

引用格式:张晨萱,刘桂珍,高荣晖,等.鄂尔多斯盆地东南部深层高阶煤储层孔隙结构及含气性[J].油气藏评价与开发,2026,16(5):974-982.

Zhang Chenxuan, Liu Guizhen, Gao Ronghui, et al. Pore structure and gas-bearing properties of deep high-rank coal reservoirs in southeastern Ordos Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2026, 16(5): 974-982.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2025145

鄂尔多斯盆地东南部深层高阶煤储层孔隙结构及含气性

张晨萱^{1,2}, 刘桂珍^{1,2}, 高荣晖^{1,2}, 野乐俊^{1,2}, 韩 铭^{1,2}, 蔺淑涵^{1,2}

(1. 西安石油大学地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 西安石油大学陕西省油气成藏地质学重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘要: 深层煤储层孔隙系统的跨尺度特征直接影响煤层气的赋存状态与渗流能力, 且对深层煤层气吸附/解吸过程具有重要影响。为了更好地评价深层煤层气含气量, 该研究以鄂尔多斯盆地东南部8号高阶煤为研究对象, 采用高压压汞、液氮(N₂)吸附和CO₂吸附及扫描电镜等实验手段多尺度表征深层高阶煤储层孔隙结构。结果表明: 深层高阶煤储层孔隙主要是有机质孔和微裂缝, 纳米级、微米级孔隙呈圆状、椭圆状, 微裂缝呈长条带状, 部分孔隙和裂缝充填黏土矿物和黄铁矿。深层高阶煤储层微孔、介孔、宏孔连续发育, 孔隙类型呈多峰态分布特征。其中, 微孔段曲线呈“台阶式”高峰, 其中0.4~0.7 nm微孔占绝对优势, 介孔(2~50 nm)优势孔径为3~5 nm, 孔径大于50 nm的宏孔与微裂缝发育程度相对较低, 但对储层渗透率贡献最大, 为游离气提供了主要储集空间。深层煤层气具有多相态赋存特征, 主要有吸附态和游离态。研究区8号煤层实测总含气量介于28.39~35.85 m³/t, 兰氏体积介于26.09~29.52 m³/t, 含气饱和度达116%~150%, 整体处于过饱和状态。总体上8号煤层微孔比表面积占99%以上, 深层高阶煤含气量以吸附气为主, 吸附能力仍是评价含气量的主控因素; 深部煤储层发育一定的宏孔和微裂缝, 其为游离气提供了储集空间, 深层煤层气整体处于过饱和状态, 普遍发育游离气, 且具有高含气饱和度。

关键词: 鄂尔多斯盆地东南部; 深层煤层气; 孔隙结构; 赋存状态; 8号煤

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Pore structure and gas-bearing properties of deep high-rank coal reservoirs in southeastern Ordos Basin

Zhang Chenxuan^{1,2}, Liu Guizhen^{1,2}, Gao Ronghui^{1,2}, Ye Lejun^{1,2}, Han Ming^{1,2}, Lin Shuhan^{1,2}

(1. School of Earth Science and Engineering, Xi'an Petroleum University, Xi'an, Shaanxi 710065, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an Petroleum University, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract: The cross-scale characteristics of pore systems in deep coal reservoirs directly affect the occurrence state and seepage capacity of coalbed methane (CBM), and have an important influence on the adsorption-desorption processes of deep CBM. To better evaluate the gas content of deep CBM, this study took the No. 8 high-rank coal seam as the study object in the southeastern Ordos Basin. Multiple experimental methods, including high-pressure mercury intrusion, liquid nitrogen (N₂) adsorption, carbon dioxide (CO₂) adsorption, and scanning electron microscopy (SEM), were adopted to characterize the pore structure of deep high-rank coal reservoirs at multiple scales. The results revealed that the pores in deep high-rank coal reservoirs were predominantly organic matter pores and microfractures. Nanoscale and micron-scale pores were circular or elliptical, while microfractures were long band-shaped. Some pores and fractures were filled with clay minerals and pyrite. Micropores, mesopores, and macropores were continuously developed in deep high-rank coal reservoirs, with pore sizes exhibiting multimodal distribution characteristics. Among them, the micropore segment curve showed a stepped peak, and micropores ranging from 0.4 nm to 0.7 nm occupied an absolutely dominant proportion. The dominant pore size of mesopores (2-50 nm) was 3-5 nm. Macropores with pore sizes larger than 50 nm and microfractures were relatively poorly developed, yet they contributed the most to reservoir permeability and served as the primary storage space for free gas. Deep CBM had multiphase occurrence characteristics, mainly occurring as

收稿日期: 2025-06-26。

第一作者简介: 张晨萱(2004—), 男, 本科, 主要从事非常规油气地质方面的研究。地址: 西安市鄠邑区五竹街道沣京路560号西安石油大学, 邮政编码: 710065。E-mail: yunmeng2233@qq.com

通信作者简介: 刘桂珍(1976—), 女, 博士, 副教授, 主要从事非常规油气地质方面的研究。地址: 西安市鄠邑区五竹街道沣京路560号西安石油大学, 邮政编码: 710065。E-mail: liuguizhen509@xsyu.edu.cn

基金项目: 陕西省重点研发计划项目“深部煤层气储层地质-工程一体化测井评价技术研究”(2025CY-YBXM-163); 国家级大学生创新创业训练项目“深层高阶煤储层孔隙结构特征及储气潜力分析——以鄂尔多斯盆地大宁—吉县区块为例”(S202410705054)。

adsorbed gas and free gas. The measured total gas content of the No. 8 coal seam in the study area ranged from 28.39 m³/t to 35.85 m³/t. The Langmuir volume varied between 26.09 m³/t and 29.52 m³/t, and the gas saturation reached 116%–150%, indicating an overall oversaturated state. Overall, micropores accounted for more than 99% of the specific surface area of the No. 8 coal seam. The gas content of deep high-rank coal was dominated by adsorbed gas, and adsorption capacity remained the primary controlling factor for gas content evaluation. Deep coal reservoirs contained some macropores and microfractures that provided storage space for free gas. Deep CBM was generally in an oversaturated state, with widespread free gas and high gas saturation.

Keywords: southeastern Ordos Basin; deep coalbed methane (CBM); pore structure; occurrence state; No. 8 coal seam

“煤层气”是指煤岩自身生成或其他气源运移而赋存于煤岩中,游离态和吸附态并存,且游离气含量高,通过储层改造可快速产气并能获得工业化开采的烃类气体^[1]。深层煤层气在储层类型上与浅层煤层气相似,在天然气赋存特征上与页岩气相似,在开发方式上与页岩气、致密气相似,是一种特殊类型的非常规天然气资源。有学者将煤层气定义为以煤作为储集岩且处于开采经济技术极限深度以下煤层中的天然气,这个极限深度一般是1 500 m^[2]。关于深层煤层气埋藏深度的界定,业内前沿未形成统一认识,有强调1 500 m以深^[3–4],也有强调2 000 m以深^[5–8],还有强调以“临界深度”为限,由于“临界深度”在不同盆地、同一盆地不同构造带深度不一,所以是个动态数据。据估算,煤岩吸附能力的转折深度一般约1 500 m^[7],因此1 500 m符合考虑当前经济技术条件下煤炭开采极限深度和煤岩吸附能力的双重约束。

深层煤层气是非常规油气的重要组成部分。据估算,1 500 m以深的煤层气资源量约为50×10¹² m³,是浅层煤层气资源量的2.4倍^[9]。深层煤层气具有多相态赋存特征,不仅有吸附气,还有游离气,且游离气占比可达20%~50%^[10],这一特性使得深层煤层气在开采时,压后开井即可迅速实现高产,无需像浅层煤层气开发那样经历漫长的排水过程,经济效益远超传统浅层煤层气开发模式^[11]。然而,深层煤储层的开发面临诸多严峻挑战,其处于“高地温、高储层压力、高地应力”的三高环境,且具有较强的非均质性^[12]。在深埋藏环境中,气体以吸附态、游离态和溶解态等多种相态共存。其中,游离气的占比有所提高,这赋予深层煤层气同时具备常规与非常规双重地质属性^[13]。

鄂尔多斯盆地东南部本溪组8号煤储层属于高阶煤储层($R_o > 2.5\%$, R_o 为镜质体反射率),经历了深变质演化,具有复杂孔隙网络。孔隙系统呈现跨尺度特征,微孔占比高达99%,1~10 μm过渡带孔隙连通性较差,导致储气空间预测误差超过30%^[14]。此外,高地应力对煤储层孔隙结构影响显著,渗流孔隙度随围压的增加呈负指数型下降,当围压由5 MPa增至40 MPa时,降幅可达62%。这些复杂因素相互交织,极大地增加了煤储层评价与开发方案优化难度,严重制约了深层煤层气高效开发。

高阶煤具有生气量大、甲烷吸附能力强的特征,也是煤层气富集的物质基础^[15],埋藏深度、地质构造(含构造应力场)、煤体结构等决定高阶煤储层渗透率^[16],是煤层气富集关键主控因素^[17]。大宁—吉县地区作为中国首个实现1 500 m以深煤层气商业化开发示范区,其深层8号煤层(埋深介于1 500~2 400 m)在开发实践中成绩斐然^[5,18],单井日产量突破10×10⁴ m³,探明地质储量超1 100×10⁸ m³^[19]。该区块具有煤阶高、镜质体反射率(R_o)普遍大于2.8%、游离气占比高特点,呈现出“吸附–游离”双模态储集特征,且地层压力系数介于1.0~1.2,含气量较浅层煤层气提升2倍^[15]。这些特征使大宁—吉县区块成为研究深层煤层气高效开发的典型实例,对其开展深入研究,对于深层煤层气的开发具有重要的参考意义^[14,20–21]。

本文重点讨论深层高阶煤储层孔隙结构特征,通过对高阶煤储层多尺度孔隙结构进行精细化表征,并分析孔隙结构对深层高阶煤储层游离气与吸附气赋存的影响。该研究为深层高阶煤储层中煤层气高效开发靶区的优选提供理论依据,对于推动中国煤层气产业向深层领域拓展具有重要的理论和实践价值。

1 地质背景及样品

1.1 地质概况

研究区位于鄂尔多斯盆地东南缘,构造处于晋西挠褶带南端及伊陕斜坡,区内总体为向西倾斜的单斜构造,局部发育鼻状隆起带(图1a)。

研究区内主力煤层为本溪组顶部8号煤层(图1b),主要由海陆过渡相潮坪–潟湖沉积环境下泥炭堆积形成。8号煤层埋藏深度介于1 500~2 300 m,煤层连续性好,厚度介于3~15 m,平均12 m,纵向上夹矸1~2层,整体完整性较好,煤体结构以原生煤体结构为主。

1.2 煤样基础参数

煤岩样取自吉县地区8号煤层,均通过钻井取心获得,采样点平面上分布于西部平缓带,测试结果见表1。取样深度介于1 888~1 890 m,以光亮煤—半亮煤为主,镜质组含量介于60.5%~62.7%。镜质体最大反射率介

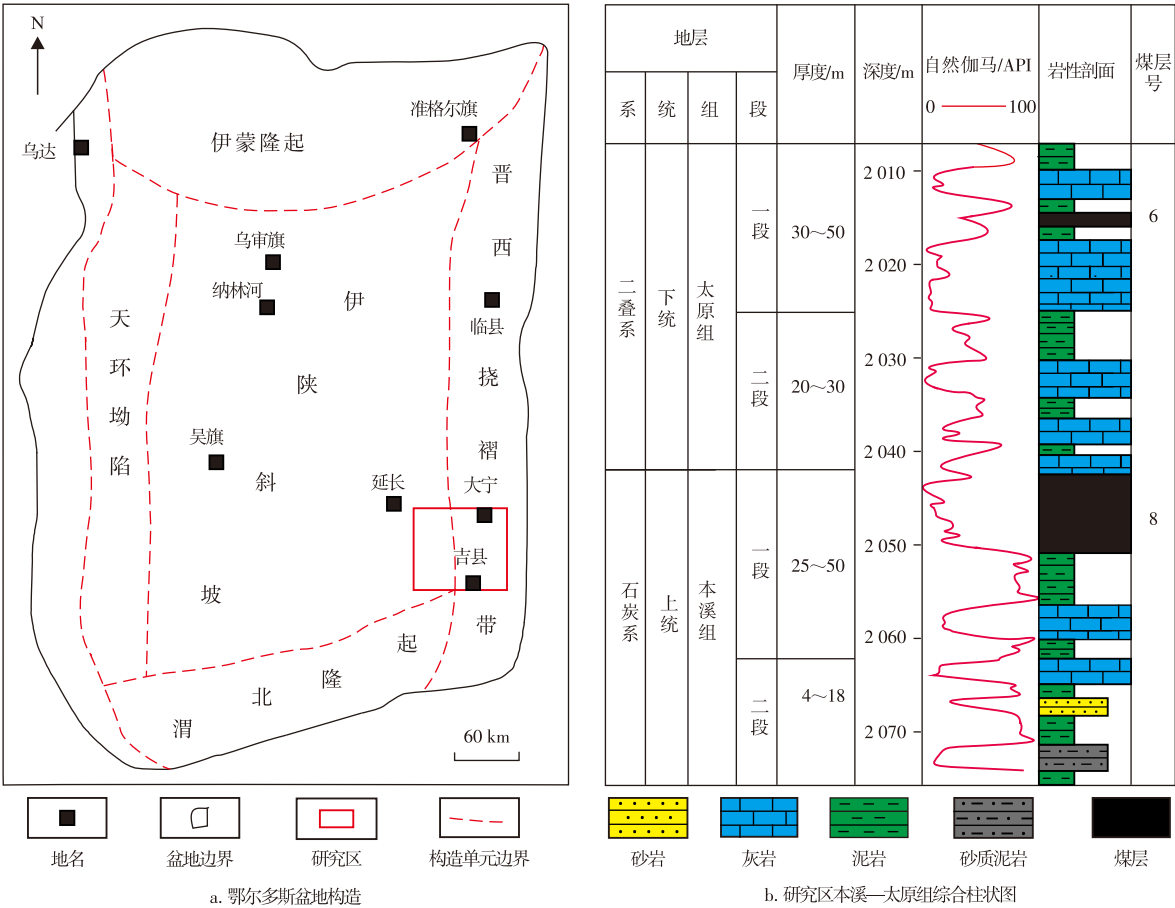


图1 鄂尔多斯盆地东南部研究区位置与综合柱状图

Fig. 1 Location of study area in southeastern Ordos Basin and comprehensive stratigraphic column

于2.90%~3.17%,属高阶煤。工业组分具有低水分、低挥发分、中低灰分特征(表1),煤样测试平均孔隙度为5.74%,平均渗透率为 $0.052 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属低孔,低渗煤储层。

表1 煤储层样品实验参数统计

Table 1 Experimental parameters of coal reservoir samples

样品 编号	工业组分/%				有机组分/%		无机组分/%				镜质体 反射率/%	孔隙度/ %	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$
	水分	灰分	挥发分	固定碳	镜质组	惰质组	黏土类	硫化铁类	碳酸盐类	氧化硅类			
W1	0.69	10.56	6.13	82.63	62.7	29.5	3.6	0.6	0.4	3.2	3.07	5.81	0.086 1
W2	0.63	8.81	6.34	84.23	61.3	31.3	3.7	0.4	0.7	2.6	2.91	5.17	0.005 4
W3	0.62	14.85	6.58	77.96	60.5	31.9	4.8	0.4	0.4	2.0	3.17	6.29	0.026 8
W4	1.00	27.25	7.89	63.87	61.4	29.2	5.5	0.4	0.4	2.1	2.90	5.67	0.093 0

2 深层高阶煤储层孔隙结构特征

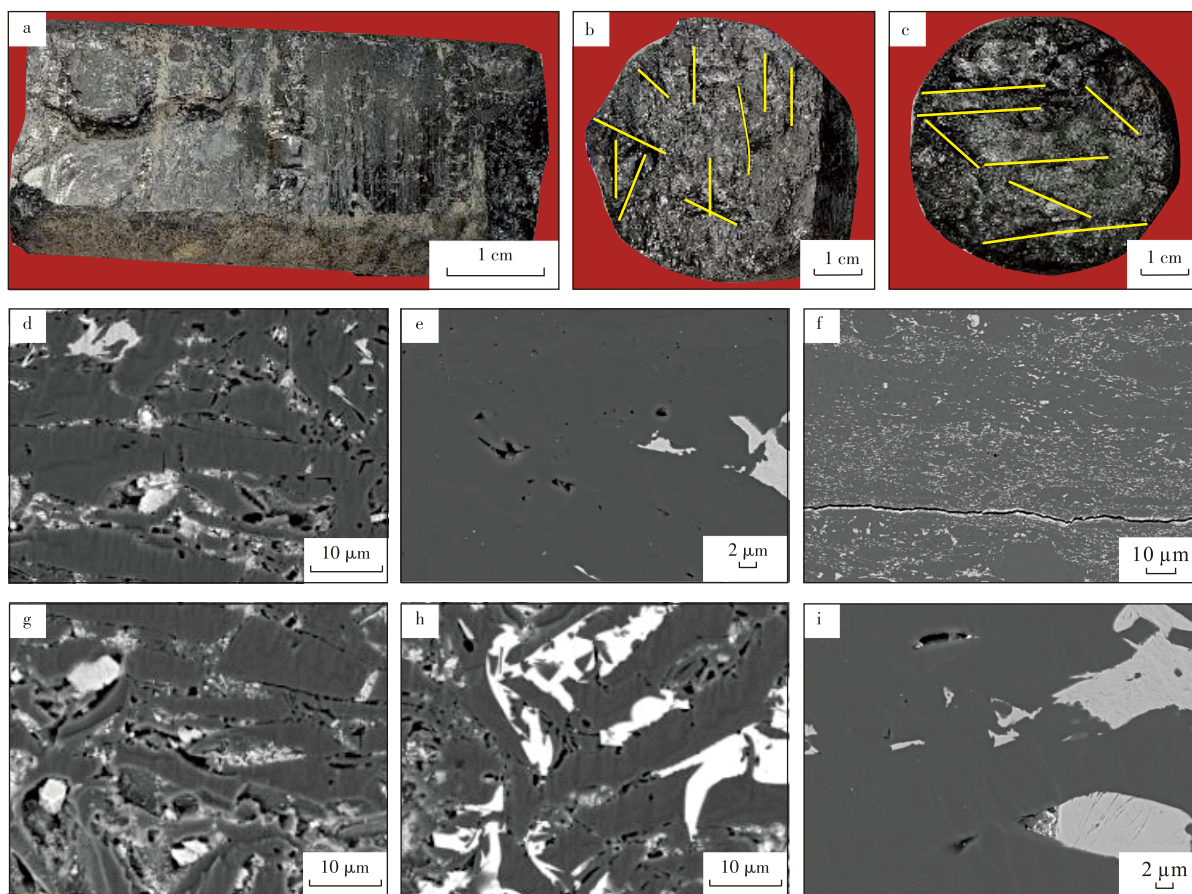
2.1 孔隙类型

研究区8号煤层主要发育半亮煤—半暗煤,夹亮煤和镜煤(图2a、图2b、图2c),煤层坚硬,煤岩中面割理发育(图2b、图2c)。主要孔隙类型为有机质孔和微裂缝,有机质呈长条带状展布(图2d),部分纳米级、微

米级孔隙呈圆状、椭圆状(图2e),煤岩中微裂缝呈长条带状发育(图2f),孔隙中部分充填黏土矿物和黄铁矿(图2g),碳酸盐矿物发育,与有机质直接接触,孔隙发育具有定向性(图2h),孔隙中充填的矿物微裂缝发育(图2i)。

2.2 基于流体侵入的孔隙结构定量表征

分别采用高压压汞、液氮(N₂)和CO₂吸附实验测试



注:a为W1,半亮煤,阶梯状断口,夹细、中、宽条带状亮煤、镜煤;b为W1,半亮煤,割理发育;c为W2,半亮煤,割理发育;d为W3,不同级别的孔隙大量发育,部分孔隙充填黄铁矿和黏土矿物;e为W1,微米、纳米级孔隙,孔隙呈椭圆、长条带状;f为W2,长条状裂隙发育;g为W4,不同级别孔隙发育,呈长条带状,孔隙中部分充填黏土矿物、黄铁矿;h为W4,碳酸盐矿物发育,孔隙部分半充填;i为W1,无机矿物内裂缝发育。

图2 煤储层岩心照片和扫描电镜下孔隙特征

Fig. 2 Coal reservoir core photographs and pore characteristics under scanning electron microscopy

表征不同尺度孔隙结构。孔径分类划分为微孔(孔径小于2 nm)、介孔(孔径介于2~50 nm)、宏孔(孔径大于50 nm)。针对各测试方法特点,选取测试方法最优孔径下限作为拼接孔隙,即压汞测试优势孔径范围为50 nm以上(利用孔隙体积与阶段进汞饱和度的乘积求取各孔径段孔隙体积),低温 N_2 吸附测试优势孔径范围介于2~50 nm, CO_2 吸附法优势测试孔径小于2 nm。因此,选取2 nm和50 nm为 CO_2 吸附、低温 N_2 吸附和高压压汞3种方法测试孔隙孔径拼接点^[22]。

2.2.1 CO_2 吸附实验

CO_2 吸附法主要表征微孔(孔径小于2 nm的孔隙)吸附特征,吸附量均随相对压力(p/p_0 , p 为实验中测得的平衡压力,即 CO_2 气体在样品腔中达到吸附平衡时的实际分压, p_0 为实验温度下 CO_2 的饱和蒸气压)增加而上升(图3a)。其中W3样品吸附量在各压力点都高于其他样本,表明其对 CO_2 的吸附能力最强;W4样品吸附量相对最低,吸附能力较弱。前期曲线斜率较大,意味着

在较低压力下吸附速率较快,之后随着压力的增加,曲线斜率变小,吸附速率趋于平缓,显示出吸附逐渐接近饱和状态。

CO_2 吸附测试结果显示,样品的孔径主要分布在0.4~0.7 nm,该区间对应比表面积与孔容的优势区间,是主要吸附气赋存空间(图3b、图3c)。煤岩微孔样品基于DR方程计算微孔比表面积(DR-SSA)介于128.098~215.934 m^2/g ,平均值为175.443 m^2/g , CO_2 吸附法测定的基于DA方程计算微孔体积(DA-TPV)介于0.036~0.068 cm^3/g ,平均值为0.054 cm^3/g (表2),整体上,微孔比表面积和微孔总孔体积均表现出随孔径增加而增大的趋势,且二者呈现一样的趋势。

2.2.2 N_2 吸附实验

采用低温 N_2 吸附实验来表征2~50 nm介孔与宏孔的孔隙结构特征。高阶煤样低温 N_2 吸附/解吸等温线整体呈现出“S”型特征(图4a)。当相对压力小于0.8时,吸附曲线趋于平缓,表明单分子层吸附过程已完成,

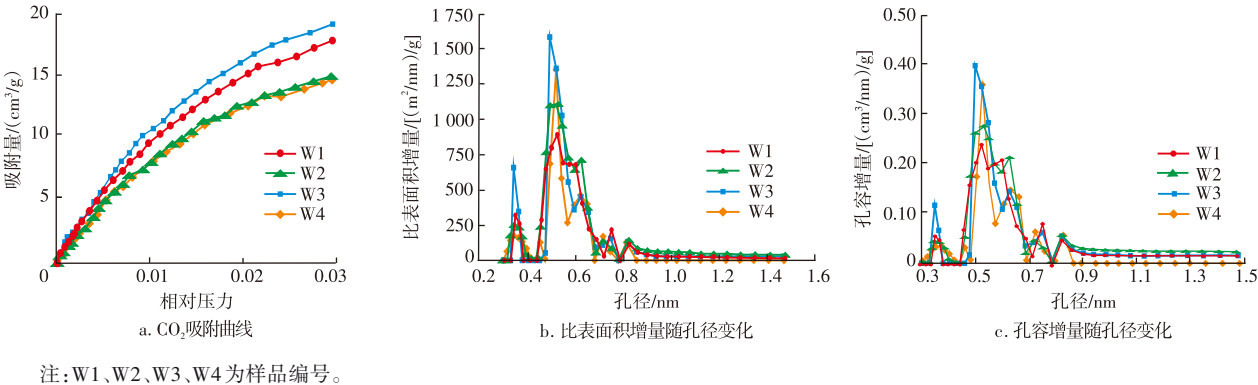


图3 CO₂吸附曲线及孔径分布
Fig. 3 CO₂ adsorption curves and pore size distribution

表2 CO₂吸附微孔参数统计
Table 2 CO₂ adsorption micropore parameters

样品号	微孔比表面积/(m²/g)				微孔体积/(cm³/g)				平均孔径/nm
	<0.4 nm	0.4~0.7 nm	>0.7 nm	小计	<0.4 nm	0.4~0.7 nm	>0.7 nm	小计	
W1	9.162	133.249	32.050	174.460	0.002	0.037	0.016	0.055	0.524
W2	15.022	164.088	36.824	215.934	0.003	0.046	0.019	0.068	0.524
W3	15.598	143.290	24.390	183.280	0.003	0.040	0.011	0.055	0.501
W4	12.432	109.158	6.508	128.098	0.002	0.031	0.003	0.036	0.524

开始了多分子层吸附过程。但气体吸附率随着相对压强逐渐增加,当相对压力大于0.8时,增长速率上涨,到达近乎饱和状态。表明孔隙形态为两端开放的平行板孔和狭缝型孔^[23];当相对压力为0.5时,解吸曲线有急剧下降拐点,说明煤储层发育一定数量“墨水瓶”形孔。

孔隙比表面积增量与孔容增量均随孔径变化呈单峰分布,峰值主要介于3.4~4.3 nm(图4b、图4c、表3)。

2.2.3 高压压汞实验

深层高阶煤储层毛细管压力曲线呈“直立状”,整体表现为排驱压力高,接近5 MPa。当毛细管压力小于5 MPa时,压汞曲线近似直立,进汞量几乎不增加;当毛细管压力介于10~50 MPa,进汞量逐渐增大;当毛细管压力大于50 MPa时,进汞量快速增加,但整体上最大进汞饱和度低,平均仅为38.9%(图5a),表明该类样品以发育孔径不大于50 nm的微孔和介孔为主,而孔径大于50 nm

的宏孔和裂隙相对比较少,但这些少量宏孔对储层的渗透率贡献最大(图5b),其比表面积主要由微孔和介孔提供(表4)。

2.2.4 孔隙结构综合对比

基于压汞、低温N₂吸附和CO₂吸附实验计算出宏孔、介孔和微孔各孔径对应的孔隙体积,按照将各测试重叠区实验介质体积相等的孔径作为衔接孔径、弱化渗流孔径表征分歧为原则,进行煤样全尺度孔径拼接。其中,将孔径2 nm、50 nm 分别作为CO₂吸附法与低温N₂吸附法、低温N₂吸附法与压汞分析的界限。首先,根据各个实验可信且相邻重叠区间,根据高压压汞、低温N₂吸附及CO₂吸附3种测试方法特点,结合数据可信区间重叠范围与仪器精度,确定孔径拼接窗口为2 nm和50 nm。在界定拼接间和重叠区后,取CO₂数据中最大孔径点(如1.8 nm)到N₂数据中最小孔径点(如2.2 nm)之间的区

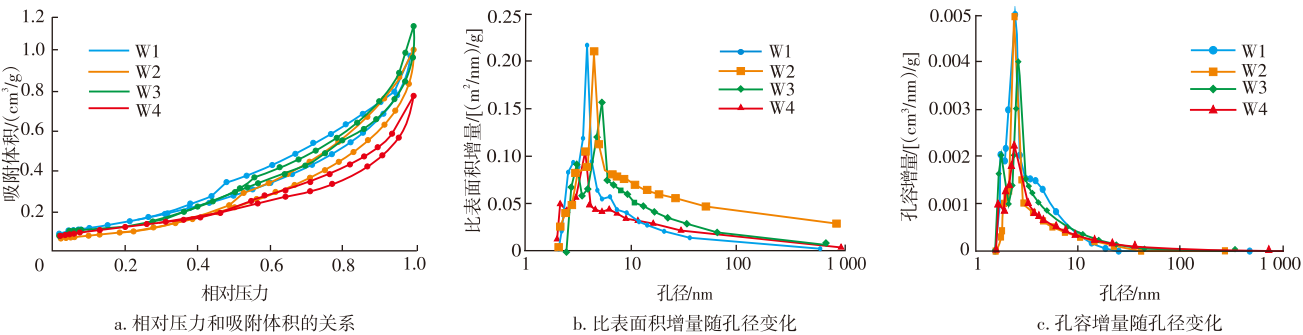


图4 低温N₂吸附曲线及孔径分布
Fig. 4 Low-temperature N₂ adsorption curves and pore size distribution

表3 低温 N₂ 吸附煤储层参数统计
Table 3 Coal reservoir parameters from low-temperature N₂ adsorption

样品号	BET-SSA/(m ² /g)				BJH-TPV/(cm ³ /g)				平均孔径/ nm
	2~<10 nm	10~50 nm	>50 nm	小计	2~<10 nm	10~50 nm	>50 nm	小计	
W1	0.982 6	0.097 9	0.001 4	0.563 0	0.001 0	0.000 5	0.000 2	0.002 0	3.876 0
W2	0.777 4	0.129 1	0.002 8	0.401 0	0.000 9	0.000 5	0.000 3	0.002 0	3.849 0
W3	0.955 9	0.116 5	0.002 1	0.488 0	0.001 1	0.000 5	0.000 4	0.002 0	4.205 0
W4	0.588 0	0.075 0	0.000 9	0.438 0	0.000 7	0.000 3	0.000 3	0.001 0	3.968 0

注:BET-SSA 为基于 BET 方程计算孔隙比表面积;BJH-TPV 为基于 BJH 方程计算孔隙总孔体积。

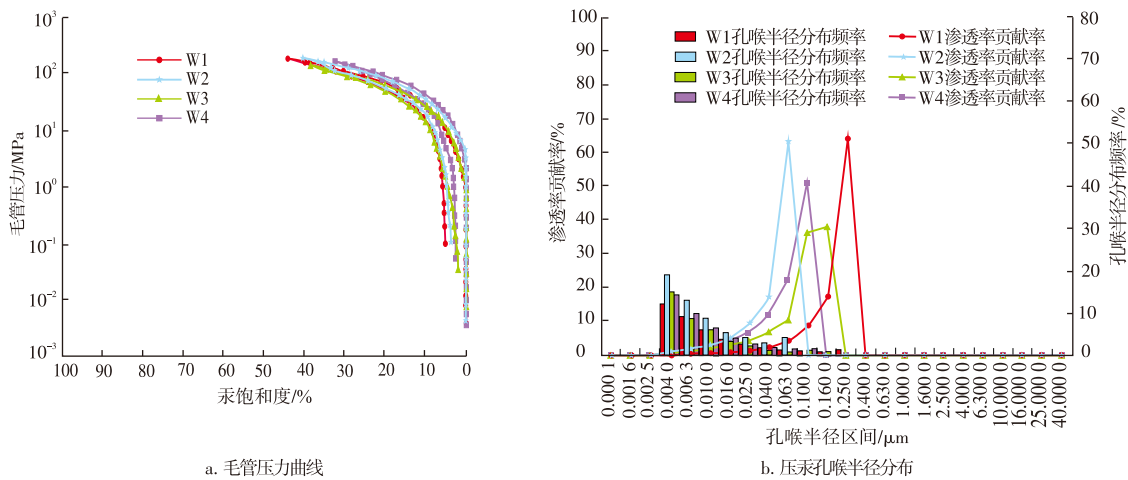


图5 高压压汞曲线和孔喉半径分布
Fig. 5 High-pressure mercury injection curves and pore-throat radius distribution

表4 基于高压压汞实验煤储层参数统计
Table 4 Coal reservoir parameters based on high-pressure mercury injection experiments

样品 编号	孔隙率/%	排驱压力/ MPa	退效率 率/%	孔径比例/%		比表面积/(m ² /g)			孔容/(cm ³ /g)		
				≤50 nm	>50 nm	S	S ₁	S ₂	V	V ₁	V ₂
W1	5.81	2.057	88.4	94.37	5.63	36.4	36.1	0.35	0.042 6	0.040 2	0.002 4
W2	5.17	8.267	91.0	96.16	3.84	30.0	29.7	0.29	0.036 4	0.035 0	0.001 4
W3	6.29	4.129	95.2	96.61	3.39	35.8	35.6	0.24	0.044 2	0.042 7	0.001 5
W4	5.67	5.501	91.8	96.28	3.72	25.8	25.6	0.18	0.037 6	0.036 2	0.001 4

注:S为总比表面积;S₁为介孔和微孔(孔隙半径小于50 nm)的比表面积;S₂为宏孔(孔隙半径大于50 nm)的比表面积;V为总孔容;V₁为介孔和微孔孔容(孔隙半径小于50 nm);V₂为宏孔孔容(孔隙半径大于50 nm)。

域,确保覆盖衔接(如2 nm)。实际范围根据具体仪器的有效检测限和数据点密度调整,对于对应数据重叠范围进行积分确定重叠窗口内的数据孔隙体积;符合“体积相等原则”。根据“弱化渗流孔径分歧”原则对重叠区两侧原始数据进行插值使得数据表现平滑采取数学上的加权平均融合,对于重叠区内的每一个孔径点 D_i 有对应的融合值如下:

$$F_i = W_2(D_i) \times N_{2_scaled}(D_i) + [1 - W_2(D_i)] \times MIP(D_i) \quad (1)$$

式中: F_i 为第 i 个孔径点 D_i 对应的融合值; D_i 为第 i 个孔径点; $W_2(D_i)$ 为孔径点 D_i 处N₂吸附数据的权重函数; $N_{2_scaled}(D_i)$ 为标准化后的N₂吸附法在孔径点 D_i 处的孔隙体积数据;MIP(D_i)为压汞法在孔径点 D_i 处的孔隙体积数据。

权重函数 $W_2(D_i)$ 的根据: $W_2(D_i)$ 在重叠区起始点(靠近N₂优势区,如45 nm)取值1,表示完全信任N₂数据。 $W_2(D_i)$ 在重叠区结束点(靠近MIP优势区,如55 nm)取值0,表示完全信任MIP数据。在两点之间光滑过渡。这是针对压汞法因喉道控制(渗流特性)与气体吸附法因腔体表征在重叠区产生系统性差异的问题所采取的数据融合策略。其核心操作是在选定的重叠窗口内,使用光滑变化的权重函数对两种方法缩放后的数据进行加权平均,从而强制实现拼接曲线的平滑过渡,特别弱化压汞数据中可能存在的渗流孔径突变点的影响,最终获得1条连续、完整的全孔径分布曲线。对区内煤储层孔隙结构全尺度精细定量表征(图6),孔径整体呈连续性分布,孔隙发育表现为多峰态特征,其中,微孔孔径在0.4~0.7 nm

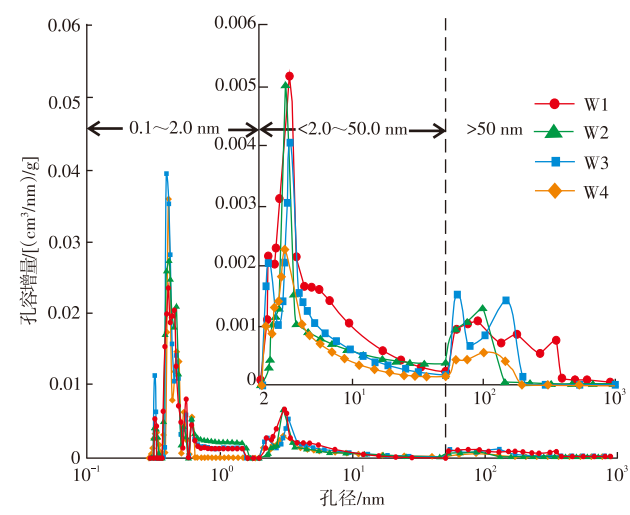


图6 多尺度表征孔隙结构拼接

Fig 6 Splicing of multi-scale pore structure characterization

表5 鄂尔多斯盆地东南部研究区8号煤层含气量统计

Table 5 Gas content in No. 8 coal seam of study area in southeastern Ordos Basin

样品编号	层位	深度/m	兰氏压力/MPa	兰氏体积/(m³/t)	理论含气量/(m³/t)	总含气量/(m³/t)	吸附气含气饱和度/%
W1	8号煤层	1 888.20	2.41	27.540	24.48	28.39	116
W2	8号煤层	1 888.80	1.51	26.091	24.20	35.85	148
W3	8号煤层	1 889.41	1.98	29.517	26.78	35.66	133
W4	8号煤层	1 890.65	2.75	26.127	22.87	34.43	150

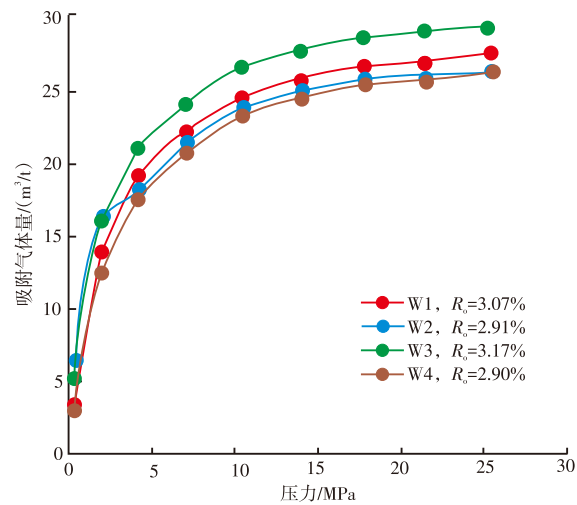


图7 煤储层等温吸附曲线

Fig. 7 Adsorption isotherms of coal reservoirs

深层煤层气主要以吸附态和游离态赋存于煤岩孔隙和裂隙中,只有极少一部分以溶解态存在。吸附气主要吸附于煤基质和无机矿物颗粒表面^[26],游离气主要充填于大孔隙和裂缝中。利用核磁共振测试表征煤样内孔隙水的赋存(可动或束缚)状态,获取深层煤可动流体孔隙率^[27],因此可以假设深层煤储层不产水情况下,大孔隙中充满游离气。研究区8号煤层核磁谱显示在饱水状态下整体形态为驼峰型(图8)。T₂(横向弛豫时间)谱曲线存

处出现明显优势峰。微孔(孔径小于2 nm)孔容占比最大,体现出研究区8号煤层以微孔为主,同时发育少量的介孔和宏孔。

3 深层高阶煤流体赋存特征

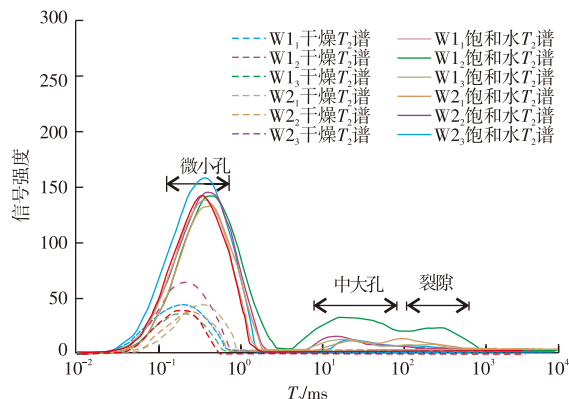
深层煤层气具有“含气量高、含气饱和度高”的特征^[24-25]。区内8号煤层实测含气量介于28.39~35.85 m³/t,平均27.30 m³/t;等温吸附实验测试8号煤层V_L(兰氏体积)介于26.09~29.52 m³/t,平均27.30 m³/t,p_L(兰氏压力)介于1.51~2.75 MPa,平均2.16 MPa(表5),计算吸附气含气饱和度介于116%~150%,变化比较大,总体上处于过饱和状态。等温吸附曲线进一步揭示,随着镜质体反射率的增加,高阶煤吸附量增加(图7)。

在2个峰,第一个峰集中分布在0.05~2.00 ms,为微小孔;第二个峰指示了煤样中发育着渗流孔隙(T₂谱介于5~30 ms)和微小裂隙(T₂谱大于30 ms),流体可以在部分渗流孔隙和裂隙中自由流动,离心后能够被甩出^[28-29]。

该样品中的3个谱峰分别反映了3种孔裂隙类型分布。其中,微小孔峰值最高,说明微小孔最发育;中大孔峰值较低,且在离心后部分谱峰消失,说明中大孔发育相对较少,但具备一定的连通性,可使部分自由流体离出;微小孔和中大孔两峰之间不连续,说明这两类孔隙间连通性差,而中大孔和裂隙两峰间的连续性好,说明这两类孔隙间连通性好(图8)。

煤岩孔隙结构对煤层气赋存、渗流及产出都具有一定的影响。对比核磁与全直径拼接2种方法表征煤岩储层孔隙结构特征,表现出煤岩各孔径段分布直方图与核磁共振T₂谱峰分布具有相似性,即全直径表征的微孔比例越高,则T₂谱中微孔的谱峰和谱面积也越大,且小于2 nm的微孔和大孔之间出现分布间断,在核磁上体现出了2类孔隙不连续性,因此2种方法表征孔隙结构具有一致性。

研究区综合分析认为8号煤层以微孔为主,微孔比表面积占有99%以上,伴有介孔、宏孔、微裂缝发育;深层高阶煤含气量仍以吸附气为主,吸附能力仍是含气量的主控因素。宏孔和微裂缝为游离气提供了储集空间,



注: W1₁、W1₂、W1₃、W2₁、W2₂、W2₃为样品编号。

图8 饱和水与离心条件下核磁共振 T_2 谱分布

Fig. 8 Nuclear magnetic resonance (NMR) T_2 spectrum distribution under saturated water and centrifugation

深层煤层气整体处于过饱和状态,普遍发育游离气,且具有高含气饱和度。

4 结论

1) 深层高阶煤岩储层8号煤层主要为半亮煤—半暗煤,夹亮煤和镜煤,具有低孔、低渗特征。孔隙类型主要为有机质孔和微裂缝,有机质孔呈短条带状展布,部分纳米级、微米级孔隙呈圆状、椭圆状,煤岩中微裂缝呈长条带状发育。

2) CO_2 吸附实验表明,0.4~0.7 nm 孔径的微孔占据绝对优势,提供了大量吸附比表面,为煤层气吸附提供场所。 N_2 吸附表明,介孔以 3~5 nm 孔径为主,是煤层气扩散和渗流的重要通道,连接着微孔和宏孔,起到桥梁作用。高压压汞表征结果显示,样品中大于 50 nm 的孔隙占比偏少,但这类孔隙主要提供游离气储集空间和渗流通道,有利于游离气赋存。

3) 深层高阶煤储层微孔、介孔、宏孔均连续发育,孔隙体积呈多峰态特征,其中微孔呈“台阶式”高峰,其中微孔(小于 2 nm)占有优势孔比表面积和孔容积,而介孔(2~50 nm)相对比较少,宏孔(大于 50 nm)和微裂缝有一定比例发育。

4) 研究区8号煤层以微孔为主,微孔比表面积占 99% 以上,伴有介孔、宏孔、微裂缝发育;深层高阶煤含气量仍以吸附气为主,吸附能力仍是含气量的主控因素,宏孔和微裂缝为游离气提供了储集空间,深层煤层气整体处于过饱和状态,普遍发育游离气,且具有高含气饱和度。

参考文献

[1] 李国欣,张水昌,何海清,等. 煤岩气: 概念、内涵与分类标准[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(4): 783-795.

Li Guoxin, Zhang Shuichang, He Haiqing, et al. Coal-rock gas: concept, connotation and classification criteria[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(4): 783-795.

[2] 周立宏,熊先钺,丁蓉,等. 煤岩气内涵、富集机理及实践意义[J]. 天然气工业, 2025, 45(3): 1-15.

Zhou Lihong, Xiong Xianyue, Ding Rong, et al. Connotation, enrichment mechanism and practical significance of coal-rock gas [J]. Natural Gas Industry, 2025, 45(3): 1-15.

[3] 房大志,程泽虎,李佳欣. 渝东南地区超深层煤层气高效压裂技术及精细排采制度研究与实践: 以 NY1 井为例[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(5): 50-56.

Fang Dazhi, Cheng Zehu, Li Jiaxin. Efficient fracturing technology and fine drainage system of ultra-deep coalbed methane in southeast Chongqing: a case study of NY1 well[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(5): 50-56.

[4] 郭旭升,胡宗全,李双建,等. 深层—超深层天然气勘探研究进展与展望[J]. 石油科学通报, 2023, 8(4): 461-474.

Guo Xusheng, Hu Zongquan, Li Shuangjian, et al. Progress and prospect of natural gas exploration and research in deep and ultra-deep strata[J]. Petroleum Science Bulletin, 2023, 8(4): 461-474.

[5] 李曙光,王成旺,王红娜,等. 大宁—吉县区块深层煤层气成藏特征及有利区评价[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(9): 59-67.

Li Shuguang, Wang Chengwang, Wang Hongna, et al. Reservoir forming characteristics and favorable area evaluation of deep coalbed methane in Daning-Jixian Block[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(9): 59-67.

[6] 江同文,熊先钺,金亦秋. 深部煤层气地质特征与开发对策[J]. 石油学报, 2023, 44(11): 1918-1930.

Jiang Tongwen, Xiong Xianyue, Jin Yiqiu. Geological characteristics and development countermeasures of deep coalbed methane[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(11): 1918-1930.

[7] 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.

[8] 熊先钺,甄怀宾,李曙光,等. 大宁—吉县区块深部煤层气多轮次转向压裂技术及应用[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(2): 147-160.

Xiong Xianyue, Zhen Huaibin, Li Shuguang, et al. Multi-round diverting fracturing technology and its application in deep coalbed methane in the Daning-Jixian block[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(2): 147-160.

[9] 吴裕根,门相勇,娄钰. 我国“十四五”煤层气勘探开发新进展与前景展望[J]. 中国石油勘探, 2024, 29(1): 1-13.

Wu Yugen, Men Xiangyong, Lou Yu. New progress and prospect of coalbed methane exploration and development in China during the 14th Five-Year Plan period[J]. China Petroleum Exploration, 2024, 29(1): 1-13.

[10] 许耀波,朱玉双. 高阶煤的孔隙结构特征及其对煤层气解吸的影响[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(1): 84-92.

Xu Yaobo, Zhu Yushuang. Pore structure characteristics of high rank coal and its effect on CBM desorption[J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(1): 84-92.

[11] 李勇,高爽,吴鹏,等. 深部煤层气游离气含量预测模型评价与校

- 正:以鄂尔多斯盆地东缘深部煤层为例[J]. 石油学报, 2023, 44(11): 1892–1902.
- Li Yong, Gao Shuang, Wu Peng, et al. Evaluation and correction of prediction model for free gas content in deep coalbed methane: a case study of deep coal seams in the eastern margin of Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(11): 1892–1902.
- [12] 陈世达, 侯伟, 汤达祯, 等. 煤储层含气性深度效应与成藏过程耦合关系[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(2): 52–59.
- Chen Shida, Hou Wei, Tang Dazhen, et al. Effects of depth on gas bearing properties of coal reservoirs and their coupling relationships with coalbed methane accumulation[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(2): 52–59.
- [13] 申建, 秦勇. 深部煤层气成藏效应[M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 2017.
- Shen Jian, Qin Yong. Deep coalbed methane accumulation effect[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [14] 张雷, 边利恒, 侯伟, 等. 深部煤储层孔隙结构特征及其勘探意义:以鄂尔多斯盆地东缘大宁—吉县区块为例[J]. 石油学报, 2023, 44(11): 1867–1878.
- Zhang Lei, Bian Liheng, Hou Wei, et al. Pore structure characteristics and exploration significance of deep coal reservoirs: a case study of Daning–Jixian block in the eastern margin of Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(11): 1867–1878.
- [15] Ma X Z, Song Y, Liu S B, et al. Experimental study on history of methane adsorption capacity of Carboniferous–Permian coal in Ordos Basin, China[J]. *Fuel*, 2016, 184: 10–17.
- [16] 李鑫. 构造对深层煤层气井产能的控制研究[J]. 油气藏评价与开发, 2021, 11(4): 643–651.
- Li Xin. Structural control on productivity of deep coalbed methane wells[J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2021, 11(4): 643–651.
- [17] 桑树勋, 韩思杰, 刘世奇, 等. 高煤阶煤层气富集机理的深化研究[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 388–403.
- Sang Shuxun, Han Sijie, Liu Shiqi, et al. Comprehensive study on the enrichment mechanism of coalbed methane in high rank coal reservoirs[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 388–403.
- [18] 杨秀春, 徐凤银, 王虹雅, 等. 鄂尔多斯盆地东缘深部煤层气勘探开发历程与启示[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(3): 30–41.
- Yang Xiuchun, Xu Fengyin, Wang Hongya, et al. Exploration and development process of coalbed methane in eastern margin of Ordos Basin and its enlightenment[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(3): 30–41.
- [19] 单长安, 张廷山, 梁兴, 等. 富镜质组和富惰质组高阶煤纳米孔隙结构特征[J]. 石油学报, 2020, 41(6): 723–736.
- Shan Chang'an, Zhang Tingshan, Liang Xing, et al. Nanopore structure characteristics of high-rank vitrinite-and inertinite-coal[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(6): 723–736.
- [20] 唐淑玲, 汤达祯, 杨焦生, 等. 鄂尔多斯盆地大宁—吉县区块深部煤储层孔隙结构特征及储气潜力[J]. 石油学报, 2023, 44(11): 1854–1866.
- Tang Shuling, Tang Dazhen, Yang Jiaosheng, et al. Pore structure characteristics and gas storage potential of deep coal reservoirs in Daning–Jixian block of Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(11): 1854–1866.
- [21] 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.
- [22] 吴见, 孙强, 石雪峰, 等. 深部煤层孔隙结构与流体差异赋存特征研究[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(8): 89–100.
- Wu Jian, Sun Qiang, Shi Xuefeng, et al. Pore structure and differential fluid occurrence of deep coal seams[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(8): 89–100.
- [23] 杨甫, 贺丹, 马东民, 等. 低阶煤储层微观孔隙结构多尺度联合表征[J]. 岩性油气藏, 2020, 32(3): 14–23.
- Yang Fu, He Dan, Ma Dongmin, et al. Multi-scale joint characterization of micro-pore structure of low-rank coal reservoir[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2020, 32(3): 14–23.
- [24] 徐凤银, 闫霞, 林振盘, 等. 我国煤层气高效开发关键技术研究进展与发展方向[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(3): 1–14.
- Xu Fengyin, Yan Xia, Lin Zhenpan, et al. Research progress and development direction of key technologies for efficient coalbed methane development in China[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(3): 1–14.
- [25] 徐凤银, 王成旺, 熊先钺, 等. 鄂尔多斯盆地东缘深部深层煤层气成藏演化规律与勘探开发实践[J]. 石油学报, 2023, 44(11): 1764–1780.
- Xu Fengyin, Wang Chengwang, Xiong Xianyue, et al. Evolution law of deep coalbed methane reservoir formation and exploration and development practice in the eastern margin of Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(11): 1764–1780.
- [26] Mou P W, Pan J N, Niu Q H, et al. Coal pores: methods, types, and characteristics[J]. *Energy & Fuels*, 2021, 35(9): 7467–7484.
- [27] 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. Advanced characterization of pores and fractures in coals by nuclear magnetic resonance and X-ray computed tomography[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2010, 40(11): 1598–1607.
- [28] 贾焰然, 石军太, 曹运兴, 等. 深部煤层气压裂水平井产气预测模型[J]. 中国海上油气, 2025, 37(1): 176–183.
- Jia Yanran, Shi Juntao, Cao Yunxing, et al. Gas production prediction model for fractured horizontal wells in deep coalbed methane reservoirs[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2025, 37(1): 176–183.
- [29] 孙立春, 刘佳, 田永净, 等. 神府区块深部煤层气开发早期实践认识与攻关方向[J]. 中国海上油气, 2025, 37(1): 116–128.
- Sun Lichun, Liu Jia, Tian Yongjing, et al. Early practical experience and key research directions for deep coalbed methane development in the Shenfu block[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2025, 37(1): 116–128.