

### 参考文献:

- [1] 高为,易同生.黔西松河井田煤储层孔隙特征及对渗透性的影响[J].煤炭科学技术,2016,44(2):55-61.
- [2] ZHANG K X, LAI J, BAI G P, et al. Comparison of fractal models using NMR and CT analysis in low permeability sandstones[J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 112:104069.
- [3] ZHANG Y C, ZENG J H, CAI J C, et al. A Mathematical Model for Determining Oil Migration Characteristics in Low-Permeability Porous Media Based on Fractal Theory[J]. Transport in Porous Media,2019,129(3):633-652
- [4] 杨峰,宁正福,孔德涛,等.高压压汞法和氮气吸附法分析页岩孔隙结构[J].天然气地球科学,2013,24(3):450-455.
- [5] 杨峰,宁正福,王庆,等.页岩纳米孔隙分形特征[J].天然气地球科学,2014,25(4):618-623.
- [6] 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.
- [7] 叶桢妮,侯恩科,段中会,等.不同煤体结构煤的孔隙-裂隙分形特征及其对渗透性的影响[J].煤田地质与勘探,2019,47(5):70-78.
- [8] 张懂.低渗透煤层孔隙结构的分形特征及力学性质研究[D].西安:西安科技大学,2015.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 贾腾飞,王猛,高星月,等.低阶煤储层孔隙结构特征及分形模型评价[J].天然气地球科学,2021,32(3):423-436.
- [13] 贾男.基于低温氮吸附法的酸化煤样孔隙分形特征研究[J].煤矿安全,2021,52(1):53-57.
- [14] 高丽蓉,杨甫,马东民,等.基于低温氮吸附的彬长矿区4号煤孔隙分形特征研究[J].非常规油气,2020,7(5):41-49.
- [15] 姚艳斌,刘大锰,汤达祯,等.华北地区煤层气储集与产出性能[J].石油勘探与开发,2007,34(6):664-668.
- [16] 陈煜朋,姜文忠,秦玉金,等.煤的孔隙分布特征研究理论与方法综述[J].煤矿安全,2021,52(3):190-196.
- [17] WANG T Y, TIAN S C, LI G S, et al. Molecular simulation of gas adsorption in shale nanopores: A critical review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2021,149:111391.
- [18] 魏建平,代少华,温志辉,等.不同煤级煤样的孔隙综合表征方法研究[J].河南理工大学学报(自然科学版),2015,34(3):305-310.
- [19] 刘世奇,王鹤,王冉,等.煤层孔隙与裂隙特征研究进展[J].沉积学报,2021,39(1):212-230.
- [20] 王启立.石墨多孔介质成孔逾渗机理及渗透率研究[D].徐州:中国矿业大学,2011.
- [21] 秦玉金,罗海珠,姜文忠,等.煤层瓦斯含量主控因素分析[J].煤矿安全,2009,40(5):84-87.
- [22] 闫一.基于灰关联分析的聚类方法研究及应用[D].重庆:重庆邮电大学,2016.
- [23] 罗毅,李昱龙.基于熵权法和灰色关联分析法的输电网规划方案综合决策[J].电网技术,2013,37(1):77-81.
- [24] 郝世雄,王承洋,江成发.固定碳对煤的孔结构和甲烷吸附量的影响[J].煤炭学报,2012,37(9):1477-1482.
- [25] 刘永和,孟宪民,王忠强.泥炭资源的基本属性、理化性质和开发利用方向[J].干旱区资源与环境,200317(2):18-22.
- [26] 王聪,江成发,储伟.煤的分形维数及其影响因素分析[J].中国矿业大学学报,2013,42(6):1009-1014.