

引用格式:王鹏翔,张洲,余婉莹,等.深/浅部煤储层孔裂隙结构及三维空间分布差异特征:以准噶尔盆地为例[J].油气藏评价与开发,2025,15(2):227-236.
WANG Pengxiang, ZHANG Zhou, YU Wanying, et al. Characteristics of pore-fracture structure and three-dimensional spatial distribution differences in deep and shallow coal reservoirs: A case study of Junggar Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2025, 15(2): 227-236.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2025.02.007

深/浅部煤储层孔裂隙结构及三维空间分布差异特征 ——以准噶尔盆地为例

王鹏翔¹, 张洲^{1,2,3}, 余婉莹¹, 邹强¹, 杨正滔¹

(1.河南理工大学资源环境学院,河南焦作454000;2.中原经济区煤层(页岩)气河南省协同创新中心,河南焦作454000;3.河南省非常规能源地质与开发国际联合实验室,河南焦作454000)

摘要:深/浅部煤储层孔隙-裂隙结构差异特征对煤层气开采具有较大影响,针对这些结构特征差异进行的研究可为探索其物性特征,寻找煤层气勘探开发有利区提供部分理论依据。以准噶尔盆地深/浅部煤储层的煤岩样品作为研究对象,对深/浅部样品进行扫描电子显微镜、低温N₂吸附、高压压汞和CT(计算机断层成像)扫描等测试。测试结果表明,从浅部到深部的煤岩样品的渗透率逐渐降低,总孔体积逐渐降低,微孔与大孔分布频率逐渐降低;浅层样品孔隙-裂隙发育较好,中孔与大孔阶段孔隙分形数值低,孔隙发育的均质性强,大孔隙与微裂隙相互连通;深部煤岩样品孔隙-裂隙发育相对较为孤立,在中孔与大孔阶段孔隙发育情况较复杂,孔隙-裂隙多被矿物充填。通过最大球算法对样品构建孔隙网络模型,阐明了样品连通孔隙的分布规律、形态与结构在三维空间的发育情况,并对等效孔隙、孔喉参数等结构参数和连通情况进行统计和分析,发现浅层样品连通孔隙度和总孔隙度优于深层样品,浅部样品孔隙-裂隙数量多,在微裂隙尺度占有优势,喉道短,孔喉半径大,发育密集,配位数高,连通性好,有利于气体在储层中流动。研究成果对于准噶尔盆地开发深/浅部煤层气采用适配性技术提供了实验数据支撑,对现场开发具有一定的指导意义。

关键词:准噶尔盆地;深部煤层气;孔隙特征;物性特征;CT(计算机断层成像)扫描

中图分类号:TE132

文献标识码:A

Characteristics of pore-fracture structure and three-dimensional spatial distribution differences in deep and shallow coal reservoirs: A case study of Junggar Basin

WANG Pengxiang¹, ZHANG Zhou^{1,2,3}, YU Wanying¹, ZOU Qiang¹, YANG Zhengtao¹

(1. School of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China; 2. Collaborative Innovation Center of Coalbed Methane and Shale Gas for Central Plains Economic Region, Jiaozuo, Henan 454000, China; 3. Henan International Joint Laboratory for Unconventional Energy Geology and Development, Jiaozuo, Henan 454000, China)

Abstract: The differences in pore-fracture structures between deep and shallow coal reservoirs significantly affect coalbed methane extraction. Research on these structural differences provides theoretical support for exploring their physical properties and identifying favorable zones for coalbed methane exploration and development. This study analyzed coal samples from deep and shallow coal reservoirs in the Junggar Basin. These samples were tested using scanning electron microscopy, low-temperature N₂ adsorption, high-pressure mercury injection, and CT scan. The results showed that, from shallow to deep coal samples, the permeability, total pore volume, and distribution frequency of micropores and macropores gradually decreased. The shallow coal samples exhibited well-developed pores and fractures, with low fractal dimensions in the mesopore and macropore stages, strong homogeneity in pore development, and interconnection between macropores and microfractures. In contrast, the deep coal samples showed relatively isolated pore-fracture development, more complex pore development in the mesopore and macropore stages, and significant mineral filling within pores and fractures. A pore network model for the samples was established using the maximal sphere algorithm to analyze the distribution pattern, morphology, and three-dimensional structural development of the connected pores and fractures. The equivalent pores, throat parameters, and other structural parameters, along with the connectivity, were statistically analyzed. The results revealed that shallow coal samples showed higher connectivity and total porosity

收稿日期:2024-10-21。

第一作者简介:王鹏翔(1998—),男,在读硕士研究生,主要从事煤地质与非常规天然气地质研究。地址:河南省焦作市世纪路2001号河南理工大学,邮政编码:454000。E-mail:1227181367@qq.com

通信作者简介:张洲(1979—),男,博士,副教授,主要从事煤层气地质与开发研究。地址:河南省焦作市世纪路2001号河南理工大学,邮政编码:454000。E-mail:zhangzhou@hpu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目“煤层气低产储层靶向改造增产关键理论及技术基础”(42230814);河南省高等学校重点项目计划“煤层气井煤粉沉降规律及处理系统研究”(25B170010)。

compared to the deep samples. The shallow samples exhibited more pores and fractures, with a dominance at the microfracture scale. Additionally, they exhibited shorter throats, larger pore-throat radii, denser pore development, higher coordination numbers, and better connectivity, which facilitated gas flow in the reservoir. The research findings provide experimental data support for the development of deep and shallow coalbed methane in the Junggar Basin using adaptive technologies, and offer valuable guidance for on-site development.

Keywords: Junggar Basin; deep coalbed methane; pore characteristics; physical properties; CT scan

近年来,中国煤层气的勘探开发趋势逐渐从浅部向深部煤层气发展^[1-4],由于深部煤储层受到高温、高压、高地应力的影响,造成孔隙、裂隙被压实或充填,降低了煤层气在储层中的运移能力^[5-7],使得深部与浅部煤储层在孔隙-裂隙结构特征、含气性能、气体排采特征等具有明显差异。因此,针对深部与浅部煤储层孔隙-裂隙结构特征差异开展多维、多尺度的研究^[8],可对探索其储层物性特征,寻找深部煤层气勘探开发有利区域提供部分理论依据。同时,煤储层孔隙裂隙的微观结构发育特征,空间分布情况和连通性能从根本上控制着煤层气的吸附、解吸、扩散和渗流情况^[9-10],对煤层气的开发具有重要意义。

现有的孔裂隙结构表征方法主要有2类,分别为流体侵入法和光电辐射法^[11]。流体侵入法主要指气体吸附法(CO₂/N₂)和高压压汞法,该类测试方法主要通过分子探针或流体侵入间接地对煤的孔裂隙形态结构进行表征,具有较高的效率与准确性^[12-13],但在某些程度上受限于尺度特征,无法对样品进行全尺度的定量表征,在流体侵入的过程中还可能会造成破坏,降低测试结果的准确性^[14]。光电辐射法主要包括光学显微镜、扫描电子显微镜、核磁共振、小角X射线散射(SAXS)和CT(计算机断层成像)扫描等,此类分析技术大多主要应用于煤的微观结构的二维分布、孔隙发育、结构取向等形貌特征^[15-17],无法对煤样的孔隙空间、喉道分布与三维结构连通性特征进行表征,CT扫描可视化技术虽然具有无损对三维孔裂隙结构及可视化的优势,但是受限于分辨率限制,无法对过小的孔隙进行表征^[18-19]。根据以上分析,可见煤中的多尺度孔裂隙结构无法用单一测试方法进行全面表征,在这种情况下,应使用多种测试手段来克服其局限性^[20-22]。

以准噶尔盆地深部和浅部煤储层作为研究对象,通过结合扫描电镜、N₂吸附法、高压压汞法和CT扫描测试等方法,对深/浅部多尺寸孔隙、裂隙结构特征进行定量表征,确定多尺寸孔隙裂隙分布情况,体积分布情况;利用CT测试数据重建三维孔隙模型,对孔隙、裂隙在三维空间中的展布、发育情况进行可视化处理。通过对深部和浅部煤储层发育情况进行多方面的对比,可为探索深部和浅部煤储层孔隙裂隙发育特征及精细评价提供借鉴和参考。

1 地质概况

准噶尔盆地位于新疆北部地区,夹于阿尔泰山与天

山之间,是中国低阶煤发育的主要盆地之一,也是煤层气资源丰富的盆地之一^[23-24]。准噶尔盆地煤层气总资源量为18.15×10¹² m³,2 000 m以浅资源量为3.11×10¹² m³,2 000 m以深资源量为15.04×10¹² m³^[25]。由盆地边缘向盆内,冲积扇相、扇三角洲相、辫状河三角洲相、滨浅湖亚相等煤系沉积相带依次展布。由于受逆冲推覆构造控制,盆地边缘煤层埋深较浅处大角度倾斜煤层发育,煤体结构相对破碎,在盆内伸展构造控制下盆地深部的煤层倾角变缓,变形较弱,构造相对稳定,有利于煤层气的富集^[26]。准噶尔盆地主要煤层分布于侏罗系西山窑组和八道湾组,其中多套煤层呈广覆式分布,西山窑组顶底板岩性多以泥岩、炭质泥岩为主,煤层封闭性较好,煤层气保存条件较优^[27-28]。此外,西山窑组煤层除盆地南缘埋藏较浅外,盆地其余地区煤层埋深多超过2 000 m,埋深大的煤层分布面积广,厚度大,煤层气资源多,开发潜力巨大^[29]。近年,准噶尔盆地淮南赋煤带齐8井垂深2 011 m处取得的最高日产气量达到5.5×10⁴ m³,准噶尔盆地白家海凸起彩探1H井垂深2 386 m处取得的最高日产气量达5.7×10⁴ m³,以上突破昭示了准噶尔盆地深部煤层气巨大的开发前景^[23]。准噶尔盆地根据基底构造形态可以划分为6个一级构造单元,包括西部隆起、中央坳陷、陆梁隆起、乌伦古坳陷、东部隆起、南缘冲断带(图1)。

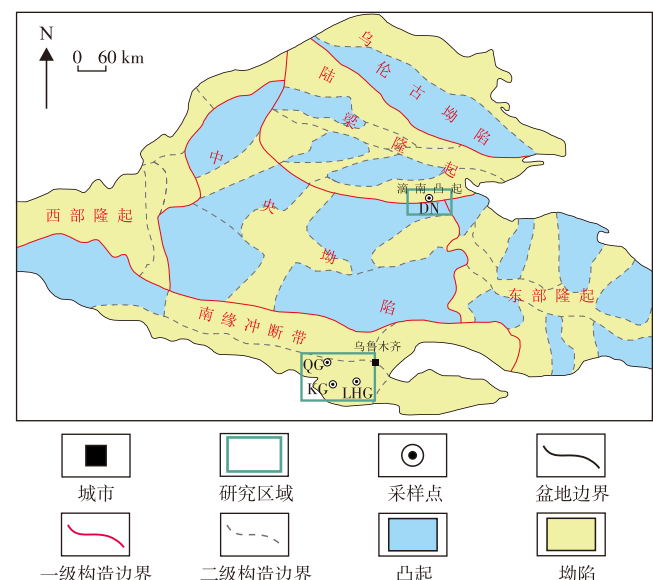


图1 准噶尔盆地构造划分及采样点

Fig. 1 Structural division and sampling points in Junggar Basin

2 样品和实验方法

2.1 样品选取及样品煤质特征

为了保证实验的有效性和可重复性,选择4组不同深度的样品来作为实验对象。所有样品均取自西山窑组,采样点位于陆梁隆起以南的滴南凸起地区和南缘冲断带以南的齐古断褶带中下段地区(图1)。深部样品采样点分别位于准噶尔盆地东北部滴南凸起地区的滴南-201井和准噶尔盆地南缘齐古地区的齐古-6井,取样深度分别为2 107 m和2 646 m;浅部样品采样点位于准噶尔盆地南缘的宽沟矿区和硫磺沟矿区,取样深度分别为312 m和397 m;根据采样地区对样品编号为QG、DN、KG、LHG。为消除非均匀性对实验数据的影响,在实验前采用线切割设备切割岩心,切取高为50 mm,直径为25 mm的圆柱状样品进行渗透率测试;测试后,在圆柱状样品上钻取2 mm×2 mm微型圆柱进行高精度CT扫描测试;随后将剩余柱状样品切割破碎,用于显微组分、扫描电镜、工业分析、高压压汞、N₂吸附等各项实验测试。4组样品煤质详细测试结果(表1)显示,含硫量均低,浅部样品KG、LHG惰质组极为发育,深部样品DN、QG镜质组发育;挥发分均高,深部样品灰分高于浅部样品。根据测试数据可知,由浅部到深部,煤岩变质程度逐渐增加。同时,稳态法渗透率测试表明由浅部到深部,样品的渗透性能逐渐降低,浅部样品渗透率达到了深部样品的7.02倍。

2.2 实验方法

1) 高压压汞法

实验使用AutoPore IV 9505压汞仪,严格按照中华人民共和国国家标准《压汞法和气体吸附法测定固体材料孔隙分布和孔隙度 第1部分:压汞法》(GB/T 21650.1—2008)进行。实验样品为1 cm³的立方体。实验结束后,根据设备给出的进汞退汞过程数据,结合Washburn方程得到孔隙体积、比表面积、平均孔径、孔隙分布等结构参数。

2) 低温液氮吸附

实验使用TriStar II比表面积分析仪,严格按照中华

人民共和国国家标准《气体吸附BET法测定固态物质比表面积》(GB/T 19587—2017)进行。实验结束后,根据N₂吸附-脱附曲线,结合多分子层吸附理论(Brunauer-Emmett-Teller,简称BET)与密度泛函理论(Density Functional Theory,简称DFT)模型获得孔体积、比表面积、平均孔径和孔径分布等结构参数。

3) 扫描电镜观测

实验使用FEI Quanta™ 250 FEG场发射扫描电镜,高真空模式下的设备分辨率为30 kV下低于1.0 nm(SE,英文全称为Secondary Electrons,中文释义为二次电子),30 kV下低于2.5 nm(BSE,英文全称为Backscattered Electrons,中文释义为背散射电子),1 kV下低于3.0 nm(SE)。

4) CT扫描测试

实验使用Phoenix Vltomelx M微米、纳米CT扫描仪。实验样品采用激光钻取出的2 mm×2 mm微型煤柱。测试条件如下:电压50 kV,功率15 W,X射线扫描最大分辨率为0.5 μm,每个样品扫描张数为2 000张。

3 实验结果与分析

参考霍多特孔隙分类方法并结合研究区孔径特征,将煤岩孔隙与裂隙划分为微孔(小于10 nm)、小孔(10~<100 nm)、中孔(100~<1 000 nm)、大孔(1 000~<10 000 nm)、微裂隙(10 000~100 000 nm)与裂隙(大于100 000 nm)。

3.1 低温N₂吸附

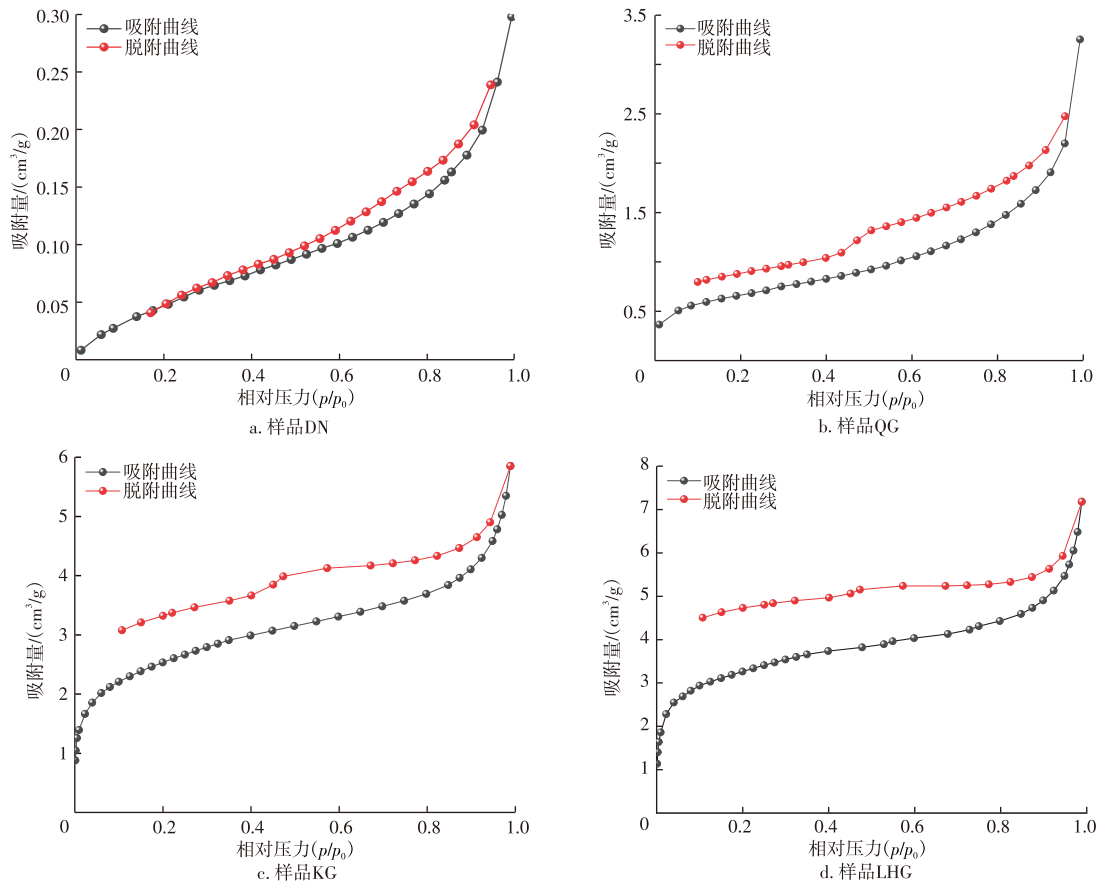
如准噶尔盆地深部、浅部煤样低温N₂吸附-脱附曲线(图2)所示,4块样品的吸附能力存在显著差异,从深部样品到浅部样品总吸附体积不断增大,浅部煤样的平均吸附体积达到了深部煤样的3.25倍。样品的N₂吸附-脱附曲线均属于IV型等温线,样品DN的滞后环仅在相对压力较低的部分重合,此形态近似于H4型滞后环,表明煤中可能存在部分开孔和半封闭孔,主要由微孔、或层状基质颗粒组成,包括大量的狭窄条形孔隙;样品QG、KG和LHG的滞后环形态接近H2型回线,N₂吸附-脱附等温线的滞后环不闭合,推测此种情况是由于墨水瓶孔吸附后孔口直径收缩,气体脱附困难导致。

表1 准噶尔盆地深部、浅部煤岩基础物理化学性质特征

Table 1 Basic physical and chemical properties of coal rocks in deep and shallow coal strata of Junggar Basin

样品 编号	采样 位置	去矿物基显微组分体积分数/%			工业分析组分质量分数/%				常量元素质量分数/%					渗透率/ 10 ⁻³ μm ²
		镜质组	惰质组	壳质组	M _{ad}	A _{ad}	V _{daf}	FC _{ad}	ω(N)	ω(C)	ω(H)	ω(S)	ω(O)	
QG	深部	45.56	53.67	0.77	3.87	2.59	25.68	67.86	0.52	78.33	4.16	0.07	12.43	0.022
DN		75.33	23.68	0.99	2.87	2.92	41.24	52.97	0.75	75.83	5.56	0.13	12.12	0.013
KG	浅部	12.55	86.61	0.84	5.74	1.27	21.30	71.69	1.37	78.19	3.78	0.05	10.21	0.097
LHG		21.20	78.00	0.80	9.85	1.98	23.76	64.41	0.04	71.25	3.46	0.03	13.95	0.149

注: M_{ad}为一般分析试验煤样水分的质量分数,%; A_{ad}为空气干燥基灰分的质量分数,%; V_{daf}为干燥无灰基挥发分的质量分数,%; FC_{ad}为空气干燥基固定碳的质量分数,%。



注: p/p_0 为相对压力,即吸附质气体的压力与该温度下吸附质气体的饱和蒸气压的比值。

图2 准噶尔盆地深部、浅部煤样低温 N_2 吸附-脱附曲线

Fig. 2 Low-temperature N_2 adsorption-desorption curves of coal samples from deep and shallow strata of Junggar Basin

低温 N_2 吸附研究采用 DFT 模型^[30]分析样品的孔径分布特征(图 3)。深部样品 DN 和 QG 的气体吸附量在 1~10 nm 的微孔阶段出现峰值均匀分布的情况,在小孔阶段 20 nm 处达到最高峰,之后开始缓慢下降;孔体积在 10~<30 nm 处呈现缓慢上升的趋势,在 30 nm 左右处发生短暂的停顿后,上升趋势开始变陡。与深部样品不同,浅部样品 KG 和 LHG 的气体吸附量在 1~<3 nm 处出现 4 个峰值,在 3 nm 后的孔隙分布情况较为均匀;孔体积在 1~<3 nm 处出现陡峭上升的现象,在 3 nm 的拐点后上升趋势开始变缓。由以上数据可知,在 N_2 吸附的测量范围内,深部样品的小孔发育情况优于微孔,在小孔阶段贡献了较多的孔体积容量;浅部样品则与之相反,在微孔阶段贡献了绝大部分的孔体积容量,在小孔阶段发育不佳。

3.2 压汞测试

压汞法测得的煤样孔径分布曲线如图 4 所示,深部煤样的进汞量峰值出现在 8 nm 和 70 nm 左右,浅部煤样进汞量在 7 nm 和 230 nm 处达到峰值。结果表明研究区的深部样品主要发育微孔至小孔尺度的孔隙,但在中孔及大孔阶段发育情况较差,与鄂尔多斯盆地某区块深部煤样具有相同的孔隙发育特征^[6]。与深部样品不同的

是,浅部样品在小孔阶段发育不佳,在中孔及大孔阶段发育情况明显高于深部样品。同样由测试结果可知, DN、QG、KG、LHG 的总进汞量分别为 0.035、0.072、0.092、0.156 mL/g,根据测试样品的累计进汞量来看,从深部煤样到浅部煤样,煤样的总孔容在逐渐增加,浅部样品孔隙发育程度要高于深部样品。

3.3 不同深部样品孔隙分形特征

3.3.1 基于液氮和 FHH 模型

通过 FHH 模型计算^[31]得出低温液氮的分形维数,以相对压力 0.5 作为边界值,将分形曲线分为低压区和高压区,分别对应 D_1 和 D_2 (表 2)。研究区所有样品的分形维数值均介于 2~3,具有分形特征。深部样品的 D_1 和 D_2 平均值分别为 2.392 0 和 2.692 1,浅部样品的 D_1 和 D_2 平均值分别为 2.638 3 和 2.859 8。结果表明无论是在微孔阶段还是小孔阶段,浅部样品的孔隙形态均比深部样品的孔隙形态更加复杂,非均质性更强。推测是由于浅部样品墨水瓶状孔隙和细瓶颈状孔隙广泛发育,使其复杂的孔隙结构对煤储层中气体的解吸和扩散造成不利影响。

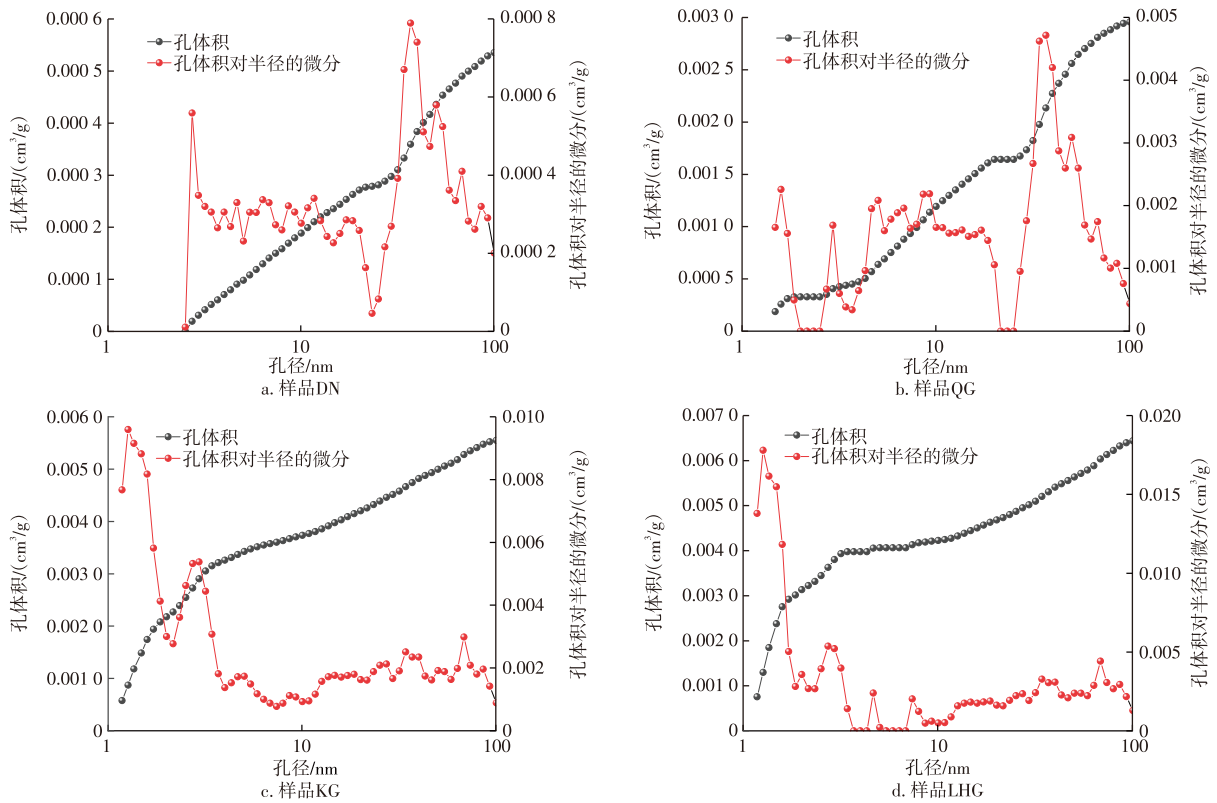


图3 准噶尔盆地深部、浅部煤样N₂吸附实验计算的孔容与孔径关系分布

Fig. 3 Distribution of pore volume and pore size relationship calculated from N₂ adsorption experiments for deep and shallow coal samples from Junggar Basin

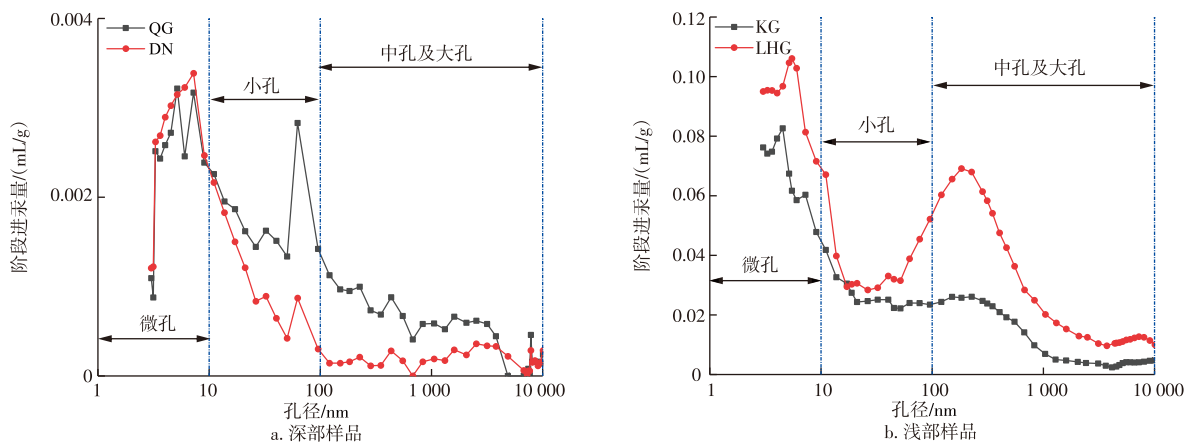


图4 准噶尔盆地深部、浅部煤样压汞实验计算的孔容与孔径关系分布

Fig. 4 Distribution of pore volume and pore size relationship calculated from mercury intrusion experiments for deep and shallow coal samples from Junggar Basin

表2 基于液氮和FHH模型计算的分形维数

Table 2 Fractal dimensions calculated based on liquid nitrogen and FHH model

样品编号	采样位置	相对压力(p/p_0)小于0.5			相对压力(p/p_0)大于0.5		
		拟合函数	D_1	R^2	拟合函数	D_2	R^2
QG	深部	$y = -0.7636x - 3.3464$	2.2364	0.9509	$y = -0.3382x - 3.3185$	2.6618	0.9930
DN		$y = -0.4524x - 0.2160$	2.5476	0.9781	$y = -0.2777x - 0.1034$	2.7223	0.9781
KG	浅部	$y = -0.3666x + 1.0787$	2.6334	0.9657	$y = -0.1440x + 1.0957$	2.8559	0.9978
LHG		$y = -0.3568x + 1.3270$	2.6432	0.9215	$y = -0.1363x + 1.2929$	2.8637	0.9931

3.3.2 基于压汞法和Sierpinski模型

通过Sierpinski模型计算压汞法的分形维数^[32-33],得出大孔及中孔的分形维数,分别对应 D_3 和 D_4 (表3)。深部样品的 D_3 和 D_4 平均值分别为2.915 2和2.912 6,浅部样品的 D_3 和 D_4 平均值分别为2.687 4和2.463 9。浅部样品在中孔及大孔阶段,分形维数低于深部样品,表明在此孔径阶段,浅部样品的孔隙表面更为光滑,复杂程度更低。

3.4 扫描电镜测试

不同深度煤样在扫描电镜下的微观特征如图5所示,深部样品QG中具有形状规则的剪性裂隙发育,推测可能是由于深部储层压力过高,煤基质经挤压变形导致。样品DN中矿物非常发育,大部分裂隙与孔隙被矿物所填充。浅部样品LHG和KG的孔隙和裂隙大量发育,样品LHG中常见裂隙与孔隙相互连通的情况,样品KG中椭圆形、球形孔隙较为发育,边缘比较光滑,偶见墨水瓶状孔隙发育。

3.5 煤体内部三维可视化

利用多张二维切片叠加,即可构建三维数字岩心模型并作进一步处理。为保持实验数据的规范性和有效

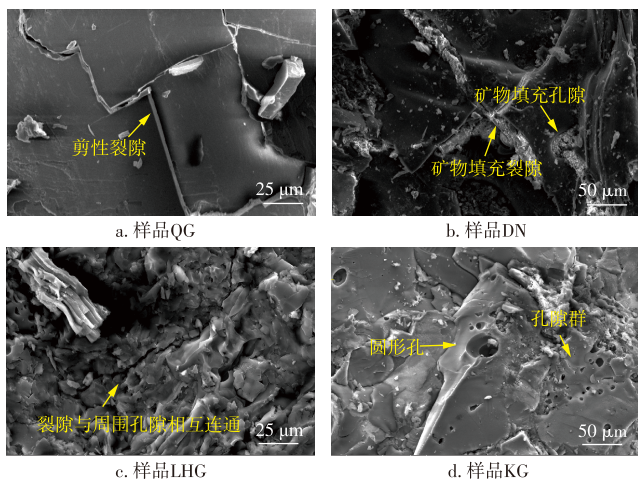


图5 准噶尔盆地深部、浅部煤样扫描电镜

Fig. 5 Scanning electron microscopy images of deep and shallow coal samples from Junggar Basin

性,将样品统一处理为 $1\ 200\ \mu\text{m}\times 1\ 200\ \mu\text{m}\times 1\ 600\ \mu\text{m}$ 的长方体模型来进行操作。

3.5.1 三维空间孔裂隙分布特征

为表征孔裂隙在三维空间中的分布特征,在通过对二维切片调节灰度值、滤波降噪和基于分水岭算法阈值分割后,对煤样孔隙和裂隙进行三维重构,重构结果如图6a—图6d所示。在三维重构后,利用标签分析对重建孔隙与裂隙结构进行渲染处理,使相互连通的部分配上相近的颜色,最终结果如图6e—图6h所示,可以看出,浅煤样品LHG与KG中发育有数条横跨样品的倾斜板状裂隙,与周围次一级的微米尺度裂隙之间构成一个较大的裂隙网络,可为气体的流动提供充足的运移空间。深部样品QG中的微裂隙较为发育,多见其与周围大孔隙相互连通,样品DN可见大孔与微裂隙聚集为团簇状,但大部分孔隙与微裂隙孤立发育。

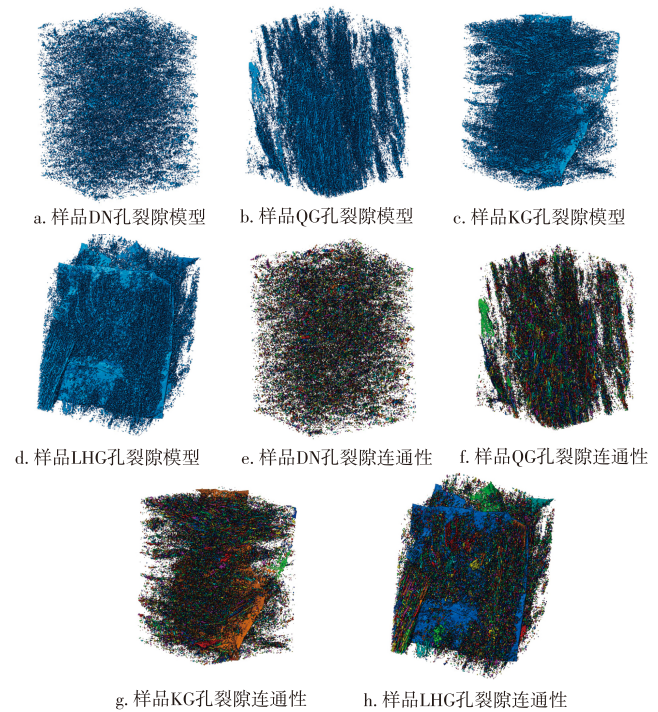


图6 准噶尔盆地深部、浅部煤样CT扫描提取的孔裂隙模型

Fig. 6 Pore-fracture models extracted from CT scans of deep and shallow coal samples from Junggar Basin

表3 基于压汞法和Sierpinski模型计算得出的中孔及大孔分形维数

Table 3 Fractal dimensions of mesopores and macropores calculated based on mercury intrusion porosimetry and Sierpinski model

样品编号	采样位置	大孔			中孔		
		拟合函数	D_3	R^2	拟合函数	D_4	R^2
QG	深部	$y=0.070\ 8x-3.852\ 2$	2.929 2	0.959 7	$y=0.033\ 9x-3.864\ 7$	2.966 1	0.991 0
DN		$y=0.098\ 7x-3.786\ 0$	2.901 3	0.954 9	$y=0.140\ 9x-3.795\ 6$	2.859 1	0.992 0
KG	浅部	$y=0.218\ 0x-4.667\ 2$	2.782 0	0.990 2	$y=0.512\ 8x-4.732\ 8$	2.487 2	0.995 5
LHG		$y=0.407\ 2x-3.936\ 0$	2.592 8	0.985 7	$y=0.559\ 3x-4.013\ 1$	2.440 7	0.996 5

3.5.2 孔隙网络模型

储层中流体渗流的主要通道以连通孔隙与裂隙为主,因此,主要针对连通孔隙与非连通孔隙进行划分,在提取的连通性数据的基础上建立等效孔隙网络模型(图7),最后通过图像处理软件对孔隙参数、孔喉参数与连通性相关参数进行统计。孔隙网络模型基于中心轴算法与最大球算法^[34-35]建立。该模型将孔隙视为球体,将孔隙之间的通道视为喉道,每个球体所连接的喉道数量称为配位数,通过此模型可以直观地显示多孔介质内部复杂的孔隙空间。

进一步处理后,对4块样品的等效孔隙尺寸、孔喉尺寸、孔隙与孔喉的连接情况等参数进行分析,统计结果如图8和表4所示。样品KG和LHG的孔隙等效直径分布比较接近,峰值均分布在5~<10 μm和10~<20 μm处。样品DN和QG在大孔中比较发育,在微裂隙中发育较为均匀。样品QG的孔隙等效直径的主要峰值分布在小于5 μm、10~20 μm处。样品DN的孔隙等效直径的主要峰值分布在小于5 μm处。与深部样品相比,浅部样品的孔喉等效直径明显更大,尤其在5~<10 μm、10~<20 μm处。样品KG和LHG的平均孔喉长度主要分布在小于50 μm、50~<100 μm、100~<200 μm处,样品DN和QG的孔喉长度在100~<200 μm、200~<300 μm、300~500 μm处均匀分布。在孔喉半径分布频率统计(图8c)中可见,

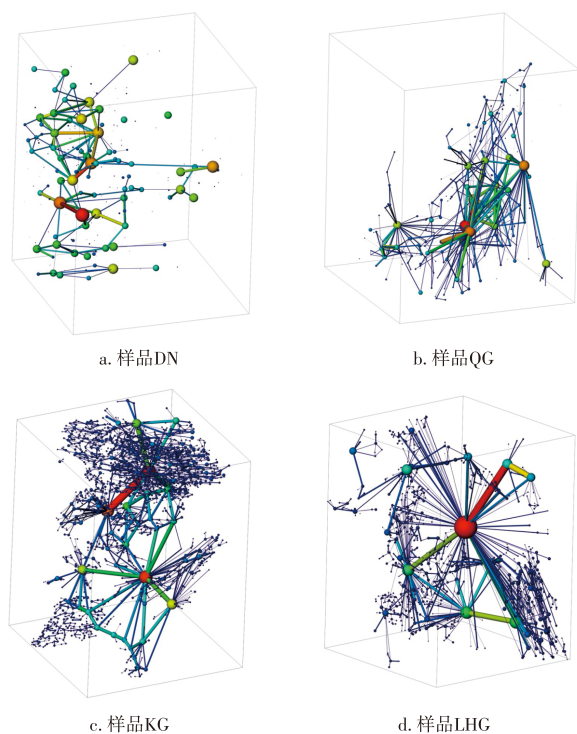


图7 准噶尔盆地深部、浅部样品孔隙网络模型

Fig. 7 Pore network models of deep and shallow coal samples from Junggar Basin

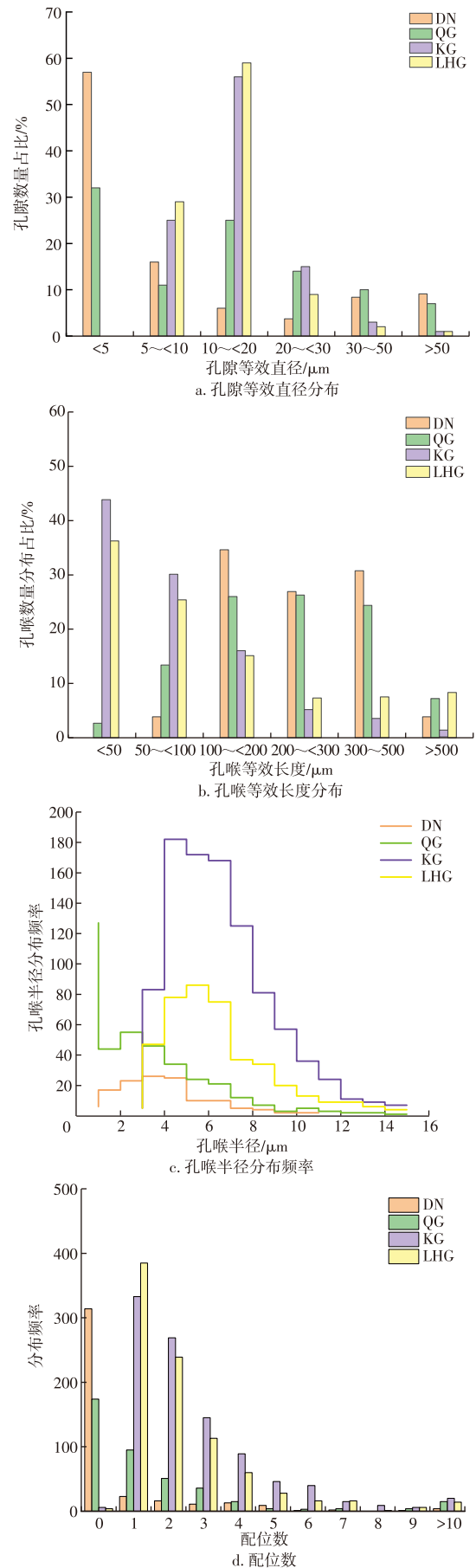


图8 准噶尔盆地深部、浅部样品孔隙模型结构参数

Fig. 8 Structural parameters of pore model for deep and shallow coal samples from Junggar Basin

表4 CT扫描重构孔隙网络模型基本参数
Table 4 Basic parameters of pore network models reconstructed from CT scans

样品编号	孔径	等效孔隙数量	平均孔隙等效直径/ μm	累计孔隙等效直径/ μm	孔喉长度/ μm	孔喉数量	平均孔喉长度/ μm	累计孔喉长度/ μm	有效配位数
DN	<5	226	1.91	432	<50	0	0	0	80
	5~<10	62	6.46	401	50~<100	5	78.8	394	
	10~<20	23	13.26	305	100~<200	45	157.6	7 094	
	20~<30	15	25.20	378	200~<300	35	256.8	8 989	
	30~50	33	39.51	1 304	300~500	40	381.6	15 265	
	>50	36	69.30	2 498	>500	5	587.4	2 937	
QG	<5	127	2.39	304	<50	10	36.6	366	227
	5~<10	44	7.04	310	50~<100	50	78.2	3 908	
	10~<20	101	14.70	1 485	100~<200	97	145.2	14 087	
	20~<30	58	24.70	1 437	200~<300	98	246.3	24 139	
	30~50	43	36.48	1 569	300~500	91	378.3	34 430	
	>50	28	83.03	2 325	>500	27	589.3	15 912	
KG	<5	0	0	0	<50	229	35.9	8 242	972
	5~<10	136	7.61	1 036	50~<100	157	78.6	12 347	
	10~<20	302	17.63	5 327	100~<200	84	139.2	11 694	
	20~<30	81	23.03	1 866	200~<300	27	274.7	7 418	
	30~50	15	34.80	522	300~500	19	332.0	6 314	
	>50	5	57.80	289	>500	7	539.5	3 777	
LHG	<5	0	0	0	<50	200	35.1	7 019	878
	5~<10	255	8.30	2 119	50~<100	140	69.5	9 731	
	10~<20	517	13.62	7 046	100~<200	84	143.2	12 028	
	20~<30	79	23.36	1 846	200~<300	41	248.1	10 174	
	30~50	21	37.00	777	300~500	42	383.7	16 118	
	>50	10	79.20	792	>500	46	669.0	30 774	

深部样品 KG 和 LHG 的孔喉半径在 3~15 μm 处分布数量均高于浅部样品 DN 和 QG 的孔喉半径分布的数量。

配位数可以在一定程度上表示出样品微观结构之间的连通性能^[36],配位数越高,证明喉道所连通的孔隙越多,流体在煤中的运移能力越强。配位数统计如图 8d 所示,浅部样品 KG 和 LHG 的配位数在各处均有分布,峰值从 1 到大于 10 逐渐降低:样品 KG 最大配位数为 53,平均配位数为 2.7;样品 LHG 最大配位数为 68,平均配位数为 2.5。深部样品 QG 和 DN 在无效配位数 0 处分布最多:样品 QG 配位数数量同样从 1 开始逐渐减少,但在大于 10 处分布略有回升,最大配位数为 33,平均配位数为 1.8;样品 DN 配位数发育最少,最大配位数仅为 13,平均配位数为 0.6。

4 孔裂隙结构特征对运移性能的控制作用

煤中孔隙、裂隙的发育情况直接制约煤层气的解吸、扩散和渗流等运移能力,具体包括孔隙与裂隙的分布情况、连通性能、矿物充填情况等。由于单一的实验方法无法对煤储层全尺度的孔裂隙结构进行表征,因此,以此为切入点,

根据不同测试方法的实验原理和优势孔径段,对不同深度的煤储层样品进行多种实验手段、多尺度的精细表征。

N_2 吸附测试显示,深部样品在微孔阶段 2~<10 nm 处分布较为均匀,在小孔阶段 10~<100 nm 处更加发育,相比浅部样品具有尺度更窄的滞后环,通过计算得出更低的分形维数,分析得出深部样品由于受到较少的微孔复杂程度制约,连通性能优,孔隙结构简单,相比浅部样品具有更好的解吸、扩散能力;与深部样品不同的是,浅部样品在小于 3 nm 的微孔阶段非常发育,在微孔阶段占据了过半的孔容,具有较高的吸附性能,但由于滞后环较宽,连通性相对较差,孔隙结构复杂,结合煤层气扩散规律可知,浅部样品微孔比例较高、孔隙结构相对复杂,造成浅部样品解吸与扩散阻力增大,解吸、扩散速率降低。

CT 实验结果显示,深部样品孔隙等效直径在小于 5 μm 的微裂隙尺度最为发育,喉道长度则主要分布在 100~500 μm 的范围内,孔喉半径主要分布在 1~8 μm 的范围内,可以得知深部样品主要发育有狭窄、细长的微米尺度裂隙,此种裂隙由于喉道半径小,会对气体的运移造成一定阻碍。同时,由于喉道过长会增加煤层气的运移路程,对连通性能造成不利影响,使得配位数降低,无法

形成大的裂隙网络。

在压汞测试中,通过计算得出较高的分形维数值,表明中孔大孔阶段发育结构复杂,结合扫描电镜测试中常见孔隙裂隙被矿物填充等情况,综合考虑可能是由以上因素导致了深部煤样的渗透性能降低,渗透率介于 $(0.013\sim 0.022)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,对煤层气的渗流造成不利影响。在浅部样品扫描电镜测试中,常见大孔隙群发育,裂隙连通孔隙等情况,由CT实验同样测得浅部样品孔隙等效直径主要分布在 $10\sim 20\mu\text{m}$ 的裂隙尺度上,孔喉等效长度主要分布在 $50\sim 100\mu\text{m}$ 的尺度范围,孔喉半径分布在 $3\sim 12\mu\text{m}$ 的范围,可知浅部样品多发育等效直径大、孔喉半径大和喉道长度短的微米尺度裂隙。此种裂隙由于孔喉大,喉道短,更容易使得微米尺度裂隙配位数提高,相互连通形成一个较大的裂隙网络,连通性能变好,使得气体的渗流能力增加,渗透率介于 $(0.097\sim 0.149)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。

5 结论

根据扫描电镜、 N_2 吸附、高压压汞、CT扫描测试等多种方法对深部、浅部煤储层多尺度孔隙-裂隙结构特征和孔隙-裂隙在三维空间中的结构分布特征进行研究,研究得出以下结论:

1) 准噶尔盆地深/浅部煤岩的成分存在明显差异,从浅部样品KG、LHG到深部样品QG、DN镜质组含量、灰分不断增加,空气干燥基水分不断降低,渗透率不断降低。研究区浅部煤岩样品平均镜质组含量为深部样品的3.58倍,浅部样品平均水分含量为深部样品的2.31倍。

2) 利用 N_2 吸附和压汞法得知从浅部到深部矿区样品总孔隙体积不断减小,孔隙度逐渐降低,浅部样品的平均微孔占比体积高达 $0.053\text{ cm}^3/\text{g}$,为深部样品的13.24倍。通过研究可知,深部样品孔径分布以小孔阶段占据优势,根据分形维数计算结果,深部样品在微孔小孔阶段发育比较光滑,可对气体的解吸、扩散造成优势。浅部样品孔径分布在微孔、中一大孔阶段占优。根据分形维数计算结果,浅部样品在微孔小孔阶段非均质性强,但在中一大孔阶段,孔隙表面光滑,复杂程度低,可对煤层气的渗流能力造成有利影响。

3) 通过X-CT技术建立孔隙网络模型并进行了多维的评价,对不同尺度的等效孔隙和喉道长度、半径与连通性能进行定量分析。研究表明,浅部样品在微裂隙的发育程度、孔喉半径大小和配位数分布状况上高于深部样品,喉道长度低于深部样品,浅部样品连通性能明显优于深部样品。最后通过各块样品的渗透率表现,证明了连通性良好的微米尺度裂隙在气体的渗流中能发挥重要作用,是煤层气从小孔扩散至裂隙中进行流动的关键。

参考文献

- [1] 蒋曙鸿,师素珍,赵康,等.深部煤及煤层气勘探前景及发展方向[J].科技导报,2023,41(7):106-113.
JIANG Shuhong, SHI Suzhen, ZHAO Kang, et al. Prospect and development direction of deep coal and coalbed methane exploration[J]. Science & Technology Review, 2023, 41(7): 106-113.
- [2] 贾承造,王祖纲,姜林,等.中国油气勘探开发成就与未来潜力:深层、深水与非常规油气——专访中国科学院院士、石油地质与构造地质学家贾承造[J].世界石油工业,2023,30(3):1-8.
JIA Chengzhao, WANG Zugang, JIANG Lin, et al. Achievements and future potential for oil&gas exploration and development in China: deep-formation, deep-water and unconventional reservoirs—Interview with JIA Chengzao, Academician of the CAS, geologist in petroleum geology and structure[J]. World Petroleum Industry, 2023, 30(3): 1-8.
- [3] 张华珍,徐海云,张焕芝,等.2022国外油气田开发技术进展[J].世界石油工业,2023,30(3):53-60.
ZHANG Huazhen, XU Haiyun, ZHANG Huanzhi, et al. Progress of oil and gas field development technologies in 2022[J]. World Petroleum Industry, 2023, 30(3): 53-60.
- [4] 汪泽成,赵振宇,黄福喜,等.中国中西部含油气盆地超深层油气成藏条件与勘探潜力分析[J].世界石油工业,2024,31(1):33-48.
WANG Zecheng, ZHAO Zhenyu, HUANG Fuxi, et al. Ultra-deep hydrocarbon accumulation conditions and exploration potential in sedimentary basins of Central-Western China[J]. World Petroleum Industry, 2024, 31(1): 33-48.
- [5] 秦勇.中国深部煤层气地质研究进展[J].石油学报,2023,44(11):1791-1811.
QIN Yong. Progress on geological research of deep coalbed methane in china[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(11): 1791-1811.
- [6] 邓泽,王红岩,姜振学,等.深部煤储层孔隙结构对煤层气赋存的影响:以鄂尔多斯盆地东缘大宁-吉县区块为例[J].煤炭科学技术,2024,52(8):106-123.
DENG Ze, WANG Hongyan, JIANG Zhenxue, et al. Influence of deep coal pore and fracture structure on occurrence of coalbed methane: A case study of Daning-Jixian Block in eastern margin of Ordos Basin[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(8): 106-123.
- [7] 章新文,王勇,金芸芸,等.鄂尔多斯盆地南部旬-宜探区深部煤层气成藏条件与勘探潜力[J].石油地质与工程,2024,38(2):77-81.
ZHANG Xinwen, WANG Yong, JIN Yunyun, et al. Reservoir-forming conditions and exploration potential of deep coalbed methane in Xun-Yi exploration area, southern Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2024, 38(2): 77-81.
- [8] 许晓凡,杨铁梅,邓志宇,等.深煤层可改造性测井评价方法研究[J].石油地质与工程,2024,38(5):30-35.
XU Xiaofan, YANG Tiemei, DENG Zhiyu, et al. Logging evaluation of the transformability potential for deep coalbed methane reservoir[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2024, 38(5): 30-35.
- [9] 降文萍,张群,姜在炳,等.构造煤孔隙结构对煤层气产气特征的影响[J].天然气地球科学,2016,27(1):173-179.
BENG Wenping, ZHANG Qun, JIANG Zaibing, et al. Effect on CBM drainage characteristics of pore structure of tectonic coal[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(1): 173-179.
- [10] 李相臣,康毅力.煤层气储层微观结构特征及研究方法进展[J].中国煤层气,2010,7(2):13-17.
LI Xiangchen, KANG Yili. Advances in the micro-structural features and research methodology of coalbed methane reservoir[J]. China Coalbed Methane 2010, 7(2): 13-17.
- [11] 刘大猛,贾奇峰,蔡益栋.中国煤层气储层地质与表征技术研究进展[J].煤炭科学技术,2022,50(1):196-203.
LIU Dameng, JIA Qifeng, CAI Yidong. Research progress on coalbed methane reservoir geology and characterization technology in China

- [J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(1): 196–203.
- [12] JIANG B, QU Z H, WANG G, et al. Effects of structural deformation on formation of coalbed methane reservoirs in Huabei coalfield, China [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2010, 82(3–4): 175–183.
- [13] SCHMITT M, FERNANDES C P, DA CUNHA NETO J A B, et al. Characterization of pore systems in seal rocks using nitrogen gas adsorption combined with mercury injection capillary pressure techniques[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 39(1): 138–149.
- [14] 王睿,冯宏飞,柳长峰.压汞法和液氮吸附法在高阶煤孔隙结构表征中的适用性[J].*石油钻采工艺*, 2024, 46(1): 112–118.
WANG Rui, FENG Hongfei, LIU Changfeng. Applicability of mercury intrusion method and nitrogen adsorption method in characterizing pore structure of high-rank coal[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2024, 46(1): 112–118.
- [15] 张慧.煤孔隙的成因类型及其研究[J].*煤炭学报*, 2001, 26(1): 40–44.
ZHANG Hui. Genetical types of pores in coal reservoir and its research significance[J]. *Journal of China Coal Society*, 2001, 26(1): 40–44.
- [16] 姚艳斌,刘大锰,蔡益栋,等.基于NMR和X-CT的煤的孔裂隙精细定量表征[J].*中国科学:地球科学*, 2010, 40(11): 1598–1607.
YAO Yanbin, LIU Dameng, CAI Yidong, et al. Fine quantitative characterization of pore fracture in coal based on NMR and X-CT[J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 2010, 40(11): 1598–1607.
- [17] 王尧,王传格,曾凡桂,等.中低阶煤纳米孔隙结构的小角X射线散射研究[J].*煤炭转化*, 2022, 45(4): 10–18.
WANG Yao, WANG Chuange, ZENG Fangui, et al. Small-Angle X-ray scattering study on the Nano-pore structure of middle and low rank coal[J]. *Coal Conversion*, 2022, 45(4): 10–18.
- [18] 苟尚洋,徐尚,郝芳,等.基于微米CT页岩微裂缝表征方法研究[J].*地质学报*, 2019, 93(9): 2372–2382.
GOU Qiyang, XU Shang, HAO Fang, et al. Study on characterization of micro-fracture of shale based on micro-CT[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(9): 2372–2382.
- [19] 彭紫燕,谢斐,王炜肖,等.页岩储层压裂裂缝形态描述及流动模拟方法研究现状[J].*石油地质与工程*, 2023, 37(5): 120–126.
PENG Ziyang, XIE Fei, WANG Yixiao, et al. Research status of fracture morphology description and flow simulation method in shale reservoirs[J]. *Petroleum Geology & Engineering*, 2023, 37(5): 120–126.
- [20] 张苗,刘钦节,王兴阵,等.整合压汞、 N_2 和 CO_2 吸附的中-高阶煤多重分形特征[J].*煤炭学报*, 2024, 49(5): 2394–2404.
ZHANG Miao, LIU Qinjie, WANG Xingzhen, et al. Multiple fractal characterization of medium-high-rank coal integrating mercury intrusion porosimetry, N_2 and CO_2 adsorption experiments[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(5): 2394–2404.
- [21] 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.
LIU Shiqi, WANG He, WANG Ran, et al. Research advances on characteristics of pores and fractures in Coal Seams[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(1): 212–230.
- [22] 汪周华,范琨鹏,赵建飞,等.非常规储层微纳米孔隙介质中流体相态研究进展[J].*世界石油工业*, 2024, 31(3): 68–77.
WANG Zhouhua, FAN Kunpeng, ZHAO Jianfei, et al. Research progress of fluid phase behavior in micro-nano porous media of unconventional reservoirs[J]. *World Petroleum Industry*, 2024, 31(3): 68–77.
- [23] 汤达祯,杨曙光,唐淑玲,等.准噶尔盆地煤层气勘探开发与地质研究进展[J].*煤炭学报*, 2021, 46(8): 2412–2425.
TANG Dazhen, YANG Shuguang, TANG Shuling, et al. Advance on exploration-development and geological research of coalbed methane in the Junggar Basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(8): 2412–2425.
- [24] 桑树勋,李瑞明,刘世奇,等.新疆煤层气大规模高效勘探开发关键技术领域研究进展与突破方向[J].*煤炭学报*, 2024, 49(1): 563–585.
SAN Shuxun, LI Ruiming, LIU Shiqi, et al. Research progress and breakthrough direction of the key technical fields for large scale and efficient exploration and development of coalbed methane in Xinjiang [J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(1): 563–585.
- [25] 兰浩,杨兆彪,仇鹏,等.新疆准噶尔盆地白家海凸起深部煤层气勘探开发进展及启示[J].*煤田地质与勘探*, 2024, 52(2): 13–22.
LAN Hao, YANG Zhaobiao, CHOU Peng, et al. Exploration and exploitation of deep coalbed methane in the Baijiahai uplift, Junggar Basin: Progress and its implications[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(2): 13–22.
- [26] 程建,周小进,刘超英,等.中西部大盆地重点勘探领域战略选区研究[J].*石油实验地质*, 2023, 45(2): 229–237.
CHENG Jian, ZHOU Xiaojin, LIU Chaoying, et al. Strategic area selection and key exploration fields in central and western large basins[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2023, 45(2): 229–237.
- [27] 彭文利,薛浏,马效杰,等.准噶尔盆地南缘齐古地区煤层气地质特征[J].*非常规油气*, 2021, 8(1): 8–14.
PENG Wenli, XUE Lie, MA Xiaojie, et al. Geological characteristics of coalbed methane in Qigu area on the southern margin of Junggar Basin[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2021, 8(1): 8–14.
- [28] 彭文利,薛浏,胡斌,等.准噶尔盆地东部煤层气地质特征及有利区优选[J].*非常规油气*, 2015, 2(5): 7–12.
PENG Wenli, XUE Lie, HU Bin, et al. CBM geological characteristics and favorable zone optimization in eastern Junggar Basin[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2015, 2(5): 7–12.
- [29] 宋永,唐勇,何文军,等.准噶尔盆地油气勘探新领域、新类型及勘探潜力[J].*石油学报*, 2024, 45(1): 52–68.
SONG Yong, TANG Yong, HE Wenjun, et al. New fields, new types and exploration potentials of oil-gas exploration in Junggar Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2024, 45(1): 52–68.
- [30] 张哲冷,杨正红.微介孔材料物理吸附准确性分析的理论与实践[J].*催化学报*, 2013, 34(10): 1797–1810.
ZHANG Zheling, YANG Zhenghong. Theoretical and practice discussion of measurement accuracy for physisorption with micro- and mesoporous materials[J]. *Chinese Journal of Catalysis*, 2013, 34(10): 1797–1810.
- [31] 张昆,孟召平,金毅,等.不同煤体结构煤的孔隙结构分形特征及其研究意义[J].*煤炭科学技术*, 2023, 51(10): 198–206.
ZHANG Kun, MENG Zhaoping, JIN Yi, et al. Fractal characteristics of pore structures on different coal structures and its research significance[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(10): 198–206.
- [32] SONG Y, JIANG B, LIU J G. Nanopore structural characteristics and their impact on methane adsorption and diffusion in low to medium tectonically deformed coals: Case study in the Huabei coal field[J]. *Energy & Fuels*, 2017, 31(7): 6711–6723.
- [33] ZHANG Z, LIU G F, WANG X M, et al. A fractal Langmuir adsorption equation on coal: Principle, methodology and implication [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 488: 150869.
- [34] LIU D M, ZHAO Z, CAI Y D, et al. Review on applications of X-ray computed tomography for coal characterization: Recent progress and perspectives[J]. *Energy & Fuels*, 2022, 36(13): 6659–6674.
- [35] 张开仲,程远平,王亮,等.基于煤中瓦斯赋存和运移方式的孔隙网络结构特征表征[J].*煤炭学报*, 2022, 47(10): 3680–3694.
ZHANG Kaizhong, CHENG Yuanping, WANG Liang, et al. Pore network structure characterization based on gas occurrence and migration in coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(10): 3680–3694.
- [36] ZHANG K Z, WANG S L, WANG L, et al. 3D visualization of tectonic coal microstructure and quantitative characterization on topological connectivity of pore-fracture networks by Micro-CT[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 208: 109675