

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2023.252

煤孔裂隙多尺度表征及其对渗透率的影响分析 ——以中国 14 个大型煤炭基地为例

王刚^{a,b}, 陈雪畅^b, 程卫民^{a,b}, 陈昊^b

(山东科技大学 a. 矿山灾害预防控制国家重点实验室培育基地;

b. 安全与环境工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要:为探究煤体不同尺度孔裂隙特征及其对渗透率的影响,从我国 14 个大型煤炭基地分别取样,进行氮气吸附、压汞和 CT 实验,并将 CT 扫描后的煤样进行渗流实验。结果表明,各煤样中微孔和过渡孔多为封闭孔,连通性差,不利于渗流的进行。 $r=10\text{ nm}$ 和 $r=100\text{ }\mu\text{m}$ 的孔裂隙体积占比相对较大,贡献了煤体大部分孔隙率,S2 和 S3 中的大尺度平行板孔隙为渗流提供了充足的空间。通过划分 3 种实验表征的优势孔径段,提出了综合表征孔隙率和分形维数的方法,得到各煤样的孔隙率范围为 1.62%~11.60%,分形维数范围为 2.29~2.78。煤样渗透率在 $0.000\ 2\times 10^{-15}\sim 0.652\ 5\times 10^{-15}\text{ m}^2$ 之间,以中低渗为主。 $r<50\text{ nm}$ 、 $50\text{ nm}\leq r\leq 8.5\text{ }\mu\text{m}$ 和 $r>8.5\text{ }\mu\text{m}$ 的孔隙率分量与渗透率的关系分别为 $y=0.274\ 1x-0.078\ 1$ 、 $y=0.067\ 4x+0.023\ 7$ 和 $y=0.003\ 9x^{2.598\ 6}$,其中 $r>8.5\text{ }\mu\text{m}$ 的孔隙率分量与渗透率的相关性最强。相对于氮气吸附和压汞实验,CT 实验更适用于分析孔裂隙结构对水渗的影响。

关键词:煤;多尺度表征;分形维数;孔隙率;渗透率

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2024)04-034-17

Multi-scale characterization of coal pore and fractures and its influence on permeability—taking 14 large coal bases in China as examples

WANG Gang^{a,b}, CHEN Xuechang^b, CHENG Weimin^{a,b}, CHEN Hao^b

(a. Mining Disaster Prevention and Control-Ministry of State Key Laboratory Breeding Base;

b. College of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, P. R. China)

Abstract: In order to explore the characteristics of pores and fractures at different scales and their influence on permeability, nitrogen adsorption, mercury injection and CT experiments were carried out on 14 large coal bases in China. Seepage experiments were then conducted on the coal samples after CT scanning. The results showed that the micropores and transition pores in each coal sample are mostly closed pores with poor connectivity, which is not conducive to coal seepage. The pore and fractures volume with $r=10\text{ nm}$ and $r=100\text{ }\mu\text{m}$ accounts for a large

收稿日期: 2022-09-23 网络出版日期: 2023-06-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51934004, 51974176); 山东省自然科学基金杰出青年基金资助项目 (ZR2020JQ22)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (51934004, 51974176), and Shandong Natural Science Fund Outstanding Youth Fund (ZR2020JQ22).

作者简介: 王刚 (1984—), 男, 博士, 教授, 主要从事煤岩微观孔裂隙结构渗流理论及防灾工程应用研究, (E-mail) gang.wang@sdust.edu.cn。

proportion, contributing most to the porosity of coal. Large-scale parallel plate pores in S2 and S3 provide sufficient space for seepage. By dividing dominant pore size segments characterized by three experiments, a method for comprehensively characterizing porosity and fractal dimension is proposed. The porosity range of each coal sample is from 1.62% to 11.60%, and the fractal dimension range is from 2.29 to 2.78. The permeability of coal samples ranges from $0.000\ 2 \times 10^{-15}$ m² to $0.652\ 5 \times 10^{-15}$ m², mainly in medium and low permeability. The relationship between the porosity components of $r < 50$ nm, $50\ \text{nm} \leq r \leq 8.5\ \mu\text{m}$ and $r > 8.5\ \mu\text{m}$ and permeability is as follows: $y = 0.274\ 1x - 0.078\ 1$, $y = 0.067\ 4x + 0.023\ 7$ and $y = 0.003\ 9x^{2.598\ 6}$, respectively. The correlation between the porosity component of $r > 8.5\ \mu\text{m}$ and permeability is the strongest. Compared with nitrogen adsorption and mercury intrusion experiments, the CT experiment is more suitable for analyzing the influence of pore and fractures on water seepage.

Keywords: coal; multi-scale characterization; fractal dimension; porosity; permeability

中国14个大型煤炭基地的煤炭产量占全国总产量的90%以上,是国内煤炭最主要的来源。国务院在2014年发布的《能源发展战略行动计划(2014—2020年)》^[1]中确定,将重点建设神东、陕北等14个亿吨级大型煤炭基地。煤的孔裂隙组成了煤层气及其他流体的储集和运移空间,在很大程度上影响了煤的物理力学性质,进而影响煤层注水、煤层气开发和煤矿灾害防治等过程^[2-4]。探究14个煤炭基地煤样的多尺度结构特点及其对渗流的影响有助于构建我国清洁、高效、安全、可持续的现代能源体系^[5-6]。

表征煤体微观结构的方法主要分为两类,一类是向煤体注入特定流体,间接得到孔裂隙结构特点,如N₂、CO₂吸附实验和压汞实验等^[7-9]。这类实验无法直接观察孔裂隙,必须通过流体进出煤的体积变化得到孔裂隙体积、形状和连通性等特点^[10-11]。此外,实验流体需要在一定压力下才能进入煤体,会对孔裂隙结构产生破坏,且观测尺度受限于流体压力^[12-13]。另一类是采用光学或者电子显微镜直接观测,但这类实验只能观测二维的孔裂隙^[14-15]。CT三维重构技术通过降噪、阈值分割等步骤可以重现煤的三维裂隙结构,实现了图像从二维到三维表征裂隙的突破,且对煤结构无损伤,得到了广大学者的青睐^[16-18]。胡秋嘉等^[19]和李伟等^[20]通过CT三维重建得到煤三维孔裂隙模型,并定量评价其连通性。贾小宝等^[21]借助微焦点显微CT技术,比较了原生煤和构造煤的孔裂隙形态和空间分布特点,预判了煤体的渗透性能。同时,CT实验也存在一定的局限性:CT图像的精度受限于煤样尺寸,即煤样尺度越小,分辨率越高,而煤样尺寸过小则无法表征大尺度裂隙^[22]。

由于不同测量方法的局限性,单一方法难以准确表征煤的孔裂隙结构^[23]。近年来,采用多种实验手段综合表征孔裂隙参数的方法得到广泛应用。Qin等^[12]和Wen等^[8]指出,采用氮气吸附-压汞法是表征煤体孔裂隙结构最准确、实用的方法,孙中良等^[24]利用压汞和氮气吸附实验探究了不同矿物成分对煤体孔喉和连通性特征的影响。Yao等^[25]比较了压汞法、核磁共振法和微聚焦计算机层析成像法在表征煤体孔径分布方面的差异,发现低场核磁共振分析是一种有效的无损定量表征煤孔径分布的工具。

以上文献中对孔裂隙表征方面的研究已经较为深入,但跨越多个长度尺度综合表征孔裂隙有待进一步探究。同时,分析裂隙数量、密度、复杂性等特点的主要目的是揭示煤的渗流特点,进而对煤层的渗流能力做出预判。但在探究多尺度孔裂隙对渗透率的影响时,多采用模拟和方程计算煤渗透率,忽略了分辨率以下孔裂隙的影响,不能真实反映渗透特点^[26-28]。笔者分别从中国14个大型煤炭基地采集煤样,首先基于CT三维重建技术重现煤三维裂隙结构,定量评价裂隙复杂性和连通性等特点。再利用氮气吸附和压汞实验弥补CT实验分辨率限制,探究更小尺度裂隙特点。最后,通过划分优势孔径段得到煤样的综合孔隙率和分形维数,并比较不同方法得到的优势孔隙率与渗透率的相关性。研究成果为煤层注水及煤层气开发等提供了理论基础。

1 实验和方法

1.1 煤样选取

为了系统探究我国煤炭的微观结构特点,从14个煤炭基地分别取样,煤样信息如表1所示,利用台钻搭配小直径钻头钻取煤芯,并用砂纸将其轻柔打磨为高10 mm,直径5 mm的煤柱。

表1 14个煤炭基地的煤样信息
Table 1 Coal sample data of 14 coal bases

| 煤样 | 所属省份 | 所属煤矿 | 煤种 |
|-----|------|-------|-----|
| S1 | 宁夏 | 枣泉煤矿 | 褐煤 |
| S2 | 陕西 | 孙家岔煤矿 | 气煤 |
| S3 | 山西 | 磁窑沟煤矿 | 长焰煤 |
| S4 | 山东 | 东滩煤矿 | 长焰煤 |
| S5 | 新疆 | 大黄山煤矿 | 气煤 |
| S6 | 山西 | 王庄煤矿 | 肥煤 |
| S7 | 河北 | 东庞煤矿 | 气煤 |
| S8 | 安徽 | 张集矿 | 气煤 |
| S9 | 黑龙江 | 桃山矿 | 肥煤 |
| S10 | 山西 | 同富新煤矿 | 肥煤 |
| S11 | 云南 | 羊场湾煤矿 | 焦煤 |
| S12 | 河南 | 平顶山煤矿 | 焦煤 |
| S13 | 陕西 | 韩城煤矿 | 焦煤 |
| S14 | 山西 | 阳泉煤矿 | 无烟煤 |

1.2 CT扫描、氮气吸附和压汞实验

CT扫描实验的基本原理是利用X射线穿透煤体截面,由于煤体内部不同密度的微观结构对X射线的吸收率不同,使得射线经过各截面后的衰减信息不同,CT技术即是将收集到的密度变化信息转化为灰度信息记录在CT图像中。本次CT扫描的基本参数如表2所示,得到的图像精度为 $8.5\ \mu\text{m}$,即图像中1个像素为 $8.5\ \mu\text{m}$ 。CT扫描得到的灰度图像必须通过进一步处理才能直观反映煤的内部结构。首先,为了降低打磨过程中对煤样边缘的破坏,从图像中心截取300张 $300\times 300\ \text{Pixel}^2$ 的截面。其次,为了降低扫描过程中噪声对CT图像的影响,采用中值滤波进行降噪处理。为了准确分割煤基质和孔裂隙,采用适用于煤体CT图像的MP-Otsu阈值分割方法^[29]计算阈值,利用Avizo软件提取裂隙。最终通过体渲染得到三维裂隙。

表2 CT扫描的基本参数
Table 2 Basic parameters of CT scanning

| 扫描时间/h | 电压/kV | 电流/ μA | 扫描帧数 | 分辨率/ μm |
|--------|-------|-------------------|------|--------------------|
| 4.3 | 60 | 80 | 998 | 8.5 |

研究中通常用等效孔径来描述煤体孔裂隙的大小,将孔隙等效为球体,通过式(1)计算等效孔径 r ,

$$r = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot V_{\text{pore}}}{\pi}}, \quad (1)$$

式中, V_{pore} 表示孔裂隙体积。

氮气吸附实验采用由安东帕-康塔公司生产的Autosorb-iQ型BET测试仪,孔径测量范围为 $2\sim 220\ \text{nm}$,实验过程严格按照《煤的镜质体反射率显微镜测定方法》(GB/T 6948—2008)执行。按照《压汞法和气体吸附法测定固体材料孔径分布的孔隙度 第1部分:压汞法》(GB/T 21650.1—2008)规定的实验条件,压汞实验采用美国麦克默瑞提克公司生产的AutoPore V 9600压汞仪,孔径测量范围为 $5\ \text{nm}\sim 400\ \mu\text{m}$ 。

1.3 渗流实验

为保证渗透率数据与煤裂隙结构的统一性,需将CT扫描后的煤样放入渗流设备进行渗流实验。由于供CT扫描的试样尺寸较小,普通渗流设备的夹持器无法满足小尺度煤样的渗流。课题组自主研发的多尺度实

时在线加载渗流设备配备了2组夹持器系统,可同时满足直径5 mm和50 mm 试样的渗流,并实时记录注入煤样的水的流量,如图1所示。对记录的时间和渗流量进行拟合,即可由达西定律计算渗透率,如式(2)所示。设置围压为2 MPa,在1 MPa水压下注水24 h测试渗透率。

$$K = \frac{\mu Q L}{A \Delta P}, \quad (2)$$

式中: K 为煤样渗透率; μ 为液体黏度; Q 为单位时间内通过煤样的流量; L 为煤样长度; A 为煤样截面积; ΔP 为驱替压力。

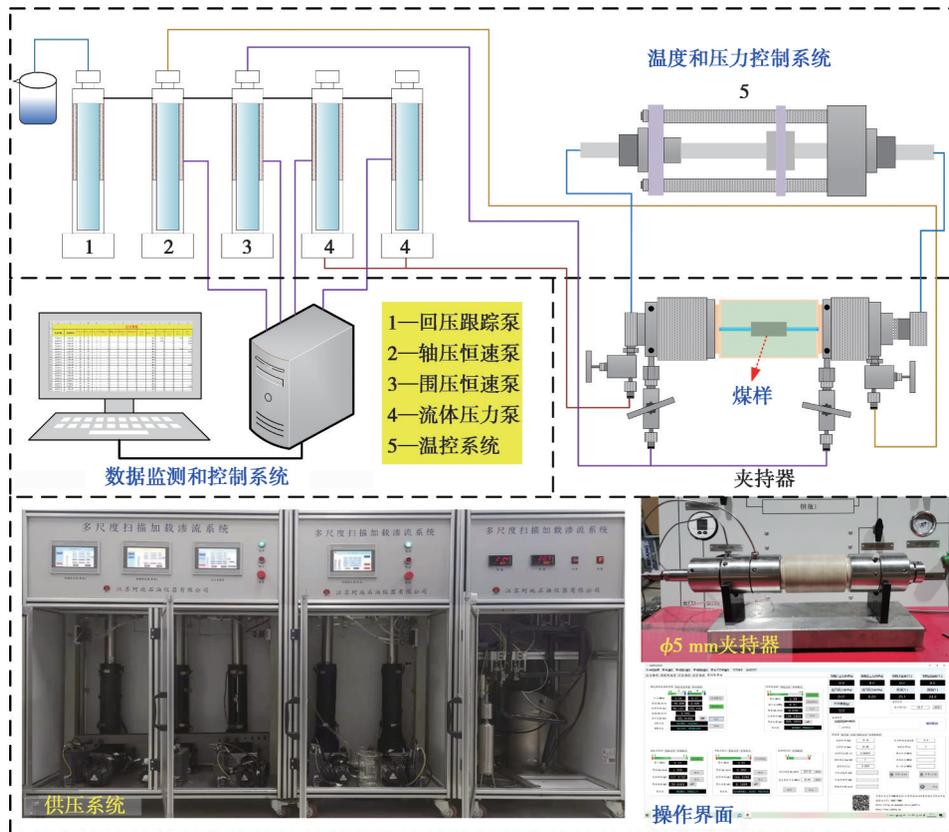


图1 渗流设备实物和原理图

Fig. 1 Physical objects and schematic diagrams of seepage equipment

1.4 分形维数的计算

分形维数可以定量表征孔裂隙结构的复杂程度,不同的实验数据可结合合适的分形方法进行计算。在CT实验中,盒计数法可以简单准确计算三维图像的分形维数,如式(3)所示^[23]。

$$D_c = -\lim_{s \rightarrow 0} \frac{\lg N(s)}{\lg(s)} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{\lg N(s)}{\lg(1/s)}, \quad (3)$$

式中: s 为三维盒子边长; $N(s)$ 是可以覆盖目标区域的盒子数量, D_c 为CT实验计算的分形维数。

Avizo软件内置的盒计数法可以不断变化三维盒子边长对孔裂隙结构进行覆盖,自动记录与孔裂隙相交的盒子数量 $N(s)$ 和边长 s ,通过拟合 $\lg N(s)$ 和 $\lg(1/s)$ 得到的直线斜率即为孔裂隙分形维数。

Frenkel-Halsey-Hill(FHH)模型广泛应用于氮气吸附实验中,有效计算多孔介质的分形维数^[30]

$$\ln V_t = \text{Const} \tan t + (D_n - 3) \ln(\ln(1/(P/P_0))), \quad (4)$$

式中: V_t 为总吸附量; P 为平衡压力; P_0 为吸附饱和蒸气压; D_n 为氮气吸附实验分形维数。

假设采用球形填充孔裂隙,将压汞实验测得的孔容 V 和进汞压力 P_m 代入下式即可求得孔裂隙的分形维数^[31]

$$\lg\left(\frac{dV}{dP_m}\right) \propto (D_m - 4) \lg P_m, \quad (5)$$

式中: V 为孔容; P_m 为进汞压力; D_m 为压汞实验计算的分形维数; \propto 表示 $\lg(dV/dP_m)$ 与 $(D_m - 4)\lg(P_m)$ 成正比,将二

者进行线性拟合得到直线斜率 $k, k+4=D_m$ 。

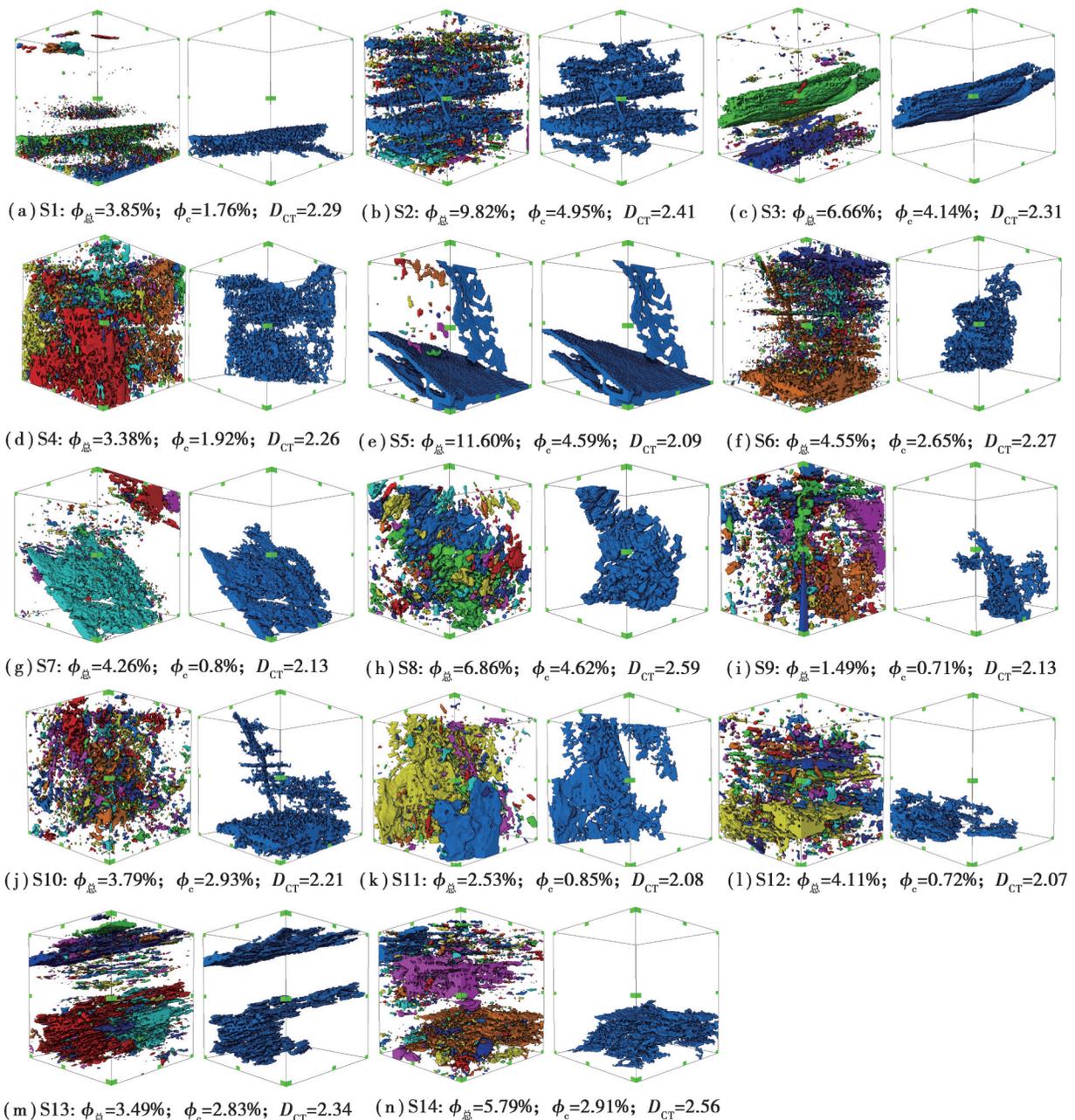
2 分析与讨论

2.1 孔裂隙结构多尺度表征

学者根据尺度大小对孔裂隙进行了分类^[32],其中,最常用的为霍多特(XOJIOT)^[33]孔径划分方法,将孔裂隙分为大孔($r>1\ 000\ \text{nm}$),中孔($100<r\leq 1\ 000\ \text{nm}$),过渡孔($10\leq r\leq 100\ \text{m}$)和微孔($r<10\ \text{nm}$)。这里在霍多特孔隙分类方法的基础上,将大孔中 $r>8.5\ \mu\text{m}$ 的定义为裂隙。

2.1.1 CT实验表征裂隙结构特征

Avizo平台中“Volume Rendering”模块可以将相互连通的裂隙渲染为同一颜色,当模型中存在较大区域的同色覆盖范围时,表明煤样的连通性较强。相反,当颜色较为分散时,表明连通性较差。图2为各煤样的



注: $\phi_{\text{总}}$ 表示煤样总孔隙率; ϕ_{c} 表示CT测试的煤样连通孔隙率; D_{CT} 表示CT实验计算的分形维数。

图2 各煤样的三维重构模型

Fig. 2 3D reconstruction model of coal samples

三维裂隙模型,可以直观看出,S2、S5和S7同色覆盖范围较大,说明煤样内有连通的大裂隙,渗流通过此类裂隙时动能损失小,有利于渗流的持续进行。而S1、S9和S10的裂隙分散,连通性差,这意味着渗流需要通过相对狭窄的喉道进入相邻裂隙,导致大量动能损失,对流体运移造成困难。

需要指出的是,并不是所有的裂隙都对渗透率有贡献。以S4、S12为例,虽然裂隙较为密集,但多数裂隙之间不存在相连通的喉道,因此这些裂隙对渗流没有贡献。为了定量表征裂隙的连通特性,进一步提取连通裂隙置于裂隙模型右侧。通过“Volume fraction”模块自动计算总孔隙率和连通孔隙率,并采用式(6)定义裂隙连通性,计算结果如表3所示。

$$C = \frac{\phi_c}{\phi_{\text{总}}}, \quad (6)$$

式中: ϕ_c 为连通孔隙率; $\phi_{\text{总}}$ 为总孔隙率。

由表3可知,S4、S12的连通孔隙率仅为1.92%和0.72%,连通性为0.43和0.51,初步判断其渗透率较低。而S2和S5相邻裂隙之间同色覆盖范围较大,且喉道发育,连通性也分别达到0.79和0.91,可初步判断渗透率较高。

表3 氮气吸附、压汞和CT实验测试孔隙率结果

Table 3 Results of porosity by nitrogen adsorption, mercury injection and CT

| 煤样 | 氮气吸附实验 | 压汞实验 | CT实验 | | |
|-----|--------|-------|-------|------|------|
| | | | 连通孔隙率 | 总孔隙率 | 连通性 |
| S1 | 0.84 | 4.34 | 1.76 | 2.44 | 0.72 |
| S2 | 3.85 | 11.28 | 4.95 | 6.27 | 0.79 |
| S3 | 1.01 | 7.85 | 4.14 | 7.14 | 0.58 |
| S4 | 0.58 | 3.49 | 1.92 | 4.43 | 0.43 |
| S5 | 1.11 | 14.11 | 4.59 | 5.04 | 0.91 |
| S6 | 2.89 | 3.04 | 2.65 | 6.46 | 0.41 |
| S7 | 0.51 | 4.34 | 0.83 | 0.92 | 0.90 |
| S8 | 0.42 | 7.67 | 4.62 | 5.19 | 0.89 |
| S9 | 0.45 | 2.15 | 0.71 | 3.55 | 0.20 |
| S10 | 0.50 | 6.54 | 2.93 | 6.10 | 0.48 |
| S11 | 0.47 | 3.24 | 0.85 | 1.33 | 0.64 |
| S12 | 0.56 | 3.49 | 0.72 | 1.41 | 0.51 |
| S13 | 0.45 | 4.12 | 2.83 | 3.49 | 0.81 |
| S14 | 0.48 | 65.01 | 2.91 | 5.60 | 0.52 |

裂隙结构的复杂性可以由分形维数定量表征。盒计数法计算的连通裂隙分形维数如表4所示。由裂隙模型可以看出,S8和S14的裂隙分布密集复杂,因此分形维数较高,为2.59和2.56。有研究表明^[34],当裂隙的分形维数在2.0~2.5之间时,分形维数的增加会使煤样渗透率大幅下降,这将不利于煤层注水的进行。

表4 氮气吸附、压汞和CT实验计算分形维数结果

Table 4 Results of fractal dimension calculated by nitrogen adsorption, mercury intrusion and CT experiments

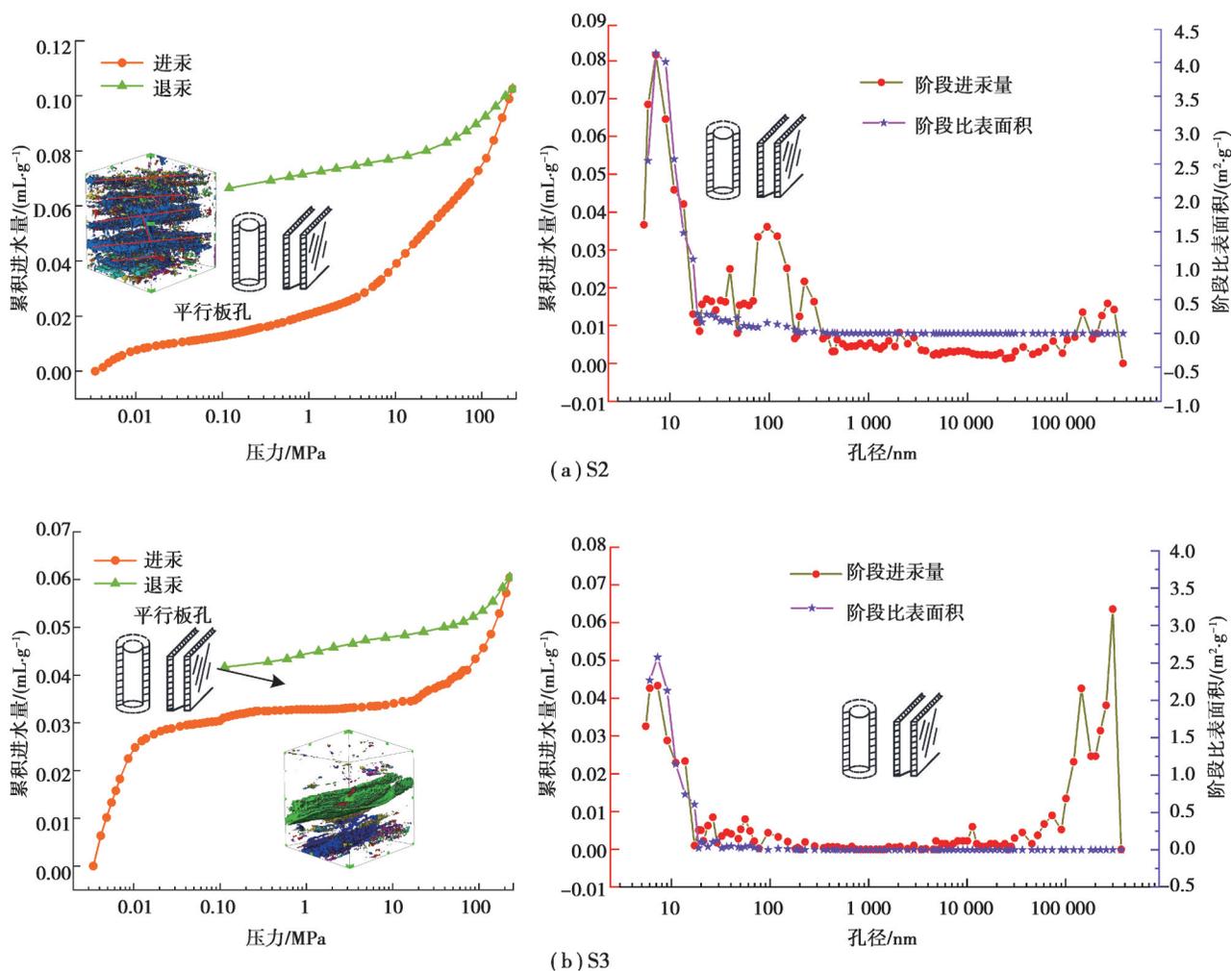
| 煤样 | 氮气吸附实验 | | 压汞实验 | | CT实验 D_c |
|----|----------|----------|----------|----------|------------|
| | D_{n1} | D_{n2} | D_{m1} | D_{m2} | |
| S1 | 1.96 | 2.60 | 3.63 | 2.77 | 2.29 |
| S2 | 2.16 | 2.86 | 3.31 | 3.11 | 2.41 |

续表4

| 煤样 | 氮气吸附实验 | | 压汞实验 | | CT实验 D_c |
|-----|----------|----------|----------|----------|------------|
| | D_{n1} | D_{n2} | D_{m1} | D_{m2} | |
| S3 | 1.50 | 2.76 | — | 2.51 | 2.31 |
| S4 | 1.37 | 2.63 | 3.78 | 2.90 | 2.26 |
| S5 | 2.16 | 2.62 | 3.31 | 3.24 | 2.09 |
| S6 | 2.34 | 2.66 | — | 2.53 | 2.27 |
| S7 | 0.83 | 2.67 | 3.74 | 2.82 | 2.13 |
| S8 | 0.01 | 2.64 | 3.51 | 2.45 | 2.59 |
| S9 | 0.65 | 2.61 | 3.95 | 2.82 | 2.13 |
| S10 | -1.57 | 2.61 | 3.56 | 2.54 | 2.21 |
| S11 | -0.16 | 2.63 | 3.66 | 2.65 | 2.08 |
| S12 | 0.99 | 2.66 | 3.67 | 2.91 | 2.07 |
| S13 | 0.12 | 2.61 | 3.92 | 2.69 | 2.34 |
| S14 | 2.20 | 2.80 | — | 2.09 | 2.56 |

2.1.2 压汞实验表征孔裂隙结构特征

作出了各煤样的进退汞曲线和孔径、比表面积分布图像,由于篇幅所限,这里以S2、S3、S9和S14为例,如图3所示。



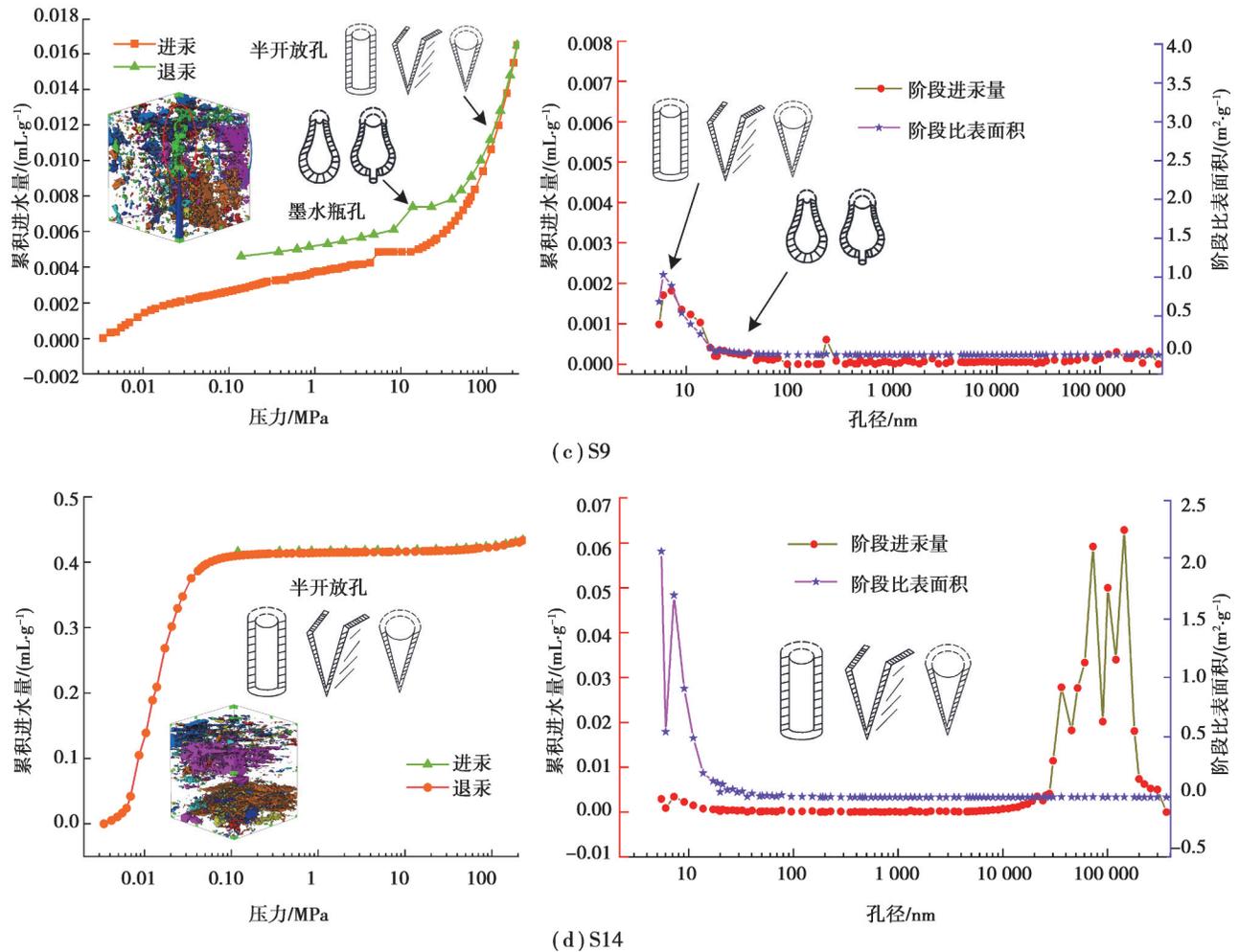


图 3 进退汞曲线及孔径分布情况

Fig. 3 Mercury entry and demercuration curves and pore size distribution

参照 Wang 等^[35]的研究,根据煤样进退汞曲线的特点将孔隙形状分为平行板孔、墨水瓶孔和半开放孔 3 种。压汞实验中不同的滞回环代表不同形状和连通性的孔裂隙^[26]。由图 3 可以看出,S3 的进退汞曲线趋于平行,可以判断煤样内平行板孔发育。这类孔裂隙的连通性较强,结构较为简单,渗流经过此类裂隙的动能损失较小,因此平行板裂隙的存在有助于煤体渗流。由于 CT 实验和压汞实验同时表征了 $r > 8.5 \mu\text{m}$ 的裂隙,因此压汞实验分析结果一定程度上可由 CT 实验验证。由 S3 的 CT 三维重构模型可以看出 S3 内确实存在贯穿煤样的平行板裂隙。S9 的退汞曲线存在 1 个上凸点,表明煤样内存在墨水瓶裂隙,由 S9 三维裂隙模型也可以看出,煤样内存在腔体大,口径较小的墨水瓶裂隙。相对于平行板孔而言,此类孔隙由于口径较小,流体注入较为困难。

为了比较不同煤样的孔裂隙体积,在孔径、比表面积分布图中,除 S14 外,纵坐标保持一致。由图 3 可知,几乎所有的煤样的孔裂隙都在 10 nm 和 100 μm 附近出现体积峰值,说明微孔和大孔较为发育,并贡献了煤体大部分孔隙率。当孔隙尺度较小时,比表面积分布和孔径分布具有较高的一致性,但随着孔裂隙尺度增大,裂隙体积持续变化,比表面积则一直维持在较低水平。需要注意的是,S14 微孔的比表面积和大尺度裂隙体积远高于其他煤样,结合实际分析,这是由于在高压汞作用下煤孔裂隙发生了较为严重的破坏,因此该实验结果不宜直接作为分析煤样的依据。

进退汞曲线中滞回环的大小反映了不同形状孔裂隙的体积。S2 的滞回环面积较大,在低压段进退汞曲线相对平行,且孔径分布图显示该煤样裂隙体积较大,说明 S2 内存在大量平行板孔。由 CT 实验得到的该煤样 $r > 8.5 \mu\text{m}$ 孔隙率较高为 4.95%,且存在多条平行于煤体的裂隙,验证了压汞实验分析结果的可靠性。由 CT

实验得到的S9孔隙率较低,为0.71%,因此压汞实验得到的滞回环面积较小。

由于汞无法进入煤体内的孤孔,因此压汞实验测得的孔隙率即为连通孔隙率,如表3所示。可以看出,CT实验得到的孔隙率普遍低于压汞实验。这是由于:1)CT无法表征 $r < 8.5 \mu\text{m}$ 的孔隙;2)压汞实验中,高压汞的注入对孔裂隙有一定程度的破坏,扩大了孔裂隙体积,如上文提到的S14压汞测试结果。

根据式(5)拟合计算了各煤样的分形维数,这里以S2、S5、S6和S13为例,如图4所示。Liu等^[30]的研究表明,当毛管压力 $P > 10 \text{ MPa}$,即 $\lg P > 1$ 时,煤基质压缩明显影响孔隙结构。由图4可知, $\lg P = 1$ 两侧存在明显分段。因此,以 $\lg P = 1$ (对应孔径 73.5 nm)作为分界点进行拟合,将分形维数计算结果列于表4。第1段分形维数介于2.45~3.24,拟合度多在92%以上,具有良好的分形特征。理论上孔裂隙的分形维数在2~3之间,但第二段的分形维数及S2和S5的第1段分形维数 > 3 ,由CT的分析结果可知,此煤样大尺度裂隙较多,这可能是高压下煤出现压缩变形导致的,但分形维数 > 3 的实验结果不失为表征储层特性的一个有效指标^[36]。

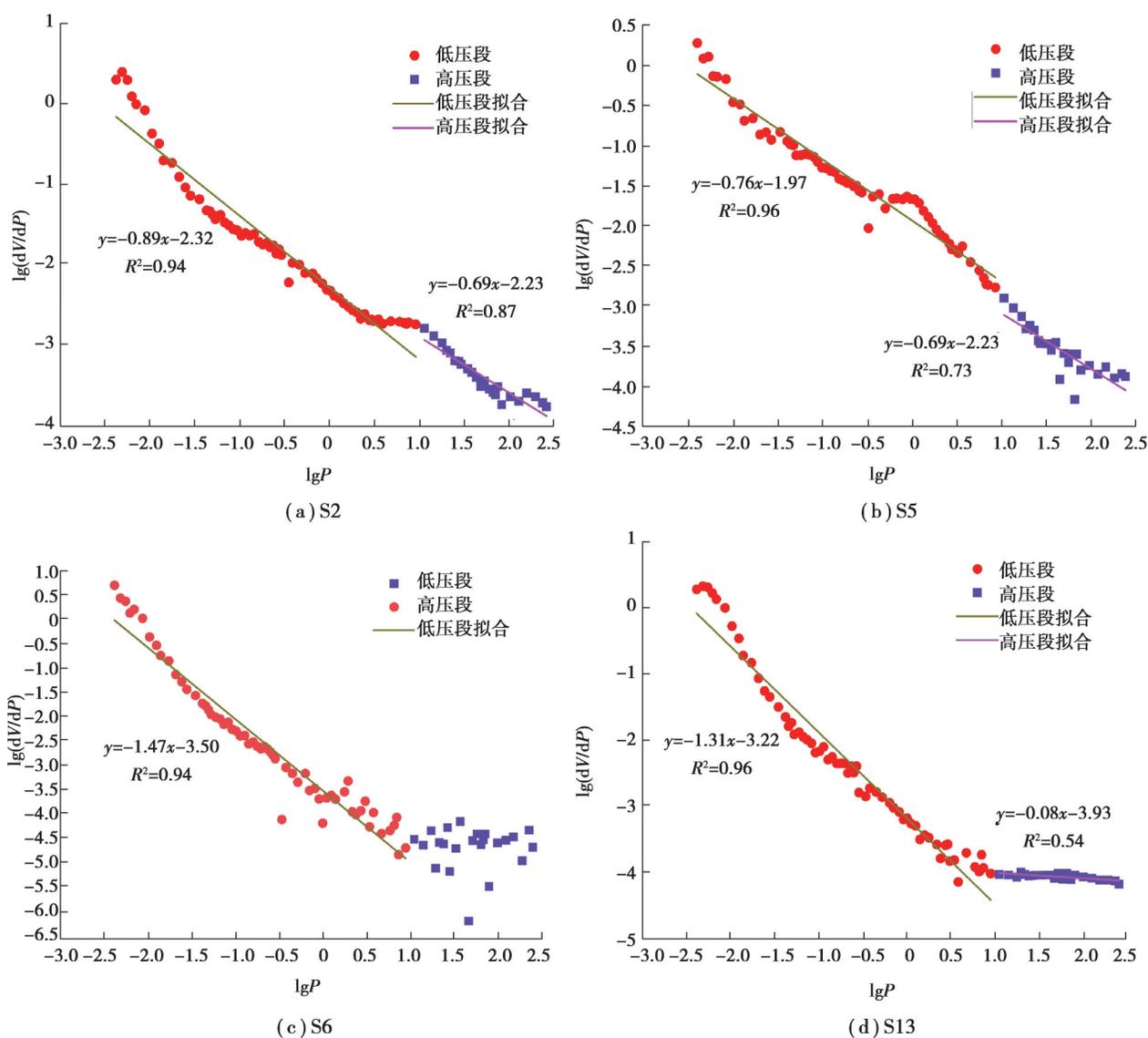


图4 压汞实验分形维数拟合

Fig. 4 Fractal dimension fitting of mercury pressure experiment

2.1.3 氮气吸附实验表征孔隙结构特征

低压下的氮气吸附实验中,氮气分子首先充满小尺度孔隙,随着压力增大,氮气吸附层增厚,当相对压力达到最大值时,毛细管冷凝达到最大孔隙半径。

以S2和S4为例,氮气吸附实验得到的吸附-解吸曲线和孔径分布如图5所示。参照Wang等^[35]的研究按照吸附-解吸曲线将孔隙分为平行板孔、墨水瓶孔和半开放孔3种形状。多数煤样的吸附-解吸曲线滞回环面积较小,说明微孔和过渡孔多为封闭孔,开放程度和连通性差。一般来说,煤样在孔径达到10 nm时,孔隙累计体积达到总体积的50%;孔径达到50 nm时,累计孔体积已达到了孔隙总体积的90%。说明微孔和过渡孔较为发育。

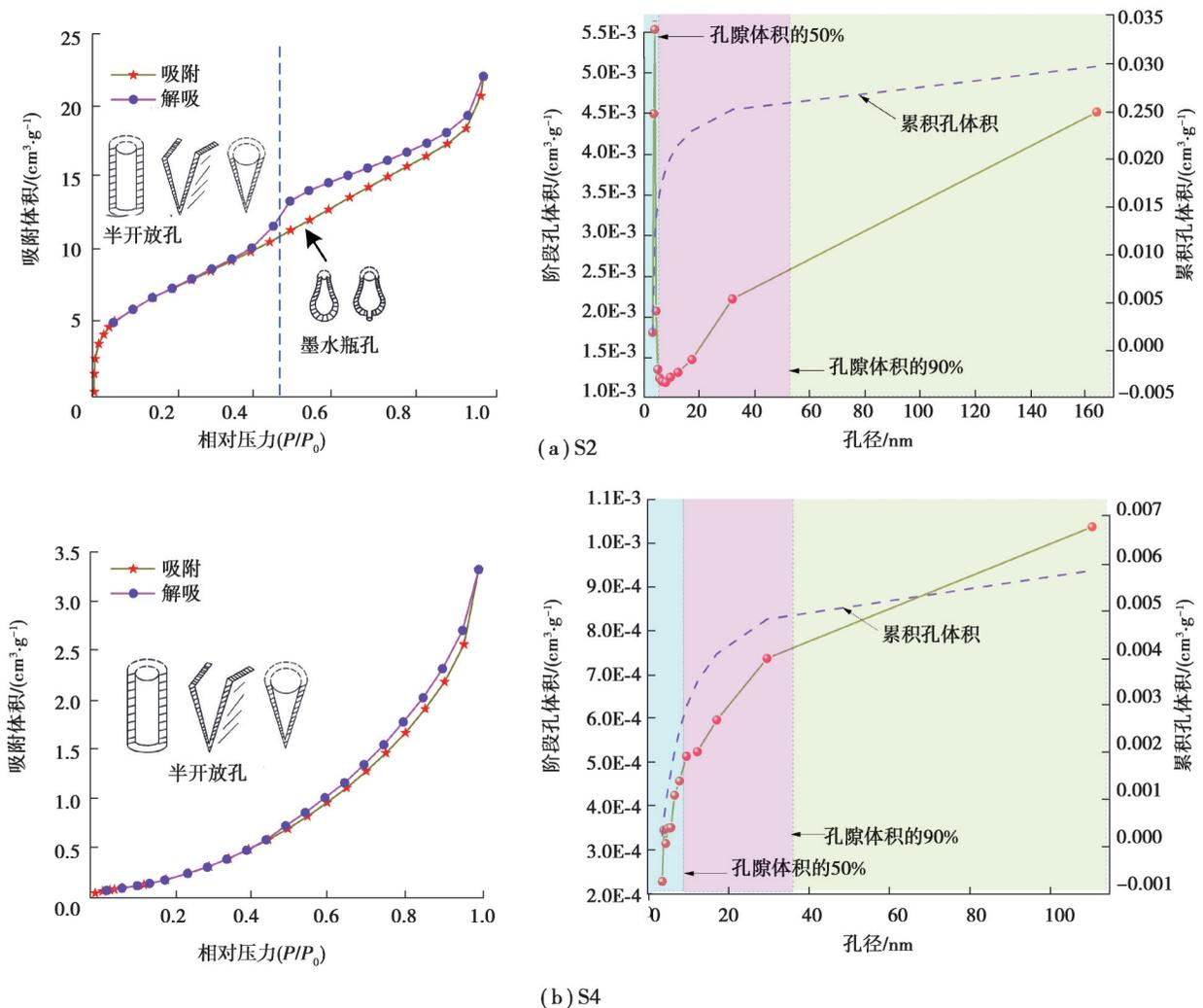


图5 吸附-解吸曲线及孔径分布

Fig. 5 Adsorption-desorption curve and pore size distribution

由氮气吸附实验测得的孔隙率和分形维数如表3和表4所示。相比压汞和CT实验,氮气吸附实验测得的孔隙率较低,在0.42%~3.85%之间,这是因为氮气吸附实验即使在最大相对压力下,仍然难以准确表征 $r > 50$ nm的介孔^[37]。

与压汞实验相似,氮气吸附实验也具有明显的尺度分形特征,吸附-解吸曲线在相对压力位于0.45左右时出现差异,以此为界分为2个比压区段, < 0.45 为低比压区,属于吸附孔分形维数 D_1 ,它反映了吸附孔($r < 4.34$ nm)表面分形特征。 > 0.45 为高比压区,属于渗流孔分形维数 D_2 ,反映中孔和大孔($r > 4.34$ nm)的结构分形特征。由表4分形维数计算结果可知, D_1 在-1.57~2.34之间,且多低于2,这可能是由于目标区域内孔隙结构数量较少或结构较为简单,但其仍能在一定程度上反映孔隙结构的复杂程度。 D_2 在2.60~2.86之间,且同一煤样 D_1 均小于 D_2 ,说明渗流孔结构更为复杂。

2.2 优势孔径段的划分及孔裂隙参数综合表征

由于不同方法测量的孔隙尺寸范围不同,单靠一种方法难以全面表征孔裂隙,因此,这里采用氮气吸附、

压汞和CT实验相结合的方法表征煤孔裂隙,如图6所示,不同宽度的矩形代表不同尺度的孔裂隙。在压汞实验中,图6(c)中绿色填充代表汞可进入的孔裂隙区域。一方面,裂隙极易在高压汞作用下扩张,如A区域所示;另一方面,高压汞会对微孔产生破坏,如B区域所示。因此,压汞实验不适合表征微孔和大尺度裂隙,但是可以较为准确地表征 $50\text{ nm} \leq r \leq 8.5\text{ }\mu\text{m}$ 的孔隙,称为压汞实验的优势孔径段。图6(b)中粉色代表氮气可填充区域,低压下氮气可充满尺度较小的孔隙,随着相对压力的增加,氮气吸附达到可填充的最大孔隙直径,当 $r > 50\text{ nm}$ 时,氮气由于无法充满孔隙导致结果不准确,如C区域所示,因此 $r < 50\text{ nm}$ 为氮气吸附所表征的优势孔径段。CT扫描实验受限于分辨率,如D区域所示,但可以准确表征 $r > 8.5\text{ }\mu\text{m}$ 的裂隙,因此弥补了压汞实验无法准确表征裂隙的缺陷。

综上所述,这里以氮气吸附实验表征 $r < 50\text{ nm}$ 的孔隙,压汞实验表征 $50\text{ nm} \leq r \leq 8.5\text{ }\mu\text{m}$ 的孔隙,CT表征 $r > 8.5\text{ }\mu\text{m}$ 的裂隙,上述实验方法分别在 50 nm 和 $8.5\text{ }\mu\text{m}$ 处衔接。

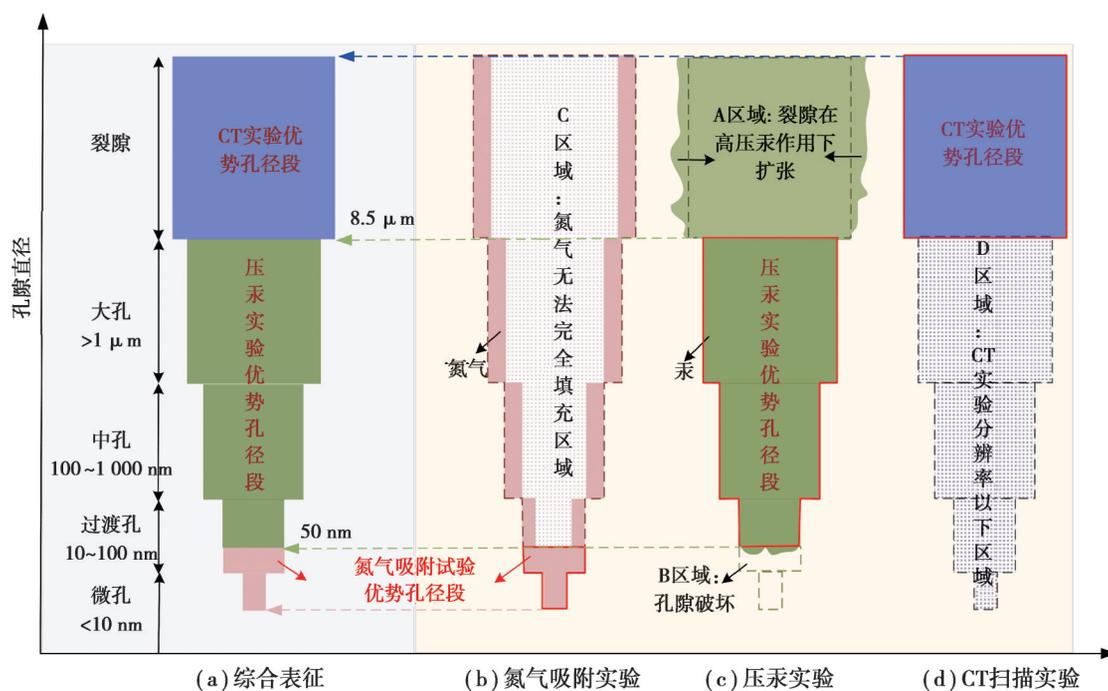


图6 氮气吸附、压汞和CT实验的优势孔径段划分原理

Fig. 6 Principle of dominant pore size segments for nitrogen adsorption, mercury injection and CT experiments

2.2.1 孔隙率的综合表征

依据上文确定的优势孔径段划分方法,用氮气吸附实验获取 $r < 50\text{ nm}$ 的孔隙率分量,压汞实验获取 $50\text{ nm} \leq r \leq 8.5\text{ }\mu\text{m}$ 的孔隙率分量,CT实验获取 $r > 8.5\text{ }\mu\text{m}$ 的孔隙率分量。如式(7)所示,将3种实验计算的孔隙率分量之和作为媒体综合孔隙率,据此计算的孔隙率分量和综合孔隙率如图7所示。

$$\phi_t = \phi_n + \phi_h + \phi_c = \frac{V_{r < 50\text{ nm}}}{V_n} + \frac{V_{50\text{ nm} \leq r \leq 8.5\text{ }\mu\text{m}}}{V_h} + \frac{V_{r > 8.5\text{ }\mu\text{m}}}{V_c}, \quad (7)$$

式中: ϕ_t 为媒体综合孔隙率; ϕ_n 、 ϕ_h 和 ϕ_c 分别为氮气吸附、压汞和CT实验计算的孔隙率分量; $V_{r < 50\text{ nm}}$ 为氮气吸附实验获取的 $r < 50\text{ nm}$ 的孔隙体积; $V_{50\text{ nm} \leq r \leq 8.5\text{ }\mu\text{m}}$ 为压汞实验获取的 $50\text{ nm} \leq r \leq 8.5\text{ }\mu\text{m}$ 的孔隙体积; $V_{r > 8.5\text{ }\mu\text{m}}$ 为CT实验获取的 $r > 8.5\text{ }\mu\text{m}$ 的裂隙体积; V_n 、 V_h 和 V_c 分别为氮气吸附、压汞和CT实验的煤样体积。

为便于对比,图8还展示了3种实验方法单独测得的煤样孔隙率与综合表征方法得到的孔隙率。压汞实验测得的孔隙率显著高于其他方法,这是因为高压汞作用下煤体的微孔产生破坏以及裂隙扩张。氮气吸附实验和CT实验由于无法观测 $r > 200\text{ nm}$ 和 $r < 8.5\text{ }\mu\text{m}$ 的孔裂隙,且由前文压汞实验可知多数煤样2个尺度范围内孔隙率较高,导致氮气吸附和压汞实验得到的孔隙率偏低。综合表征得到的孔隙率范围为 $1.48\% \sim 11.60\%$,介于压汞和CT实验结果之间。压汞实验得到S14的孔隙率高达 65.01% ,与实际情况差异较大。而

通过划分优势孔径段后计算的孔隙率为 4.48%,有效克服了压汞实验对裂隙的破坏造成的误差。

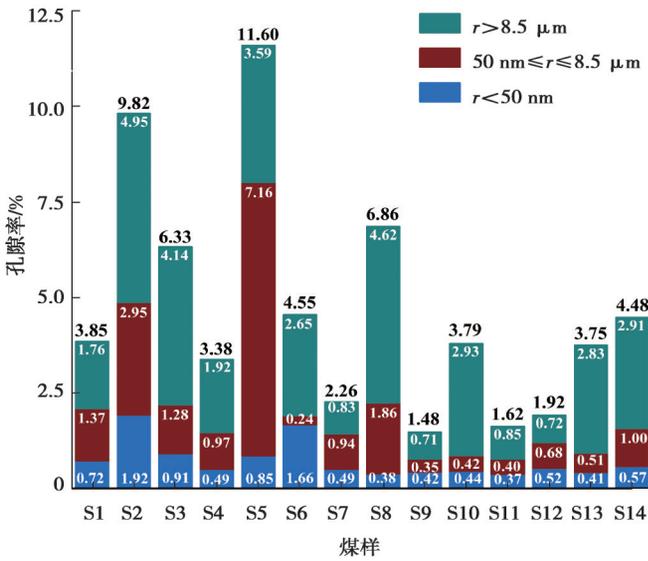


图 7 不同表征方法的优势孔隙率分量及综合孔隙率

Fig. 7 The dominant porosity components and comprehensive porosity of different characterization methods

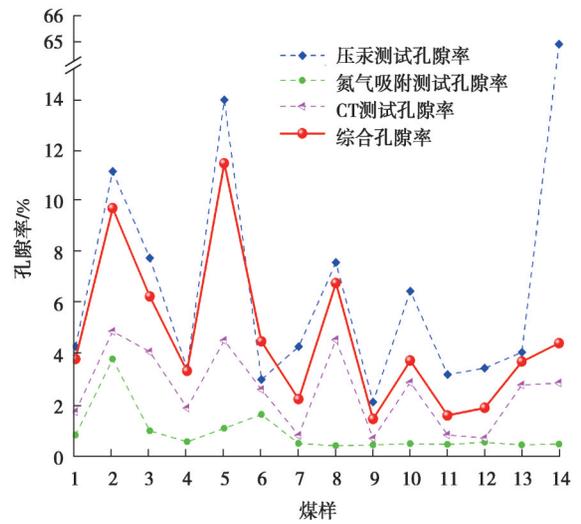


图 8 煤体孔裂隙不同表征方法得到的孔隙率差异

Fig. 8 The porosity difference obtained by different characterization methods of coal pore and fractures

2.2.2 分形维数的综合表征

为了得到煤的多尺度分形维数,这里采用归一化后的优势孔隙率分量作为权重系数计算分形维数。需要指出的是,压汞实验高压阶段时微孔结构已经破坏,使得分形维数均>3,此时压汞实验对微孔复杂性的表征已经不准确,因此,忽略了这部分孔隙的分形维数,用 D_{m_2} 代表压汞实验的分形维数;氮气吸附实验中,当 $\lg P > 0.45$ 时,氮气吸附无法充满孔裂隙,计算的分形维数也是不准确的,在计算中忽略此部分分形维数。最终分形维数的计算方法如式(8)~(9)所示。

$$D_f = c_n D_{n_2} + c_h D_{h_2} + c_c D_c, \tag{8}$$

式中: D_f 代表综合分形维数; D_{n_2} 、 D_{h_2} 、 D_c 分别代表氮气吸附、压汞和CT计算的分形维数; c_n 、 c_h 、 c_c 分别代表 $r < 50 \text{ nm}$ 、 $50 \text{ nm} \leq r \leq 8.5 \text{ } \mu\text{m}$ 和 $r > 8.5 \text{ } \mu\text{m}$ 的归一化后孔隙率分量,计算方法为

$$c_n = \frac{\phi_n}{\phi_t}, \quad c_h = \frac{\phi_h}{\phi_t}, \quad c_c = \frac{\phi_c}{\phi_t}, \tag{9}$$

式中, ϕ_n 、 ϕ_h 和 ϕ_c 分别为氮气吸附、压汞和CT实验的优势孔隙率分量; ϕ_t 为综合孔隙率。最终计算的多尺度分形维数见表5。

表 5 各煤样多尺度分形维数

Table 5 Multi-scale fractal dimension of coal samples

| 煤样 | D_f | 煤样 | D_f |
|----|-------|-----|-------|
| S1 | 2.52 | S8 | 2.55 |
| S2 | 2.71 | S9 | 2.43 |
| S3 | 2.42 | S10 | 2.29 |
| S4 | 2.50 | S11 | 2.35 |
| S5 | 2.78 | S12 | 2.53 |
| S6 | 2.43 | S13 | 2.42 |
| S7 | 2.53 | S14 | 2.49 |

2.3 孔隙率与分形维数、液态渗透率的关系

2.3.1 孔隙率与分形维数的关系

孔隙度决定了煤体内部渗流空间的大小,而分形维数则体现了煤体内渗流空间分布的复杂程度,进而影响煤储层的渗流能力。前人多对煤体孔隙率及其分形维数的关系进行相关研究,但由于观测尺度的差异,得出的结果不尽相同^[38-39]。图9给出了我国14个煤炭基地煤样的综合孔隙率和分形维数的关系,可以看出,随着综合孔隙率的提高,分形维数也逐渐增大,两者的关系可以表示为 $y=0.0287x+2.3474$ 。这也说明,高孔隙率的煤样更容易形成复杂的孔裂隙结构。

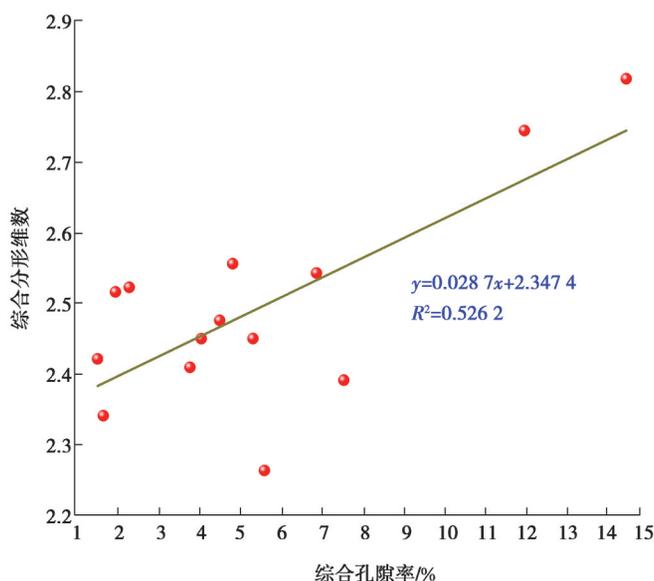


图9 综合孔隙率和分形维数的关系

Fig. 9 The relationship between comprehensive porosity and fractal dimension

2.3.2 优势孔径段的孔隙率与渗透率的关系

由实验得到的煤样渗透率如表6所示,各煤样的渗透率在 $0.0002 \times 10^{-15} \sim 0.6525 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 之间。由于S2和S5的综合孔隙率最高,为渗流提供了充分的空间,因此渗透率最大,分别为 $0.6525 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 和 $0.3483 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 。氮气吸附、压汞和CT实验得到的优势孔隙率分量与渗透率的关系如图10所示。 $r < 50 \text{ nm}$ 的孔隙率与渗透率的关系可以表示为 $y=0.2741x-0.0781$,由于 $r < 50 \text{ nm}$ 的微孔和过渡孔连通性差,对渗透率的贡献较小,与渗透率的线性相关性仅为0.4180。与 $r < 50 \text{ nm}$ 的孔裂隙类似, $50 \text{ nm} \leq r \leq 8.5 \mu\text{m}$ 的孔隙率与渗透率呈 $y=0.0674x+0.0237$ 的正相关关系,但相关性较小,为0.3485。相比之下, $r > 8.5 \mu\text{m}$ 的孔隙率与渗透率的关系可以表示为 $y=0.0039x^{2.5986}$,且相关性较强,为0.7536。这也体现了与氮气吸附和压汞实验所表征的优势孔径段相比,分辨率为 $8.5 \mu\text{m}$ 的CT实验所能准确表征的优势孔径段更能反映孔裂隙结构对水渗的影响,这与Zhou等^[40]的研究结果类似。且作者之前的研究也证明,对于水渗而言,渗流主要通过大尺度裂隙进入煤体,并逐渐渗流到小尺度孔隙^[41]。需要指出的是,探究孔裂隙对水渗的影响时,因为高分辨率的CT实验要求的煤样尺寸较小,会导致一部分较大尺度的裂隙无法观测,因此,对探究水渗特点而言,CT实验的分辨率并不是越高越好。对适用于观测煤体水渗的CT实验分辨率及煤样大小,这里不再做深入探究,这将是未来工作的重点。

相对于氮气吸附和压汞实验,CT可准确观测的尺度范围内($r > 8.5 \mu\text{m}$)的裂隙对煤样渗透率的影响更大,且重构的三维裂隙结构对预测水的渗流路径和分布等具有重要意义^[42],适用于分析孔裂隙结构对水渗的影响问题,从微观角度为提高煤层注水效率提供理论基础。而在煤层气采收领域, $r < 100 \text{ nm}$ 的吸附孔主要影响煤对气体的吸附、解吸和扩散能力,利用氮气吸附实验探究吸附孔的结构特点有助于提高煤层气的采收率^[7]。此外,许多学者结合氮气吸附和压汞实验探讨孔裂隙结构参数之间的内在联系,为煤层气的开采提供

理论基础^[36]。因此,针对不同的工程背景,应选用不同的孔裂隙表征方法。

表 6 各煤样渗透率
Table 6 Permeability of coal samples

| 煤样 | 渗透率/ fm^2 | 煤样 | 渗透率/ fm^2 |
|----|--------------------|-----|--------------------|
| S1 | 0.000 7 | S8 | 0.107 7 |
| S2 | 0.652 5 | S9 | 0.000 2 |
| S3 | 0.429 5 | S10 | 0.081 2 |
| S4 | 0.000 6 | S11 | 0.000 9 |
| S5 | 0.348 3 | S12 | 0.009 4 |
| S6 | 0.005 5 | S13 | 0.006 2 |
| S7 | 0.012 5 | S14 | 0.032 7 |

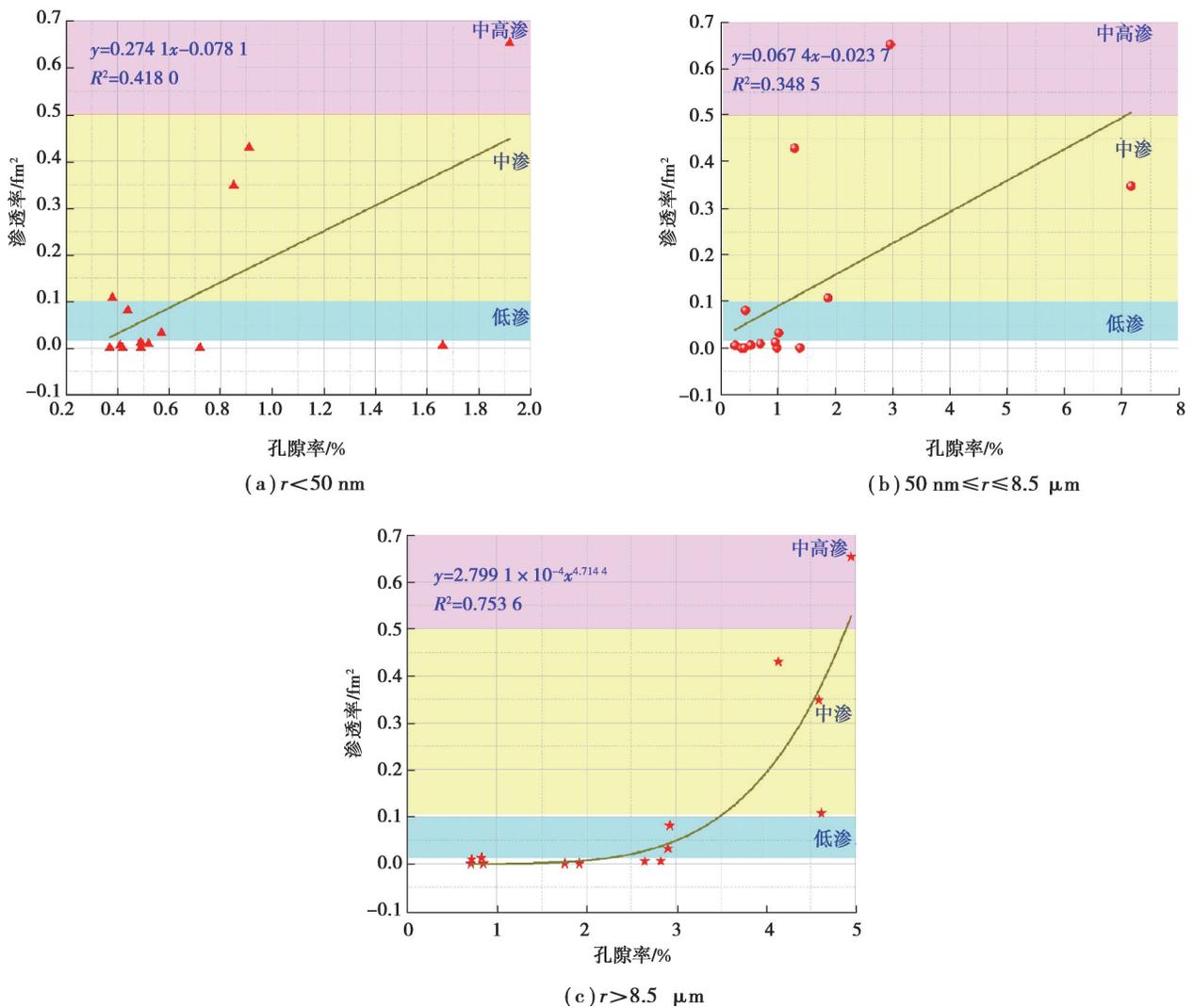


图 10 不同优势孔径段内的孔隙率与渗透率的关系

Fig. 10 Relationship between porosity and permeability in different dominant porosity components

3 结 论

分别采用氮气吸附、压汞和 CT 实验表征了我国 14 个煤炭基地煤样的孔裂隙结构特点。通过划分 3 种实

验方法所能准确表征的优势孔径段,综合表征煤样的孔隙率和分形维数,并比较了不同实验方法的优势孔隙率分量与煤样实验渗透率的关系,得到以下主要结论:

1)通过氮气吸附实验发现,14个煤炭基地煤样的微孔和过渡孔以连通性差的半开放孔和封闭孔为主,CT和压汞实验可同时表征 $r>8.5\ \mu\text{m}$ 的孔裂隙,因此实验得到的孔裂隙形状和连通性等特征可相互验证。两实验表明,S2和S3均存在体积较大的平行板孔裂隙,有助于煤体内部渗流。

2)由于表征尺度和测试原理的不同,3种实验方法得到的煤样孔隙率具有明显差异。其中,压汞实验得到孔隙率最大,其次为CT实验,氮气吸附实验得到的煤样孔隙率最小。结合氮气吸附、压汞和CT实验的特点,确定其可表征的优势孔径段分别为 $r<50\ \text{nm}$, $50\ \text{nm}\leq r\leq 8.5\ \mu\text{m}$, $r>8.5\ \mu\text{m}$ 。将各孔径段内的孔隙率相加,得到煤样综合孔隙率范围为1.62%~11.60%。

3)氮气吸附和压汞实验测得的孔裂隙分形维数具有明显的尺度特征。以归一化后优势孔隙率分量为系数,确定了孔裂隙综合分形维数,其范围为2.29~2.78。综合各孔隙率和分形维数之间呈正相关关系,可以表示为 $y=0.0287x+2.3474$ 。

4)渗流实验得到14个煤炭基地煤样的渗透率在 $0.0002\times 10^{-15}\sim 0.6525\times 10^{-15}\ \text{m}^2$ 之间,以中低渗为主。由CT实验表征的优势孔隙率分量与实验渗透率的相关性最强,可以表示为 $y=0.0039x^{2.5986}$ 。相对于氮气吸附和压汞实验,CT实验更适用于分析孔裂隙结构对水渗的影响,进而为煤层注水提供理论基础。

参考文献

- [1] 人民网. 能源发展战略行动规划(2014—2020年)[EB/OL]. (2014-11-09) [2022-11-30]. <http://energy.people.com.cn/n/2014/1119/c71661-26055076.html>,2014-11-19/2022-01-20.
- [2] Davy P, Le Goc R, Darcel C. A model of fracture nucleation, growth and arrest, and consequences for fracture density and scaling[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, 118(4): 1393-1407.
- [3] Zhao Z, Ni X M, Cao Y X, et al. Application of fractal theory to predict the coal permeability of multi-scale pores and fractures[J]. *Energy Reports*, 2021, 7: 10-18.
- [4] Ni X M, Chen W X, Li Z Y, et al. Reconstruction of different scales of pore-fractures network of coal reservoir and its permeability prediction with Monte Carlo method[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2017, 27(4): 693-699.
- [5] 秦跃平, 刘鹏, 郝永江. 煤体双重孔隙瓦斯双渗流模型及无因次解算[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(1): 43-52.
Qin Y P, Liu P, Hao Y J. Mathematical model and dimensionless numerical simulation of methane flow in a dual-porosity and dual-permeability coal seam[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(1): 43-52.(in Chinese)
- [6] 吴双, 汤达祯, 李松, 等. 煤层气储层孔渗参数的应力响应特征[J]. *油气地质与采收率*, 2019, 26(6): 80-86.
Wu S, Tang D Z, Li S, et al. Stress response characteristics of porosity and permeability of coalbed methane reservoirs[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2019, 26(6): 80-86.(in Chinese)
- [7] Dantas S, Struckhoff K C, Thommes M, et al. Phase behavior and capillary condensation hysteresis of carbon dioxide in mesopores[J]. *Langmuir*, 2019, 35(35): 11291-11298.
- [8] Wen Z H, Wang Q, Yang Y P, et al. Pore structure characteristics and evolution law of different-rank coal samples[J]. *Geofluids*, 2021, 2021(4): 1-17.
- [9] Li Z T, Liu D M, Cai Y D, et al. Adsorption pore structure and its fractal characteristics of coals by N_2 adsorption/desorption and FESEM image analyses[J]. *Fuel*, 2019, 257: 116031.
- [10] Zhang G L, Ranjith P G, Fu X H, et al. Pore-fracture alteration of different rank coals: implications for CO_2 sequestration in coal[J]. *Fuel*, 2021, 289: 119801.
- [11] Wang X L, Pan J N, Wang K, et al. Characterizing the shape, size, and distribution heterogeneity of pore-fractures in high rank coal based on X-ray CT image analysis and mercury intrusion porosimetry[J]. *Fuel*, 2020, 282: 118754.
- [12] Qin L, Li S G, Zhai C, et al. Changes in the pore structure of lignite after repeated cycles of liquid nitrogen freezing as determined by nitrogen adsorption and mercury intrusion[J]. *Fuel*, 2020, 267: 117214.
- [13] Li Y T, Jiang Y D, Zhang B, et al. Investigation on the pore characteristics of coal specimens with bursting proneness[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 16518.
- [14] Wang G, Han D Y, Qin X J, et al. A comprehensive method for studying pore structure and seepage characteristics of coal mass

- based on 3D CT reconstruction and NMR[J]. *Fuel*, 2020, 281: 118735.
- [15] Milliken K L, Rudnicki M, Awwiller D N, et al. Organic matter-hosted pore system, Marcellus Formation (Devonian), Pennsylvania[J]. *AAPG Bulletin*, 2013, 97(2): 177-200.
- [16] Ju Y, Xi C D, Zhang Y, et al. Laboratory in situ CT observation of the evolution of 3D fracture networks in coal subjected to confining pressures and axial compressive loads: a novel approach[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51(11): 3361-3375.
- [17] Jing D J, Meng X X, Ge S C, et al. Reconstruction and seepage simulation of a coal pore-fracture network based on CT technology[J]. *Plos One*, 2021, 16(6): e0252277.
- [18] Li Y W, Yang Y F, Dong M Z, et al. Effect of pore structure and capillary number on gas-water flow patterns in carbonate rocks[J]. *SPE J*, 2022, 27(04): 1895-1904.
- [19] 胡秋嘉, 刘世奇, 毛崇昊, 等. 基于X-ray CT与FIB-SEM的无烟煤孔裂隙发育特征[J]. *煤矿安全*, 2021, 52(9): 10-15, 21.
Hu Q J, Liu S Q, Mao C H, et al. Characteristics of pores and fractures in anthracite coal based on X-ray CT and FIB-SEM[J]. *Safety in Coal Mines*, 2021, 52(9): 10-15, 21.(in Chinese)
- [20] 李伟, 要惠芳, 刘鸿福, 等. 基于显微CT的不同煤体结构煤三维孔隙精细表征[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(6): 1127-1132.
Li W, Yao H F, Liu H F, et al. Advanced characterization of three-dimensional pores in coals with different coal-body structure by micro-CT[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(6): 1127-1132.(in Chinese)
- [21] 贾小宝, 牛海萍, 刘鸿福, 等. 基于微焦点显微CT技术的不同煤体结构煤的孔裂隙定量表征[J]. *煤矿安全*, 2018, 49(11): 24-28.
Jia X B, Niu H P, Liu H F, et al. Quantitative characterization of pore fissures for different coal structures based on μ CT[J]. *Safety in Coal Mines*, 2018, 49(11): 24-28. (in Chinese)
- [22] Wang G, Qin X J, Han D Y, et al. Study on seepage and deformation characteristics of coal microstructure by 3D reconstruction of CT images at high temperatures[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2021, 31(2): 175-185.
- [23] 杨赫. 注水煤样细观结构分形特征及渗透特性研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2018: 37-41.
Yang H. Study on the fractal and seepage characteristics of A coal sample meso-structure of coal seam water infusion[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2018: 37-41.(in Chinese)
- [24] 孙中良, 王芙蓉, 韩元佳, 等. 潜江凹陷盐间页岩油储层孔隙结构分形表征与评价[J]. *地质科技通报*, 2022, 41(4): 125-137.
Sun Z L, Wang F R, Han Y J, et al. Characterization and evaluation of fractal dimension of intersalt shale oil reservoirs in Qianjiang Depression[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41(4): 125-137.(in Chinese)
- [25] Yao Y B, Liu D M. Comparison of low-field NMR and mercury intrusion porosimetry in characterizing pore size distributions of coals[J]. *Fuel*, 2012, 95: 152-158.
- [26] 王刚, 杨鑫祥, 张孝强, 等. 基于DTM阈值分割法的孔裂隙煤岩体瓦斯渗流数值模拟[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(1): 119-129.
Wang G, Yang X X, Zhang X Q, et al. Numerical simulation of gas flow in pores and fissures of coal based on segmentation of DTM threshold[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(1): 119-129.(in Chinese)
- [27] 刘维福, 丁序海, 周光. 基于CT成像的煤岩孔裂隙结构重建及渗流模拟研究[J]. *煤矿安全*, 2021, 52(2): 23-27.
Liu W F, Ding X H, Zhou G. Reconstruction and seepage simulation of coal and rock pore fracture structure based on CT imaging[J]. *Safety in Coal Mines*, 2021, 52(2): 23-27.(in Chinese)
- [28] 沈俊男. 基于CT技术和分形理论的煤体孔裂隙结构表征[D]. 青岛: 山东科技大学, 2019: 26-28.
Shen J N. Characterization of coal pore fracture structure based on CT technology and fractal theory[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2019: 26-28. (in Chinese)
- [29] 王刚, 陈雪畅, 韩冬阳, 等. 基于改进Otsu的煤体CT图像阈值分割算法的研究[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(1): 264-271.
Wang G, Chen X C, Han D Y, et al. Research on threshold segmentation algorithm of coal CT images based on improved Otsu[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(1): 264-271.(in Chinese)
- [30] Liu K Q, Ostadhassan M, Sun L W, et al. A comprehensive pore structure study of the Bakken Shale with SANS, N_2 adsorption and mercury intrusion[J]. *Fuel*, 2019, 245: 274-285.
- [31] 卢振东, 刘成林, 臧起彪, 等. 高压压汞联合分形理论分析致密砂岩孔隙结构: 以鄂尔多斯盆地合水地区为例[J]. *地质科技通报*, 2023, 42(1): 264-273.
Lu Z D, Liu C L, Zang Q B, et al. Analysis of pore structure of tight sandstone by high pressure mercury injection combined with fractal theory: a case study of Heshui area in Ordos Basin[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2023, 42(1):

264-273.(in Chinese)

- [32] 刘纪坤, 任棒, 王翠霞. 中低阶煤孔隙结构特征及其对瓦斯解吸特性影响[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(12): 153-161.
Liu J K, Ren B, Wang C X. Pore structure characteristics of middle and low rank coals and their influence on gas desorption characteristics[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 153-161.(in Chinese)
- [33] 程远平, 胡彪. 基于煤中甲烷赋存和运移特性的新孔隙分类方法[J]. 煤炭学报, 2023, 48(01): 212-225.
Cheng Y P, Hu B. A new pore classification method based on the methane occurrence and migration characteristics in coal[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(01): 212-225.(in Chinese)
- [34] 王镜惠, 梅明华, 刘娟, 等. 基于分形理论的高煤阶煤岩渗透率计算方法研究与应用[J]. 当代化工, 2020, 49(7): 1356-1359, 1364.
Wang J H, Mei M H, Liu J, et al. Research and application of permeability calculation method of high rank coal and rock based on fractal theory[J]. Contemporary Chemical Industry, 2020, 49(7): 1356-1359, 1364. (in Chinese)
- [35] Wang L, Zhang G X, Liu J, et al. Effect of the pore structure on adsorption and diffusion migration of different rank coal samples[J]. Energy & Fuels, 2020, 34(10): 12486-12504.
- [36] 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. (in Chinese)
- [37] Labani M M, Rezaee R, Saeedi A, et al. Evaluation of pore size spectrum of gas shale reservoirs using low pressure nitrogen adsorption, gas expansion and mercury porosimetry: a case study from the Perth and Canning Basins, Western Australia[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2013, 112: 7-16.
- [38] Li Q, Liu D M, Cai Y D, et al. Effects of natural micro-fracture morphology, temperature and pressure on fluid flow in coals through fractal theory combined with lattice Boltzmann method[J]. Fuel, 2021, 286: 119468.
- [39] Wang G, Qin X J, Shen J N, et al. Quantitative analysis of microscopic structure and gas seepage characteristics of low-rank coal based on CT three-dimensional reconstruction of CT images and fractal theory[J]. Fuel, 2019, 256: 115900.
- [40] Zhou S D, Liu D M, Cai Y D, et al. Gas sorption and flow capabilities of lignite, subbituminous and high-volatile bituminous coals in the Southern Junggar Basin, NW China[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 34: 6-21.
- [41] 王刚, 江成浩, 刘世民, 等. 基于CT三维重建煤骨架结构模型的渗流过程动态模拟研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(5): 1390-1399.
Wang G, Jiang C H, Liu S M, et al. Dynamic simulation of seepage process based on CT 3D reconstruction of coal skeleton structure model[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5): 1390-1399.(in Chinese)
- [42] Wang G, Chen X C, Wang S B, et al. Influence of fracture connectivity and shape on water seepage of low-rank coal based on CT 3D reconstruction[J]. Journal of Nature Gas Science and Engineering, 2022, 102: 10458.

(编辑 郑洁)