

新疆山前冲断带浅部与深部高挥发分烟煤 孔隙结构表征对比研究*

任艳泽¹, 李鑫^{1†}, 谢安², 王子强², 王兴刚³, 焦立新³, 曹志雄³, 李斌³

(1. 新疆大学 新疆中亚造山带大陆动力学与成矿预测自治区重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830017; 2. 怀柔实验室新疆研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000; 3. 中国石油吐哈油田分公司 勘探开发研究院, 新疆 哈密 839000)

摘要: 煤岩孔隙结构对煤层气储集与渗流具有重要控制作用。基于恒速压汞、低温液氮吸附及低场核磁共振等测试, 对比分析了新疆山前冲断带浅部与深部高挥发分烟煤(HVBC)样品孔隙-喉道结构差异及其对不同深度煤层气勘探开发的影响。结果如下:(1) 恒速压汞实验表明, 相对浅部HVBC样品, 深部HVBC样品大孔半径峰值大于浅部, 且喉道尺寸分布非均质性更强, 孔喉半径比更大。(2) 低温液氮实验表明, 相对浅部HVBC样品, 深部HVBC样品微孔和过渡孔弱于浅部, 且主要发育贯通型圆柱孔和开放型层状孔。(3) 低场核磁共振实验表明, 相对浅部HVBC样品, 深部HVBC样品中孔更为发育, 大孔及裂隙发育较差。(4) 浅部HVBC煤岩受成煤作用后煤层深埋作用与折返抬升作用影响, 呈现微孔、过渡孔及大孔和裂隙发育程度更好且低孔喉半径比特征; 相比之下, 深部HVBC煤岩受深埋压实作用影响, 呈现弱改造效应下的高孔喉半径比特征。

关键词: 煤层气; 孔隙结构; 恒速压汞; 低温液氮吸附; 低场核磁共振

DOI: 10.13568/j.cnki.651094.651316.2025.06.29.0001

中图分类号: P618 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2025)06-0654-011

引文格式: 任艳泽, 李鑫, 谢安, 王子强, 王兴刚, 焦立新, 曹志雄, 李斌. 新疆山前冲断带浅部与深部高挥发分烟煤孔隙结构表征对比研究[J]. 新疆大学学报(自然科学版中英文), 2025, 42(6): 654-664.

英文引文格式: REN Yanze, LI Xin, XIE An, WANG Ziqiang, WANG Xinggang, JIAO Lixin, CAO Zhixiong, LI Bin. Comparative study on the characterization of pore structures between shallow and deep high-volatile bituminous coal in the foreland thrust belt of Xinjiang[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2025, 42(6): 654-664.

Comparative Study on the Characterization of Pore Structures between Shallow and Deep High-Volatile Bituminous Coal in the Foreland Thrust Belt of Xinjiang

REN Yanze¹, LI Xin¹, XIE An², WANG Ziqiang², WANG Xinggang³,
JIAO Lixin³, CAO Zhixiong³, LI Bin³

(1. Xinjiang Key Laboratory of Continental Dynamics and Mineralization Prediction in the Central Asian Orogenic Belt, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830017, China; 2. Huairou Laboratory Xinjiang Research Institute, Urumqi Xinjiang 830000, China; 3. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Tuha Oilfield Company, Hami Xinjiang 839000, China)

Abstract: The pore structure of coal plays a critical controlling role in coalbed methane storage and seepage. Based on constant-rate mercury intrusion porosimetry, low-temperature nitrogen adsorption, and low-field nuclear

* 收稿日期: 2025-06-29

基金项目: 新疆维吾尔自治区天山英才计划“新疆前陆冲断带深部煤系天然气形成机制与富集机理”(2022TSYCCX0043); 新疆维吾尔自治区科技重大专项“利用二氧化碳提高新疆难开采煤层气采收率技术体系研发”(2022A03015-3)。

作者简介: 任艳泽(2000—), 男, 硕士生, 从事非常规油气与勘探的研究, E-mail: 2295481257@qq.com.

† 通讯作者: 李鑫(1990—), 男, 博士, 教授, 主要从事非常规油气与勘探的研究, E-mail: lixinwaxj@xju.edu.cn.

magnetic resonance tests, this study comparatively analyzes the differences in pore-throat structures between shallow and deep high-volatile bituminous coal (HVBC) samples from the foreland thrust belt of Xinjiang and their implications for coalbed methane exploration and development at varying depths. The key findings are as follows: (1) Constant-rate mercury intrusion porosimetry results indicate that, compared to shallow HVBC samples, deep HVBC samples exhibit a larger peak macropore radius, stronger heterogeneity in throat size distribution, and a higher pore-throat radius ratio. (2) Low-temperature nitrogen adsorption results reveal that deep HVBC samples have less developed micropores and mesopores than shallow's, with predominantly interconnected cylindrical pores and open slit-shaped pores. (3) Low-field nuclear magnetic resonance results demonstrate that deep HVBC samples contain more mesopores but fewer macropores and fractures compared to shallow's. (4) Shallow HVBC has better-developed micropores, mesopores, macropores, and fractures, along with a lower pore-throat radius ratio, influenced by post-coalification deep burial followed by uplift and exhumation. In contrast, deep HVBC exhibits a high pore-throat ratio under weak modification effects due to deep burial and compaction.

Key words: coalbed methane; pore structure; constant-rate mercury intrusion porosimetry; low-temperature nitrogen adsorption; low-field nuclear magnetic resonance

0 引言

我国煤层气开发重点正逐步向深部储层转移^[1-3]. 深部煤储层受高温高压及强地应力作用, 孔隙-裂隙系统发生显著变化, 主要表现为孔隙压缩和裂隙充填, 严重影响煤层气的运移效率. 这种储层条件的差异使得深部与浅部煤储层在物性特征、气体赋存状态及开采动态等方面表现出明显区别^[4-5]. 故开展浅、深部煤储层多尺度孔隙-裂隙系统对比研究, 不仅有助于揭示储层物性演化规律, 更能为深部煤层气有利区优选提供理论支撑^[6].

当前煤储层孔隙结构表征技术主要分为两类: 流体注入分析法和射线法^[7]. 前者以气体吸附分析和压汞法为代表, 利用流体渗透原理间接获取孔隙形态信息, 测试效率较高但存在尺度局限性, 且可能因流体压力导致样品结构损伤. 后者包括电子显微技术、核磁共振分析等多种手段, 核磁共振法能够高效、便捷区分束缚流体与可动流体^[8], 但当 T_2 谱转化为对应孔喉数据时, 受人为因素影响较大^[9]. 故需要采用多方法联合分析以全面表征煤储层孔隙结构系统.

本文选取同为山前冲断带、热演化程度相似的高挥发分烟煤 (High-Volatile Bituminous Coal, HVBC)、原生结构状态的浅层与深层煤储层样品, 综合运用恒速压汞、低温液氮吸附及低场核磁共振等技术手段, 覆盖不同尺度范围, 系统分析浅、深部煤储层多尺度孔隙结构特征, 揭示浅、深部煤储层孔隙结构差异, 以为煤层气储层评价提供参考.

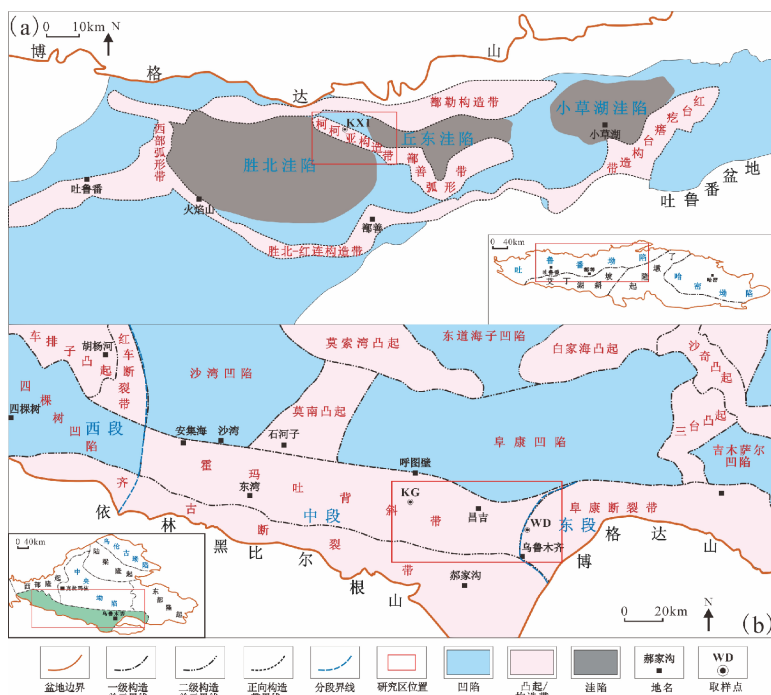


图 1 吐哈盆地台北凹陷柯柯亚构造带 (a) 与准噶尔盆地南缘冲断带 (b) 划分及取样点

1 地质概况

深部高挥发分烟煤样品采自台北凹陷柯柯亚构造带. 台北凹陷是吐哈盆地吐鲁番坳陷北部的一个重要凹陷, 区域内发育胜北、丘东和小草湖三个次级洼陷, 其中柯柯亚地区位于丘东洼陷西北缘. 受博格达造山运动影响, 山前带在垂向上形成高、中、低三级断阶结构. 研究区所在的柯柯亚构造带处于低断阶位置, 呈现长轴东西向的背斜形态^[10] (图1(a)). 浅部高挥发分烟煤样品采自准噶尔盆地南缘山前冲断带宽沟矿区和乌东矿区. 准噶尔盆地南缘位于北天山山脉北侧, 其构造变形特征表现为显著的“南北分异、东西分块”格局^[11] (图1(b)).

2 煤样及实验方法

2.1 样品选取

依据《煤层煤样采取方法》(GB/T 482—2008), 在台北凹陷柯柯亚构造带西山窑组主力煤层采集煤样, 采集该区域KX1井3 260~3 262 m深度10件煤样与3 318~3 320 m深度10件煤样; 在准噶尔盆地南缘的宽沟矿区B₄₋₁和乌东矿区西山窑组43号主力煤层各采集10件煤样, 其中取宽沟矿区B₄₋₁煤层埋深为317~320 m的煤样、乌东矿区43号煤层埋深为564~567 m的煤样.

本文选取4组不同埋深的煤样作为实验对象, 所有样品均采自山前冲断带构造单元的侏罗系西山窑组, 热演化程度相似, 均为高挥发分烟煤. 样品按采样点编号为KX-1、KX-2、KG、WD, 对样品依次进行恒速压汞、低温液氮吸附、低场核磁共振等孔隙结构表征测试.

为防止氧化, 用保鲜膜及时密封采集的样品, 然后将部分样品制取为直径45 mm、高25 mm的圆柱状样品, 用于低场核磁共振实验; 部分样品制取为直径25 mm、高20 mm的圆柱状样品, 用于恒速压汞实验; 部分样品压碎后进行细分, 块状用于开展煤岩显微组分与镜质体反射率的煤岩煤质测试分析, 粒度为0.2~0.3 mm的样品用于低温液氮吸附实验, 粒度小于0.2 mm的样品用于煤工业分析实验.

系统测试煤样的煤质特征, 显微组分检测依据《煤的显微组分组和矿物测定方法》(GB/T 8899—2013) 进行, 镜质组反射率测定参照《煤的镜质体反射率显微镜测定方法》(GB/T 6948—2008) 进行, 工业分析依据《煤的工业分析方法》(GB/T 212—2008) 进行. 由表1可知, 浅部煤样(KG、WD)与深部煤样(KX-1、KX-2)的工业分析结果近似, 干燥无灰基挥发分产率为32.24%~36.73%、镜质组含量为34.2%~96.1%、平均最大镜质体反射率为0.72%~0.74%, 均属高挥发分煤.

表 1 煤工业分析、显微组分检测、镜质体反射率测定数据

样品编号	采样深度/m	$R_{o,max}/\%$	工业分析/%		
			M_{ad}	A_d	V_{daf}
KG	317	0.72	3.66	5.38	36.73
WD	564	0.73	2.53	4.12	32.24
KX-1	3 318	0.74	1.54	5.23	33.82
KX-2	3 260	0.74	1.41	5.77	36.57

注: $R_{o,max}$ 为平均最大镜质体反射率; M_{ad} 为空气干燥基水分; A_d 为干燥基灰分产率; V_{daf} 为干燥无灰基挥发分产率

2.2 实验方法

2.2.1 恒速压汞法

孔隙结构测试采用Coretest ASPE-730型压汞仪. 通过记录进汞-退汞曲线, 表征样品孔隙的微观结构. 将汞以极低的恒定速度(0.000 1 mL/min)注入岩石孔隙中, 进汞压力达到最大时(6.20 MPa)实验结束, 根据进汞压力的涨落和进汞量来确定样品孔隙的微观结构, 同时直接获取孔隙、喉道的分布特征^[12-13].

2.2.2 低温液氮吸附

实验使用TriStar II比表面积分析仪, 严格按照《气体吸附BET法测定固态物质比表面积》(GB/T 19587—2017)进行. 完成低温氮气吸附-脱附测试后, 基于Brunauer-Emmett-Teller (BET)多分子层吸附理论, 计算得到样品的比表面积参数; 同时应用Barrett-Joyner-Hale (BJH)毛细管凝聚理论, 对孔径分布特征进行精确解析. 结合上述两种方法, 获取包括总孔体积、比表面积数值、平均孔径大小以及完整的孔径分布曲线在内的多项关键孔隙结构参数.

2.2.3 低场核磁共振

实验使用MesoMR23-060V-I核磁共振仪,严格按照《煤和岩石孔径分布的测定 核磁共振法》(GB/T 42035—2022)进行.由射频场条件下质子的核磁共振特征表征孔隙结构.基于射频条件原子核的核共振响应特性,实现孔隙结构的定量表征.

3 浅部与深部煤储层孔隙结构对比分析

3.1 大孔隙结构

恒速压汞法可用于表征大孔孔隙结构(表征孔隙直径范围为0.12~500 μm)^[14].与常规压汞相比,恒速压汞可直接提供总体、孔隙和喉道3种毛细管压力曲线^[15].样品KG、WD、KX-1、KX-2最终进汞饱和度分别为16.25%、31.85%、67.50%和55.29%(表2).浅部样品KG和WD最终进汞饱和度均较低,两样品渗透率差异较大.由图2(a)可知,进汞压力较小时,样品KG的总体毛细管压力与孔隙毛细管压力几乎一致,说明汞先进入大喉道控制的孔隙中.且随着进汞压力增加,喉道进汞饱和度增速非常缓慢,说明该样品细小喉道数量少;总体进汞饱和度的增速与孔隙进汞饱和度的变化趋势较一致,说明该样品进汞饱和度总体上受孔隙控制;最终进汞饱和度不足17%,进一步印证了该样品低渗的特性.

表 2 恒速压汞实验数据

样品编号	采样深度/m	孔隙度/%	渗透率/ $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	孔隙进汞 饱和度/%	喉道进汞 饱和度/%	喉道均质 系数/%	平均孔喉 半径比
KG	317	10.86	0.14	14.94	1.31	0.45	144.08
WD	564	12.75	2.90	27.93	3.92	0.84	201.04
KX-1	3 318	16.09	2.92	21.48	46.02	1.99	188.94
KX-2	3 260	11.58	2.10	32.99	22.30	3.15	389.30

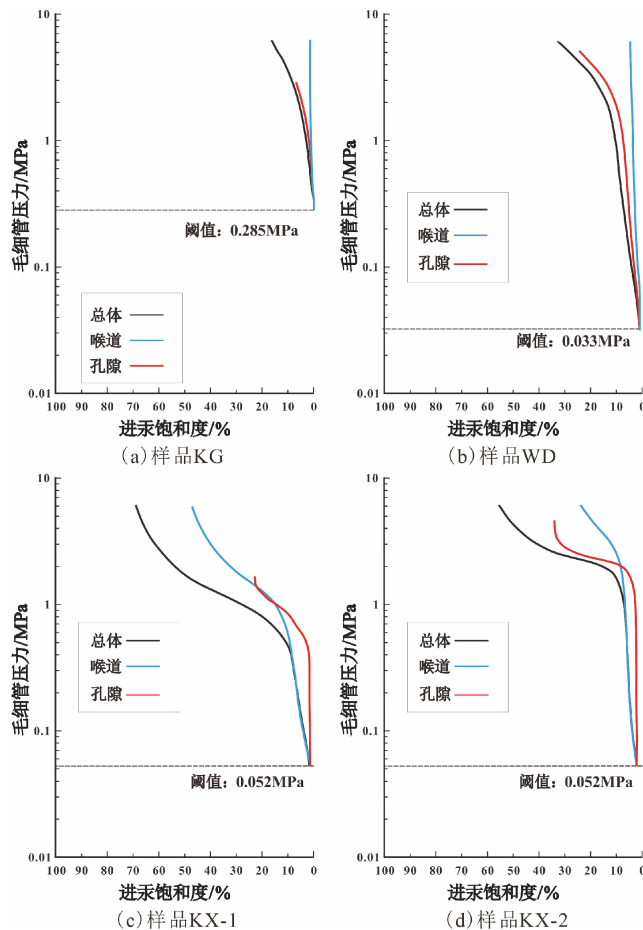


图 2 恒速压汞曲线特征

由图2 (b) 可知, 样品WD的孔隙毛细管压力与总体毛细管压力略有差异, 但随毛细管压力增加, 总体进汞饱和度与孔隙进汞饱和度的变化趋势接近, 说明该样品进汞饱和度总体上受孔隙控制; 同时WD样品喉道进汞饱和度增速同样十分缓慢, 说明该样品的细小喉道数量较少, 该样品的最终进汞饱和度约为31.85%, 略高于样品KG, 印证了其具有更高的渗透率. 样品WD的进汞阈值低于样品KG, 说明样品WD具有更大孔径的初始喉道. 从孔喉配置关系来看, 样品WD的大喉道占比略高于样品KG, 且孔隙更发育, 这也是导致其渗透率更高的原因之一. 由图2 (c) 可知, 进汞压力较小时, 样品KX-1进汞饱和度主要受喉道控制, 此时总体毛细管压力曲线与喉道毛细管压力曲线基本重合, 但随着进汞压力增大, 孔隙也开始共同控制进汞饱和度, 最终进汞饱和度达到67.50%, 说明该样品具有较高渗透率; 同时样品KX-1的孔隙进汞饱和度较早停止增长, 后续只剩余喉道控制进汞饱和度, 说明该样品分布较多细小喉道. 由图2 (d) 可知, 样品KX-2在进汞压力较小时, 其进汞饱和度主要受喉道控制, 此时总体毛细管压力曲线与喉道毛细管压力曲线基本重合, 但随着进汞压力增大, 孔隙开始与喉道共同控制进汞饱和度, 这与样品KX-1相似; 同时两个深部样品的阈值相同, 说明他们的初始喉道孔径十分接近.

浅部样品总体毛细管压力曲线与孔隙毛细管压力曲线趋势接近, 说明其进汞饱和度主要受孔隙控制, 喉道数量较少, 大孔连通性较差导致低渗; 相对于浅部, 深部样品低压阶段总体曲线与喉道曲线重合, 说明其低压阶段进汞饱和度由喉道主导, 高压阶段孔隙与喉道共同控制, 喉道数量较多, 大孔连通性较好, 渗透率相对较高. 浅部样品最终进汞饱和度低于深部样品, 说明深部样品孔喉连通性好; 高压阶段深部样品进汞仍显著增长, 说明其细小孔喉发育好.

由图3可知, 4组样品的孔隙半径分布曲线均接近正态分布, 其中: 浅部样品的孔隙半径峰值接近, 介于90~120 μm ; 深部样品孔隙半径峰值则介于130~150 μm , 说明深部样品比浅部样品孔隙半径更大. 根据4组样品的孔喉半径比分布曲线分析, 浅部样品的孔喉半径比峰值接近, 介于50~100; 深部样品KX-1的孔喉半径比峰值介于100~250、KX-2的孔喉半径比峰值介于400~450; 较高的孔喉半径比说明孔隙半径远大于喉道半径, 孔隙通过狭窄喉道连通, 但由于深部样品喉道数量较多, 其渗透性高于浅部样品^[16-17]. 根据表2中的数据, 浅部样品的喉道均质系数均显著低于深部样品, 说明深部样品的喉道尺寸分布较为分散, 喉道大小差异大.

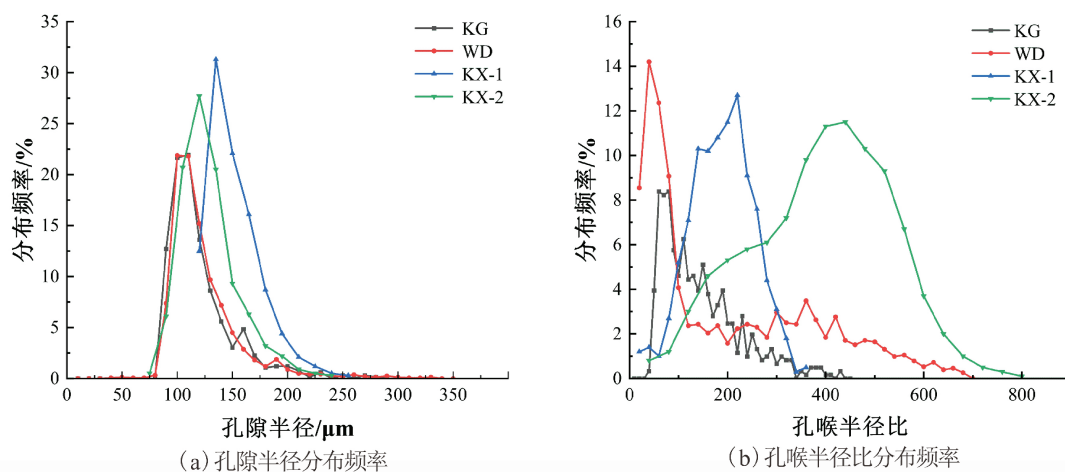


图3 恒速压汞实验孔隙半径、孔喉半径比分布频率曲线特征

3.2 微孔和过渡孔孔隙结构特征

低温液氮吸附实验可用于表征煤微孔和过渡孔孔隙结构. 通过分析低温液氮吸附-脱附曲线的形态特征, 可以揭示煤体的孔隙结构差异 (表3). 基于孔隙几何形态及气-液界面行为的差异, 前人将孔隙分为三类典型结构^[18]: 第一类包括单端封闭的圆柱孔、平板狭缝孔及楔形孔, 其吸附-脱附过程中气-液界面均呈现半球形弯液面特征, 由于凝聚压与蒸发压相近, 等温线不出现滞后环; 第二类为两端开放的圆柱孔和四面开放的平板孔, 因吸附相变与脱附相变过程中界面形态差异, 等温线出现明显的分支分离现象; 第三类为墨水瓶型孔, 其狭窄

的孔喉结构在脱附过程中产生液封效应,导致吸附分支与脱附分支的相对压力差异,形成特征性的滞后回线并伴随明显的拐点特征.

表3 低温液氮吸附实验数据

样品编号	采样深度/m	BET比表面积/($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	BJH总孔体积/($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	平均孔隙半径/ μm
KG	317	1.06	0.001 7	7.50
WD	564	1.81	0.006 5	16.10
KX-1	3 318	0.25	0.001 6	25.75
KX-2	3 260	0.33	0.002 7	33.00

由图4可知,浅部样品的吸附-脱附曲线,与IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) 分类中的II型吸附类型相似,主要出现在无孔或大孔材料中. 吸附曲线呈持续增长趋势,脱附曲线则表现出显著的滞后现象,表明样品中存在贯通型圆柱孔和开放型狭缝孔结构. 值得注意的是,两个浅部样品的脱附曲线均在相对压力 (p/p_0) 0.45附近出现特征性转折点,说明浅部样品的部分孔隙为墨水瓶型. 此外,样品WD在低压区吸附-脱附曲线重合,说明该压力区间对应的孔隙主要为单端封闭孔;相比之下,样品KG的转折特征更为突出,证实其含有更显著的墨水瓶型孔隙^[19].

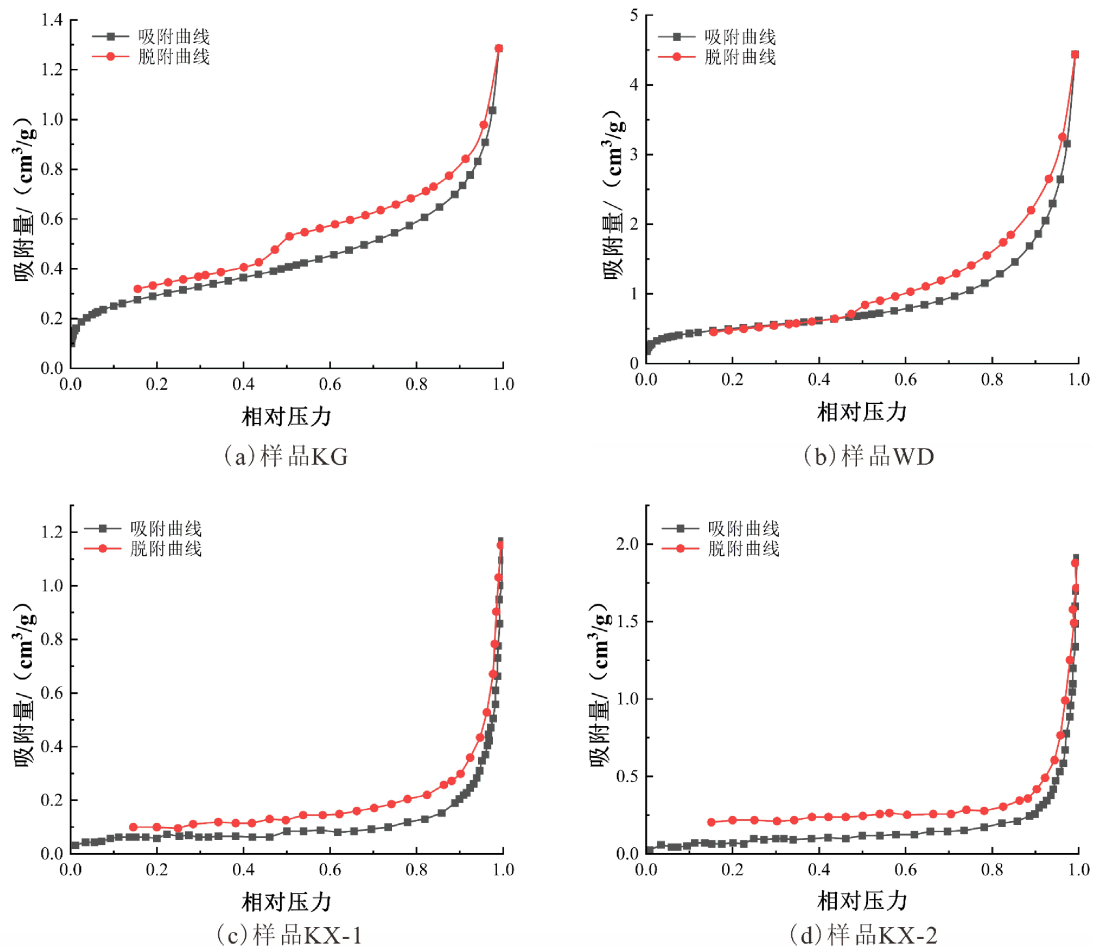


图4 低温液氮实验煤样吸附-脱附曲线特征

由图4(c~d)可知,深部样品的吸附-脱附曲线均呈现典型的滞后回线特征,且KX-2样品的吸附量和滞后环面积均大于KX-1样品. 值得注意的是,在相对压力0.55附近,两条曲线均出现轻微转折,这一现象说明样品中主要发育贯通型圆柱孔和开放型层状孔,同时含有少量墨水瓶型孔隙. 前人研究^[20]指出,此类墨水瓶型孔隙因特殊的“瓶颈”结构将阻碍气体运移,导致气体以间歇方式释放,进而影响煤层气的稳定产出.

由表3、图5可知,浅部样品的孔径-孔容分布曲线形态接近,浅部样品过渡孔发育情况好于微孔,过渡孔阶段提供了更多孔体积;深部样品的孔径-孔容分布曲线形态接近,KX-1、KX-2峰值均介于100~200 nm,过渡孔阶段提供的孔体积容量远高于微孔阶段提供的孔体积容量.样品KG的比表面积在微孔阶段1~2 nm处达到峰值,之后整体呈下降趋势,说明该浅部样品微孔阶段贡献了更多比表面积;样品WD的比表面积在10 nm处达到峰值,过渡孔阶段贡献了更多比表面积.深部样品的孔径-比表面积分布曲线形态接近,KX-1、KX-2峰值均介于10~11 nm,过渡孔阶段提供的比表面积远高于微孔阶段提供的比表面积.由表3可知,浅部样品的总比表面积高于深部样品,可能是因为浅部样品微孔更发育,单位体积微孔贡献的比表面积远高于过渡孔.

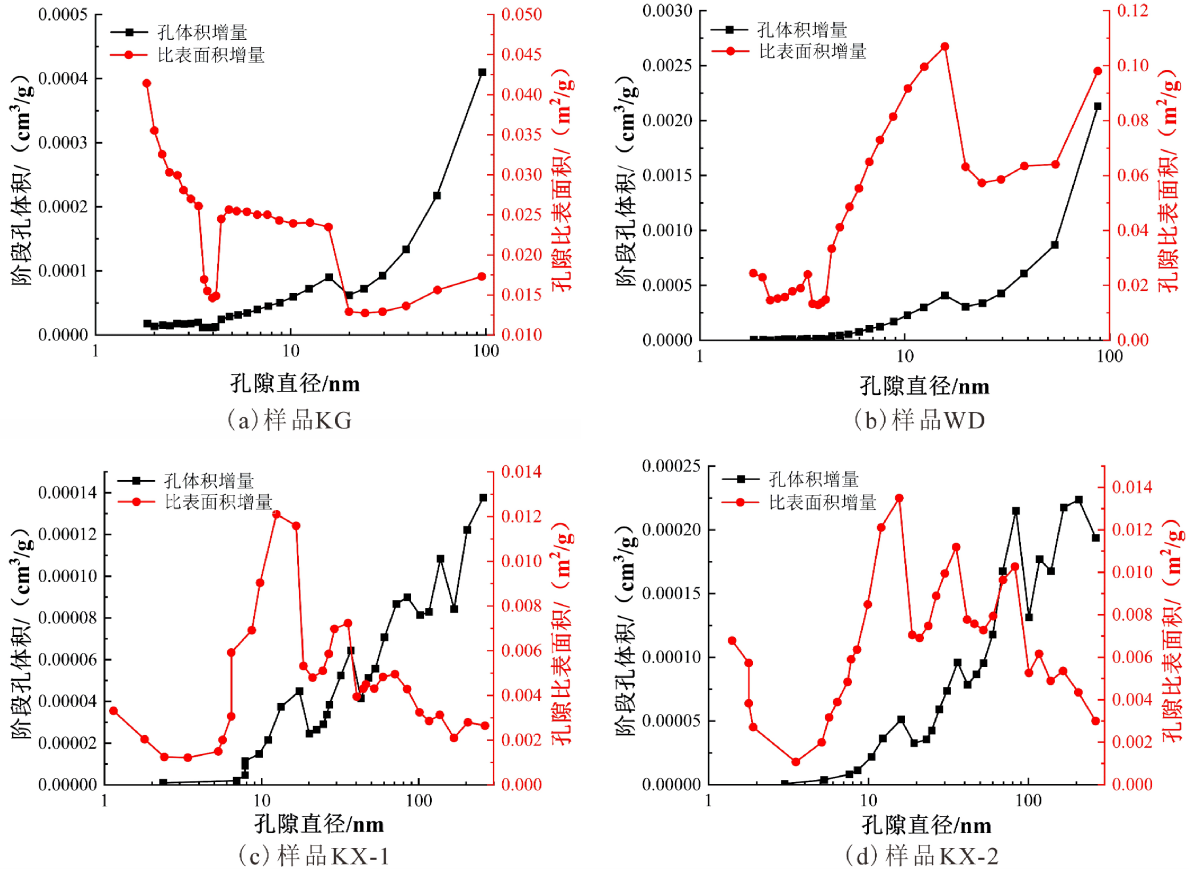


图5 低温液氮实验煤样的BJH孔径阶段孔体积及BET比表面积分布

3.3 全尺度孔隙结构

作为一种无损检测手段,低场核磁共振(Low-Field Nuclear Magnetic Resonance, LF-NMR)能够高效准确地测定煤体孔隙参数^[21].如图6所示,横向弛豫时间(T_2)谱峰的面积与孔隙体积呈正相关,可近似代表样品的孔隙体积;谱峰分离程度则可作为孔隙连通性的评价指标^[22]. T_2 的分布特征与流体赋存孔隙的尺寸及容积密切相关,其信号强度可反映煤体孔隙结构的特点^[23].基于 T_2 值的不同范围,煤的孔径可分为三类:微孔和过渡孔($T_2 < 2.5$ ms)、中孔($2.5 \text{ ms} < T_2 < 100$ ms)、大孔及裂隙($T_2 > 100$ ms)^[24].

T_2 弛豫谱的峰值分布反映不同孔径的发育特征:左端最高峰代表微孔和过渡孔,随弛豫时间增加的峰值依次对应中孔、大孔及裂隙^[25].浅部样品的 T_2 谱均呈双峰结构,不同孔隙阶段占比也较为接近.其中:KG的微孔和过渡孔 T_2 谱面积占比为58.9%,中孔占比为37.4%,大孔及裂隙占比为3.7%;WD的微孔和过渡孔 T_2 谱面积占比为57.2%,中孔占比为39.9%,大孔及裂隙占比为2.9%;浅部样品的大孔及裂隙发育较少.深部样品的 T_2 谱均呈中间峰占比最高的结构,KX-1的微孔和过渡孔与中孔峰谷较深,表明两类孔隙间连通性较差,而中孔峰与大孔峰重叠度高,峰谷不明显,说明二者连通性良好.KX-2的微孔和过渡孔与中孔峰谷也较深,表明两类孔隙间连通性较差,中孔峰与大孔峰分离明显,代表其连通性较差.KX-1的微孔和过渡孔 T_2 谱面积占比为24.6%,中孔占比为72.5%,大孔及裂隙占比为2.9%,说明其中孔发育最好,微孔和过渡孔与大孔发育较差;KX-2的微

孔和过渡孔 T_2 谱面积占比为35.2%,中孔占比为62.5%,大孔及裂隙占比为2.3%,说明其微孔和过渡孔发育略好于KX-1,中孔发育略差于KX-1.

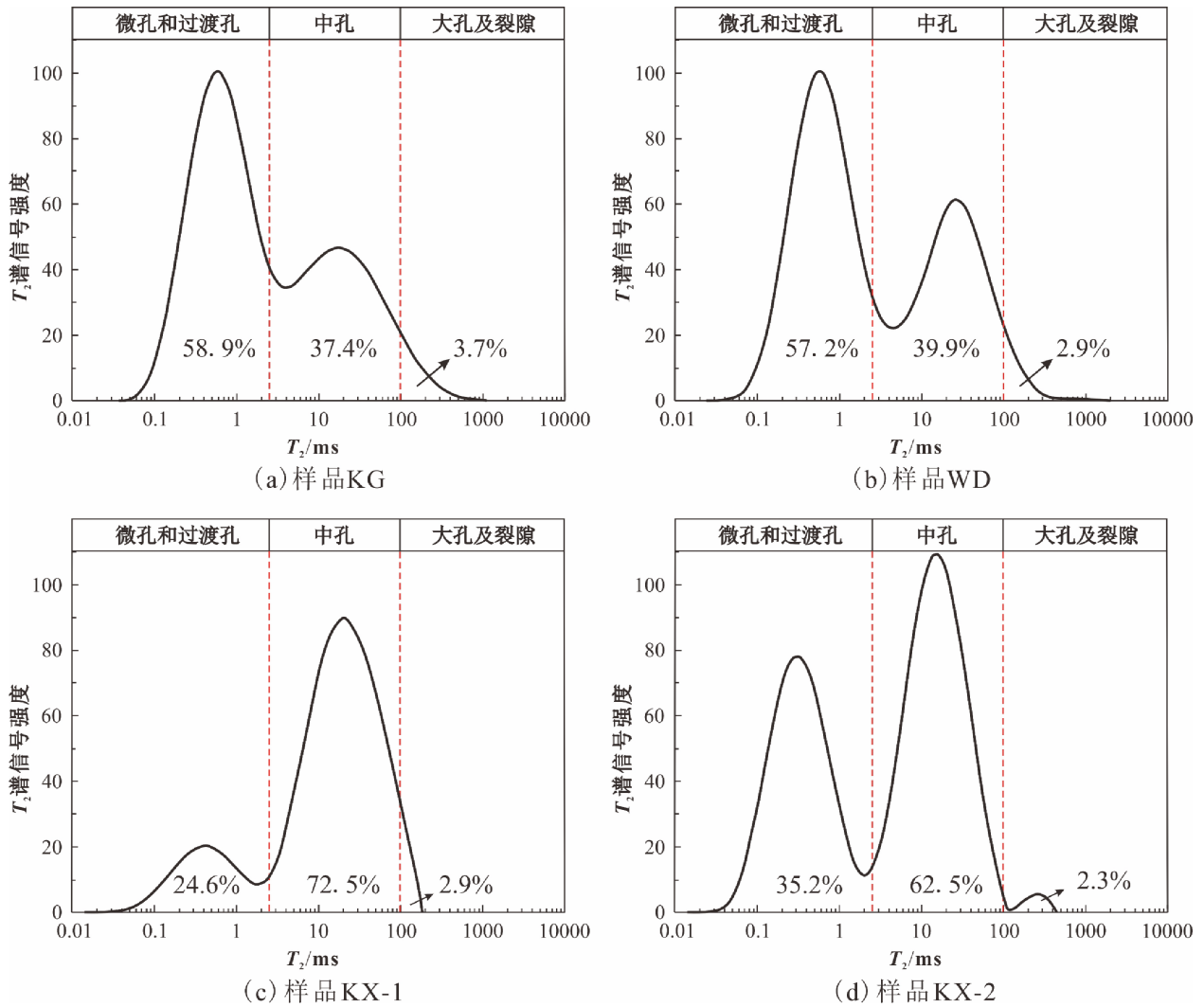


图6 低场核磁共振实验 T_2 谱及各孔径段体积分数

表4 浅部与深部孔隙差异性

差异性参数或指标	浅部HVBC	深部HVBC
最终进汞饱和度/%	16.25~31.85	55.29~67.50
喉道进汞饱和度/%	1.31~3.92	22.30~46.02
大孔孔隙半径/ μm	90~120	130~150
孔喉半径比	144~201	189~389
喉道均质系数/%	0.45~0.84	1.99~3.15
孔隙结构	贯通型圆柱孔和开放型狭缝孔	贯通型圆柱孔和开放型层状孔
BET比表面积/ $(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	1.06~1.81	0.25~0.33
优势体积占比孔径	微孔和过渡孔	中孔

3.4 孔隙结构差异性及其地质控制探讨

煤储层孔隙与喉道结构特征受构造演化、埋深、地应力、热成熟度及构造应力等多重地质因素控制,表现出显著的深浅差异.由表4可知,浅部样品(KG、WD)受成煤作用后煤层深埋作用与折返抬升作用影响,压实作用较弱,大孔及裂隙较为发育,且大孔孔隙半径分布集中(90~120 μm)、孔喉半径比较低(144~201),但进汞饱和度较低,说明其大孔与喉道连通性差、渗透率低;低温液氮吸附显示微孔和过渡孔贡献更多比表面积,

深部样品主要发育贯通型圆柱孔和开放型层状孔,低场核磁共振揭示双峰 T_2 谱以微孔和过渡孔为主,这可能是构造抬升过程应力集中所致。深部样品(KX-1、KX-2)在高温高压环境下发育次生孔隙,如气孔、溶蚀孔^[26],导致中孔较为发育但大孔欠发育,并且由于压实与胶结作用导致喉道分选性差,孔喉半径比显著升高至189~389,形成大孔阶段“孔大-喉小”特征,但因较多的喉道数量导致进汞饱和度高、渗透率较高。浅部煤层气以富集吸附气为主,受成煤作用后煤层深埋作用与折返抬升作用影响,呈现微孔和过渡孔、大孔及裂隙发育程度更好且低孔喉半径比特征,建议开发过程保持连续、缓慢、稳定降压以确保煤层气稳定解吸渗流,规避储层应力敏感性。相比之下,深部煤层气以“吸附气-游离气”共存富集为特征^[27],但受深埋压实作用影响呈弱改造效应下的高孔喉半径比特征,开发时需采用合适压裂改造手段,打破大孔及裂隙欠发育与高孔喉半径比约束,确保煤层气扩散-解吸连续性。

4 结论

本文通过恒速压汞、低温液氮吸附及低场核磁共振实验分析,系统研究了新疆山前冲断带不同深度HVBC煤层孔隙结构特征差异性,主要结论如下:

(1) 恒速压汞实验表明,浅部HVBC样品大孔半径峰值介于90~120 μm ,喉道尺寸分布较均匀,孔喉半径比介于144~201;相对于浅部,深部HVBC样品发育更多细小喉道,大孔半径峰值介于130~150 μm ,孔喉半径比介于189~389,喉道直径分布非均质性强。

(2) 低温液氮实验表明,浅部HVBC样品主要发育贯通型圆柱孔和开放型狭缝孔结构,发育更多微孔;相对于浅部,深部HVBC样品主要发育贯通型圆柱孔和开放型层状孔,发育更多过渡孔。

(3) 低场核磁共振实验表明,浅部HVBC样品微孔和过渡孔较为发育,大孔及裂隙发育程度较好;相对于浅部,深部HVBC样品中孔较为发育,大孔及裂隙发育较差。

(4) 浅部煤层气以富集吸附气为主,受成煤作用后煤层深埋作用与折返抬升作用影响,呈微孔和过渡孔、大孔及裂隙发育程度更好且低孔喉半径比特征,建议开发过程保持连续、缓慢、稳定降压以确保煤层气稳定解吸渗流,规避储层应力敏感性。相比之下,深部煤层气以“吸附气-游离气”共存富集为特征,但受深埋压实作用影响呈弱改造效应下的高孔喉半径比特征,开发时需采用合适压裂改造手段,打破大孔及裂隙欠发育与高孔喉半径比约束,确保煤层气扩散-解吸连续性。

参考文献:

- [1] 曹代勇, 琚宜文, 夏玉成, 等. 中国煤田构造研究的史实概览、主要进展与前景展望[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(5): 1-23.
CAO D Y, JU Y W, XIA Y C, et al. Historical overview, advancements, and future prospects of coalfield structure research in China[J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(5): 1-23. (in Chinese)
- [2] 徐凤银, 甄怀宾, 李曙光, 等. 深部煤层气储层改造技术迭代升级历史与发展方向: 以鄂尔多斯盆地东缘大吉区块为例[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(3): 1-18.
XU F Y, ZHEN H B, LI S G, et al. History and development direction of iterative upgrading of deep coalbed methane reservoir reconstruction technology: Taking the Daji block in the eastern margin of the Ordos Basin as an example[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(3): 1-18. (in Chinese)
- [3] 闫霞, 徐凤银, 熊先钺, 等. 深部煤层气勘探开发关键实验技术及发展方向[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(1): 128-141.
YAN X, XU F Y, XIONG X Y, et al. Key experimental technologies and their development directions for the exploration and production of deep coalbed methane[J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(1): 128-141. (in Chinese)
- [4] 陈河青, 杨兆彪, 李道清, 等. 新疆准噶尔盆地白家海凸起深部煤层气孔渗系统特征[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(6): 33-43.
CHEN H Q, YANG Z B, LI D Q, et al. Characteristics of the pore and seepage system of deep coalbed methane in the Baijiahai uplift, Junggar Basin, Xinjiang[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(6): 33-43. (in Chinese)
- [5] 邓泽, 王红岩, 姜振学, 等. 深部煤储层孔裂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 Z, WANG H Y, JIANG Z X, 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. (in Chinese)

- [6] 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 P X, ZHANG Z, YU W Y, 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. (in Chinese)
- [7] 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 K, MENG Z P, JIN Y, 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. (in Chinese)
- [8] 吴长辉,党海龙,赵思远.恒速压汞在储层微观孔隙结构研究中的应用:以鄂尔多斯盆地吴起油田下组合长9油藏为例[J].非常规油气,2017,4(3):75-80+69.
WU C H, DANG H L, ZHAO S Y. Application of constant pressure mercury in the study of micro-pore structure of reservoir: A case study of Chang 9 reservoir in Wuqi oilfield, Ordos Basin[J]. Unconventional Oil & Gas, 2017, 4(3): 75-80+69. (in Chinese)
- [9] 刘海波,曹瑞波,乔婷婷,等.大庆长垣一类油层聚合物驱后孔隙结构变化特征[J].大庆石油地质与开发,2025,44(4):133-139.
LIU H B, CAO R B, QIAO T T, et al. Characteristics of pore structure variation in Class I reservoir of Daqing Placanticline after polymer flooding[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2025, 44(4): 133-139. (in Chinese)
- [10] 钟金银,戴鸿鸣,王满.台北凹陷柯柯亚构造八道湾组储层成岩作用[J].岩性油气藏,2010,22(3):38-42.
ZHONG J Y, DAI H M, WANG M. Reservoir diagenesis of Badaowan formation in Kekeya structure of Taibei sag[J]. Lithologic Reservoirs, 2010, 22(3): 38-42. (in Chinese)
- [11] 于宝利,贾承造,刘可禹,等.准噶尔盆地南缘多滑脱层控制的冲断构造特征及深层油气勘探方向[J].石油勘探与开发,2025,52(3):593-606.
YU B L, JIA C Z, LIU K Y, et al. Multi-detachment-controlled thrust structures and deep hydrocarbon exploration targets in southern margin of Junggar Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2025, 52(3): 593-606. (in Chinese)
- [12] 王静,郝兆栋,陆冬华.基于恒速压汞技术研究页岩气储层孔隙结构:以湘西北地区五峰组页岩为例[J].地质与勘探,2021,57(2):450-456.
WANG J, XI Z D, LU D H. Pore structure of shale gas reservoirs revealed by constant-speed mercury injection experiments: A case study of Wufeng formation shale from northwestern Hunan Province[J]. Geology and Exploration, 2021, 57(2): 450-456. (in Chinese)
- [13] JIANG M L, ZHANG Y F, LIU Y. Analyzing the micro-pore characteristics of tight oil reservoirs through the implementation of mercury intrusion technique[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14: 1787.
- [14] 赵华伟,宁正福,赵天逸,等.恒速压汞法在致密储层孔隙结构表征中的适用性[J].断块油气田,2017,24(3):413-416.
ZHAO H W, NING Z F, ZHAO T Y, et al. Applicability of rate-controlled porosimetry experiment to pore structure characterization of tight oil reservoirs[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2017, 24(3): 413-416. (in Chinese)
- [15] CHALMERS G R, BUSTIN R M, POWER I M. Characterization of gas shale pore systems by porosimetry, pycnometry, surface area, and field emission scanning electron microscopy/transmission electron microscopy image analyses: Examples from the Barnett, Woodford, Haynesville, Marcellus, and Doig units[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(6): 1099-1119.
- [16] MASTALERZ M, SCHIMMELMANN A, DROBNIAK A, et al. Porosity of Devonian and Mississippian New Albany Shale across a maturation gradient: Insights from organic petrology, gas adsorption, and mercury intrusion[J]. AAPG Bulletin, 2013, 97(10): 1621-1643.
- [17] 久凯,丁文龙,王哲,等.黔北凤冈地区龙马溪组页岩储层储集空间划分与演化过程分析[J].地学前缘,2016,23(1):195-205.
JIU K, DING W L, WANG Z, et al. Reservoir space and evolution process of Longmaxi shale in the Fenggang area of northern Guizhou[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(1): 195-205. (in Chinese)
- [18] 陈萍,唐修义.低温氮吸附法与煤中微孔隙特征的研究[J].煤炭学报,2001,26(5):552-556.
CHEN P, TANG X Y. The research on the adsorption of nitrogen in low temperature and micro-pore properties in coal[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(5): 552-556. (in Chinese)
- [19] 胡鑫,姚卫江,胡正舟,等.准噶尔盆地白家海地区西山窑组深部煤岩储层孔隙结构表征及发育主控因素[J].中国石油大学学报(自然科学版),2024,48(4):12-23.
HU X, YAO W J, HU Z Z, et al. Pore structure characterization and main control factors of deep coal reservoir of

- Xishanyao formation in Baijiahai area, Junggar Basin[J]. *Journal of China University of Petroleum*(Edition of Natural Science), 2024, 48(4): 12-23. (in Chinese)
- [20] 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.
JIANG W P, ZHANG Q, JIANG Z B, et al. Effect on CBM drainage characteristics of pore structure of tectonic coal[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(1): 173-179. (in Chinese)
- [21] 陈富瑜, 周勇, 杨栋吉, 等. 基于分形理论的致密砂岩储层孔隙结构研究: 以鄂尔多斯盆地庆城地区延长组长7段为例[J]. *中国矿业大学学报*, 2022, 51(5): 941-955.
CHEN F Y, ZHOU Y, YANG D J, et al. Study of pore structure of tight sandstone reservoir based on fractal theory: A case study from Chang 7 tight sandstone of Yanchang formation in Qingcheng area, Ordos Basin[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2022, 51(5): 941-955. (in Chinese)
- [22] 李阳, 张玉贵, 张浪, 等. 基于压汞、低温 N_2 吸附和 CO_2 吸附的构造煤孔隙结构表征[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(4): 1188-1196.
LI Y, ZHANG Y G, ZHANG L, et al. Characterization on pore structure of tectonic coals based on the method of mercury intrusion, carbon dioxide adsorption and nitrogen adsorption[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(4): 1188-1196. (in Chinese)
- [23] YAO Y B, LIU D M, CHE Y, et al. Petrophysical characterization of coals by low-field nuclear magnetic resonance(NMR)[J]. *Fuel*, 2010, 89(7): 1371-1380.
- [24] ZHENG S J, YAO Y B, LIU D M, et al. Nuclear magnetic resonance T_2 cutoffs of coals: A novel method by multifractal analysis theory[J]. *Fuel*, 2019, 241: 715-724.
- [25] 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 J J, ZHANG Y L, YANG D, 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. (in Chinese)
- [26] 周新锐, 王喜鑫, 李少华, 等. 陆相混积型页岩储集层孔隙结构特征及其控制因素[J]. *新疆石油地质*, 2023, 44(4): 411-420.
ZHOU X R, WANG X X, LI S H, et al. Pore structure characteristics and controlling factors of continental mixed shale reservoirs[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2023, 44(4): 411-420. (in Chinese)
- [27] 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 H, TANG D Z, TAO S, 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. (in Chinese)

责任编辑: 张自强