

# 鄂尔多斯盆地东缘中—高煤阶煤储层 微观孔隙—裂缝结构表征

范文田<sup>1</sup>, 林会喜<sup>1</sup>, 李 磊<sup>2</sup>, 王 涛<sup>3</sup>, 刘立航<sup>4</sup>, 郑定业<sup>1</sup>, 王静怡<sup>1</sup>

(1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206; 2. 东北石油大学 地球科学学院, 黑龙江 大庆 163318; 3. 重庆科技大学 非常规油气开发研究院, 重庆 401331; 4. 中国石油长庆油田分公司 第十一采油厂, 甘肃 庆阳 745000)

**摘 要:**以鄂尔多斯盆地东缘本溪组 8 号煤层为研究对象, 开展低压 CO<sub>2</sub> 吸附、低温 N<sub>2</sub> 吸附、高压压汞和微米 CT 扫描等实验, 对中—高煤阶煤储层的孔隙—裂缝结构进行全尺度表征, 评价不同尺度的孔隙—裂缝结构特征, 探讨变质程度对不同尺度孔隙—裂缝发育的影响。结果表明: 研究区煤体类型以微孔—裂缝双峰优势型为主, 具有微孔与裂缝并存的双峰态特征, 孔径主要集中在 0.3~1.5 nm 之间和大于 1 000 μm 的范围内; 微孔、介孔、宏孔和裂缝平均体积分别占总孔体积的 70.8%、16.0%、8.1% 和 5.1%。微孔贡献 98.8% 的比表面积, 是吸附气的主要赋存场所。中—高煤阶煤储层的孔隙—裂缝结构存在显著差异, 随煤阶的升高, 煤变质程度加深, 微孔体积增加, 裂缝体积呈先增加再降低后升高的变化规律, 介孔和宏孔体积变化不明显; 高煤阶煤储层中微孔体积占比更高, 吸附性更强。该结果为鄂尔多斯盆地深层煤层气潜力评价及勘探开发提供支持。

**关键词:**孔隙—裂缝; 结构表征; 煤储层; 中—高煤阶; 本溪组; 鄂尔多斯盆地东缘

**中图分类号:** P618.11; TE132 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-4107(2026)02-0095-14

## 0 引言

中国 1 500 m 以深的煤层气资源量超过  $5.07 \times 10^{13} \text{ m}^3$ , 主要分布于鄂尔多斯盆地、准噶尔盆地、四川盆地和吐哈盆地<sup>[1]</sup>。在深层煤层气方面, 准噶尔盆地彩探 1H 井最高产量为  $5.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ <sup>[2]</sup>; 四川盆地阳 2 井连续自喷生产 100 d, 累计产气  $1.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ <sup>[3]</sup>; 吐哈盆地柯新 1H 井测试结果显示, 西山窑组煤含气量最高为  $20 \text{ m}^3/\text{t}$ , 表明吐哈盆地具备良好的煤层气形成条件<sup>[4]</sup>。近年来, 鄂尔多斯盆地深部煤层气连续取得重大突破, 大宁—吉县(大吉)、临兴—神府等区块探明储量达到  $1.0 \times 10^{11} \text{ m}^3$ <sup>[5-6]</sup>。其中, 大吉区块深层煤层气产量最高为  $4.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$ , 生产能力超过  $1.5 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$ , 吉深 6-7 平 01 井获得  $1.0 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$  工业气流; 临兴—神府区块深煤 1 号水平井初期产量为  $6.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ; 大牛地气田阳煤 1HF 井压裂后产气量最高为  $1.04 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$ , 累计产气量超过  $2.30 \times 10^7 \text{ m}^3$ <sup>[2,7-9]</sup>。

中浅部煤层气主要以吸附态形式赋存于煤孔隙表面, 深部储层可能赋存一定比例的游离气<sup>[10]</sup>。孔隙—裂缝大小不一, 形态各异, 为气体的运移提供通道。根据孔径大小, 将煤储层的储集空间结构划分为微孔(<2 nm)、介孔(2~50 nm)、宏孔(50 nm~10 μm)和裂缝(>10 μm)4 种类型<sup>[11]</sup>。多采用扫描电镜、CT 扫描、低温 N<sub>2</sub> 吸附及高压压汞等方法, 对煤层孔隙—裂缝结构进行表征<sup>[12-16]</sup>, 明确形状、大小和分布等特征, 以及体积和比表面积等结构参数。以聚焦离子束—扫描电镜(FIB-SEM)三维重构<sup>[17]</sup>、透射电子显微镜(TEM)<sup>[18]</sup>、X 线计算机断层扫描(X-CT)<sup>[19]</sup>为代表的多尺度成像技术, 推动煤层孔隙结构与矿物赋存状态的研究, 从二维到三维、从单一尺度到多尺度融合转变, 研究范式从定性描述转向定量分析, 能够精确解析煤层复杂结构的三维形貌、空间构型及连通性, 并提取关键的量化参数。人们研究鄂尔多斯盆地深层 5 和 8 号煤层孔隙—裂缝结构<sup>[20-23]</sup>, 但未考虑煤储层具有非均质性强、孔径范围变化大的特点, 不同煤阶煤储层的孔隙—裂缝结构差异大, 在综合对比不同变质程度煤层孔隙—裂缝特征方面不深入。

鄂尔多斯盆地煤层气资源量为  $1.83 \times 10^{13} \text{ m}^3$ , 具有广阔的勘探开发前景<sup>[24]</sup>。以鄂尔多斯盆地东缘 8

收稿日期: 2025-09-02; 编辑: 朱秀杰

基金项目: 中国石化科技部项目(P24205); 重庆科技大学科研资助项目(ckrc20241208)

作者简介: 范文田(1994—), 男, 博士, 博士后, 工程师, 主要从事油气勘探方面的研究。

号煤层为研究对象,开展低压 CO<sub>2</sub> 吸附、低温 N<sub>2</sub> 吸附、高压压汞和微米 CT 扫描等实验,对中—高煤阶煤储层孔隙—裂缝结构进行全尺度表征,探讨变质程度对孔隙—裂缝发育结构的影响,为鄂尔多斯盆地深层煤层气的潜力评价和勘探开发提供支持。

### 1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地位于华北克拉通西部,是中国第二大沉积盆地,面积约为  $2.5 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,油气资源丰富,划分为伊盟隆起、伊陕斜坡、天环坳陷、西缘逆冲带和晋西挠褶带 6 个构造单元<sup>[25-29]</sup>。石炭纪—二叠纪,鄂尔多斯盆地由海相渐变为陆相,气候逐渐干旱,形成大面积海陆过渡相煤系地层<sup>[30]</sup>。鄂尔多斯盆地煤层分布面积超过  $1.0 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,埋深差异较大,自东向西从 0.5 km 增加到 4.0 km,镜质体反射率( $R_o$ )自东向西随埋深的增加而增大,自南向北呈南高北低的分布规律,盆地东南部的  $R_o$  最大,普遍超过 2.0%<sup>[31-32]</sup>(见图 1(a))。

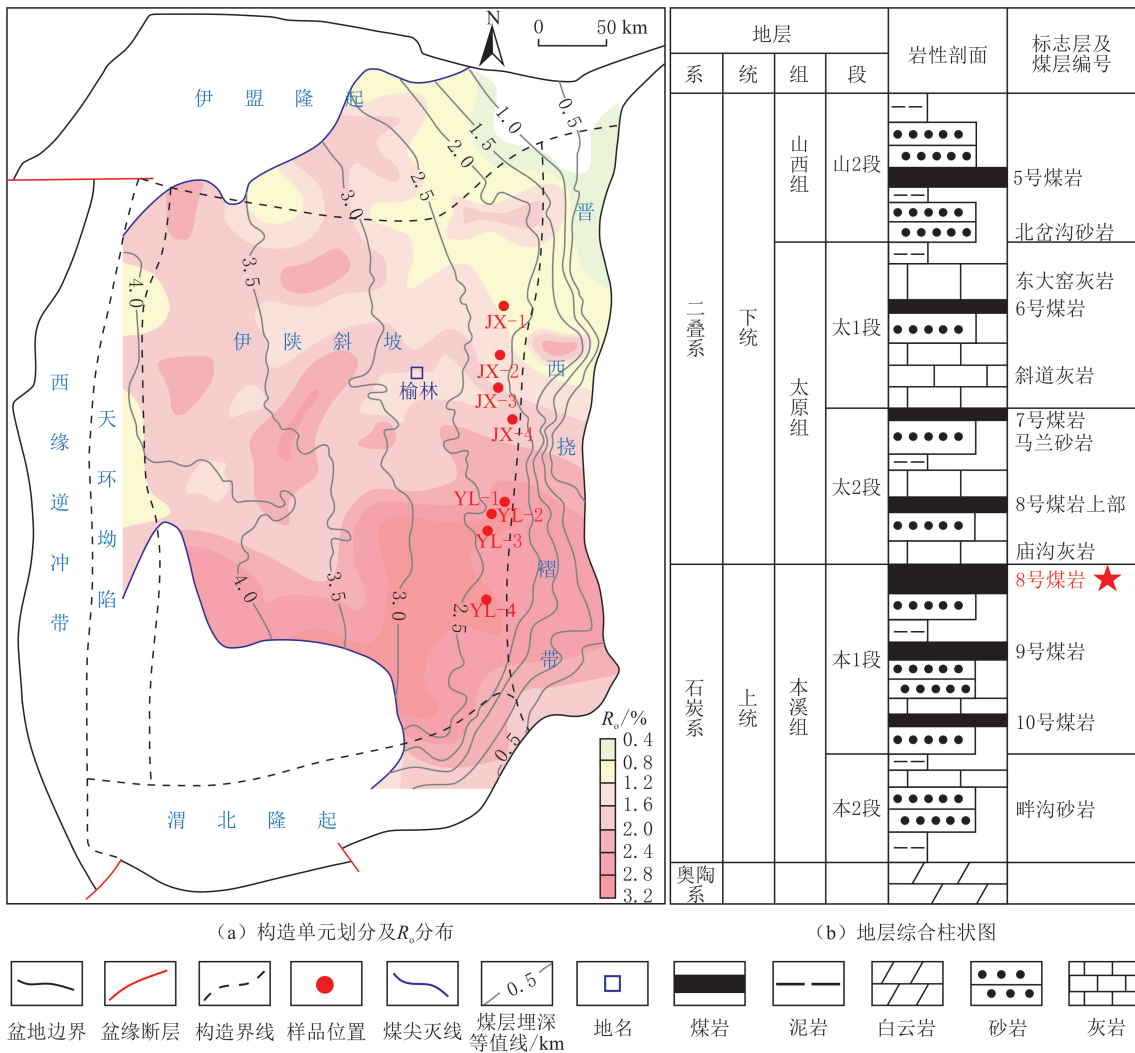


图 1 鄂尔多斯盆地构造单元划分、 $R_o$  分布及地层综合柱状图(据文献[32-33]修改)

Fig. 1 Division of tectonic units,  $R_o$  distribution and comprehensive stratigraphic column chart in Ordos Basin (modified by references[32-33])

鄂尔多斯盆地石炭系—二叠系主要由砂岩、泥岩、煤层及多层石灰岩组成,呈显著的多旋回韵律结构。盆地发育 10 套煤层,其中,二叠系山西组发育 1~5 号煤层,太原组发育 6~7 和 8<sup>±</sup> 号煤层,石炭系本溪组发育 8,9 和 10 号煤层(见图 1(b))。5 和 8 号煤层埋深普遍超过 2.0 km,分布广,厚度大,是盆地的主力煤层,也是深层煤层气勘探开发的主要层位。

## 2 样品选取与实验方法

### 2.1 样品选取

选取鄂尔多斯盆地东缘本溪组 8 号煤层样品 8 块,根据煤的变质程度,划分为低煤阶煤( $R_{\text{omax}} < 0.65\%$ )、中煤阶煤( $R_{\text{omax}}$  为  $0.65\% \sim 2.00\%$ )和高煤阶煤( $R_{\text{omax}} > 2.00\%$ )。其中,JX-1、JX-2、JX-3 和 JX-4 为中煤阶煤样品,YL-1、YL-2、YL-3 和 YL-4 为高煤阶煤样品,埋深在 2.0~2.5 km 之间,取样位置见图 1。为消除煤样品非均质性的影响,首先将样品切割成圆柱体,进行微米 CT 扫描;然后将样品切割粉碎,开展高压压汞、低温  $\text{N}_2$  吸附和低压  $\text{CO}_2$  吸附实验;最后采用显微镜观察,在油浸反射光中随机进行  $R_o$  测量(50 点)和显微组分分析(500 点),分别参照 GB/T 6948—2008《煤的镜质体反射率显微镜测定方法》和 SY/T 6414—2014《全岩光片显微组分鉴定及统计方法》执行,分析煤样品的空气干燥基水分、灰分产率、挥发分产率及固定碳质量分数,测试结果见表 1。其中,煤样品显微组分以镜质组为主,惰质组次之,壳质组和矿物质质量分数很低。中—高煤阶煤呈“特低水分、低灰分、低挥发分和中高固定碳”特征。

表 1 鄂尔多斯盆地东缘煤样品镜质体反射率、显微组分及工业分析测试结果

Table 1  $R_o$  and maceral and industrial analysis results of coal samples from eastern margin of Ordos Basin

样品编号	$R_{\text{omax}}/\%$	显微组分质量分数/%				工业分析质量分数/%			
		镜质组	惰质组	壳质组	矿物质	$M_{\text{ad}}$	$A_{\text{ad}}$	$V_{\text{ad}}$	$\text{FC}_{\text{ad}}$
JX-1	1.10	85.20	7.40	2.80	4.60	0.79	13.14	19.77	66.30
JX-2	1.39	54.80	4.00	2.00	39.20	0.86	9.74	12.69	76.71
JX-3	1.62	76.79	0.79	20.63	1.79	0.55	17.96	11.56	69.93
JX-4	1.80	76.80	1.00	19.60	2.60	0.45	6.31	13.26	79.98
YL-1	2.17	77.00	23.00	0.00	0.00	0.95	3.86	7.91	87.28
YL-2	2.49	73.00	0	26.00	1.00	0.92	2.78	7.52	88.78
YL-3	2.86	84.80	13.00	0.20	2.00	1.04	14.97	6.80	77.19
YL-4	3.53	72.60	0.80	24.80	1.80	1.02	10.95	13.72	74.31

注: $M_{\text{ad}}$ 为空气干燥基水分; $A_{\text{ad}}$ 为空气干燥基灰分; $V_{\text{ad}}$ 为空气干燥基挥发分; $\text{FC}_{\text{ad}}$ 为空气干燥基固定碳。

### 2.2 实验方法

#### 2.2.1 微米 CT 扫描实验

微米 CT 扫描采用三英公司 nanoVoxel3502E 多尺度高分辨 X 线三维显微成像系统。首先用锥束 X 线将煤样品穿透后投影到探测器,煤样品、射线源和探测器  $360^\circ$  旋转,全方位采集数据;然后利用 Avizo 软件进行煤样品微观结构的自动化处理与重建。实验过程与数据处理参照 SY/T 7410.1—2018《岩石三维孔隙结构测定方法 第 1 部分:CT 扫描法》执行。

#### 2.2.2 高压压汞实验

采用康塔公司 AUTOPORE 9505 压汞仪,压汞仪可提供 413 MPa 汞注入压力。首先将样品制作成  $1 \text{ cm}^3$  的立方体,确保样品表面光滑;然后在  $105^\circ\text{C}$  温度条件下持续烘干 8 h,排除原有孔隙内部的杂质、气体;之后在仪器内部真空状态下采集进汞和退汞数据;最后结合 Washburn 方程获取结构参数。实验与数据处理参照 GB/T 21650.1—2008《压汞法和气体吸附法测定固体材料孔径分布和孔隙度 第 1 部分:压汞法》执行。

#### 2.2.3 气体吸附实验

气体吸附采用康塔公司 Autosorb-iQ-MP-C 型全自动物理化学吸附仪。

低温  $\text{N}_2$  吸附实验步骤:首先将样品放入脱气站,在  $110^\circ\text{C}$  温度下脱气 12 h;然后将样品移入分析站,以高纯度  $\text{N}_2$  为吸附质,在 77 K 热力学温度下进行吸附—脱附测试;最后基于 BET 和 NLDFT 模型<sup>[34-35]</sup>获取结构参数。实验与数据处理参照 GB/T 21650.2—2008《压汞法和气体吸附法测定固体材料孔径分布和孔隙度 第 2 部分:气体吸附法分析介孔和大孔》执行。

低压  $\text{CO}_2$  吸附实验步骤:首先将样品放入脱气站,在  $110^\circ\text{C}$  温度下脱气 16 h;然后将样品移入分析

站,以高纯度 CO<sub>2</sub> 为吸附质,在 273 K 热力学温度下进行吸附测试;后续实验过程及数据处理参照低温 N<sub>2</sub> 吸附实验的步骤进行。

### 3 实验结果

#### 3.1 微米 CT 扫描实验

研究区本溪组煤样品物质组成及微裂缝二维分布见图 2,灰色代表煤样品中的煤基质,亮白色代表矿物质,暗黑色代表微裂缝,阈值分割后裂缝为蓝色。在原始的微米 CT 切片图像的基础上进行渲染,以展示主要裂缝和各物质组分的最终解释结果,煤基质、矿物质和裂缝叠加组成煤样品的三维结构模型,红色代表孔隙—裂缝,黄色代表矿物质,灰色代表煤基质(见图 3)。以 YL-2 煤样品为例,可见明显的细长条状及锯齿弯曲状裂缝,以及数量众多的微米级孔隙,主要为不规则的椭球形状和多边形状,分布在煤样品的各个区域,部分为相对集中的片状孔隙,孔隙与裂缝共同构成 YL-2 煤样品的双重介质结构(见图 3)。

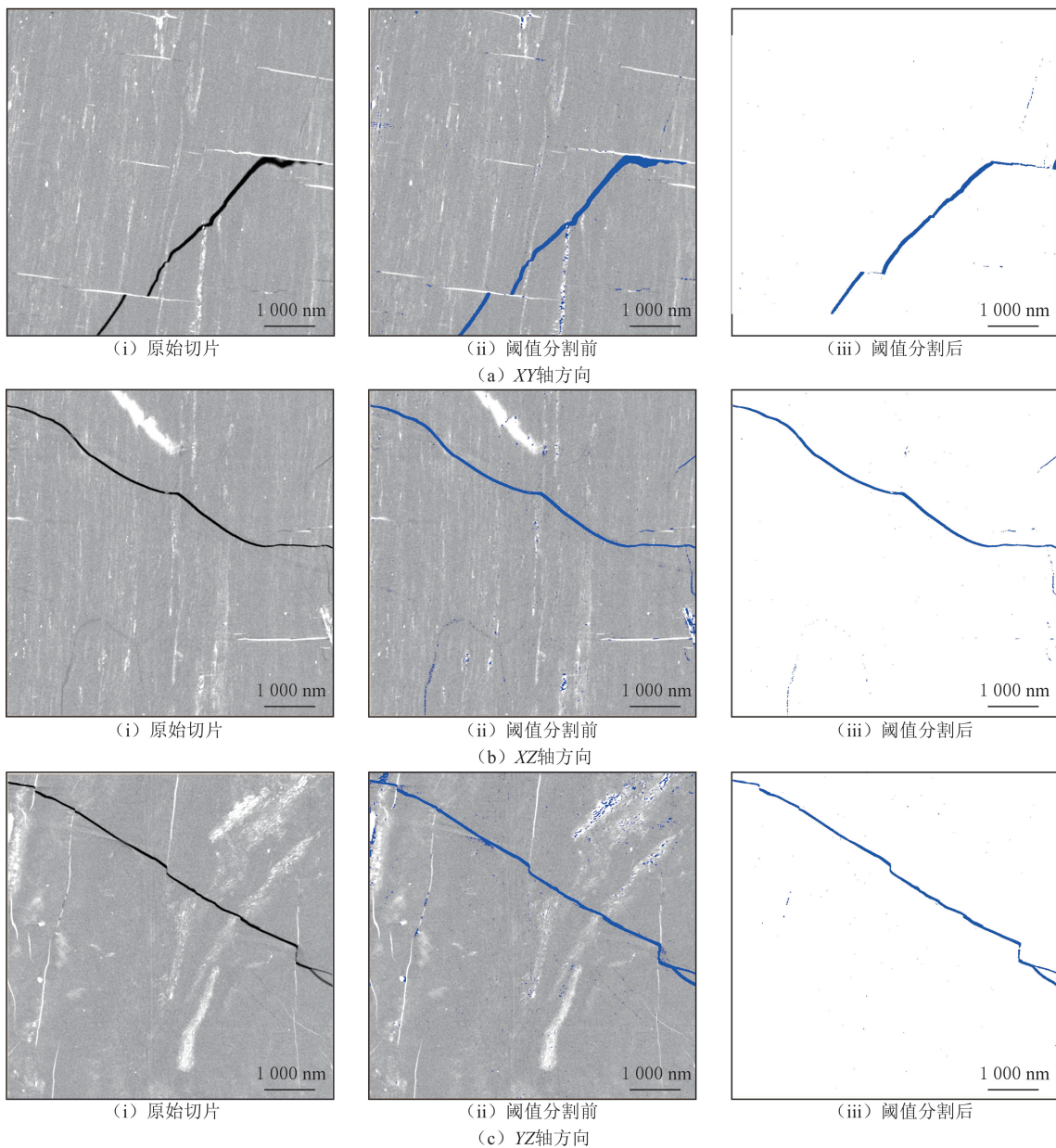


图 2 鄂尔多斯盆地东缘 YL-2 煤样品裂缝二维分布特征

Fig. 2 Two-dimensional distribution of fractures in YL-2 coal sample from eastern margin of Ordos Basin

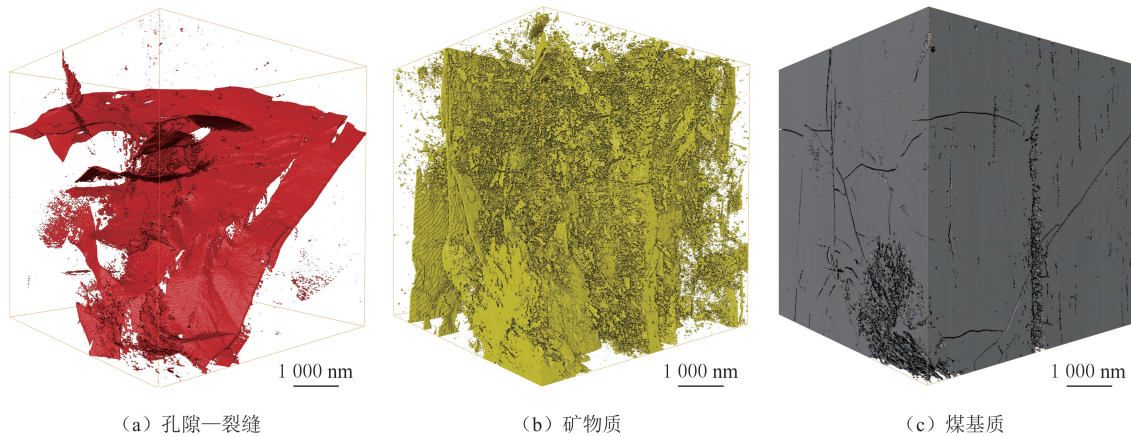


图 3 鄂尔多斯盆地东缘 YL-2 煤样品中不同物质组成的三维分布特征

Fig. 3 Three-dimensional distribution characteristics of different material compositions in YL-2 coal sample from eastern margin of Ordos Basin

基于煤样品的 CT 三维重构模型,提取样品总体积与裂缝的总体积,并计算裂缝的总表面积;结合样品干质量,计算裂缝体积和比表面积。中煤阶煤样品的裂缝体积和比表面积分别为  $0.005 \sim 0.028 \text{ cm}^3/\text{g}$  和  $0.0001 \sim 0.0003 \text{ m}^2/\text{g}$ ,平均分别为  $0.013 \text{ cm}^3/\text{g}$  和  $0.0002 \text{ m}^2/\text{g}$ 。高煤阶煤样品的裂缝体积和比表面积分别为  $0.006 \sim 0.034 \text{ cm}^3/\text{g}$  和  $0.0001 \sim 0.0002 \text{ m}^2/\text{g}$ ,平均分别为  $0.015 \text{ cm}^3/\text{g}$  和  $0.0002 \text{ m}^2/\text{g}$  (见表 2)。

表 2 鄂尔多斯盆地东缘煤样品裂缝参数统计结果

Table 2 Statistical results of fracture parameters of coal samples from eastern margin of Ordos Basin

样品编号	视密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	质量/g	裂缝体积/ $(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	裂缝比表面积/ $(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$
JX-1	1.340	458.28	0.011	0.0001
JX-2	1.330	581.21	0.028	0.0002
JX-3	1.400	890.40	0.009	0.0003
JX-4	1.300	497.90	0.005	0.0001
YL-1	1.340	983.56	0.009	0.0001
YL-2	1.300	1232.40	0.012	0.0002
YL-3	1.370	449.36	0.034	0.0002
YL-4	1.390	284.95	0.006	0.0002

### 3.2 高压压汞实验

煤样品的进汞—退汞曲线在形态上较为相似,具有前后端陡峭、中间平缓的特点,表明煤样品具有相似的孔隙结构(见图 4)。当进汞压力小于  $0.1 \text{ MPa}$  时,进汞迅速,反映汞逐渐进入煤样品裂缝或尺度较大的孔隙;当进汞压力小于  $100.0 \text{ MPa}$  时,进汞缓慢,反映汞逐渐进入煤样品的介孔和部分大尺度孔隙;当进汞压力超过  $100.0 \text{ MPa}$  时,进汞较为迅速,反映汞随压力增大而迅速进入煤样品丰富的微纳米尺度微孔和部分介孔。

中煤阶煤样品的孔体积和比表面积分别为  $0.038 \sim 0.129 \text{ cm}^3/\text{g}$  和  $4.96 \sim 5.35 \text{ m}^2/\text{g}$ ,平均分别为  $0.086 \text{ cm}^3/\text{g}$  和  $5.08 \text{ m}^2/\text{g}$ 。高煤阶煤样品的孔体积和比表面积为  $0.021 \sim 0.113 \text{ cm}^3/\text{g}$  和  $2.81 \sim 6.16 \text{ m}^2/\text{g}$ ,平均分别为  $0.073 \text{ cm}^3/\text{g}$  和  $4.75 \text{ m}^2/\text{g}$ (见表 3)。高煤阶煤样品的孔体积和比表面积低于中煤阶的,表明中煤阶煤样品发育数量更多的大孔隙和裂缝。当孔径小于  $30 \text{ nm}$  时,约  $80\%$  的汞饱和度开始大量进入煤样品,表明主要发育微米级大孔隙和裂缝(见图 5)。

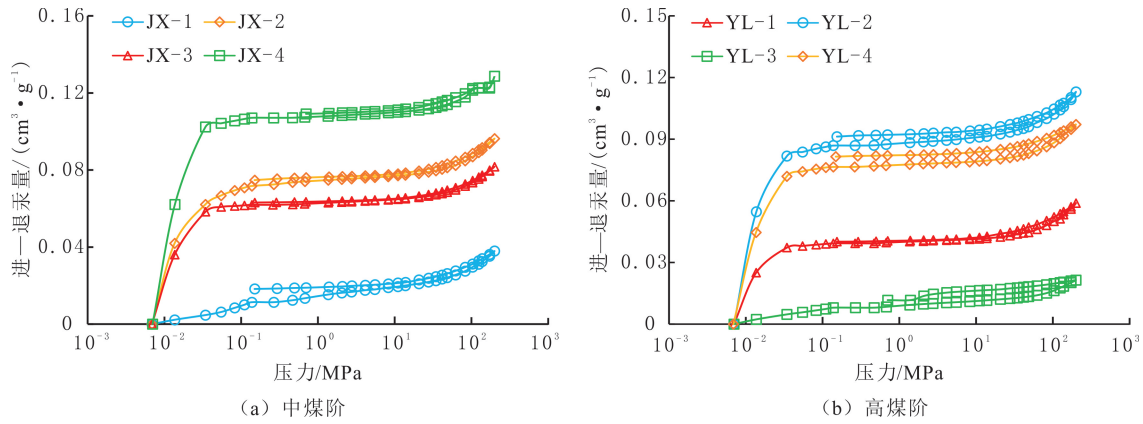


图 4 鄂尔多斯盆地东缘煤样品高压进汞—退汞曲线

Fig. 4 High pressure mercury injection-mercury withdrawal curves of coal samples from eastern margin of Ordos Basin

表 3 鄂尔多斯盆地东缘煤样品孔隙结构参数

Table 3 Pore structure parameters of coal samples from eastern margin of Ordos Basin

样品编号	低压 CO <sub>2</sub> 吸附实验			低温 N <sub>2</sub> 吸附实验			高压压汞实验	
	DFT 孔体积/ (cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> )	DFT 比表面积/ (m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	平均孔径/ nm	DFT 孔体积/ (cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> )	DFT 比表面积/ (m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	平均孔径/ nm	孔体积/ (cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> )	比表面积/ (m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )
JX-1	0.038	122.240	0.524	0.006	2.200	5.880	0.038	4.96
JX-2	0.051	166.319	0.501	0.005	1.800	6.079	0.096	5.35
JX-3	0.047	147.170	0.501	0.005	1.752	4.183	0.082	4.69
JX-4	0.049	158.320	0.524	0.006	2.764	2.314	0.129	5.31
YL-1	0.059	198.604	0.501	0.005	2.663	3.775	0.059	5.03
YL-2	0.070	228.730	0.501	0.003	1.284	2.289	0.113	6.16
YL-3	0.072	246.777	0.501	0.007	5.966	2.941	0.021	2.81
YL-4	0.092	316.680	0.501	0.007	5.796	3.245	0.100	4.98

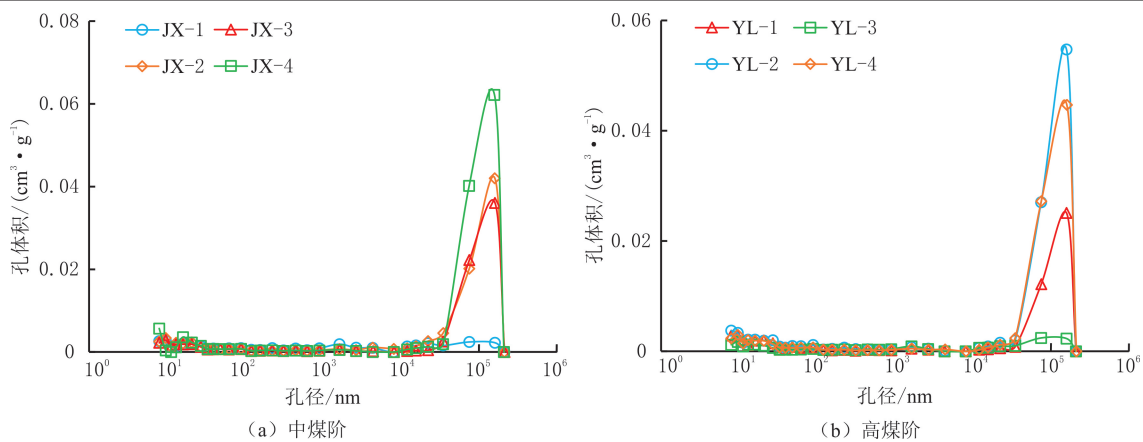


图 5 鄂尔多斯盆地东缘煤样品高压压汞实验孔径分布

Fig. 5 Pore diameter distribution of coal samples from eastern margin of Ordos Basin in high pressure mercury injection experiment

### 3.3 低温 N<sub>2</sub> 吸附实验

研究区煤样品吸附—脱附曲线(见图 6)在形态上略有差别,整体呈反“S”型。当相对压力从 0 增加到 0.10 时,N<sub>2</sub> 吸附量快速增加,表明发生微孔充填且以单分子吸附为主;当相对压力从 0.10 增加到 0.90

时,  $N_2$  吸附量缓慢增加, 反映多分子开始吸附; 当相对压力接近 1.00 时,  $N_2$  吸附量再次快速增加, 未出现  $N_2$  吸附饱和, 表明煤样品存在一定数量的大孔隙。

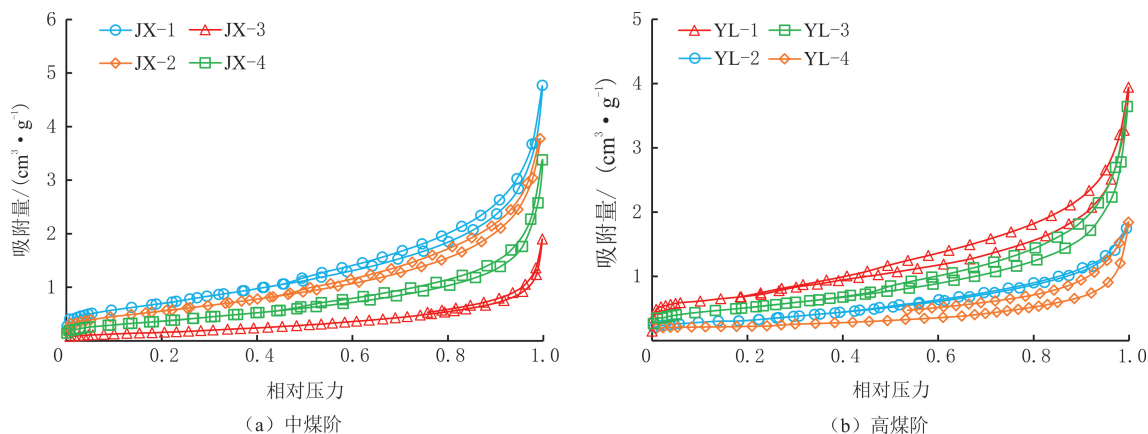


图6 鄂尔多斯盆地东缘煤样品低温  $N_2$  吸附实验吸附—脱附曲线

Fig. 6 Low temperature  $N_2$  adsorption-desorption curves of coal samples from eastern margin of Ordos Basin

根据曲线类型及滞后回线形状, 可以判断煤样品的孔隙形态。当相对压力大于 0.45 后, 吸附—脱附曲线不重合, 形成滞后回线; 当相对压力接近饱和蒸气压时, 2 条曲线趋于重合, 形成窄小的滞后回线。该类曲线与 IUPAC 提出的 H3 型<sup>[36]</sup> 接近, 兼有 H4 型特征, 反映 8 号煤层煤样品存在纳米级孔隙, 以圆锥形、墨水瓶形和狭缝形为主(见图 6)。

采用 NLDFT 模型<sup>[35]</sup>, 计算低温  $N_2$  吸附实验煤样品孔径在 1.06~78.00 nm 内的孔隙结构参数和孔径分布曲线(见表 3、图 7)。中煤阶煤样品 DFT 孔体积和比表面积分别为 0.005~0.006  $cm^3/g$  和 1.80~2.76  $m^2/g$ , 平均分别为 0.006  $cm^3/g$  和 2.13  $m^2/g$ , 平均孔径为 4.614 nm。高煤阶煤样品 DFT 孔体积和比表面积分别为 0.003~0.007  $cm^3/g$  和 1.28~5.97  $m^2/g$ , 平均分别为 0.006  $cm^3/g$  和 3.93  $m^2/g$ , 平均孔径为 3.060 nm。由图 7 可知, 当孔径大于 10 nm 时, 孔体积和比表面积变化较小, 表明孔隙—裂缝占比较高。

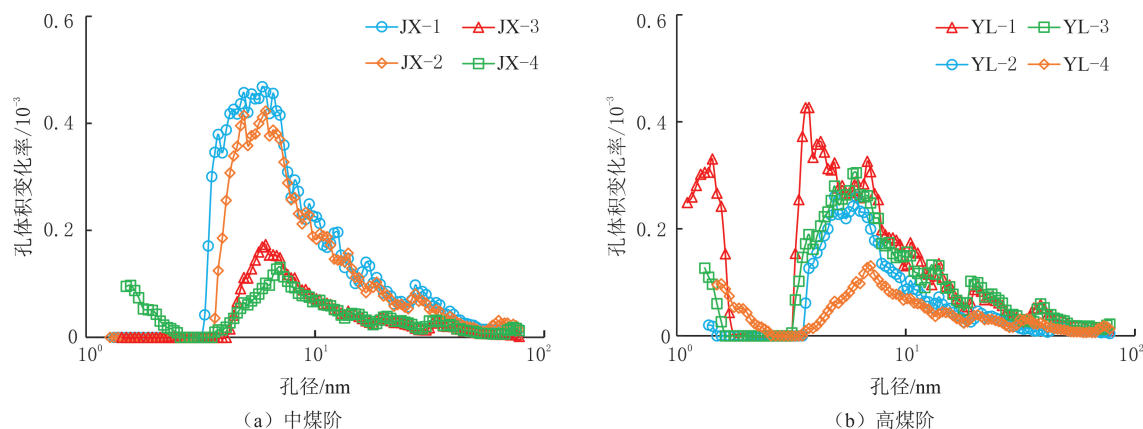


图7 鄂尔多斯盆地东缘煤样品低温  $N_2$  吸附实验孔径分布

Fig. 7 Pore diameter distribution of coal samples from eastern margin of Ordos Basin in low temperature  $N_2$  adsorption experiment

### 3.4 低压 $CO_2$ 吸附实验

研究区煤样品低压  $CO_2$  吸附曲线表现为相似的特征,  $CO_2$  吸附量随压力增大而增大, 与 IUPAC 提出的 I 型吸附等温线特征<sup>[37]</sup> 相似(见图 8)。YL-4 煤样品  $CO_2$  吸附量最大, 为 30.37  $cm^3/g$ (见图 8(b)), 反映含有数量较多的微孔; JX-1 煤样品  $CO_2$  吸附量最少, 为 11.77  $cm^3/g$ (见图 8(a)), 反映微孔数量较少。

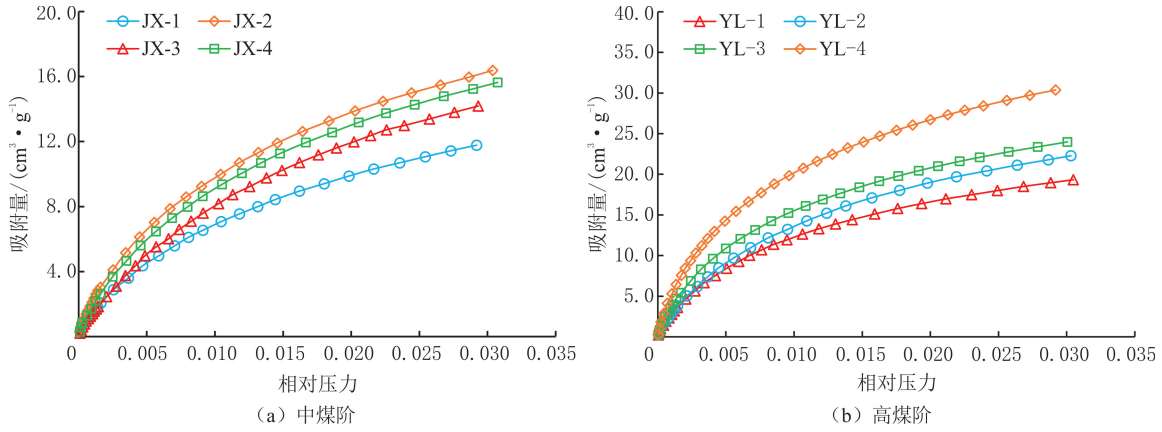


图8 鄂尔多斯盆地东缘煤样品低压 CO<sub>2</sub> 吸附曲线

Fig. 8 Low pressure CO<sub>2</sub> adsorption curves of coal samples from eastern margin of Ordos Basin

采用 NLDFT 模型<sup>[35]</sup>,计算低压 CO<sub>2</sub> 吸附实验煤样品孔径在 0.3~1.5 nm 内的孔隙结构参数和孔径分布曲线(见表 3、图 9)。中煤阶煤样品的微孔体积和比表面积分别为 0.038~0.051 cm<sup>3</sup>/g 和 122.24~166.32 m<sup>2</sup>/g,平均分别为 0.046 cm<sup>3</sup>/g 和 148.51 m<sup>2</sup>/g,平均孔径为 0.513 nm。高煤阶煤样品的微孔体积和比表面积为 0.059~0.092 cm<sup>3</sup>/g 和 198.60~316.68 m<sup>2</sup>/g,平均分别为 0.073 cm<sup>3</sup>/g 和 247.70 m<sup>2</sup>/g,平均孔径为 0.501 nm。高煤阶煤样品的微孔体积和比表面积高于中煤阶的,说明高煤阶样品发育数量更多的微孔隙。由图 9 可知,煤样品孔径分布整体呈三峰型,峰值分布分别在 0.3~0.4、0.4~0.7 和 0.8~0.9 nm 之间;当孔径超过 1.0 nm 时,孔体积和比表面积无明显增加趋势,表明孔径对应的孔体积和比表面积占比较低。

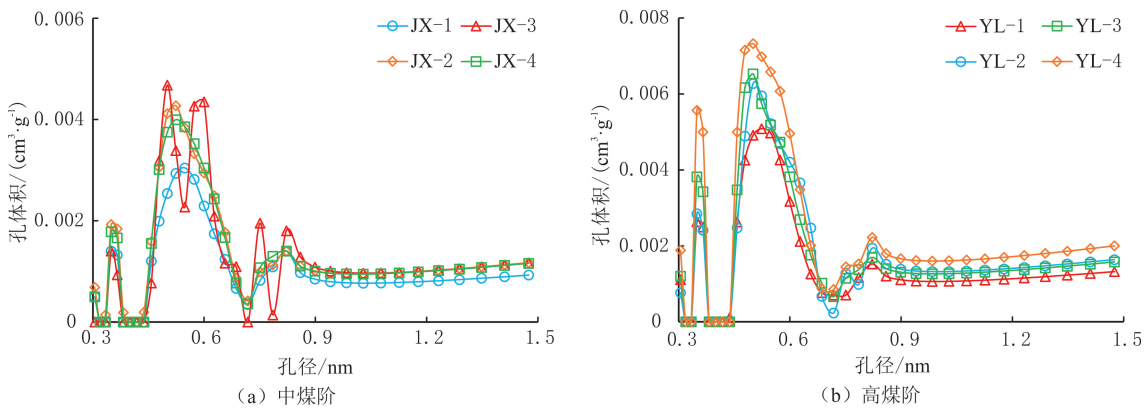


图9 鄂尔多斯盆地东缘煤样品低压 CO<sub>2</sub> 吸附实验孔径分布

Fig. 9 Pore diameter distribution of coal samples from eastern margin of Ordos Basin in low pressure CO<sub>2</sub> adsorption experiment

## 4 实验讨论

### 4.1 全尺度孔隙—裂缝结构表征

#### 4.1.1 孔隙—裂缝拼接

不同实验方法在不同孔径范围内优势不同,能够对各自优势孔径段的孔隙—裂缝结构进行精准表征。在 273 K 热力学温度时,CO<sub>2</sub> 分子动力学直径为 0.33 nm,具有较高的饱和蒸气压,在较高压力下可以快速充填微孔,对微孔结构进行准确表征,但 CO<sub>2</sub> 难以在介孔和宏孔中发生毛细管冷凝,表征准确性大幅降低,低压 CO<sub>2</sub> 吸附法适用于表征 1.5 nm 以下的微孔结构。在低温 N<sub>2</sub> 吸附实验中,气体充填的孔径越大,需要的相对压力越接近 1.00,受制于仪器精度,无法准确测试 50 nm 以上的孔隙;对于 1.5 nm 以下的孔隙,需要的相对压力为 10<sup>-7</sup>~10<sup>-5</sup>,且 N<sub>2</sub> 需要很长时间才能达到吸附平衡,甚至无法达到吸附平衡,低

温  $N_2$  吸附法适合对 2~50 nm 的介孔进行表征。高压压汞法的孔径测试范围为 3.6 nm~100  $\mu\text{m}$ , 鉴于煤的可压缩性, 适用于表征孔径为 50 nm~10  $\mu\text{m}$  的孔隙<sup>[38]</sup>。煤样品的尺寸影响微米 CT 扫描的分辨率, 微米 CT 扫描法的最小孔径为 10  $\mu\text{m}$ 。

采用每种实验最优孔径范围的测试数据, 选取适合的计算模型, 即采用低压  $CO_2$  吸附法测定 0.3~1.5 nm 孔径段, 采用低温  $N_2$  吸附法测定 1.5~50.0 nm 孔径段, 采用高压压汞法测定 50.0 nm~10  $\mu\text{m}$  孔径段, 采用微米 CT 扫描测定大于 10  $\mu\text{m}$  孔径段。

#### 4.1.2 孔隙—裂缝结构联合表征

中煤阶煤样品孔体积随孔径变化关系见图 10(a), 体积类型以微孔—裂缝双峰优势型为主, 呈微孔与裂缝并存的双峰态, 孔径集中在 0.3~1.5 nm 和 >1 000  $\mu\text{m}$  的范围内。不同尺度煤样品孔体积结果见表 4。由表 4 可知, 煤样品总孔体积介于 0.062~0.118  $\text{cm}^3/\text{g}$  (平均为 0.085  $\text{cm}^3/\text{g}$ ), 孔体积主要以微孔为主, 介孔和宏孔较少。其中, 微孔主要发育在 0.3~0.7 nm 孔径段, 微孔体积为 0.038~0.092  $\text{cm}^3/\text{g}$  (平均为 0.060  $\text{cm}^3/\text{g}$ ), 占总孔体积的 55.7%~84.0% (平均占 70.8%)。裂缝体积为 0.005~0.034  $\text{cm}^3/\text{g}$  (平均为 0.014  $\text{cm}^3/\text{g}$ ), 占总孔体积的 5.2%~30.3% (平均占 16.0%)。介孔和宏孔占比最小, 介孔主要发育在 5~10 nm 之间孔径段, 介孔体积介于 0.002~0.007  $\text{cm}^3/\text{g}$  (平均为 0.004  $\text{cm}^3/\text{g}$ ), 占总孔体积的 2.4%~7.9% (平均占 5.1%); 宏孔体积主要由 1  $\mu\text{m}$  以上的孔隙贡献, 宏孔体积介于 0.004~0.012  $\text{cm}^3/\text{g}$  (平均为 0.006  $\text{cm}^3/\text{g}$ ), 占总孔体积的 4.3%~17.9% (平均占 8.1%)。

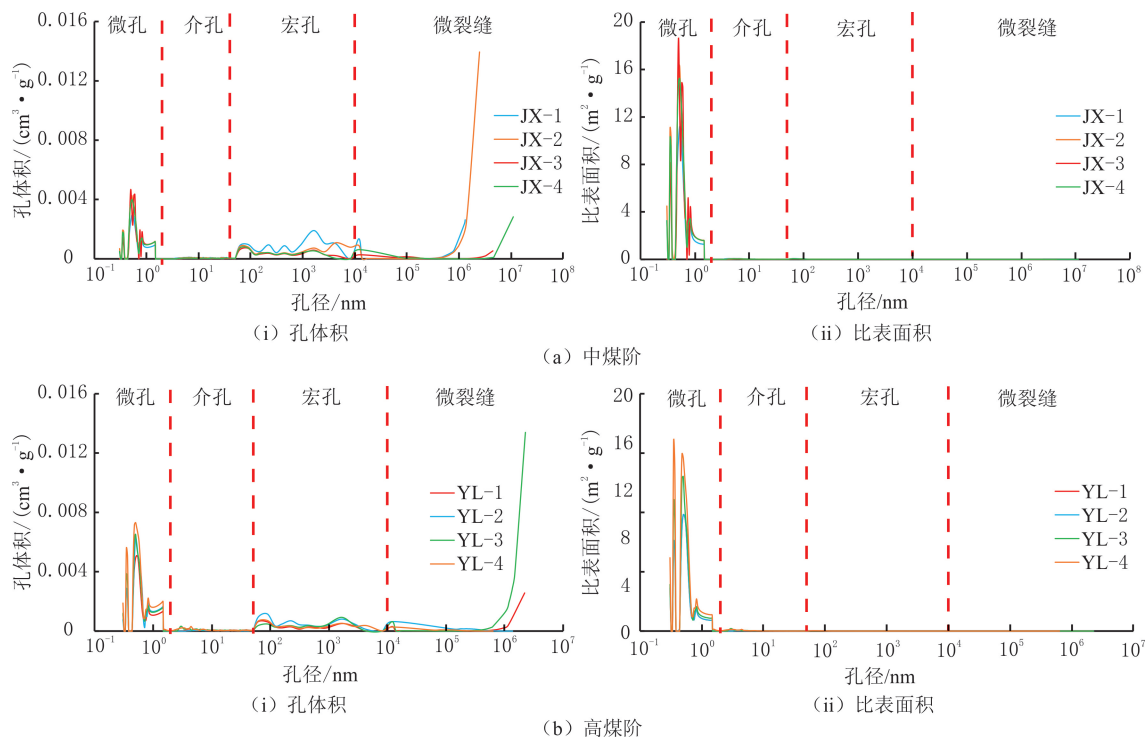


图 10 鄂尔多斯盆地东缘煤样品孔隙—裂缝全孔径分布特征

Fig. 10 Distribution characteristics of pore-fracture full aperture of coal samples from eastern margin of Ordos Basin

高煤阶煤样品比表面积随孔径变化关系见图 10(b), 比表面积类型以单峰—微孔优势型为主, 呈微孔单峰态, 峰值主要集中于 0.3~1.5 nm。不同尺度煤样品比表面积结果见表 5。由表 5 可知, 煤样品总孔比表面积介于 124.59~324.02  $\text{m}^2/\text{g}$  (平均为 200.77  $\text{m}^2/\text{g}$ ), 以微孔为主, 其次是介孔, 宏孔和裂缝的极少。微孔比表面积介于 122.24~318.02  $\text{m}^2/\text{g}$  (平均为 198.29  $\text{m}^2/\text{g}$ ), 占总孔比表面积的 98.10%~99.52% (平均为 98.8%); 介孔比表面积介于 0.59~5.89  $\text{m}^2/\text{g}$  (平均为 2.35  $\text{m}^2/\text{g}$ ), 占总孔比表面积的 0.40%~1.83% (平均为 1.10%); 宏孔和裂缝平均占总孔比表面积的 0.10%。与中煤阶煤样品相比, 高煤阶煤样品发育数量更多的微孔。研究区本溪组 8 号煤层煤样品的孔比表面积随孔径分布曲线具有相似

性,孔体积发育的孔径段对应的孔比表面积也发育,煤样品孔比表面积以微孔为主,表明微孔为深部煤层气提供大量的吸附点位和赋存空间,也是煤层气解吸后初期运移、扩散的重要通道。

表 4 鄂尔多斯盆地东缘煤样品不同尺度孔体积

Table 4 The pore volume at different scales of coal samples from eastern margin of Ordos Basin

样品 编号	总孔体积/ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ )	微孔		介孔		宏孔		裂缝	
		$V_1/$ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ )	$\alpha_1/$ %	$V_2/$ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ )	$\alpha_2/$ %	$V_3/$ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ )	$\alpha_3/$ %	$V_4/$ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ )	$\alpha_4/$ %
JX-1	0.066	0.038	57.6	0.005	7.9	0.012	17.9	0.011	16.6
JX-2	0.091	0.051	55.7	0.004	4.9	0.008	9.0	0.028	30.3
JX-3	0.062	0.047	75.8	0.002	2.7	0.005	7.7	0.009	13.8
JX-4	0.063	0.049	77.9	0.003	5.4	0.005	8.5	0.005	8.2
YL-1	0.076	0.059	77.5	0.004	5.3	0.004	5.2	0.009	11.9
YL-2	0.091	0.070	76.8	0.002	2.4	0.007	8.0	0.012	12.9
YL-3	0.118	0.072	61.2	0.006	5.5	0.005	4.3	0.034	29.0
YL-4	0.110	0.092	84.0	0.007	6.5	0.005	4.3	0.006	5.2

注: $V_1$  为微孔体积, $\alpha_1$  为微孔体积占比; $V_2$  为介孔体积, $\alpha_2$  为介孔体积占比; $V_3$  为宏孔体积, $\alpha_3$  为宏孔体积占比; $V_4$  为裂缝体积, $\alpha_4$  为裂缝体积占比。

表 5 鄂尔多斯盆地东缘煤样品不同尺度比表面积

Table 5 The specific surface area at different scales of coal samples from eastern margin of Ordos Basin

样品 编号	总孔体积/ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ )	微孔		介孔		宏孔		裂缝	
		$S_1/$ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ )	$\beta_1/$ %	$S_2/$ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ )	$\beta_2/$ %	$S_3/$ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ )	$\beta_3/$ %	$S_4/$ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ )	$\beta_4/$ %
JX-1	124.59	122.24	98.10	2.17	1.70	2.17	1.70	0.000 1	0.000 1
JX-2	168.22	166.32	98.90	1.76	1.00	1.76	1.00	0.000 2	0.000 1
JX-3	147.87	147.17	99.50	0.59	0.40	0.59	0.40	0.000 3	0.000 2
JX-4	159.63	158.32	99.18	1.19	0.70	1.19	0.70	0.000 1	0.000 0
YL-1	200.50	198.72	99.11	1.69	0.80	1.69	0.80	0.000 1	0.000 0
YL-2	229.84	228.73	99.52	0.95	0.41	0.95	0.41	0.000 2	0.000 1
YL-3	251.45	246.78	98.14	4.59	1.83	4.59	1.83	0.000 2	0.000 1
YL-4	324.02	318.02	98.15	5.89	1.82	5.89	1.82	0.000 2	0.000 1

注: $S_1$  为微孔比表面积, $\beta_1$  为微孔比表面积占比; $S_2$  为介孔比表面积, $\beta_2$  为介孔比表面积占比; $S_3$  为宏孔比表面积, $\beta_3$  为宏孔比表面积占比; $S_4$  为裂缝比表面积, $\beta_4$  为裂缝比表面积占比。

#### 4.2 变质程度对孔隙—裂缝结构发育的影响

深部煤储层孔隙结构发育是多因素作用的结果。煤储层的变质程度控制孔隙发育,变质程度较高的煤岩生气量大,有机质孔隙更发育,随变质程度的增加,具有微孔增加的特征<sup>[23]</sup>。显微组分也控制孔隙发育,镜质组具有表面颗粒结构更密集、起伏程度小的特征,大量发育微孔,惰质组具有颗粒表面粗糙程度较大、起伏程度大的特征,以宏孔发育为主,微孔发育受镜质组质量分数控制<sup>[5,21,39-40]</sup>。

随煤样品变质程度增强,微孔体积增大(见图 11(a)),介孔体积略有变化(见图 11(b)),宏孔体积整体减少(见图 11(c)),裂缝体积呈先增大再减小后增大的变化规律(见图 11(d))。JX-1 煤样品变质程度低( $R_{\text{omax}}=1.10\%$ ),裂缝发育较差。随变质程度增强,新生裂缝不断形成;JX-2 煤样品( $R_{\text{omax}}=1.39\%$ )裂缝较为发育,发育峰值与气态烃生成的高峰一致。当  $R_{\text{omax}}$  为  $0.60\% \sim 1.40\%$  时,为裂缝主要形成阶段,之后随变质程度增强,煤体分子进行结构重组并造成部分割理闭合,导致裂缝密度逐渐降低。煤样品  $R_{\text{omax}}$  为  $1.20\% \sim 1.80\%$  时,裂缝较为发育,煤样品的变质作用和割理达到平衡状态,为裂缝形成创造条件;当  $R_{\text{omax}}$  约为  $2.86\%$  时,裂缝最为发育。此外,YL-2 煤样品  $R_{\text{omax}}$  为  $2.49\%$  时,内生裂隙存在于镜质组内部,

导致高煤阶煤的裂缝发育,随变质程度增强,裂缝密度逐渐降低,主要由煤体分子结构重组导致部分割理闭合。

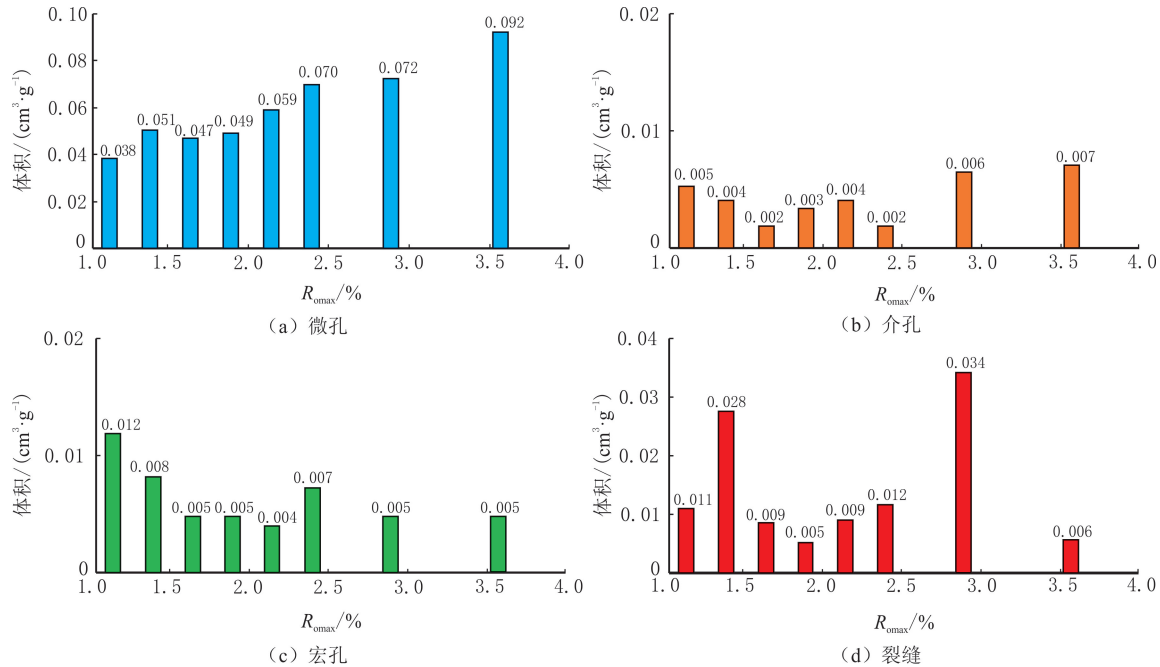


图 11 鄂尔多斯盆地东缘煤变质程度与不同尺度孔隙—裂缝发育的关系

Fig. 11 Relationship between coal metamorphism and pore-fracture development at different scales from eastern margin of Ordos Basin

## 5 结论

(1) 鄂尔多斯盆地东缘深层中—高煤阶煤储层体积类型以微孔—裂缝双峰优势型为主,呈微孔与裂缝并存双峰态,孔径集中于  $0.3 \sim 1.5 \text{ nm}$  和大于  $1000 \mu\text{m}$ 。煤体积以微孔贡献为主,占比为  $70.8\%$ ,裂缝和宏孔占比分别为  $16.0\%$ 、 $8.1\%$ ,介孔占比为  $5.1\%$ 。

(2) 研究区煤储层比表面积类型以单峰—微孔优势型为主,呈微孔单峰态,微孔贡献  $98.8\%$  的比表面积,具备高比表面积与强吸附势能特征,是吸附气的主要赋存场所,也是煤层气解析后初期运移、扩散的重要通道。

(3) 研究区中—高煤阶煤储层的孔隙—裂缝结构存在显著差异,微孔体积随变质程度增强而增大,裂缝体积呈先增大再减小后增大的变化规律,介孔和宏孔变化不明显。变质程度高的煤储层微孔数量更多,体积占比更高,吸附性更强。

## 参考文献 (References):

- [1] 丁蓉, 庞雄奇, 贾承造, 等. 基于全油气系统理论评价深部煤层气的方法原理和研究实例[J]. 石油学报, 2025, 46(3): 532-546.  
Ding Rong, Pang Xiongqi, Jia Chengzao, et al. Methods, principles and case study of evaluating deep coalbed methane based on Whole Petroleum System theory[J]. Acta Petrolei Sinica, 2025, 46(3): 532-546.
- [2] 徐凤银, 王成旺, 熊先钺, 等. 深部(层)煤层气成藏模式与关键技术对策: 以鄂尔多斯盆地东缘为例[J]. 中国海上油气, 2022, 34(4): 30-42.  
Xu Fengyin, Wang Chengwang, Xiong Xianyue, et al. Deep(layer) coalbed methane reservoir forming modes and key technical countermeasures: taking the eastern margin of Ordos Basin as an example[J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(4): 30-42.
- [3] 许浩, 汤达祯, 陶树, 等. 深、浅部煤层气地质条件差异性及其形成机制[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(2): 33-39.  
Xu Hao, Tang Dazhen, Tao Shu, et al. Differences in geological conditions of deep and shallow coalbed methane and their formation mechanisms[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(2): 33-39.

- [4] 李建忠,陈旋,龚德瑜,等.吐哈盆地致密砂岩气及煤层气勘探新领域与资源潜力[J].石油学报,2025,46(1):104-117.  
Li Jianzhong, Chen Xuan, Gong Deyu, et al. New exploration fields and resource potential of tight sandstone gas and coalbed methane in Turpan-Hami Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2025,46(1):104-117.
- [5] 徐凤银,闫霞,李曙光,等.鄂尔多斯盆地东缘深部(层)煤层气勘探开发理论技术难点与对策[J].煤田地质与勘探,2023,51(1):115-130.  
Xu Fengyin, Yan Xia, Li Shuguang, et al. Theoretical and technological difficulties and countermeasures of deep CBM exploration and development in the eastern edge of Ordos Basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2023,51(1):115-130.
- [6] 朱光辉,季洪泉,米洪刚,等.神府深部煤层气大气田的发现与启示[J].煤田地质与勘探,2024,52(8):12-21.  
Zhu Guanghui, Ji Hongquan, Mi Honggang, et al. Discovery of a large gas field of deep coalbed methane in the Shenfu Block and its implications[J]. Coal Geology & Exploration, 2024,52(8):12-21.
- [7] 李明宅,曹毅民,丁蓉,等.大宁—吉县区块深层煤岩气赋存产气特征与储量估算方法指标探讨[J].中国石油勘探,2024,29(4):142-155.  
Li Mingzhai, Cao Yimin, Ding Rong, et al. Gas occurrence and production characteristics of deep coal measure gas and reserve estimation method and indicators in Daning-Jixian Block[J]. China Petroleum Exploration, 2024,29(4):142-155.
- [8] 李勇,徐立富,张守仁,等.深煤层含气系统差异及开发对策[J].煤炭学报,2023,48(2):900-917.  
Li Yong, Xu Lifu, Zhang Shouren, et al. Gas bearing system difference in deep coal seams and corresponded development strategy [J]. Journal of China Coal Society, 2023,48(2):900-917.
- [9] 李亚辉.鄂尔多斯盆地大牛地气田深层中煤阶煤层气勘探实践及产能新突破[J].石油与天然气地质,2024,45(6):1555-1566.  
Li Yahui. Exploration practices of and recent production breakthroughs in deep middle-rank coalbed methane in the Daniudi Gas Field, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024,45(6):1555-1566.
- [10] 吴见,张松航,贾腾飞,等.深部煤层钻孔保压取心流程分析及含气量测定方法[J].石油实验地质,2025,47(1):163-172.  
Wu Jian, Zhang Songhang, Jia Tengfei, et al. Analysis of pressure-maintaining coring process in deep coal seams and gas content determination methods[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2025,47(1):163-172.
- [11] 牛小兵,范立勇,闫小雄,等.鄂尔多斯盆地煤岩气富集条件及资源潜力[J].石油勘探与开发,2024,51(5):972-985.  
Niu Xiaobing, Fan Liyong, Yan Xiaoxiong, et al. Enrichment conditions and resource potential of coal-rock gas in Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024,51(5):972-985.
- [12] Zhang Cun, Jia Sheng, Huang Xuanhao, et al. Accurate characterization method of pores and various minerals in coal based on CT scanning[J]. Fuel, 2024,358(Part A):1-11.
- [13] Sun Lulu, Wan Fuqian, Wang Gang, et al. Pore-fracture structures and seepage flow characteristics during spontaneous coal combustion based on CT 3D reconstruction[J]. Energy, 2024,305:1-15.
- [14] Xie Honggao, Li Xijian. Microstructure and nanomechanical characterization of tectonic coal based on SEM, AFM, XRD and DSI [J]. Surfaces and Interfaces, 2024,46:1-19.
- [15] Zhang Miao, Duan Chaochao, Li Guofu, et al. Determinations of the multifractal characteristics of the pore structures of low-, middle-, and high-rank coal using high-pressure mercury injection[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021,203(1):1-21.
- [16] Liu Huihu, Farid I I, Sang Shuxun, et al. Synthetical study on the difference and reason for the pore structure of the No.3 coal reservoir from the southern Qinshui Basin, China, using mercury intrusion porosimetry, low-temperature N<sub>2</sub> adsorption, low field nuclear magnetic resonance, and nuclear magnetic resonance cryoporometry[J]. Energy Reports, 2020,6:1876-1887.
- [17] 杨秀春,宋柏荣,陈国辉,等.大宁—吉县区块深层煤岩多尺度孔缝结构特征[J].特种油气藏,2022,29(5):94-100.  
Yang Xiuchun, Song Bairong, Chen Guohui, et al. Characteristics of multi-scale pore-fracture structure of deep coal rocks in the Daning-Jixian Block[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2022,29(5):94-100.
- [18] Pan Jienan, Wang Sen, Ju Yiwen, et al. Quantitative study of the macromolecular structures of tectonically deformed coal using high-resolution transmission electron microscopy[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015,27:1852-1862.
- [19] Gupta N, Mishra B, Crandall D M. A new workflow of X-ray CT image processing and data analysis of structural features in rock using open-source software[J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2022,39(5):2011-2024.
- [20] 侯雨庭,周国晓,黄道军,等.鄂尔多斯盆地纳林河地区煤岩气成藏地质特征[J].石油与天然气地质,2024,45(6):1605-1616.  
Hou Yuting, Zhou Guoxiao, Huang Daojun, et al. Geological characteristics of coal-rock gas accumulation in the Nalinhe Area, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024,45(6):1605-1616.
- [21] 刘新社,黄道军,虎建玲,等.鄂尔多斯盆地中东部地区石炭系本溪组煤岩气储层特征[J].天然气工业,2024,44(10):51-62.  
Liu Xinshe, Huang Daojun, Hu Jianling, et al. Reservoir characteristics of Carboniferous Benxi Formation coal-rock gas in the Central and Eastern Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2024,44(10):51-62.

- [22] 孙璐,周国晓,荆雪媛,等.鄂尔多斯盆地中东部本溪组深部煤岩分形特征与成储机理[J].西安石油大学学报(自然科学版),2024,39(3):1-11.  
Sun Lu, Zhou Guoxiao, Jing Xueyuan, et al. Research on fractal characteristics and reservoir forming mechanism of deep coal rock in Benxi Formation, Central-Eastern Ordos Basin[J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition), 2024,39(3):1-11.
- [23] 黄道军,许浩,虎建玲,等.鄂尔多斯盆地深部8号煤储层孔隙发育模式及其控气作用[J].煤炭科学技术,2025,53(3):115-123.  
Huang Daojun, Xu Hao, Hu Jianling, et al. Pore development patterns and gas control effects of the No. 8 deep coal seam of the Ordos Basin[J]. Coal Science and Technology, 2025,53(3):115-123.
- [24] 朱星丞,路俊刚,李勇,等.鄂尔多斯盆地山西组海陆过渡相页岩与煤岩储层全尺度孔隙结构表征及主控因素分析[J].天然气地球科学,2025,36(7):1291-1306.  
Zhu Xingcheng, Lu Jungang, Li Yong, et al. Full-scale pore structure characterization and main controlling factors of marine-continental transitional shale and coal reservoirs in the Shanxi Formation, Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2025,36(7):1291-1306.
- [25] 夏辉,王龙,李娅,等.鄂尔多斯盆地庆阳气田上古生界气藏气水分布主控因素[J].特种油气藏,2025,32(1):88-97.  
Xia Hui, Wang Long, Li Ya, et al. Main control factors of gas-water distribution in the Upper Paleozoic gas reservoirs of the Qingyang Gas Field in the Ordos Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2025,32(1):88-97.
- [26] 向英杰,娄林,孙静.鄂尔多斯盆地东南缘晚石炭系—早二叠系海陆过渡层序及聚煤模式[J].东北石油大学学报,2023,47(2):104-116.  
Xiang Yingjie, Lou Lin, Sun Jing, et al. Marine-continental transitional sequence and coal accumulation model during Late Carboniferous to Early Permian in the southeast margin of Ordos Basin[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2023,47(2):104-116.
- [27] 王永乐,马俊生,陈剑峰,等.鄂尔多斯盆地东南部山西组曲流河三角洲构型特征及沉积模式[J].东北石油大学学报,2022,46(5):26-39.  
Wang Yongle, Ma Junsheng, Chen Jianfeng, et al. Architectural characteristics and sedimentary model of meandering river delta of Shanxi Formation in the southeast of Ordos Basin[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2022,46(5):26-39.
- [28] 张新新.鄂托克旗地区上古生界优质储层控制因素分析[J].石油化工高等学校学报,2020,33(2):59-66.  
Zhang Xinxin. Analysis of factors controlling reservoir with high quality in Etuoqueqi Area[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2020,33(2):59-66.
- [29] Bai Bin, Hao Jingyue, Fu Ling, et al. Microfacies and diagenetic alteration in a semi-deep to deep lacustrine shale: the Yanchang Formation in the Ordos Basin, China[J]. Petroleum Science, 2024,21(3):1524-1538.
- [30] 单俊峰,吴炳伟,金科,等.鄂尔多斯盆地宜川—黄龙地区上古生界储层特征及其对天然气成藏的影响[J].特种油气藏,2022,29(6):29-38.  
Shan Junfeng, Wu Bingwei, Jin Ke, et al. Characteristics of Upper Paleozoic reservoirs and its influence on natural gas accumulation in Yichuan-Huanglong Area, Ordos Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2022,29(6):29-38.
- [31] 李勇,徐凤银,唐书恒,等.鄂尔多斯盆地煤层(岩)气勘探开发进展及发展方向[J].天然气工业,2024,44(10):63-79.  
Li Yong, Xu Fengyin, Tang Shuheng, et al. Progress and development direction of coalbed methane(coal-rock gas) exploration and development in the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2024,44(10):63-79.
- [32] 陈世达,汤达祯,侯伟,等.煤储层流体特征、聚气主控因素及富气模式:以鄂尔多斯盆地中东部上古生界为例[J].石油勘探与开发,2025,52(2):385-394.  
Chen Shida, Tang Dazhen, Hou Wei, et al. Fluid characteristics, gas accumulation control factors and gas enrichment modes in coal reservoirs: a case study of the Upper Paleozoic in the Central-Eastern Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2025,52(2):385-394.
- [33] 李明瑞,史云鹤,范立勇,等.鄂尔多斯盆地上古生界本溪组8#煤岩煤岩气与致密砂岩气主要气藏特征对比[J].石油与天然气地质,2024,45(6):1590-1604.  
Li Mingrui, Shi Yunhe, Fan Liyong, et al. Comparison of main reservoir characteristics between deep coal-rock gas of the No. 8 coal seam of the Upper Paleozoic Benxi Formation and tight sand gas reservoirs, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024,45(6):1590-1604.
- [34] Zou Jie, Fan Chunyan, Liu Xiu. Effects of molecular cross-sectional areas of adsorbed nitrogen on the Brunauer-Emmett-Teller analysis for carbon-based slit pores[J]. Langmuir, 2020,36(48):14656-14665.
- [35] Ghosh A, Vangberg T. Valence ionization potentials and cation radicals of prototype porphyrins. The remarkable performance of nonlocal density functional theory[J]. Theoretical Chemistry Accounts, 1997,97(1/2/3/4):143-149.
- [36] Thommes M. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution(IUPAC Tech-

- nical Report)[J]. Pure and Applied Chemistry, 2016,87(1):25.
- [37] Sing K S W. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity(Recommendations 1984)[J]. Pure and Applied Chemistry, 1985,57(4):603-619.
- [38] 刘佳佳,张云龙,杨迪,等.基于压汞-液氮吸附-核磁共振法的中低阶煤孔裂隙联合表征[J].河南理工大学学报(自然科学版),2025,44(2):19-31.  
Liu Jiajia, Zhang Yunlong, Yang Di, et al. Joint characterization of middle and low rank coal pores and fractures based on pressed mercury-nitrogen adsorption-nuclear magnetic resonance method[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science), 2025,44(2):19-31.
- [39] 侯雨庭,李勇,张涛,等.鄂尔多斯盆地靖边地区本溪组8#煤孔隙特征及控制因素[J].钻采工艺,2025,48(3):189-196.  
Hou Yuting, Li Yong, Zhang Tao, et al. Pore characteristics and controlling factors of No. 8 coal in Benxi Formation, Jingbian Area, Ordos Basin[J]. Drilling & Production Technology, 2025,48(3):189-196.
- [40] 张小梅,王绍清,陈昊,等.基于原子力显微镜观测的煤中显微组分微观形貌与孔隙结构[J].煤炭科学技术,2023,51(4):127-132.  
Zhang Xiaomei, Wang Shaoqing, Chen Hao, et al. Micro morphology and pore structure of macerals in coal observed by atomic force microscopy(AFM)[J]. Coal Science and Technology, 2023,51(4):127-132.

## 《东北石油大学学报》获评 “石油和化工行业高影响力期刊”

2026年4月23日,由中国化工情报信息协会主办的石油和化工行业高影响力期刊遴选结果公布,《东北石油大学学报》入选石油和化工行业高影响力期刊总榜,获评“石油和化工行业高影响力期刊”荣誉,同时入选石油和化工行业高影响力学术类期刊子榜,获评“石油和化工行业高影响力学术类期刊”荣誉。

近年来,《东北石油大学学报》评价指标与国际学术影响力稳步提升。学报聚焦油气行业“两深一非”领域,围绕松辽盆地与南海油气地质、陆相页岩油气高效开发、提高油气采收率、储气库高效安全利用等重点方向,刊发全国油田科研院所与高校的最新科技成果,促进学术交流与成果转化,为服务国家能源战略、推动区域经济社会发展提供有力支撑。



**Key words:** Junggar Basin; Manan Slope; Fengcheng Formation; the whole oil and gas system; laterally connected source-reservoir; tight oil reservoir; main controlling factors; accumulation mode

**Microscopic pore-fracture structure characterization of medium-high rank coal reservoirs from eastern margin of Ordos Basin/2026, 50(2):95-108**

Fan Wentian<sup>1</sup>, Lin Huixi<sup>1</sup>, Li Lei<sup>2</sup>, Wang Tao<sup>3</sup>, Liu Lihang<sup>4</sup>, Zheng Dingye<sup>1</sup>, Wang Jingyi<sup>1</sup>

( 1. *Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China*; 2. *School of Earth Sciences, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China*; 3. *Unconventional Oil and Gas Development Research Institute, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China*; 4. *11th Oil Production Plant, PetroChina Changqing Oilfield Company, Qingyang, Gansu 745000, China* )

**Abstract:** The development of deep coal reservoirs is the key approach to increasing reserves and production of coalbed methane. The Benxi Formation 8th coals in eastern margin of Ordos Basin were taken as the research object, based on the coal quality parameter test, experiments such as low pressure CO<sub>2</sub> adsorption, low temperature N<sub>2</sub> adsorption, high pressure mercury injection and micron CT scanning were carried out to characterize the pore-fracture structure of medium-high coal reservoirs with a full scale, the characteristics of pore-fracture structure at different scales were comprehensively evaluated, and the influence of metamorphism degree on the development of pore-fracture at different scales was also discussed. The results show that the coal volume type in the study area is mainly characterized by a dual-peak pattern of micropores and fractures, featuring the coexistence of micropores and fractures, and the pore size is mainly concentrated in the range of 0.3–1.5 nm and greater than 1 000 μm. The average volume of micropores, mesoporous pores, macropores and fractures accounted for 70.8%, 16.0%, 8.1% and 5.1% of the total pore volume, respectively. Micropores contribute 98.8% of specific surface area and are the main occurrence sites of adsorbed gas. There are significant differences in the pore-fracture structure of middle-high coal reservoirs. With the increase of coal rank, the metamorphism of coal rock was deepened, the volume of micropores increases steadily, and the volume of fractures increases first and then decreases and then increases, while the change of mesoporous and macro pores volume is not obvious. The coal reservoirs with higher coal rank has higher volume proportion of micropores and stronger adsorption. This result provides theoretical and data support for deep coalbed methane potential evaluation and exploration and development in Ordos Basin.

**Key words:** pore-fracture; structural characterization; coal reservoirs; middle-high coal rank; Benxi Formation; eastern margin of Ordos Basin