地球與空間科學輯要
Compendium of Earth and Space Sciences
ISSN Print: 3079-5621
ISSN Online: 3079-563X
https://doi.org/10.63313/CESS.4009

煤储层孔隙结构分形表征方法综述

崔驰

单位河南理工大学 资源环境学院，河南 焦作 454000

发布日期：2025年5月14日

摘 要

煤储层孔隙结构具有强烈的非均质性，分形理论通过分形维数（D）可定量表征孔隙表面的粗糙程度及空间结构的复杂程度。本文系统归纳了煤孔隙结构分形表征的四种主要方法-气体吸附法、压汞法、核磁共振法和图像分析法，阐述了各方法涉及的分形模型及其适用范围，对比分析了不同模型与方法之间的差异性。在此基础上，总结了目前常用的多方法联合测试方案，梳理了分形维数与孔径分布、比表面积、孔容等孔隙结构参数之间的关系。这对煤储层物性评价及孔隙结构精细表征提供了一定参考。

关键词

煤储层；孔隙结构；分形维数；多方法联合

A Review of Fractal Characterization Methods For Pore Structure in Coal Reservoirs

Chi Cui

School of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China

Abstract

The pore structure of coal reservoirs exhibits significant heterogeneity. Fractal theory quantitatively characterizes the roughness of pore surfaces and the complexity of spatial structures through the fractal dimension (D). This study comprehensively reviews four primary methods for fractal characterization of coal pore structure: gas adsorption, mercury intrusion, nuclear magnetic resonance, and image analysis. It discusses the fractal models utilized in each method, their respective scopes, and conducts a comparative analysis of model and method variances. Furthermore, it consolidates prevalent multi-method joint testing approaches and elucidates the relationship between fractal dimension and pore structure parameters such as pore size distribution, specific surface area, and pore volume. These findings serve as a valuable

文章引用：崔驰．(2026)．煤储层孔隙结构分形表征方法综述[J]．地球與空間科學輯要，1(2)：11-20．ISSN Print: 3079-5621; ISSN Online: 3079-563X.
DOI: 10.63313/CESS.4009

resource for evaluating the physical properties of coal reservoirs and refining pore structure characterization.

Keywords

Coal Reservoir; Pore Structure; Fractal Dimension; Multi-Method Integration

Copyright © 2026 by author(s) and Erytis Publishing Limited.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

1. 引言

煤储层孔隙结构直接控制着煤层气的吸附、解吸、渗流及产出过程，是煤层气地质评价和瓦斯灾害防治的核心研究内容[1]。然而，煤中孔隙从纳米级微孔到微米级裂隙呈现多尺度、非均质、不规则的分布特征，常规的孔径、孔容、比表面积等参数难以全面刻画这种复杂性。分形维数作为定量描述不规则几何体复杂程度的数学参数，为煤储层孔隙结构的精细化表征提供了新的思路[2]。

近年来，国内外学者基于低温气体吸附、高压压汞、核磁共振及图像分析等技术，结合多种分形模型，系统开展了煤孔隙分形维数的计算与分析，揭示了分形维数与孔径分布、比表面积、孔容、煤岩组分及变质程度之间的关联。不同分形模型（如 FHH 模型、热力学模型、Menger 海绵模型及多重分形理论）的引入，进一步丰富了对煤储层跨尺度非均质性的定量认识。本文系统综述了煤储层孔隙结构分形表征的主要方法、多方法联合方案、分形维数与孔隙结构参数的关系，并探讨了当前研究存在的问题与未来发展方向。

2. 分形表征方法

在系统介绍各分形模型之前，需明确其有效区间：基于气体吸附法、压汞法及核磁共振法所获取的分形维数皆属于三维孔隙结构的分形表征，其理论有效区间为 2～3，数值越靠近 3 表明孔隙结构越复杂、非均质性越强；而基于图像分析法（如扫描电镜、CT 图像二值化处理）所获得的分形维数则对应于二维孔隙边界轮廓的分形特征，其有效区间为 1～2。由于不同方法、不同模型所得计算结果皆不相同，其适用范围与模型假设也存在差异，因此，不宜跨方法进行直接比较。

2.1. 气体吸附法

2.1.1. 低温二氧化碳吸附法

基本原理：低温 CO2 吸附法基于气体物理吸附的原理，通过在恒温条件下（通常为 273.15K）测定煤对 CO2 的吸附等温线，以表征其微孔结构。由于 CO2 分子的动力学直径小于 N2 等常用吸附气体，它能够更有效地进入 N2 分子难以触及的超微孔隙。该方法能获取微孔比表面积、孔容及孔径分布等关键参数，其有效测定孔径范围通常为 0.3～1.5（2） nm，是精确表征煤体微孔（<2 nm）及超微孔（<1 nm）分布的理想技术手段。

常用分形模型：对于煤储层，可采用 WANG 等[3]提出的经验公式，或 Sierpinski 模型进行计算；对于页岩而言则更多采用 V-S 理论模型进行计算。

1. 根据 WANG 等提出的经验公式，其计算公式如下：

$$\ln A(\mu) = C + D_m \ln B(\mu)$$

$$A(\mu) = -\int_{N(\mu)}^{N_{\max}} \ln(\mu) dN(\mu) / r(\mu)^2$$

$$B(\mu) = (N_{\max} - N_{\mu})^{\frac{1}{3}} / r(\mu)$$

式中：D_m 为超微孔表面分形维数，C 为常数项，其中 N_{max} 为最大相对压力下吸附量，cm^3/g；N(μ) 为相对压力 μ 时的吸附量，cm^3/g；不同压力阶段 CO_2 覆盖的孔隙空间不同，测得平均孔径 r 与相对压力 μ 之间函数关系可用开尔文公式表征：

$$r = \frac{2\sigma v}{RT(-\ln \mu)}$$

式中：σ 为表面张力，v 为摩尔体积，22.4L/mol；R 为理想气体常数，8.314J/(mol·k)，T 为绝对温度，K。

2. Sierpinski 模型的计算方程如下[4]：

$$Ln(V) = Lna + (3 - D_s) Ln(P - P_t)$$

式中：V 为进汞量，mL/g；a 为常数，无量纲；P 为压力，MPa；Pt 为门限压力，MPa。通过得出对数函数 K 为 *Ln(V)*和 *Ln(P-Pt)*对数作图的斜率，分形维数 Ds=3-K。

3. V-S 理论模型计算公式如下[5-6]：

$$LnV = \frac{3}{D_c} \times LnS + C$$

式中：V 为吸附量，单位 cm3/g；S 为累计比表面积，单位 m2/g；C 为常数；Dc 为微孔的分形维数。

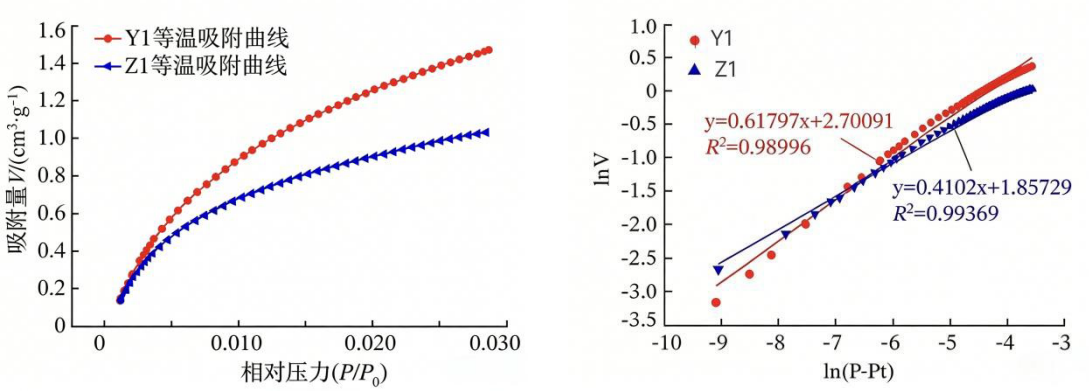


图 1 CO_2 等温吸附曲线图及分形维数模型示例图

参数定义：一般不用对 D 值进行分段或分点，会根据公式直接计算出一个定值，不同模型需进行不同分析。

优缺点：其优点在于可利用 CO_2 分子较小的动力学直径及其在 273K 下的快速扩散能力，对煤中＜2 nm 范围内的微孔进行高精度表征。局限性在于该方法测试范围仅限微孔或超微孔并需与其他方法联用以覆盖全孔径段，且对测试温度和预处理条件较为敏感，变温可能影响孔结构参数。

2.1.2. 低温氮气吸附法

基本原理：低温氮气吸附法基于气体在固体表面的多层吸附理论（BET 理论），在液氮温度（77K）下测定不同相对压力下煤样对氮气的吸附量，根据吸附-脱附等温线分析煤的比表面积、孔容及孔径分布。

该方法对中孔（2～50 nm）的测试精度较高，但对于孔径小于 2 nm 的微孔和大于 50 nm 的大孔表征存在局限性，通常需与 CO_2 吸附法和压汞法联用，从而实现煤储层全孔径段的孔隙结构联合表征。

常用分形模型：基于低温液氮吸附实验数据的分形维数计算模型有很多，常用的有 Nei-mark-Kiselev（NMK）模型[7]，Wang-Li（WL）模型和 FHH（Frenkel-Halsey-Hill）模型[8]等，其中 FHH 模型适用范围广泛且拟合度好，本文将重点介绍。

FHH 模型计算公式有以下两种形式：

$$\ln V = A\ln[\ln(\frac{P_0}{P})] + C$$

$$\ln\frac{V}{V_0} = A\ln[\ln(\frac{P_0}{P})] + C$$

式中：P 为吸附平衡压力，MPa；P0 为气体吸附的饱和蒸气压，MPa；V 为平衡压力下吸附气体体积，cm3/g；V0 为单分子层吸附气体体积，cm3/g；C 为常量；A 为 lnV/V0 和 ln[ln(P0/P)]双对数曲线的斜率，与分形维数（D）呈线性关系，即 D=A+3。

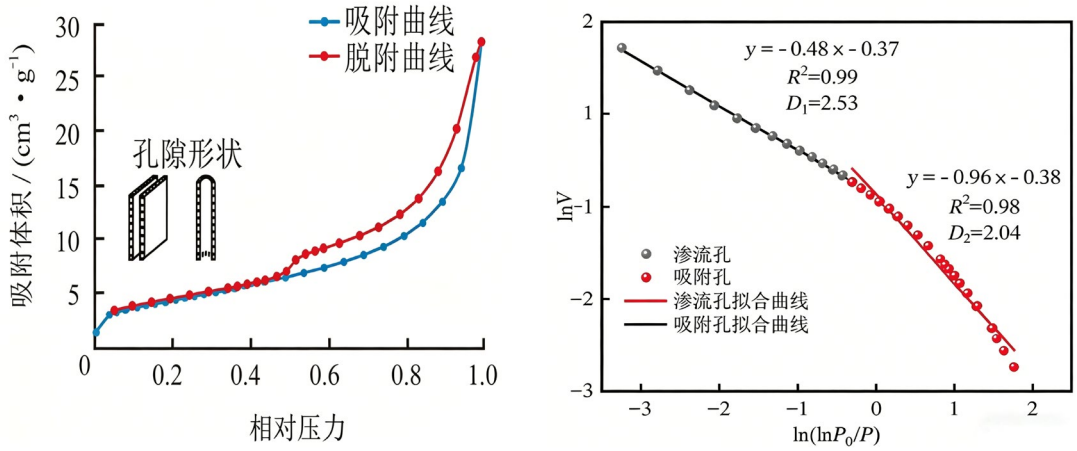


图 2. N2 吸脱附曲线图及 FHH 模型示例图

参数定义：大部分学者以相对压力 P/P0=0.45 或 0.5 为分界点，将低于该值的区域划为低压区，高于该值的划为高压区，对应的分形维数分别记为 D1 和 D2。其中，D1 反映孔隙表面的粗糙度，D2 则反映孔体积及孔结构的复杂发育特征。

优缺点：低温氮气吸附法的优点在于能精准表征介孔（2～50 nm）的比表面积、孔容及孔径分布，且测试过程无损；其缺点是对微孔（<2 nm）和大孔>50 nm）检测能力有限，BJH 模型对复杂孔形存在理论偏差，结果易受样品预处理条件影响，且无法探测封闭孔。

2.2. 压汞法

基本原理：压汞法基于汞对煤表面的不润湿特性（接触角>90°），根据 Washburn 方程(Pc=2δcosθ/r)，外加压力 P 与孔喉半径 r 呈反比，通过记录不同压力下汞的注入体积即可获得孔径分布。该方法更适用于大孔的测定，一般认为对大于 50 nm 的孔径段测试结果较为可靠，而对于小于 2 nm 的微孔偏差较大，不宜单独使用。

常用分形模型：对于压汞分形模型涉及的较多，本文将着重介绍其中的经典模型，包括毛细管模型，热力学模型以及 Menger 海绵模型（适用性广范）等。

1. 毛细管模型的计算方程如下，主要有以下两种形式[9-10]：

$$LgS_{Hg} = (D_1 - 2)LgP_c$$

$$Lg(1 - S_{Hg}) = (3 - D_2)LgP_s + (D_2 - 3)LgP_c$$

式中：S_{Hg} 为进汞饱和度，%；Pc 为毛细管压力，MPa；Ps 为入口毛细管压力，MPa；K_1 为 LgS_{Hg} 和 LgPc 对数作图的斜率，分形维数 D1=2+K；K_2 为 Lg(1-SHg)和 LgPc 对数作图的斜率，分形维数 D_2=3+K。

2. 热力学模型，具体方程如下[11]：

$$Ln(\frac{W_n}{r_n^2}) = DLn(\frac{V_n^{\frac{1}{3}}}{r_n}) + C$$

式中：Wn 是汞侵入过程中到 n 阶段为止累计的表面能，rn 为孔径半径，Vn 为孔隙体积，D 为孔表面的分形维数，可由 Ln(Wn/r_n2)对 Ln(V_n1/3/rn)作图可得，C 是表面张力与汞接触角余弦值的乘积。

3. Menger 海绵模型的计算方程如下[12]：

$$Lg(dV / dP) = C + (\mathrm{D} - 4)LgP$$

式中：P 为进汞压力，MPa；V 为进汞压力 P 对应的汞体积，mL/g；D 为孔隙分形维数；K 为 log(dV/dP)和 logP 双对数曲线的斜率。根据压汞实验数据，以 log(dV/dP)为纵坐标，logP 为横坐标绘制散点图并进行拟合，得到分形曲线及拟合曲线斜率 K，从而计算煤的孔隙分形维数 Dp（Dp＝4＋K）。

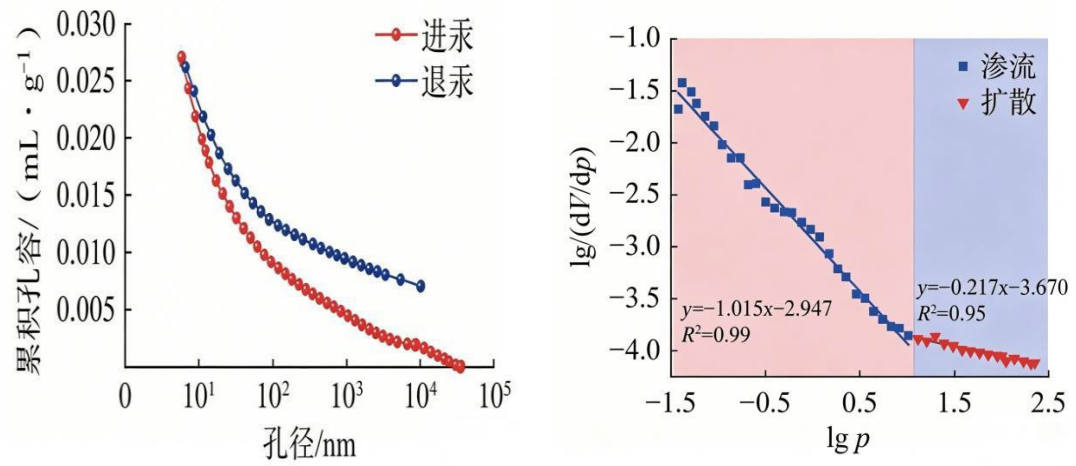


图 3. MIP 进退汞曲线图谱及 Menger 海绵模型示例图

参数定义：多数文献以 95 nm，100 nm 或自定义大小为孔径分界点，大于该值的渗流孔分形维数记为 D_1，小于该值的吸附孔记为 D_2。部分学者则将压汞分形曲线按压力划分为低压区（<0.1 MPa）、中压区（0.1~10.0 MPa）和高压区（>10 MPa），对应的分形维数分别记为 D_1、D_2、D_3[13-14]。

优缺点：优点是模型简单、测试速度快，孔径测量范围广，能够获得较完整的孔径分布信息（约 6 nm-400 μm，>50 nm 时结果更准确）。缺点是高压条件下汞的注入可能破坏煤的原始孔隙结构（当>10 MPa 时，需对压力段进行压缩校正），尤其对低阶煤和构造煤影响显著，导致测试结果出现较大误差，因此，压汞法更适合中高阶煤的测定。

2.3. 核磁共振法

基本原理：低场核磁共振技术通过检测煤孔隙中饱含流体的氢核弛豫信号（含氢流体如水、甲烷等），在获取孔隙结构与流体分布信息的同时，实现对孔径分布的表征。在表面弛豫主导条件下，横向弛豫时间（T_2）与孔隙半径呈正比：小孔对应短 T_2、大孔对应长 T_2。通过 T_2 谱分布可间接反映煤的孔径结构信息，结合压汞或液氮吸附数据进行标定，即可将 T_2 谱转换为孔径分布曲线，实现对煤储层孔隙结构的无

损、快速定量表征。

常用分形模型：对于 NMR 分形维数，近几年来已经有比较广泛的应用，目前主要采用 Zhou 等提出的经验公式进行计算，具体公式如下[15-16]：

$$LgS_V = (3-D)LgT_2 + (D-3)LgT_{2\max}$$

式中：S_v 为弛豫时间小于 T_2 时的累积孔隙体积占总孔隙体积百分比；D 为分形维数；T_{2max} 为最大弛豫时间。

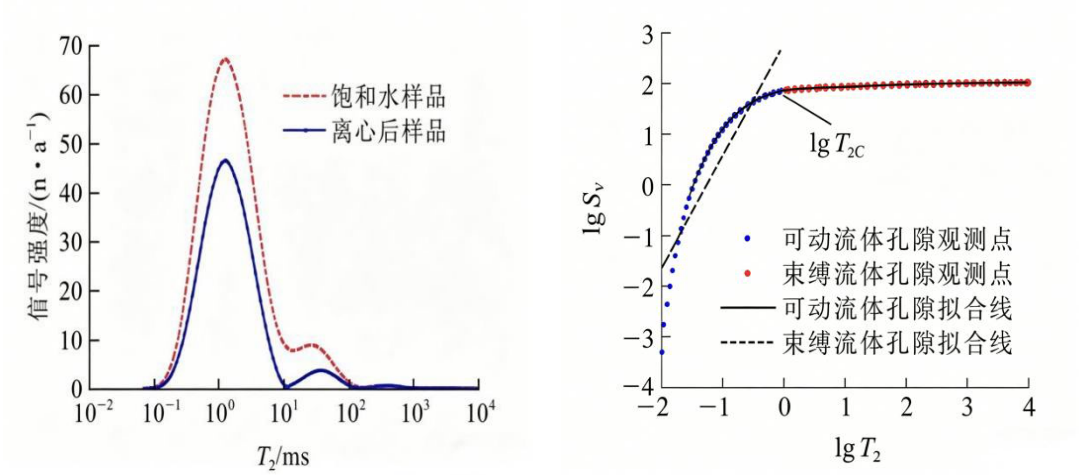


图 4. NMR T2 谱及分形计算示例图

参数定义：以弛豫时间截止值作为分界点，将分形维数分别记为 Dmin 和 Dmax，Dmin 为束缚流体孔隙分形维数，Dmax 为可动流体孔隙分形维数[17]。

优缺点：该方法的优势在于可以快速、无损、精准的获得样品的孔隙信息，例如孔隙度，孔径分布，孔隙连通性，渗透率等，适用于全孔径范围，缺点是微孔信号捕捉能力弱，三维空间可视化不足。

2.4. 图像分析法

基本原理：图像分析法是数字图像处理技术与分形几何相结合的煤孔隙结构表征方法。其通过扫描电子显微镜（SEM）、计算机断层扫描（CT）等获取煤样高分辨率显微图像，经灰度阈值分割、二值化等处理后获取孔裂隙形态，提取孔隙率、孔径分布等几何参数；对于复杂孔隙结构，则借助计盒维数等方法计算分形维数以定量表征其非均质性。该方法覆盖范围广且定义明确，其中 SEM 主要用于微纳米级表面二维形貌分析，FIB-SEM 可对纳米级孔隙进行三维重构，而 μCT 则适用于微米级孔裂隙三维可视化与定量分析。

常用分形模型：扫描电镜所对应的分形模型可用 VOSS 等[18]研究成果计算，CT 扫描所对应的可用 Hausdorff 提出的盒维数法[19]进行计算，对于二维图像，D 的范围为 1-2；对于三维重建图像（如 FIB-SEM），D 的范围为 2-3。

VOSS 经验公式可以根据周长-面积关系来求分形维数，方程存在以下关系：

$$LgC = \frac{D}{2}LgS + C$$

式中：C 为孔隙周长，nm；D 为分形维数；S 为孔隙面积，nm2；C 为常数

Hausdorff 盒维数法的所对应分形维数方程如下：

$$D = -\frac{\lg N(\delta)}{\lg(\delta)}$$

式中:δ 为正方体边长，μm；N(δ)为正方体网格数。

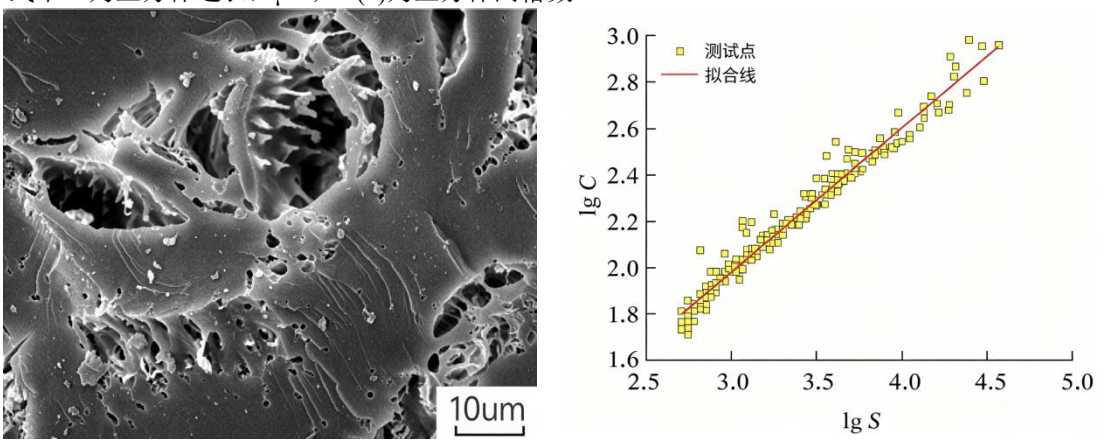


图 5. 煤样 SEM 图及分形计算示例图

参数定义：与其他方法不同的是图像分析法的分形维数划分不依赖固定的孔径阈值，而是基于图像处理中的结构对象分割，其结果受阈值选取等人为因素影响，存在一定主观性。

优缺点：优点在于可以直观获取煤孔隙的二维形貌与三维空间分布，支持纳米至毫米尺度的定性与定量表征，且 Micro-CT 具有无损检测优势。其不足点在于样品制备要求高、图像分割阈值存在主观性、视场代表性有限，以及 FIB-SEM 的逐层切割具有破坏性，数据处理较为复杂。

3. 多方法联合与对比

分形模型联合方案主要包括：对于 CO2 吸附数据，常采用 Sierpinski 模型；对于 N2 吸附数据，多采用 FHH 模型；对于压汞数据，则采用 Menger 海绵模型。多数学者根据研究目的的不同灵活选择分形模型组合，其中 Sierpinski 模型+FHH 模型+Menger 海绵模型的组合与 FHH 模型+Menger 海绵模型的组合是目前最为常由于煤孔隙的大小差异很大，单一孔隙结构表征方法受其物理原理与测试范围所限，无法完整覆盖煤储层从微孔至大孔的全孔径分布。为此，国内外学者普遍采用多方法联合测试策略：多数学者采用低温 CO2 吸附法（<2 nm）+低温 N2 吸附法（2~50 nm）+高压压汞法（>50 nm），三者联合可表征煤样微孔至大孔的全孔径段表征。在此基础上，亦不乏其他有效组合。例如秦雷等运用氮气吸附法+压汞法实现了对不同煤阶煤样的孔径及比表面积分布进行了精细化表征[20]；郑涵等基于低场 NMR+CT 技术联合实现了不同煤阶煤储层物性的定量表征[21]。杨明等根据核磁共振法研究了不同阶煤的孔隙结构特征与流体特性[22]。楚亚培等采用液氮法+压汞法+核磁共振法联合表征了孔容积、比表面积及渗透率等参数；上述研究表明，根据不同研究目的灵活组合测试手段，是克服单一方法测量范围局限性的有效途径[23]。

在获取覆盖全孔径实验数据的基础上，还需选取合适的分形模型对不同尺度孔隙的非均质性进行定量表征。目前主流的用的组合方案。此外，随着煤储层孔隙非均质性研究的深入，多重分形理论的应用日益广泛。通过广义维数谱（Dq）和多重分形奇异谱（Δα）揭示不同孔径区间孔隙结构的复杂程度。不同煤阶样品的多重分形特征存在显著差异，然而，传统单一分形维数难以全面捕捉这种跨尺度的复杂性。作为单一分形的重要补充，多重分形能够更精细地表征煤储层孔隙结构的跨尺度非均质性，为煤层气储层评价提供了更全面的定量依据。

表 1. 多方法联用及对应孔径分类汇总表

多方法联用	分形维数联合	IUPAC 分类	霍多特分类
低温 CO_2 吸附	CO_2 分形维数模型	＜2nm	＜10nm
低温 N_2 吸附	FHH 模型	2~50nm	10~1000nm
压汞法	Menger 海绵模型	＞50nm	＞1000nm

4. 分形维数与孔隙结构特征的关系

分形维数是定量表征煤储层孔隙结构复杂程度与非均质性的重要参数。作为抽象数学参数，其数值变化仅反映孔隙系统总体复杂性的相对增减，若缺乏与其他地质参数的系统关联，则难以有效揭示其在煤储层物性评价中的实际价值。因此，需将分形维数与孔径分布、比表面积及总孔容等结构参数，有机显微组分组成及变质程度等演化参数，以及水分、灰分、挥发分等工业分析参数进行系统的耦合分析。通过厘清上述关联，一方面可阐明分形维数在不同煤阶、不同煤岩组成及不同结构背景下的响应规律，另一方面能够明确分形维数用于煤储层孔隙发育特征评价的适用性与局限性。以下从三个层面分别论述分形维数与煤孔隙结构特征之间的关系。

分形维数与孔径分布、孔比表面积、总孔容的关系：

多数研究表明，分形维数与煤的比表面积呈正相关性，与平均孔径呈负相关，即孔隙结构越复杂、比表面积越大，分形维数相应越高[24]。部分学者基于压汞数据观察到，综合分形维数会随着比表面积、总孔容、微孔及过渡孔孔容所占比例增加而增大,随着中孔孔容所占比例的增加而减小，反映出不同测试原理带来的表征差异[25]。此外，分形维数与孔径分布之间存在明确的分段效应，有学者指出孔径 65 nm 以上孔隙具有显著的分形特征（分维值 2.89～2.99），而 65 nm 以下孔隙几乎无分形特征[26]。

分形维数与有机显微组分、煤变质程度的关系

分形维数受煤中有机显微组分组成及变质程度的显著控制。多数研究显示，分形维数与镜质组含量呈正相关，与惰质组含量呈负相关，表明镜质组的发育有利于孔隙结构的复杂化[27]。煤化程度方面，综合分形维数与镜质组反射率总体呈正相关趋势，即随着变质程度加深，孔隙粗糙度增加；但不同煤化阶段的分形演化机制存在阶段性差异，低煤阶至高煤阶的孔隙结构复杂化并非线性递增。部分学者还发现，变质程度对孔间距及孔分布的分形特征具有重要影响，但具体响应规律在不同研究区不尽一致。

分形维数与煤工业参数的关系

煤的水分、灰分及挥发分等工业参数与分形维数之间存在复杂关联，目前结论尚不统一。关于水分，多数研究认为分形维数与水分含量呈正相关，但也有学者得出负相关的结论。灰分含量多表现为负相关，即灰分越高分形维数越低[28]。固定碳，挥发分对分形维数的影响较为显著，灰色关联度可达 0.8 以上[29]。但其正负响应方向因煤级和地区而异。此外，有研究指出腐泥煤的分形维数与挥发分、水分及灰分均呈正相关[30]。总体而言，工业参数对分形维数的影响是煤岩热演化条件、物质组成及构造变形等多因素耦合作用的结果，不同煤阶和地区的响应规律可能存在一定差异。

5. 存在问题与展望

当前研究的主要问题：

（1）不同测试方法与分形模型之间的计算结果难以跨方法直接对比，各方法模型的适用性，原理，假设等各不相同，因此无法进行直接对比。

（2）分形维数作为单一参数，难以全面刻画孔隙系统的跨尺度复杂性，需结合综合分形维数，广义维数谱和多重分形奇异谱这类参数进行精确定量表征。

（3）不同学者对分形维数的参数划分依据缺乏统一标准，导致结果对比困难，尽管大量文献分别从

孔径分布、孔隙类型、压力区间、图像分割阈值等角度划分分形维数，但尚未形成跨研究区的通用约定，也无标准流程，容易导致同一数据的重复实验或重复计算中出现分形维数判读混乱。

（4）现有研究偏重静态表征，与工程动态过程的结合不够，目前大量研究工作集中于特定采样点的煤样孔隙分形数据获取和统计汇总，这已构成工程地质和煤层气地质的基础，但缺乏对原生状态下煤体孔裂隙结构随非均匀应力场、温度场和孔隙压力联合作用下的实时动态响应剖析。

（5）图像分析法的视场取景和数字处理仍然依赖人工干预，自动化辅助识别在煤岩复杂界面中的准确性有局限，视图选取具有较强主观性，自动识别的技术精度存在局限性

未来展望：

（1）构建跨方法的全孔径尺度分形维数协同表征通用框架。

（2）推行分形维数的规范计算流程和多区域标度对照参数。

（3）深化从二维静态向三维动态分形演化的关联建模。

（4）提升人工智能耦合分形维数的数据处理和实时监测能力。

（5）建立基于多重分形参数的储层品质综合分级评估体系与工程输出。

6. 结论

（1）气体吸附法（低温 CO2 吸附+低温 N_2吸附）与高压压汞法的联合是表征煤储层全孔径（微孔+中孔+大孔）孔隙分布的主流实验手段；与之对应，基于 CO2 吸附数据的分形模型、基于 N2 吸附数据的 FHH 模型与基于压汞数据的 Menger 海绵模型的组合，是当前实现煤储层全孔径段分形特征连续定量表征的有效技术路径。

（2）分形维数与煤的孔径分布、比表面积及总孔容之间存在显著的相关性，但不同测试方法和分形模型所得结果不可直接跨方法对比；多数研究表明分形维数随镜质组含量及煤化程度的增加而增大，而与惰质组含量呈负相关，但具体响应规律因煤阶、地区和测试尺度不同而存在分歧。

（3）现有研究仍以静态表征为主，分形维数的计算缺乏统一标准，不同方法之间的结果可比性差，制约了其在煤层气开发与瓦斯灾害评价中的工程应用；未来应着力于多方法联合标定体系的建立、分形计算流程的规范化、以及从静态描述向动态演化监测的拓展。

参考文献

[1] 李晓慧,郝廷,杨帅杰,等.大牛地气田石炭系太原组深部煤储层孔隙结构非均质性及其控气作用[J].现代地质,2026,40(01):193-206.DOI:10.19657/j.geoscience.1000-8527.202510170108.

[2] 刘怀谦,王磊,谢广祥,等.煤体孔隙结构综合表征及全孔径分形特征[J].采矿与安全工程学报,2022,39(03):458-469+479.

[3] Fumin,Wang,Shaofen,et al.Determination of the Surface Fractal Dimension for Porous Media by Capillary Condensation[J].Industrial & Engineering Chemistry Research, 1997.DOI:10.1021/ie960555w.

[4] 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(05):1611-1622.

[5] Mandelbrot B B .The Fractal Geometry of Nature[J].The Fractal Geometry of Nature, 1982.

[6] Wang X, Zhu Y, Wang Y. Fractal Characteristics of Micro- and Mesopores in the Longmaxi Shale Energies. 2020; 13(6):1349. https://doi.org/10.3390/en13061349

[7] Neimark A .A new approach to the determination of the surface fractal dimension of porous solids[J].Physica A Statistical Mechanics & Its Applications, 1992, 191(191):258-262.DOI:10.1016/0378-4371(92)90536-Y.

[8] Li Q ,Wu Y ,Qiao L .Comprehensive Characterization and Metamorphic Control Analysis of Full Apertures in Different Coal Ranks within Deep Coal Seams[J].Applied Sciences,2024,14(18):8566-8566.DOI:10.3390/APP14188566.

[9] 李永臣,张继坤,李子玲,等.保德区块煤储层孔隙结构特征及煤相控制作用[J].科学技术与工

程,2025,25(33):14106-14118.

[10] 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.

[11] Zhang B , Liu W , Liu X .Scale-dependent nature of the surface fractal dimension for bi- and multi-disperse porous solids by mercury porosimetry[J].Applied Surface Science, 2006, 253(3):1349-1355.DOI:10.1016/j.apsusc.2006.02.009.

[12] ZHEN L ,RAORAO L ,HE Y , et al.A NEW FRACTAL MODEL OF COAL PERMEABILITY BASED ON THE INCREASING FRACTAL CONSTRUCTION METHOD OF THE MENGER SPONGE[J].Fractals,2021,29(7):DOI:10.1142/S0218348X21501875.

[13] Gan H , Nandi S P , Jr P L W .Nature of the porosity in American coals[J].Fuel, 1972, 51(4):272-277.DOI:10.1016/0016-2361(72)90003-8.

[14] Friesen W I , Mikula R J .Fractal dimensions of coal particles[J].Journal of Colloid & Interface Science, 1987, 120(1):263-271.DOI:10.1016/0021-9797(87)90348-1.

[15] Al-Mahrooqi S H , Grattoni C A , Moss A K ,et al.An investigation of the effect of wettability on NMR characteristics of sandstone rock and fluid systems[J].Journal of Petroleum Science and Engineering, 2003, 39(3):389-398.DOI:10.1016/S0920-4105(03)00077-9.

[16] Shao X , Pang X , Li H ,et al.Fractal Analysis of Pore Network in Tight Gas Sandstones Using NMR Method: A Case Study from the Ordos Basin, China[J].Energy & Fuels, 2017, 31(10):10358-10368.DOI:10.1021/acs.energyfuels.7b01007.

[17] 宁传祥,姜振学,苏思远,等.泥页岩核磁共振 T2 谱换算孔隙半径方法[J].科学技术与工程,2016,16(27):14-19.

[18] Voss R F , Laibowitz R B , Alessandrini E I .Fractal Geometry of Percolation in Thin Gold Films[J].Springer US, 1991.DOI:10.1007/978-1-4757-1402-9_23.

[19] Wang H ,Liu Y ,Song Y , et al.Fractal analysis and its impact factors on pore structure of artificial cores based on the images obtained using magnetic resonance imaging[J].Journal of Applied Geophysics,2012,8670-81.DOI:10.1016/j.jappgeo.2012.07.015.

[20] 秦雷,王平,林海飞,等.基于氮气吸附和压汞法液氮冻结煤体孔隙结构精细化表征研究[J].西安科技大学学报,2020,40(06):945-952+959.DOI:10.13800/j.cnki.xakjdxxb.2020.0602.

[21] 郑涵,刘恺德,李晓龙,等.基于 NMR 与 CT 的煤储层孔裂隙结构及渗透性研究进展[J].科学技术创新,2020,(34):64-67.

[22] 杨明,柳磊,张学博,等.不同阶煤孔隙结构与流体特性的核磁共振试验研究[J].中国安全科学学报,2021,31(01):81-88.DOI:10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2021.01.012.

[23] 楚亚培,张东明,王满,等.基于核磁共振技术和压汞法的液氮冻融煤体孔隙结构损伤演化规律试验研究[J].岩石力学与工程学报,2022,41(09):1820-1831.DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2021.1072.

[24] 张玉贵,焦银秋,雷东记,等.煤体纳米级孔隙低温氮吸附特征及分形性研究[J].河南理工大学学报(自然科学版),2016,35(02):141-148.DOI:10.16186/j.cnki.2016.02.001.

[25] 高迪,刘建国.沁水盆地东南部高阶煤孔隙分形特征及意义[J].河南理工大学学报(自然科学版),2017,36(02):7-15.DOI:10.16186/j.cnki.1673-9787.2017.02.002.

[26] 毛潇潇,赵迪斐,杨玉娟,等.阳泉新景矿高煤级煤的孔隙结构分形特征[J].煤田地质与勘探,2017,45(03):59-66.

[27] 肖明国.晋中盆地西南缘石炭-二叠系煤储层孔隙结构及分形特征[J].中国煤炭地质,2020,32(06):7-15.

[28] 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(05):713-718.

[29] 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(06):1009-1014.DOI:10.13247/j.cnki.jcumt.2013.06.020.

[30] 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(04):9-13.