第31卷 第1期 2024年1月

**引用格式:**吴连波.页岩核磁共振横向弛豫时间与孔径分布量化关系及应用[J].油气地质与采收率,2024,31(1):36-43. WU Lianbo.Quantitative relationship between shale NMR transverse relaxation time and pore size distribution and its application[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2024,31(1):36-43.

# 页岩核磁共振横向弛豫时间与孔径分布 量化关系及应用

吴连波 1,2,3,4,5

(1.中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院,山东东营 257015; 2.国家能源局页岩油研发中心,山东东营 257015;
 3.山东省非常规油气勘探开发重点实验室,山东东营 257015; 4.胜利油田油气成藏重点实验室,山东东营 257015;
 5.中国石化页岩油气勘探开发重点实验室,山东东营 257015)

**摘要:**核磁共振横向弛豫时间(*T*<sub>2</sub>)常用于表征页岩的全孔径分布特征。为确定*T*<sub>2</sub>谱与页岩孔径的量化关系,选取济阳坳陷沙河街组7块页岩样品进行低温氦吸附、核磁共振实验。利用*T*<sub>2</sub>几何平均值和孔隙比表面积、孔隙体积之间的关系式,获得*T*<sub>2</sub>谱 计算孔径分布的关键参数——表面弛豫率。7块页岩样品的表面弛豫率为1.52~3.06 nm/ms,平均值为2.53 nm/ms。由表面 弛豫率计算的孔径分布结果与低温氦吸附的NLDFT模型计算结果相似度高,证实了页岩表面弛豫率确定方法和取值的合理 性。利用上述方法确定了济阳坳陷典型页岩薄层的孔径分布,结合储层物性和地球化学分析结果,认为页岩中泥质薄层主要 起到生-储作用,而纤维状方解石薄层、粉晶方解石薄层和长英质薄层则可以作为储-渗通道。在研究页岩油微观富集、流动机 制及评价页岩油"甜点"时,需细化分析不同薄层的孔径分布特征及其生-储-渗作用。 **关键词:**页岩;核磁共振横向弛豫时间;表面弛豫率;孔径分布;孔渗结构;济阳坳陷

文章编号:1009-9603(2024)01-0036-08 中图分类号:TE132.8 DOI:10.13673/j.pgre.202304005 文献标识码:A

## Quantitative relationship between shale NMR transverse relaxation time and pore size distribution and its application

WU Lianbo<sup>1,2,3,4,5</sup>

(1.Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China; 2.State Energy Center for Shale Oil Research and Development, Dongying City, Shandong Province, 257015, China; 3.Shandong Key Laboratory of Unconventional Oil and Gas Exploration and Development, Dongying City, Shandong Province, 257015, China; 4.Key Laboratory for Hydrocarbon Accumulation of Shengli Oilfield Company, Dongying City, Shandong Province, 257015, China; 5.SINOPEC Shale Oil and Gas Exploration and Development Key Laboratory, Dongying City, Shandong Province, 257015, China; 5.SINOPEC Shale Oil and Gas Exploration and Development Key Laboratory, Dongying City, Shandong Province, 257015, China; 6.Sinopec Shale Oil and Gas Exploration and Development Key Laboratory, Dongying City, Shandong Province, 257015, China; 5.SINOPEC Shale Oil and Gas Exploration and Development Key Laboratory, Dongying City, Shandong Province, 257015, China; 5.SINOPEC Shale Oil and Gas Exploration and Development Key Laboratory, Dongying City, Shandong Province, 257015, China; 5.SINOPEC Shale Oil and Gas Exploration and Development Key Laboratory, Dongying City, Shandong Province, 257015, China)

**Abstract:** Nuclear magnetic resonance (NMR) transverse relaxation time  $T_2$  is commonly used to characterize the full-scale pore size distribution characteristics of shale. In order to determine the quantitative relationship between  $T_2$  and the pore size of shale, seven shale samples from Shahejie Formation in Jiyang Depression are selected to perform low-temperature nitrogen adsorption and NMR experiments. The surface relaxivity, the critical parameter to calculate the pore size distribution by  $T_2$ , is obtained according to the equation reflecting the relationship between the logarithmic mean of  $T_2$  and specific surface area and pore volume. For these samples, the surface relaxivity ranges from 1.52 nm/ms to 3.06 nm/ms, with an average value of 2.53 nm/ms. The pore size distribution results calculated by surface relaxivity are more similar to the calculation results of the NLDFT model for low-temperature nitro-

收稿日期:2023-04-05。

作者简介:吴连波(1985—),男,山东寿光人,工程师,硕士,从事页岩油赋存特征及孔隙结构研究。E-mail:418681254@qq.com。

基金项目:中国石油化工集团公司项目"济阳坳陷及周缘页岩油资源分级分类评价与优选"(P22083)。

gen adsorption, confirming the rationality of the determination method and values of the shale surface relaxivity. The pore size distribution of typical shale thin layers in Jiyang Depression is determined by the above method. Based on the reservoir properties and geochemical results, it is believed that the argillaceous thin layer in the shale mainly plays the role of generating and storing shale oil, while the fibrous calcite thin layer, powdered calcite thin layer, and silty sand thin layer can be used as the storage and flow channel. It is necessary to analyze the pore size distribution characteristics of different thin layers and their generation, storage, and flow when studying the micro-enrichment and flow mechanism and evaluating the sweet spot of shale oil resources.

Key words: shale; NMR transverse relaxation time; surface relaxivity; pore size distribution; porous structure; Jiyang Depression

随着页岩油勘探开发在北美地区实现突破,页 岩作为一种新的储层类型引起全球的广泛关注。 济阳坳陷是中国东部典型的陆相断陷盆地,古近系 沙四段上亚段一沙三段下亚段发育半深水-深水环 境的页岩层系,有机质丰度高,热演化程度中等,具 备形成陆相页岩油的物质条件和储层基础<sup>[1-2]</sup>。前 人研究证实,页岩油主要赋存在页岩基质微-纳米级 孔隙中<sup>[34]</sup>,页岩孔隙结构的差异对页岩油的赋存和 渗流具有重要的影响。

目前,针对页岩微-纳米孔隙的表征方法主要包括图像分析法(场发射电镜)、流体注入法(高压压 汞、低温氮吸附)及非流体注入法(核磁共振法)<sup>[5-7]</sup>。 其中,图像分析法受样品尺寸影响,孔隙图像代表 性较差;而核磁共振法的结果需要其他分析进行标 定<sup>[8-10]</sup>。低温氮吸附分析孔径分布依赖于模型的选 择,常用的模型包括BJH模型和NLDFT模型,不同 模型的解释结果存在明显差异,而高压压汞则由于 页岩的进汞饱和度偏低而无法获得可靠的数据,且 页理、微裂缝的存在也会给实验结果带来干扰<sup>[6,11-12]</sup>。

通过对页岩全孔径分布的研究,发现页岩孔径 分布的主峰位于纳米孔范围内<sup>[12-13]</sup>,因此提出低温 氮吸附与核磁共振联测的方法,确定*T*2谱与页岩孔 径分布的量化关系,从而实现对页岩全孔径分布的 表征。

## 1 基本原理

由核磁共振弛豫机制可知,横向弛豫时间可表 示为<sup>[14]</sup>:

$$\frac{1}{T_{2}} = \frac{1}{T_{2B}} + \rho_{2} \left(\frac{S}{V}\right) + \frac{D(\gamma G T_{E})^{2}}{12}$$
(1)

当岩石中饱和单一流体时,流体的体积弛豫比 表面弛豫慢很多,因此体积弛豫对 $T_2$ 的贡献可以忽略;同时,当 $G = T_E$ 均很小时,孔隙流体的扩散弛豫 对 $T_2$ 的贡献也可以忽略<sup>[15]</sup>。此时, $T_2$ 主要由固体-流 体之间的表面弛豫贡献,(1)式可以简化为:

$$\frac{1}{T_2} = \rho_2 \left(\frac{S}{V}\right) = \rho_2 \frac{F_s}{r}$$
(2)

*F*<sub>s</sub>与岩石孔隙形状有关,若孔隙形状为平板状、圆柱状或球状时,对应取值为1,2,3<sup>[14,16-17]</sup>;由于圆柱状孔型介于平板状和球状之间,所以*F*<sub>s</sub>多取2<sup>[18]</sup>。 (2)式进一步简化为:

$$\frac{1}{T_2} = \rho_2 \frac{2}{r} \tag{3}$$

低温氮吸附的原理为:在液氮温度下逐步增加 氮气分压,测得对应压力下的吸附量,当相对压力 接近1时,所有孔隙均被液氮充满,然后逐步降低氮 气压力直至脱附完成。孔隙比表面积依据BET方 程<sup>[19]</sup>计算,即:

$$\frac{1}{W(P_0/P - 1)} = \frac{1}{W_{\rm m}C} + \frac{C - 1}{W_{\rm m}C} \left(\frac{P}{P_0}\right)$$
(4)

取  $P/P_0$ 在 0.05~0.35 之间 5个点拟合多点 BET 图, 斜率为(C-1)/( $W_mC$ ), 截距为  $1/(W_mC)$ , 求出  $W_m$ , 孔隙比表面积 S=4.353  $W_m$ 。

孔隙体积则依据等效体积原则,即在预设压力 P/P₀≈1时,孔隙内充满液氮<sup>[19-20]</sup>,此时有:

$$V = \frac{P_{\rm a} V_{\rm ads} V_{\rm m}}{RT}$$
(5)

在实际应用中,常采用 $T_{2LM}$ 来表示 $T_2$ 的分布<sup>[21]</sup>, 计算公式<sup>[22]</sup>为:

$$T_{2LM} = \left(\prod_{i=1}^{n} T_{2i} \phi_i\right)^{\frac{1}{\phi_{max}}}$$
(6)

将(3)-(5)式与(6)式联立,得到:

$$\frac{1}{T_{\text{2LM}}} = \rho_2 \left(\frac{S}{V}\right) = \rho_2 \frac{2}{r} \tag{7}$$

利用(7)式计算得到 $\rho_2$ ,则各 $T_2$ 分布点对应的孔 径为:

$$r_i = 2\rho_2 T_{2i} \tag{8}$$

## 2 样品及实验方法

#### 2.1 样品选取

本次研究选取济阳坳陷沙河街组7块页岩,其 矿物组成及总有机碳含量(TOC)见表1,在样品同

表目	济阳坳陷沙河街组页岩样品的基本参数
Table1	Basic parameters of shale samples from Shahejie
	Formation in Jivana Depression

r officiation in organg Depression								
样品 编号	深度/m							
		黏土 矿物	石英	长石	方解 石	白云 石	黄铁 矿	TOC/%
1#	3 783.90	35	14	17	24	5	5	1.50
2#	3 788.50	20	9	9	49	9	4	1.53
3#	3 793.30	35	16	11	28	6	4	1.90
4#	3 797.30	42	18	15	14	5	6	1.75
5#	3 800.50	33	10	13	36	6	2	1.90
6#	3 802.40	34	12	15	22	11	6	1.92
7#	3 806.30	31	15	11	34	6	3	2.11

一位置处分别取样开展核磁共振和低温氮吸附 实验。

#### 2.2 实验方法

核磁共振实验采用AniMR-150型核磁共振分析仪,将页岩破碎至大小为10 mm×5 mm×5 mm的碎块,洗油后烘干,然后置于1%KCl溶液中抽真空并加压饱和24 h,测定饱和盐水后页岩的*T*2谱,测试参数如下:CPMG回波序列,回波间隔0.1 ms,扫描次数64,回波个数4096。对饱和盐水后页岩的核磁共振信号幅度进行刻度<sup>[23]</sup>,得到页岩的核磁共振 孔隙度。

低温氮吸附实验采用美国康塔公司Autosorb-6B型比表面分析仪。将页岩样品粉碎至40~60 目,洗油后烘干。称取3g左右样品,在110℃下真 空脱气,待样品完全脱气后接入比表面分析仪进行 低温氮吸附实验,设定氮气相对压力为0.01~0.99。 采用BET,BJH和NLDFT模型分别计算页岩孔隙比 表面积、孔隙体积和孔径分布<sup>[24]</sup>。

## 3 实验结果及分析

#### 3.1 页岩核磁共振实验结果

从图1可以看出,所有样品的T<sub>2</sub>谱均呈现双峰态,短横向弛豫时间的左峰明显高于长横向弛豫时间的右峰,两者之间结合部位窄,表明页岩中发育2种不同大小的孔隙<sup>[25]</sup>,小孔隙T<sub>2</sub>峰值位于0.3 ms左右,大孔隙T<sub>2</sub>峰值位于20 ms左右。采用标准水样对页岩核磁共振信号幅度进行刻度<sup>[23]</sup>,7块页岩的核磁共振孔隙度为3.04%~4.92%,T<sub>2LM</sub>为0.508~1.080 ms。

#### 3.2 页岩低温氮吸附实验结果

以1#页岩为例,该样品低温氮吸附等温曲线





(图2)显示,曲线形态与IUPAC推荐的IV型吸附等 温曲线相似,迟滞环形态属于H<sub>4</sub>型,表明页岩内孔 隙主要呈狭缝状<sup>[24,26]</sup>。随着相对压力逐渐升高,吸 附曲线未出现明显平台段,表明页岩中存在未被充 填的宏孔<sup>[27-28]</sup>,选取图2中黑色数据点拟合多点 BET图(图3),由图3中直线的斜率和截距得出页岩 孔隙比表面积,以相对压力最高点的吸附量计算页 岩孔隙体积。7块页岩孔隙比表面积为5.724~ 9.230 m<sup>2</sup>/g,孔隙体积为9.73×10<sup>-3</sup>~1.37×10<sup>-2</sup> cm<sup>3</sup>/g。



第31卷 第1期

#### 3.3 页岩表面弛豫率计算

将上述实验结果代入(7)式,计算页岩的表面 弛豫率。7块页岩的表面弛豫率为1.52~3.06 nm/ ms,平均值为2.53 nm/ms(表2)。

表 2 济阳坳陷沙河街组页岩样品表面弛豫率及计算参数 Table 2 Surface relaxivity and calculation parameters of shale samples from Shahejie Formation

in Jiyang Depression								
样品 编号	$\phi_{ m nmr}$ /%	$S/$ $(m^2 \cdot g^{-1})$	V/ (10 <sup>-3</sup> cm <sup>3</sup> • g <sup>-1</sup> )	$T_{\rm 2LM}$ /ms	$\frac{\rho_2}{(\mathrm{nm}\cdot\mathrm{ms}^{-1})}$			
1#	4.77	8.15	13.7	0.60	2.80			
2#	3.04	5.72	9.7	0.71	2.38			
3#	4.14	9.23	12.9	0.60	2.33			
4#	4.63	9.07	13.3	0.51	2.88			
5#	4.85	7.56	12.9	0.62	2.74			
6#	4.92	7.69	12.6	1.08	1.52			
7#	4.36	7.84	13.0	0.54	3.06			

#### 3.4 实验结果验证

目前常用的低温氮吸附计算孔径分布的方法 有BJH模型和NLDFT模型,BJH模型基于宏观热力 学概念,以开尔文方程为基础,适用于介孔分布分 析;NLDFT模型采用分子动力学模拟的方法,可以 准确描述靠近固体孔壁表面的流体结构,更真实地 反映了孔隙中流体的热力学性质,适用于0.35~100 nm的孔径范围,而其解释结果取决于吸附质/吸附 剂体系、材料类型和孔型的选择<sup>[29]</sup>,两种模型均被 广泛应用于页岩孔径分布特征研究中<sup>[24,30-31]</sup>。

将 BJH 和 NLDFT 模型计算得出的孔径分布与 *T*<sub>2</sub>谱计算的孔径分布结果进行验证,步骤如下:①利 用低温氮吸附曲线的吸附支曲线,得到 BJH 模型和 NLDFT 模型的孔径分布<sup>[24, 32-33]</sup>;②利用(7)式计算 的ρ<sub>2</sub>将 *T*<sub>2</sub>谱换算成孔径分布;③判断两者重合部分 的孔径分布范围,求解该范围内页岩核磁共振孔隙 度;④分别计算不同大小孔隙的体积占比。

对比BJH模型与T<sub>2</sub>谱计算的孔径分布,发现两 者在6nm以上孔隙的体积占比基本相当,但后者6 nm以下孔隙的体积占比较前者高22%(图4),其原 因是宏观的热力学方法(如BJH模型)对微孔和狭 窄介孔不能在孔径和相对压力间建立正确的函数, 而NLDFT模型准确描述了微小孔道和气体压力之 间的关系,并被其他独立分析方法(如XRD,TEM 等)的结果验证<sup>[34]</sup>。将T<sub>2</sub>谱计算的孔径分布与 NLDFT模型计算结果进行比较,两者吻合较好(图 5),证实了该方法的合理性。



## 4 地质应用

济阳坳陷页岩发育明显的薄层结构,垂向上各 种薄层频繁交互叠置,典型的薄层结构包括泥质薄 层、长英质薄层和碳酸盐薄层等,碳酸盐薄层又可 以细分为泥晶方解石薄层、粉晶方解石薄层和纤维 状方解石薄层。为研究不同薄层的储-渗结构差异, 选取典型薄层厚度相对稳定的页岩样品,沿薄层接 触面敲击使其分离,对不同薄层进行核磁共振与低 温氮吸附联测实验,确定其表面弛豫率,计算出不 同薄层的孔径分布,结合总有机碳含量、常规热解、 分温阶热解<sup>[35]</sup>和普通薄片,分析不同薄层的孔隙结 构和地球化学性质差异。

## 4.1 泥质薄层与纤维状方解石薄层孔隙结构对比 分析

泥质薄层成分较为复杂,镜下见长石、石英等 碎屑矿物沿黏土纹层分布,少量泥晶方解石掺杂其 中;纤维状方解石薄层成分单一,方解石晶体明亮 且具有叠锥状构造<sup>[36-37]</sup>,内部发育有机质或黏土矿 物组成的暗线(图 6a)。泥质薄层表面弛豫率为 1.886 nm/ms,核磁共振孔隙度为7.50%;纤维状方解 石薄层表面弛豫率为1.712 nm/ms,核磁共振孔隙度 为6.78%,纤维状方解石薄层孔隙度稍差于相邻的 泥质薄层。泥质薄层总有机碳含量为1.19%,热解 S<sub>1</sub>值为1.37 mg/g,热解S<sub>2</sub>值为3.53 mg/g,代表页岩 油资源潜力的游离油量为1.68 mg/g(表3);纤维状 方解石薄层的相关地化参数明显低于泥质薄层近 一个数量级。利用计算的表面弛豫率,将T<sub>2</sub>谱换算 成孔径分布,两者的孔径分布均呈三峰态,泥质薄 层孔径分布以左侧峰为主峰,较小孔隙分布在0.1~ 20 nm,峰值为2 nm,较大孔隙分布在20~400 nm,峰 值为60 nm,更大的孔隙分布在700~2 000 nm,比例 低;纤维状方解石薄层孔径分布以中部峰为主峰, 较小孔隙分布在0.1~7 nm,峰值为2 nm,较大孔隙 分布在7~200 nm,峰值为30 nm,更大的孔隙分布在 300~1 000 nm,比例低。泥质薄层中孔隙大小差异 大,纤维状方解石薄层孔隙大小比较均衡,且大孔 发育程度高于相邻的泥质薄层,说明此类页岩中油 主要赋存于泥质薄层中,而相邻的纤维状方解石薄 层对页岩中油的产出起到重要的输导作用。



c—FX184井,3464.25m,泥质薄层与长英质薄层

图 6 济阳坳陷沙河街组典型页岩薄层镜下薄片及孔径分布特征比较 Fig.6 Comparison of microscopic thin sections and pore size distribution characteristics of

typical thin layers of Shahejie Formation shale in Jiyang Depression

表3 济阳坳陷沙河街组典型页岩薄层有机质丰度、含油性及储集性对比

 Table 3
 Comparison of organic matter abundance, oil content, and reservoir properties of typical thin layers of Shahejie Formation shale in Jiyang Depression

井号 深度/		层位	序号	薄层类型	表面 弛豫率/ (nm•ms <sup>-1</sup> )	核磁共振 孔隙度/%	有机质丰度			分温阶热解含油量/	
	资亩/									$(mg \bullet g^{-1})$	
	休皮/Ⅲ						TOC/%	$S_1/$	$S_2/$	滞的油量	游窗油县
								$(mg \bullet g^{-1})$	$(mg \bullet g^{-1})$	伸由曲里	研丙田里
FY101HF 3 344.10	2 244 10	沙四段上亚段	1	泥质	1.886	7.50	1.19	1.37	3.53	3.02	1.68
	5 544.10		2	纤维状方解石	1.712	6.78	0.62	0.38	1.22	0.96	0.49
FX184 3 55	2 550 00	沙四段上亚段	3	泥质	1.977	6.36	2.15	2.22	4.76	4.46	2.81
	3 339.90		4	粉晶方解石	1.672	4.30	1.63	1.57	2.91	3.19	2.08
FX184 3 464.2	2 4 6 4 25	64.25 沙四段上亚段	5	泥质	1.651	6.72	1.51	2.00	2.77	3.52	2.43
	3 404.25		6	长英质	1.335	5.36	1.07	2.18	3.02	3.97	2.55

### 4.2 泥质薄层与粉晶方解石薄层孔隙结构对比 分析

泥质薄层与粉晶方解石薄层纹层结构明显,石 英、白云石等颗粒顺层分布,泥级方解石纹层和黏 十纹层交互叠置:粉晶方解石薄层部分晶粒发生重 结晶,晶粒呈栉齿状紧密贴合,少量泥级方解石纹 层断续分布(图6b)。泥质薄层表面弛豫率为1.977 nm/ms,核磁共振孔隙度为6.36%;粉晶方解石薄层 表面弛豫率为1.672 nm/ms,核磁共振孔隙度为 4.30%, 粉晶方解石薄层孔隙度低于泥质薄层。泥 质薄层总有机碳含量为2.15%,热解S,值为2.22 mg/ g,热解S2值为4.76 mg/g,游离油量为2.81 mg/g(表 3),粉晶方解石薄层的相关地化参数略低于相邻泥 质薄层,说明两者都具有生油和储油能力,而泥质 薄层内油相对更为富集。将T,谱换算成孔径分布, 两者均呈左右不对称的双峰态,且左侧峰均为主 峰。两者的较小孔隙分布在0.1~10 nm,峰值为2 nm,较大孔隙分布在20~600 nm,峰值为100 nm,其 在粉晶方解石薄层中占比相对高,表明粉晶方解石 薄层具有较好的渗流-输导能力,对页岩中油的产出 起到重要的促进作用。

#### 4.3 泥质薄层与长英质薄层孔隙结构对比分析

泥质薄层呈纹层状结构,粉砂级石英颗粒零星 分散其中:长英质薄层棱角-次棱角状石英、长石颗 粒和黏土矿物混杂堆积(图 6c)。泥质薄层表面弛 豫率为1.651 nm/ms,核磁共振孔隙度为6.72%;长 英质薄层表面弛豫率为1.335 nm/ms,核磁共振孔隙 度为5.36%,前者孔隙度稍好于后者。泥质薄层总 有机碳含量为1.51%,热解S1值为2.00 mg/g,热解S2 值为2.77 mg/g,游离油量为2.43 mg/g(表3),长英 质薄层的相关地化参数与泥质薄层相当,说明其也 具有较好的生烃能力。将T,谱换算成孔径分布,两 者的曲线形态呈左右不对称,且左侧峰为主峰,泥 质薄层中较小孔隙分布在0.1~20 nm,峰值为2 nm, 较大孔隙分布于20~200 nm,峰值为70 nm;长英质 薄层中较小孔隙分布在0.1~5 nm,峰值为1 nm,较 大孔隙分布于5~400 nm,峰值为20 nm,表明长英质 薄层的渗流-输导能力优于相邻泥质薄层,可起到输 导相邻泥质薄层油气的作用。

## 5 结论

采用核磁共振与低温氮吸附联测的方法,确定 了核磁共振横向弛豫时间与页岩孔径分布的量化 参数——表面弛豫率,并计算了济阳坳陷沙河街组7块页岩的表面弛豫率,其值为1.52~3.06 nm/ms, 平均值为2.53 nm/ms。

利用表面弛豫率将 T<sub>2</sub>谱换算成孔径分布,其计 算结果分别同低温氮吸附的 BJH 模型和 NLDFT 模 型计算的孔径分布进行对比,发现 T<sub>2</sub>谱计算的孔径 分布与 NLDFT 模型计算结果相似度较高。

对济阳坳陷典型页岩薄层的 T。谱进行孔径分 布计算,结合岩石学、地球化学分析结果,认为页岩 中的泥质薄层主要起到生成和储集页岩油的作用, 富有机质页岩中的粉晶方解石薄层、长英质薄层也 具有较好的油气生成和储集能力,纤维状方解石薄 层、粉晶方解石薄层和长英质薄层则可以作为页岩 油的输导通道。

页岩中不同类型薄层的孔径分布特征及其在 页岩油富集、流动过程中所起的作用不同。今后在 研究页岩油微观富集、流动机制及评价页岩油"甜 点"时,要细化分析不同薄层的孔径分布特征及其 生-储-渗作用。

#### 符号解释

- *C*——BET常数;
- D----流体扩散系数,μm²/ms;
- $F_s$ —— 孔隙形状因子;
- G—— 磁场梯度,gauss/cm;
- n—— 核磁共振 T<sub>2</sub>谱的采样点个数;
- *P*/*P*<sub>0</sub> 相对压力;
- *P*<sub>a</sub> —— 大气压,10<sup>6</sup> Pa;
- *r*——孔径,nm;
- $r_i$ ——各 $T_2$ 分布点对应的孔径,nm;
- R——气体常数,J/(mol·K),取值为8.314;
- S----孔隙比表面积,m²/g;
- *T*——温度,K;
- $T_{\rm E}$ ——回波时间间隔,ms;
- $T_2$  横向弛豫时间, ms;
- $T_{2B}$ ——自由流体的体积弛豫时间,ms;
- $T_{2i}$  —— 第*i*个核磁共振横向弛豫时间, ms;
- $T_{2LM}$ —— $T_2$ 的几何平均值,ms;
- V----孔隙体积, cm<sup>3</sup>/g;
- *V*<sub>ads</sub> —— 氮气最大吸附量, cm<sup>3</sup>;
- V<sub>m</sub> —— 液氮分子的摩尔体积, cm<sup>3</sup>/mol, 取值为 34.7;
- W——相对压力下的吸附量, cm3;
- W<sub>m</sub>——单位质量样品单分子层饱和吸附量, cm<sup>3</sup>;
- $\rho_2$  表面弛豫率,  $\mu$ m/ms;
- γ----原子旋磁比, MHz/T;
- $\phi_i$  —— 对应的核磁共振孔隙度分量,%;

**φ**<sub>nmr</sub> —— 核磁共振孔隙度,%。

#### 参考文献

- [1] 宋明水,刘惠民,王勇,等.济阳坳陷古近系页岩油富集规律认 识与勘探实践[J].石油勘探与开发,2020,47(2):225-235.
   SONG Mingshui, LIU Huimin, WANG Yong, et al. Enrichment rules and exploration practices of Paleogene shale oil in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(2): 225-235.
- [2] 杨勇.济阳陆相断陷盆地页岩油富集高产规律[J].油气地质与 采收率,2023,30(1):1-20.
   YANG Yong. Enrichment and high production regularities of shale oil reservoirs in continental rift basin: A case study of Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023, 30(1); 1-20.
- [3] 王伟庆,刘惠民,刘雅利,等.东营凹陷古近系页岩碳酸盐纹层 内部结构与成因[J].油气地质与采收率,2022,29(3):11-19.
   WANG Weiqing, LIU Huimin, LIU Yali, et al. Texture and genesis of Paleogene lacustrine shale carbonate laminae in Dongying Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29(3): 11-19.
- [4] 林腊梅,程付启,刘骏锐,等.济阳坳陷渤南洼陷沙一段页岩油 资源潜力评价[J].中国海上油气,2022,34(4):85-96.
  LIN Lamei, CHENG Fuqi, LIU Junrui, et al. Evaluation of shale oil resource potential in the Es1 Member in Bonan sag, Jiyang depression [J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34 (4): 85-96.
- [5] 王民,马睿,李进步,等.济阳坳陷古近系沙河街组湖相页岩油 赋存机理[J].石油勘探与开发,2019,46(4):789-802.
  WANG Min, MA Rui, LI Jinbu, et al. Occurrence mechanism of lacustrine shale oil in the Paleogene Shahejie Formation of Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(4): 789-802.
- [6] 俞雨溪,王宗秀,张凯逊,等.流体注入法定量表征页岩孔隙结构测试方法研究进展[J].地质力学学报,2020,26(2): 201-210.

YU Yuxi, WANG Zongxiu, ZHANG Kaixun, et al. Advances in quantitative characterization of shale pore structure by using fluid injection methods [J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26 (2): 201-210.

- [7] 孙中良,李志明,申宝剑,等.核磁共振技术在页岩油气储层评价中的应用[J].石油实验地质,2022,44(5):930-940.
  SUN Zhongliang, LI Zhiming, SHEN Baojian, et al. NMR technology in reservoir evaluation for shale oil and gas [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(5): 930-940.
- [8] 李军,金武军,王亮,等.页岩气岩心核磁共振T<sub>2</sub>与孔径尺寸定 量关系[J].测井技术,2016,40(4):460-464.
  LI Jun, JIN Wujun, WANG Liang, et al. Quantitative relationship between NMR T<sub>2</sub> and pore size of shale gas reservoir from core experiment [J]. Well Logging Technolgy, 2016, 40(4): 460-464.
- [9] 赵明珠,杨威,王耀华,等.陆相页岩储层连通孔隙系统分布与

形成机制——以川西坳陷上三叠统须家河组为例[J].石油实 验地质,2022,44(1):170-179.

ZHAO Mingzhu, YANG Wei, WANG Yaohua, et al. Distribution and genetic mechanisms of connected pore systems in continental shale reservoirs: a case study of Xujiahe Formation of Upper Triassic, Western Sichuan Depression [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(1): 170-179.

- [10] KENYON W E. Nuclear-magnetic-resonance as a petrophysical measurement [J]. Nuclear Geophysics, 1992, 6(2): 153-171.
- [11] 李海波,朱巨义,郭和坤.核磁共振 T<sub>2</sub> 谱换算孔隙半径分布方 法研究[J].波谱学杂志,2008,25(2):273-280.
  LI Haibo, ZHU Juyi, GUO Hekun. Methods for calculating pore radius distribution in rock from NMR T<sub>2</sub> spectra [J]. Chinese Journal of Magnetic Resonance, 2008, 25(2): 273-280.
- [12] 龚小平,唐洪明,赵峰,等.四川盆地龙马溪组页岩储层孔隙结构的定量表征[J].岩性油气藏,2016,28(3):48-57.
  GONG Xiaoping, TANG Hongming, ZHAO Feng, et al. Quantitative characterization of pore structure in shale reservoir of Longmaxi Formation in Sichuan Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2016, 28(3): 48-57.
- [13] 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): 1 099-1 119.
- [14] 何雨丹,毛志强,肖立志,等.核磁共振T<sub>2</sub>分布评价岩石孔径分布的改进方法[J].地球物理学报,2005,48(2):373-378.
  HE Yudan, MAO Zhiqiang, XIAO Lizhi, et al. An improved method of using NMR T<sub>2</sub> distribution to evaluate pore size distribution [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48 (2): 373-378.
- [15] 张超谟,陈振标,张占松,等.基于核磁共振 T<sub>2</sub>谱分布的储层岩石孔隙分形结构研究[J].石油天然气学报,2007,29(4): 80-86.
  ZHANG Chaomo, CHEN Zhenbiao, ZHANG Zhansong, et al. Fractal characteristics of reservoir rock pore structure based on NMD T distibution [J]. Lower of Oil and Con Tachadama

NMR T<sub>2</sub> distribution [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2007, 29(4): 80-86.
[16] LIVO K, SAIDIAN M, PRASAD M. Effect of paramagnetic

- [10] LIVO K, SAIDIAN M, PRASAD M. Ellect of paramagnetic mineral content and distribution on nuclear magnetic resonance surface relaxivity in organic-rich Niobrara and Haynesville shales [J]. Fuel, 2020, 269(1): 117417. 1-117417. 10.
- [17] SAIDIAN M, PRASAD M. Effect of mineralogy on nuclear magnetic resonance surface relaxivity: A case study of Middle Bakken and Three Forks formations [J]. Fuel, 2015, 161: 197-206.
- [18] 王志战,李新,魏杨旭,等.页岩油气层核磁共振评价技术综述
  [J].波谱学杂志,2015,32(4):688-698.
  WANG Zhizhan, LI Xin, WEI Yangxu, et al. NMR technologies for evaluating oil & gas shale: A review [J]. Chinese Journal of Magnetic Resonance, 2015, 32(4): 688-698.
- [19] KUILA U, PRASAD M. Specific surface area and pore-size dis-

tribution in clays and shales [J]. Geophysical Prospecting, 2013, 61(2): 341-362.

- [20] BERTIER P, SCHWEINAR K, STANJEK H, et al. On the use and abuse of N<sub>2</sub> physisorption for the characterisation of the pore structure of shales [J]. CMS Workshop Lectures, 2016, 21: 151-161.
- [21] 唐小梅,何宗斌,张超谟,等.用核磁共振T<sub>2</sub>分布定量求取孔隙 结构参数的区域性对比研究[J].江汉石油学院学报,2003,25
  (4):75-77.
  TANG Xiaomei, HE Zongbin, ZHANG Chaomo, et al. Regional comparative study on quantitative determination of pore

structure parameters using NMR  $T_2$  distribution [J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 2003, 25(4): 75-77.

- [22] 邓少贵,赵岳,周凤鸣,等.应用核磁共振T<sub>2</sub>几何平均值预测横 波波速的方法:CN201410453724.1[P].2014-12-10.
  DENG Shaogui, ZHAO Yue, ZHOU Fengming, et al. Method for predicting shear wave velocity using T<sub>2</sub> geometric mean of nuclear magnetic resonance: CN201410453724.1 [P]. 2014-12-10.
- [23] 李艳.复杂储层岩石核磁共振特性实验分析与应用研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2008.
  LI Yan. Research on the experimental analysis and application of the complex reservoir rock NMR [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2008.
- [24] KUILA U. Measurement and interpretation of porosity and poresize distribution in mudrocks: The hole story of shales [D]. Colorado:Colorado School of Mines, 2013.
- [25] LI Ang, DING Wenlong, WANG Ruyue, et al. Petrophysical characterization of shale reservoir based on nuclear magnetic resonance (NMR) experiment: A case study of Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in eastern Yunnan Province, South China [J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering, 2016, 37: 29-38.
- [26] ROUQUEROL J, AVNIR D, FAIRBRIDGE C W, et al. Recommendations for the characterization of porous solids [J]. Pure and Applied Chemistry, 1994, 66(8): 1 739-1 758.
- [27] SING K S W, EVERETT D H, HAUL R A W, et al. Reporting physisorption data for gas solid systems with special reference to the determination of surface-area and porosity (recommendation 1984) [J]. Pure and Applied Chemistry, 1985, 57 (4) : 603-619.
- [28] 李腾飞,田辉,陈吉,等.低压气体吸附法在页岩孔径表征中的应用——以渝东南地区页岩样品为例[J].天然气地球科学,2015,26(9):1719-1728.
  LI Tengfei, TIAN Hui, CHEN Ji, et al. The application of low pressure gas adsorption to the characterization of pore size distribution for shales: An example from southeastern Chongqing
  - bution for shales: An example from southeastern Chongqing area [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(9): 1719-1728.

[29] 杨正红.物理吸附100问[M].北京:化学工业出版社,2017:
 32-36.
 VANG. Zhanakana, 100 Quantization [M] Pari.

YANG Zhenghong. 100 Questions on Physisorption [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2017: 32-36.

- [30] CLARKSON C, WOOD J, BURGIS S, et al. Nanoporestructure analysis and permeability predictions for a tight gas siltstone reservoir by use of low-pressure adsorption and mercuryintrusion techniques [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2012, 15(6): 648-661.
- [31] 王鹏,耿安松,吴亮亮,等.基于NLDFT模型的渝东五峰组页 岩孔隙结构特征及其储气意义[J].地球化学,2017,46(6): 546-556.

WANG Peng, GENG Ansong, WU Liangliang, et al. Pore structure characteristics and gas storage significance of Wufeng Formation shale from eastern Chongqing, China, based on the NLDFT model [J]. Geochimica, 2017, 46(6): 546-556.

- [32] LOUCKS R G, REED R M, RUPPEL S C, et al. Morphology, genesis, and distribution of nanometer-scale pores in siliceous mudstones of the Mississippian Barnett shale [J]. Journal of Sedimentary Research, 2009, 79(11/12): 848-861.
- [33] TIAN Hui, PAN Lei, XIAO Xianming, et al. A preliminary study on the pore characterization of Lower Silurian black shales in the Chuandong Thrust Fold Belt, southwestern China using low pressure N<sub>2</sub> adsorption and FE-SEM methods [J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 48: 8-19.
- [34] THOMMES M. Physical adsorption characterization of nanoporous materials [J]. Chemie Ingenieur Technik, 2010, 82(7): 1 059-1 073.
- [35] 蒋启贵,黎茂稳,钱门辉,等.不同赋存状态页岩油定量表征技术与应用研究[J].石油实验地质,2016,38(6): 842-849.
  JIANG Qigui, LI Maowen, QIAN Menhui, et al. Quantitative characterization of shale oil in different occurrence states and its application [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38 (6): 842-849.
- [36] COBBOLD P R, ZANELLA A, RODRIGUES N, et al. Bedding-parallel fibrous veins (beef and corn-in-corn): worldwide occurrence and possible significance in terms of fluid overpressure, hydrocarbon generation and mineralization [J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 43(3): 1-20.
- [37] 陈扬,胡钦红,赵建华,等.渤海湾盆地东营凹陷湖相富有机质 页岩纹层特征和储集性能[J].石油与天然气地质,2022,43 (2):307-324.

CHEN Yang, HU Qinhong, ZHAO Jianhua, et al. Lamina characteristics and their influence on reservoir property of lacustrine organic-rich shale in the Dongying sag, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 307-324.