

文章编号: 0254-5357(2015)06-0636-07

DOI: 10.15898/j.cnki.11-2131/td.2015.05.006

# 基于扫描电镜-氮气吸脱附和压汞法的页岩孔隙结构研究

陈生蓉<sup>1</sup>, 帅 琴<sup>1\*</sup>, 高 强<sup>1</sup>, 田 亚<sup>2</sup>, 徐生瑞<sup>3</sup>, 黄云杰<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)材料与化学学院, 湖北 武汉 430074;

2. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100029;

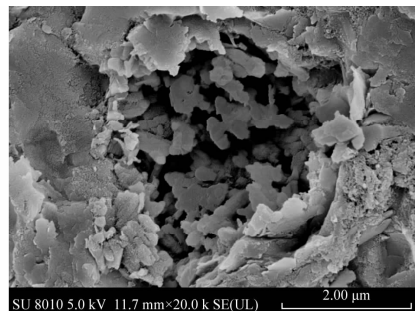
3. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 研究页岩孔隙结构特征, 对于探讨页岩气赋存机理有重要意义。本文采用扫描电镜(SEM)、氮气吸脱附法与压汞法对鄂尔多斯盆地页岩样品的孔隙结构进行了全面表征, 发现所研究区域页岩孔隙类型包括溶蚀孔隙、粒间孔隙和微裂缝; 孔径从几个纳米到几百个微米, BET 比表面积在  $7 \sim 25 \text{ m}^2/\text{g}$  之间, 孔体积在  $0.01 \sim 0.03 \text{ cm}^3/\text{g}$  范围。研究结果表明鄂尔多斯盆地页岩具有良好的孔隙结构, 孔隙类型丰富, 孔径分布范围广泛, 其中纳米级孔隙占主导, 纳米级孔的存在有利于页岩气的存储, 微裂隙的存在则有利于页岩气的运移。说明该区域页岩气的储藏具有良好的基础环境, 页岩含气量可能较丰富。

**关键词:** 页岩; 孔隙结构; 扫描电镜; 低温氮气吸脱附; 压汞法

**中图分类号:** P588.2; P575.2

**文献标识码:** A



页岩气在页岩中的赋存类型主要有两种: 吸附态和游离态。吸附态页岩气存在于黏土矿物和有机质表面, 游离态页岩气存在于微裂隙和孔隙中。页岩的孔隙(包括基质孔隙和裂缝)作为页岩气的储集空间和渗流运移通道, 是影响页岩气藏品质、页岩气的赋存形式的重要因素, 并决定着页岩气商业开采潜力和价值<sup>[1-5]</sup>, 因此页岩孔隙研究是评价页岩含气量十分重要的内容。目前, 测定页岩孔隙的主要手段是射线照射法和流体注入法两种, 每种方法都有它的优点和局限性<sup>[6]</sup>, 如高分辨率的扫描电镜可以直观地观察页岩表面孔隙结构类型, 观察纳米级孔隙, 获得精细的孔隙结构图像, 但无法定量测试孔隙大小; 低温氮气吸附法探测下限为  $2 \text{ nm}$ , 可以有效反映页岩中纳米孔隙的分布, 适用于测试介孔范围; 对于孔径小于  $2 \text{ nm}$  的孔隙在以后的研究中将进一步提高; 高压压汞法探测范围虽为  $3 \text{ nm} \sim 1 \text{ mm}$ , 但当页岩孔隙十分微小时, 液体汞不易进入

纳米级的孔隙, 且高压压汞法容易造成人工裂隙, 因此高压汞孔径分析法可以反映页岩宏孔甚至微裂缝的信息, 但不利于纳米级孔隙的定量测定<sup>[7-13]</sup>。页岩基质孔隙的结构复杂、类型多样、孔径分布宽<sup>[14]</sup>, 并且孔隙形成与页岩有机质和黏土有关系<sup>[15]</sup>, 因此采用单一手段确定页岩基质的孔隙结构往往比较困难。一些国内学者提出了微米、纳米 CT/FIB 辐射扫描和压汞、低压氮气和二氧化碳吸附孔隙的研究方法, 外国学者对北美页岩储层利用  $\text{CO}_2$  和  $\text{N}_2$  吸附进行研究, 发现  $\text{CO}_2$  与  $\text{N}_2$  吸附的孔径分布在大于  $2 \text{ nm}$  孔径段相似度高, 认为低压  $\text{CO}_2$  与  $\text{N}_2$  吸附联合能够很好地反映小孔和介孔。由此, 结合各种现代仪器分析技术手段进行页岩孔隙分析是准确揭示页岩宽范围孔径分布的有效途径。

鄂尔多斯盆地南部地区发育着大套黑色页岩, 具有分布面积广、沉积厚度大、埋藏深度适中、有机质含量高、页岩气资源丰富等特点。对其储层孔隙

收稿日期: 2015-01-20; 修回日期: 2015-10-26; 接受日期: 2015-11-08

基金项目: 中国地质调查局油气专项——鄂尔多斯盆地南部油气资源战略选区调查(1211302108023-1)

作者简介: 陈生蓉, 硕士, 化学工程专业。E-mail: 15072439946@163.com。

通讯作者: 帅琴, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事地质分析研究。E-mail: shuaiqin@cug.edu.cn。

结构的研究是非常必要的,但对孔隙的研究仅仅停留在采用扫描电镜、薄片分析和氮气吸脱附等单一的手段进行测试。基于此,本文将扫描电镜、低温氮气吸脱附与压汞法多种检测手段结合,研究鄂尔多斯盆地南岩从微孔到宏孔范围的孔隙分布特征,以便了解该区域页岩孔隙结构特征对页岩气赋存和运移的贡献程度。

1 实验部分

1.1 实验样品

页岩样品分别采自鄂尔多斯盆地南部不同的三口井,采用碳硫分析仪和配有油浸物镜及光度计的显微镜对采集的样品总有机碳(TOC)含量和镜质组反射率进行了测试,基本的参数列于表1。从表1中看出,页岩样品所在井区域测试的页岩TOC含量为3.00%~6.73%,其平均值为5.28%,大于烩源岩要求的TOC含量(2%),说明三口井所在区域页岩有机碳含量丰富,可能含气量较高,是比较好的烩源岩。

页岩样品所测得的镜质组反射率( $R_o$ )相差不大,在1.02%~1.13%之间,其平均值为1.07%。由于1.1%~1.3% $<R_o<2\%$ 属于深成熟阶段后期,高成熟阶段前期,由此可知,该页岩样品为Ⅱ<sub>2</sub>的干酪根,岩层段的成熟度较高,有机质发育良好。

表1 页岩样品参数

Table 1 Parameters of the shale samples

样品井号	样品编号	样品井深(m)	总有机碳含量(TOC,%)	镜质组反射率( $R_o$ ,%)
1号井	YY-1	1610.13~1610.33	4.54	-
	YY-2	1611.54~1611.72	6.73	1.03
	YY-3	1616.68~1616.90	5.67	1.07
	YY-4	1621.30~1621.50	3.00	-
	YY-5	1487.57~1487.77	4.57	1.08
2号井	YY-6	1495.91~1496.11	6.34	1.06
	YY-7	1499.39~1499.65	4.47	-
	YY-8	1604.57~1604.75	5.54	1.13
3号井	YY-9	1617.92~1618.12	6.03	-
	YY-10	1618.86~1619.00	5.95	1.02

1.2 测试方法

1.2.1 扫描电镜测试

采用SU8010型超高分辨率场发射扫描电镜(日本日立公司)对页岩样品孔隙结构进行表征。在测试之前取1cm左右大小的新鲜页岩块放在烘箱里,在70℃温度下烘干2h,取出,选取平整光滑

的表面,在光滑表面镀金后进行测试。

1.2.2 低温氮气吸脱附实验

采用低温氮气吸附ASAP2020全自动物理吸附分析仪(美国Micromeritics公司)对页岩的纳米级孔隙进行定量表征。仪器相关参数为:①比表面分析从0.0005m<sup>2</sup>/g至无上限;②孔径分析范围:0.35~500nm(氮气吸附),微孔区段的分辨率为0.02nm,孔体积最小检测为0.0001cc。实验测试前所有样品都经过3h的300℃高温抽真空预处理,然后以纯度大于99.999%的高纯氮气为吸附质,在77.35K温度下测定不同相对压力下的氮气吸附量。以比压为横坐标,单位样品质量的吸附量为纵坐标,绘制氮气吸附和脱附等温线。根据滞后环的类型确定孔的形状。采用BET方程计算页岩样品的比表面积。在相对压力介于0.05~0.35范围内制作BET直线图,求得单分子层饱和吸附量,从而计算出样品的BET比表面积。孔径分布根据吸附等温线的脱附支采用BJH法进行计算。孔体积和平均孔径由相对压力约为0.993时的氮气吸附量计算得到<sup>[16-17]</sup>。

1.2.3 压汞法测试

采用Pore Master 60GT压汞仪(美国康塔公司)对页岩样品的微孔及微裂隙结构进行表征。在测试之前将样品表面清洗干净,敲碎为数毫米尺寸均匀的小块,浸入无水乙醇中。测试前将样品在90℃以下于烘箱内烘4~5h,然后上机测试<sup>[18]</sup>。

2 结果与讨论

2.1 页岩样品孔隙扫描电镜表征

图1给出了页岩样品有代表性的实验结果。从图1可以看出这批鄂尔多斯盆地南部区域的页岩样品孔隙丰富,有页岩微裂缝(图1a)、颗粒孔隙(图1b)、溶蚀孔隙(图1c)等多种孔隙类型。

同时从扫描电镜结果中可以观察到页岩表面多处呈现蜂窝状(图1d),提示样品所对应的区域页岩孔隙丰富。由表1可知,YY-4、YY-2、YY-9、YY-10页岩样品的TOC值分别是3.00%、6.73%、6.03%和5.95%,结合图1可看出YY-4页岩孔隙相对于其他三个样品较少,相应的TOC值也较低,YY-2、YY-9、YY-10样品中孔隙丰富,相应的TOC值较高,说明页岩的孔隙的丰富程度与TOC含量有正相关性。

2.2 页岩样品氮气吸脱附等温曲线特征

按照1.2.2节实验方法,对一批页岩样品进行了氮气吸脱附实验,图2a为其中YY-1和YY-2

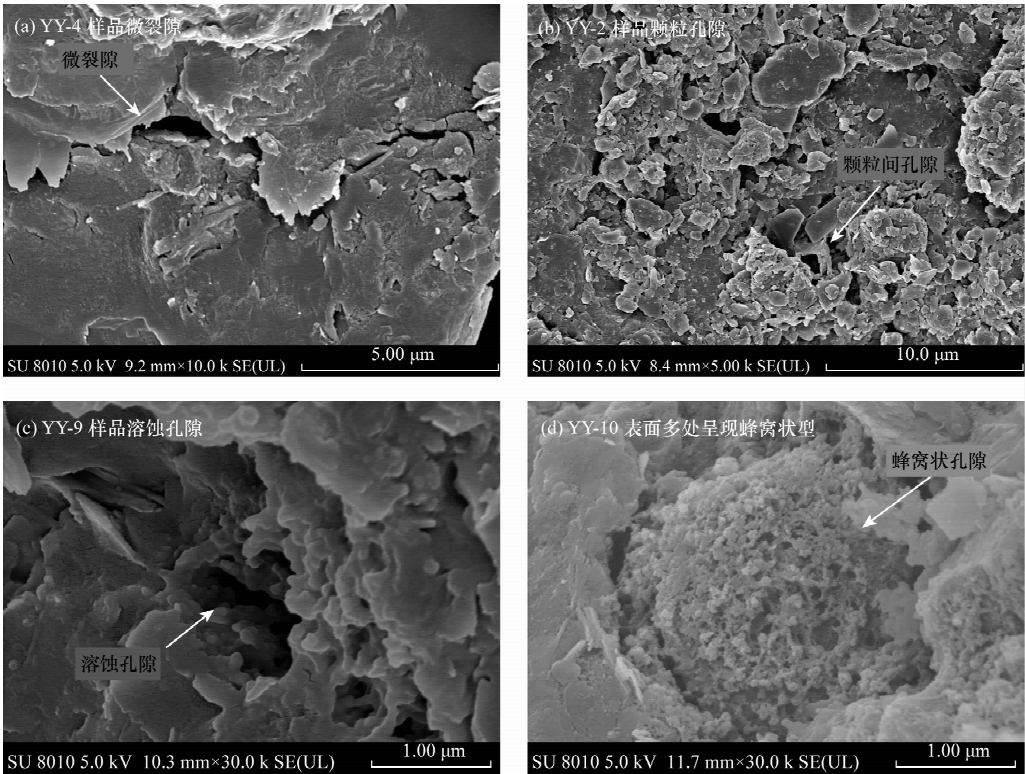


图 1 页岩样品扫描电镜表征结果  
Fig. 1 Scanning electron microscopy (SEM) photos of shale samples

两个样品的实验结果。从图 2a 可以看出:相对压力在  $0 < p/p_0 < 0.05$  范围时,曲线上升缓慢并且凸起;在高压段  $p/p_0 > 0.5$ ,等温曲线呈急剧上升趋势并呈现向下凹的形状;当  $p/p_0$  接近于 1 时,吸附量没有达到吸附饱和,这与 II 型等温线的等温吸附曲线特征相一致,表明在相对压力较小时,页岩表面发生了单分子层吸附或微孔填充;在相对压力较大时氮气在页岩表面发生毛细凝聚。同时,页岩样品的脱附曲线都在  $p/p_0 > 0.4$  后呈现出滞后回环,第 II 种类型等温吸附曲线所对应的滞后回环为类型 B,提示相应的孔隙类型为相互连通的微裂隙和四周开放的平行板孔<sup>[19]</sup>。因此说明页岩中既有微孔又有大孔及微裂隙存在,并且孔隙的连通性较好,这对于页岩气体的运移是非常有利的。

从页岩样品 YY - 3 ~ YY - 10 的吸附曲线(图 2b)可以看出:当  $p/p_0$  接近于 1 时,页岩样品的氮气吸附量最大,其中 YY - 6 样品的吸附量最大,YY - 4 样品的吸附量最小。

总有机碳含量与孔体积、比表面积的相关性分析表明,总有机碳含量与  $p/p_0 = 1$  时的吸附量(图 3a)和比表面积(图 3b)之间有一定的正相关性。随着总有机碳含量的增加,孔的比表面积和孔

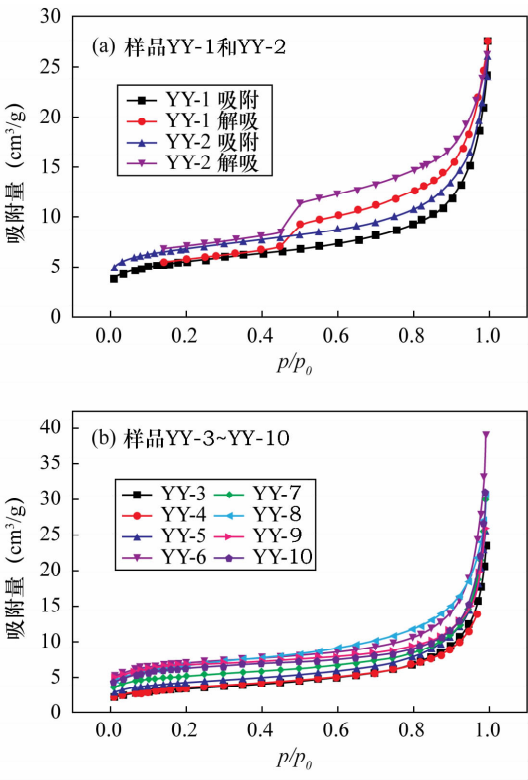


图 2 页岩氮气吸脱附等温曲线  
Fig. 2 The nitrogen absorption/desorption isothermal curves of shale samples

体积增大。总有机碳含量与孔的比表面积、孔体积有一定的正相关性,说明页岩微孔、中孔发育与有机碳含量有关,一般情况下,TOC 含量越高,页岩中的有机质含量越高,有机质的发育形成纳米孔隙,其为比表面积提供了很大的贡献。

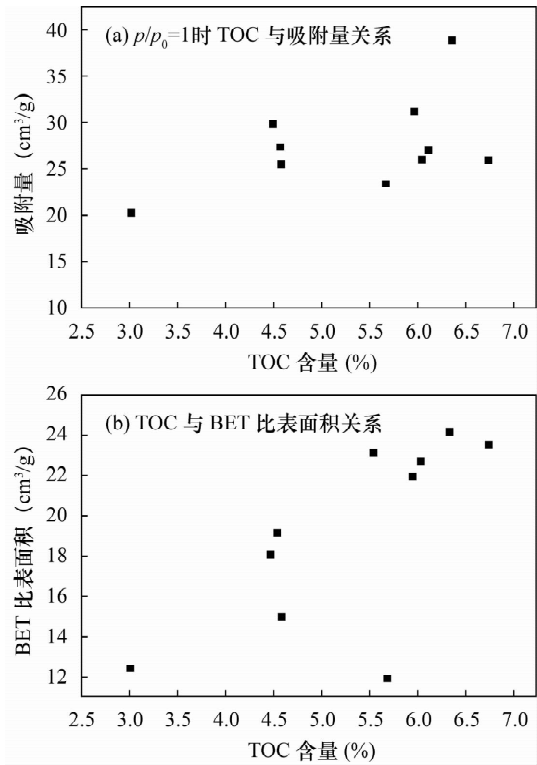


图 3 TOC 与氮气吸脱附测试值相关性研究  
Fig. 3 The relationship between TOC and BJH pore volume

2.3 页岩样品的 BET 比表面积、孔体积特征

实验获得研究区域一批页岩样品的比表面积、孔体积和平均孔径测试结果。结果显示,页岩样品的比表面积在 7.44 ~ 24.14 m²/g 之间,平均比表面积为 18.44 m²/g。这个值与 Clarkson 等<sup>[6]</sup>测试的加拿大西部页岩的测试值(2.32 ~ 3.05 m²/g)相比大很多,与四川盆地泥页岩的测试值(5.06 ~ 19.32 m²/g<sup>[20]</sup>)相当。样品孔体积在 0.0111 ~ 0.0376 cm³/g 范围内,平均孔体积为 0.0357 cm³/g,其结果与川南龙马溪组页岩的孔体积(0.0221 ~ 0.0337 cm³/g<sup>[21]</sup>)相当。表明所研究区域页岩孔隙发育良好,纳米孔隙丰富,为页岩气在其表面吸附提供了重要的基础空间。

2.4 页岩样品孔径分布特征

为了在大尺度范围定量描述页岩孔隙特征,本文结合氮气吸脱附和压汞法对页岩孔径进行测定。

氮气吸脱附实验结果显示页岩样品的平均孔径在 4.82 ~ 8.10 nm 范围内,从图 4a 可以看出,页岩孔径分布峰值在 10 nm 左右,随着孔径增大,曲线开始下降,说明页岩的孔隙直径以介孔占主导。从图 4b 可以看出大孔为孔体积的贡献更大,这是因为一个大孔的体积等于很多小孔的体积之和,说明页岩的孔体积主要与大孔有关。大孔是孔体积增大的主要因素。

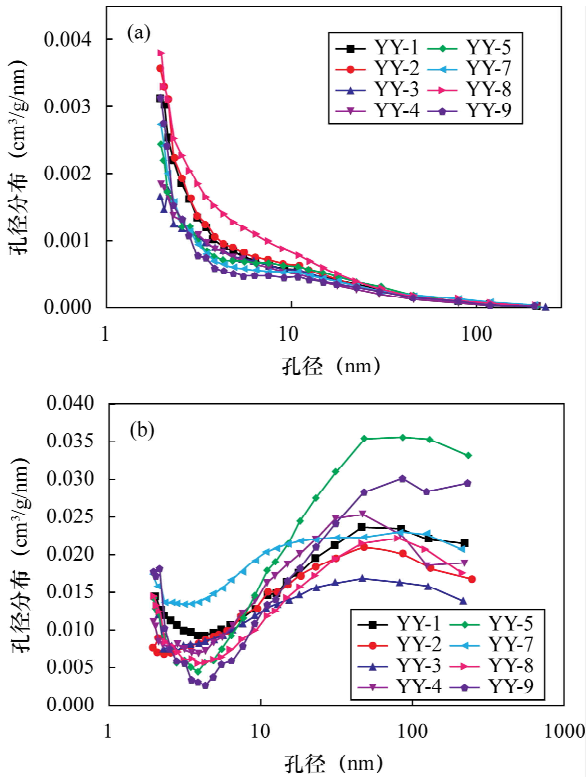


图 4 页岩样品氮气吸脱附孔径分布  
Fig. 4 The pore size distribution of shale samples

为了描述页岩大范围内孔径的分布,将氮气吸脱附和高压压汞法测试的结果结合,以 YY-6 和 YY-10 样品为例进行分析,图 5 为 YY-6 和 YY-10 页岩样品的氮气吸脱附和高压压汞法孔径分布图。从图 5b 可以看出页岩孔径分布广泛,孔径范围从 3 nm ~ 250 μm 都有分布。YY-6 的孔径分布特征是:中孔峰值在 4 ~ 6 nm 之间,宏孔峰值在 25 ~ 60 μm 之间;YY-10 的孔径分布特征是:中孔有两个峰值,分别在 9 ~ 10 nm 和 28 ~ 37 nm 之间,宏孔峰值在 25 ~ 120 μm 之间。同时,从图 5 也可看出氮气吸脱附和压汞法测试的页岩纳米级孔隙的分布范围一致,基本上都在介孔范围,说明了页岩样品孔径主要是纳米级孔隙占主导,同时还有一些宏孔



和微裂隙。通常页岩中微裂缝和宏孔有利于页岩气体的运移<sup>[22-23]</sup>。

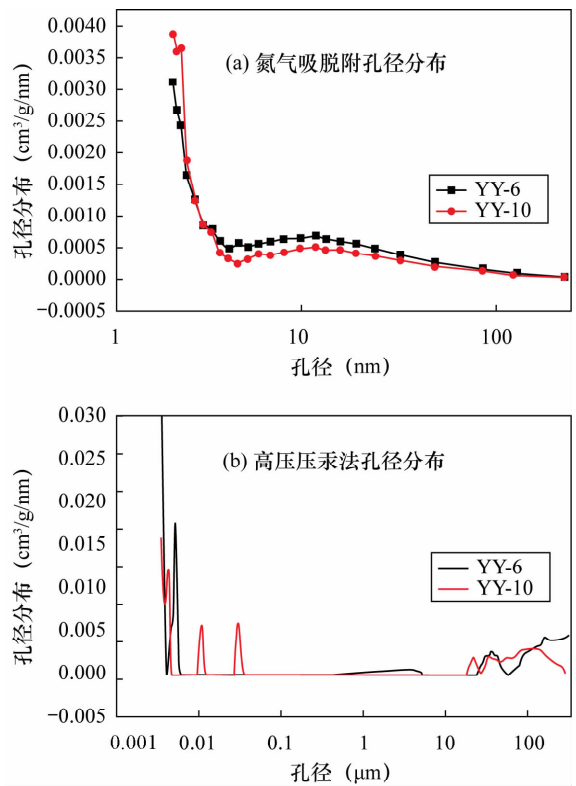


图5 氮气吸脱附、高压压汞结合孔径分布

Fig.5 The pore size distribution of shale samples of nitrogen adsorption combined with mercury porosimetry

### 3 鄂尔多斯盆地页岩孔隙特征

采用扫描电镜对鄂尔多斯盆地南部页岩孔隙研究发现了微裂隙、粒间孔和溶蚀孔(粒内孔),与王羽等<sup>[24]</sup>对四川九老洞组页岩的研究结果相一致,不同的是鄂尔多斯南部盆地页岩中含有蜂窝状的孔隙,孔隙结构相对特殊。本文采用氮气吸脱附法和压汞法测试的孔径范围是以纳米孔占主导,处于钟太贤<sup>[18]</sup>、田华等<sup>[25]</sup>对中国南方海相页岩和四川盆地海相页岩样品(孔容为0.0040~0.1540 mL/g、比表面积为5.22~103.52 m<sup>2</sup>/g)的测试值范围之内,与刘惟庆等<sup>[8]</sup>测试的川西坳陷上页岩(孔径平均为4.319~7.821 nm)孔径范围一致,具有从微孔到中孔等一系列连续性孔径。

### 4 结论

本研究将扫描电镜、氮气吸脱附与压汞法多种手段结合应用于页岩孔隙结构的研究,全面获得了鄂尔多斯盆地南部页岩孔隙结构,发现研究区域页

岩孔隙丰富。孔隙类型有微裂缝、粒间孔和溶蚀孔,其中页岩孔径主要分布在几纳米的区域,同时存在的一些宏孔和微裂缝分布峰值在几十微米的区域,相关性研究发现孔隙的丰富程度与总有机碳含量有一定正相关性。

本研究采用的多种分析测试方法的综合利用,初步实现了对鄂尔多斯盆地南部页岩孔隙大尺度范围的描述,对逐步实现页岩孔隙宽范围分布的定量描述提供了有效的途径。但由于目前采用的测试手段限制,还不能满足2 nm以下页岩孔隙的测试,有待于今后进一步研究。

**致谢:** 合作单位中国地质调查局油气资源调查中心、陕西延长石油(集团)有限责任公司为本项目所作出的贡献,在此深表感谢!

### 5 参考文献

[1] 张金川,汪宗余,聂海宽,等.页岩气及其勘探研究意义[J].现代地质,2008,22(4):640-646.  
Zhang J C, Wang Z Y, Nie H K, et al. Shale Gas and Its Significance for Exploration [J]. Geoscience, 2008, 22 (4):640-646.

[2] 张雪芬,陆现彩,张林晔,等.页岩气的赋存形式研究及其石油地质意义[J].地球科学进展,2010,25(6):597-604.  
Zhang X F, Lu X C, Zhang L Y, et al. Occurrences of Shale Gas and Their Petroleum Geological Significance [J]. Advances in Earth Science, 2010, 25 (6): 597-604.

[3] 帅琴,黄瑞成,高强,等.页岩气实验测试技术现状与研究进展[J].岩矿测试,2012,31(6):931-938.  
Shuai Q, Huang R C, Gao Q, et al. Research Development of Analytical Techniques for Shale Gas [J]. Rock and Mineral Analysis, 2012, 31 (6): 931-938.

[4] Ross D J K, Marc Bustin R. The Importance of Shale Composition and Pore Structure upon Gas Storage Potential of Shale Gas Reservoirs [J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26 (6): 916-927.

[5] Hao F, Zou H, Lu Y. Mechanisms of Shale Gas Storage: Implications for Shale Gas Exploration in China [J]. AAPG Bulletin, 2013, 97 (8): 1325-1346.

[6] Clarkson C R, Freeman M, He L, et al. Characterization of Tight Gas Reservoir Pore Structure Using USANS/ SANS and Gas Adsorption Analysis [J]. Fuel, 2012, 95: 371-385.

[7] 焦淑静,韩辉,翁庆萍,等.页岩孔隙结构扫描电镜分

- 析方法研究[J]. 电子显微学报, 2012, 31(5): 432 - 436.
- Jiao S J, Han H, Weng Q P, et al. Scanning Electron Microscope Analysis of Porosity in Shale[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2012, 31(5): 432 - 436.
- [8] 刘惟庆, 吴伟, 杨登银, 等. 川西坳陷上三叠统须家河组页岩纳米孔隙结构特征[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(21): 11 - 17.
- Liu W Q, Wu W, Yang D Y, et al. Shale Nanopore Structure Characteristics of Xujiahe Formation of Upper Triassic in Western Sichuan Basin [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(21): 11 - 17.
- [9] 熊健, 梁礼喜, 刘向君. 基于氮气吸附法的渝东南下寒武统页岩孔隙的分形特征[J]. 科技导报, 2014, 32(19): 53 - 57.
- Xiong J, Liang L X, Liu X J. Fractal Characteristics of Pore Structure of Lower Cambrian Shale in Southeast Chongqing Using Nitrogen Adsorption Data[J]. Science & Technology Review, 2014, 32(19): 53 - 57.
- [10] 杨峰, 宁正福, 张睿, 等. 甲烷在页岩上的吸附等温过程[J]. 煤炭学报, 2014, 39(7): 1327 - 1332.
- Yang F, Ning Z F, Zhang R, et al. Adsorption Isotherms Process of Methane on Gas Shales[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(7): 1327 - 1332.
- [11] 吉利明, 邱军利, 张同伟, 等. 泥页岩主要黏土矿物组分甲烷吸附实验[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2012, 37(5): 1043 - 1050.
- Ji L M, Qiu J L, Zhang T W, et al. Experiments on Methane Adsorption of Common Clay Minerals in Shale [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2012, 37(5): 1043 - 1050.
- [12] 郭旭升, 李宇平, 刘若冰, 等. 四川盆地焦石坝地区龙马溪组页岩微观孔隙结构特征及其控制因素[J]. 天然气工业, 2014, 34(6): 9 - 16.
- Guo X S, Li Y P, Liu R B, et al. Characteristics and Controlling Factors of Micropore Structures of the Longmaxi Shale in the Jiaoshiba Area, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(6): 9 - 16.
- [13] 刘英辉, 朱筱敏, 朱茂, 等. 准噶尔盆地乌—夏地区二叠系风城组致密油储层特征[J]. 岩性油气藏, 2014, 26(4): 66 - 72.
- Liu Y H, Zhu X M, Zhu M, et al. Characteristics of Tight Oil Reservoirs of the Permian Fengcheng Formation in Wu-Xia Area, Junggar Basin [J]. Northwest Oil & Gas Exploration, 2014, 26(4): 66 - 72.
- [14] Schmitt M, Fernandes C P, da Cunha Neto J A B, et al. Characterization of Pore Systems in Seal Rocks Using Nitrogen Gas Adsorption Combined with Mercury Injection Capillary Pressure Techniques[J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 39(1): 138 - 149.
- [15] Bai B, Elgmati M, Zhang H, et al. Rock Characterization of Fayetteville Shale Gas Plays [J]. Fuel, 2013, 105: 645 - 652.
- [16] Wang Y, Zhu Y, Chen S, et al. Characteristics of the Nanoscale Pore Structure in Northwestern Hunan Shale Gas Reservoirs Using Field Emission Scanning Electron Microscopy, High-pressure Mercury Intrusion, and Gas Adsorption [J]. Energy & Fuels, 2014, 28(2): 945 - 955.
- [17] Ross D J K, Bustin R M. Impact of Mass Balance Calculations on Adsorption Capacities in Microporous Shale Gas Reservoirs [J]. Fuel, 2007, 86(17 - 18): 2696 - 2706.
- [18] 钟太贤. 中国南方海相页岩孔隙结构特征[J]. 天然气工业, 2012, 32(9): 1 - 4.
- Zhong T X. Characteristics of Pore Structure of Marine Shales in South China [J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(9): 1 - 4.
- [19] Labani M M, Rezaee R, Saeedi A, et al. Evaluation of Pore Size Spectrum of Gas Shale Reservoirs Using Low Pressure Nitrogen Adsorption, Gas Expansion and Mercury Porosimetry: A Case Study from the Perth and Canning Basins, Western Australia [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2013, 112: 7 - 16.
- [20] Tian H, Pan L, Xiao X, 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.
- [21] 陈尚斌, 朱炎铭, 王红岩, 等. 川南龙马溪组页岩气储层纳米孔隙结构特征及其成藏意义[J]. 煤炭学报, 2012, 37(3): 438 - 444.
- Chen S B, Zhu Y M, Wang H Y, et al. Structure Characteristics and Accumulation Significance of Nanopores in Longmaxi Shale Gas Reservoir in the Southern Sichuan Basin [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(3): 438 - 444.
- [22] 毕赫, 姜振学, 李鹏, 等. 渝东南地区黔江凹陷五峰组—龙马溪组页岩储层特征及其对含气量的影响[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(8): 1275 - 1283.
- Bi H, Jiang Z X, Li P, et al. Shale Reservoir Characteristics and Its Influence on Gas Content of Wufeng Longmaxi Formation in the Southeastern Chongqing [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(8): 1275 - 1283.

[23] 谢勇强,彭文庆,曾荣. 煤层气吸附与解吸可逆性实验研究[J]. 矿业工程研究,2010(2): 13 – 16.

Xie Y Q, Pen W Q, Zeng R. Current Research Situation of Porosity & Permeability Characteristics and Seepage Mechanism of Shale Gas Reservoir [ J ]. Mineral Engineering Research, 2010(2): 13 – 16.

[24] 王羽,金婵,汪丽华,等. 应用氩离子抛光 – 扫描电镜方法研究四川九老洞组页岩微观孔隙特征[J]. 岩矿测试,2015,34(3):278 – 285.

Wang Y, Jin C, Wang L H, et al. Characterization of Pore Structures of Jiulaodong Formation Shale in the Sichuang Basin by SEM with Ar-ion Milling[ J ]. Rock and Mineral Analysis, 2015, 34(3): 278 – 285.

[25] 田华,张水昌,柳少波,等. 压汞法和气体吸附法研究富有机质页岩孔隙特征[J]. 石油学报,2012,33(3): 419 – 427.

Tian H, Zhang S C, Liu S B, et al. Determination of Organic-rich Shale Pore Features by Mercury Injection and Gas Adsorption Methods [ J ]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(3): 419 – 427.

## Analysis of the Pore Structure of Shale in Ordos Basin by SEM with Nitrogen Gas Adsorption-Desorption

CHEN Sheng-rong<sup>1</sup>, SHUAI Qin<sup>1\*</sup>, GAO Qiang<sup>1</sup>, TIAN Ya<sup>2</sup>, XU Sheng-rui<sup>3</sup>, HUANG Yun-jie<sup>1</sup>  
(1. Faculty of Materials Science and Chemistry, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China;  
2. Oil and Gas Resources Research Center, China Geological Survey, Beijing 100029, China;  
3. School of Earth Sciences, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Identification of porosity in shale is of great significance for exploring mechanism of shale gas. Porosity properties of the shale samples from the Ordos Basin were characterized by multiple techniques including Scanning Electron Microscope (SEM), Mercury Intrusion Porosimetry (MIP), and nitrogen gas adsorption-desorption. Results showed that the shales contained abundant pores that include dissolution pore, microfracture pore, and intergranular pore. The pore sizes range from several to several hundred nanometers. The total surface area ranges from 5.06 to 19.32 m<sup>2</sup>/g and pore volume has a range of 0.01 – 0.03 cm<sup>3</sup>/g. Results indicate that the OrdosBasin Shale develops pores of various types and sizes. The main type of pore is the nano-pore, which is beneficial for the storage of shale gas. Micro-cracks are beneficial for the transportation of shale gas. These results suggest that the basic environment of the Ordos Basin is suitable for the storage of shale gas and that the Ordos Basin may be rich in shale gas.

**Key words:** shale; pore structure; Scanning Electron Microscope; low pressure nitrogen adsorption; mercury porosimetry