

# 页岩储层纳米级孔隙的研究进展

谷渊涛<sup>1,2</sup>, 万泉<sup>1\*</sup>, 覃宗华<sup>1</sup>, 李姗姗<sup>1,2</sup>, 傅宇虹<sup>1,2</sup>, 杨美稚<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

当前, 页岩气在中国油气资源勘探中的地位越来越受到人们的关注。据 2012 年统计我国页岩气的远景资源量为  $218 \times 10^{12} \text{ m}^3$ , 2600 m 以上的现实资源量为  $123 \times 10^{12} \text{ m}^3$  (姜福杰等, 2012)。页岩气在天然气资源中也占有重要地位, 以四川盆地为例, 仅评价过的寒武系和志留系两套页岩, 页岩气资源量就相当于该盆地常规天然气资源量的 1.5~2.5 倍 (高慧丽, 2010)。由此可见, 页岩气的勘探开发有重大的实际意义。纳米级孔隙是页岩中储存气体的主要场所, 因此对这类孔隙的研究就显得尤为重要。本文就页岩储层纳米级孔隙的一些研究进展及目前较为缺乏的研究问题进行了阐述。

含气页岩的地层厚度较大, 目前具有经济可采价值的页岩气地层的厚度一般大于 6 m, 最大达 610 m, 埋深范围为 183~2600 m。页岩储层 TOC (总有机碳) 含量值变化范围大, 可由 0.3%~25% (Curtis, 2002), TOC 含量高的页岩含粘土矿物较多, 吸附性较强, 单位体积岩石含气量大。泥页岩的热成熟度  $R_0$  (以镜质体反射率表示) 在 0.4%~4% 之间, 变化范围宽 (姜福杰等, 2012)。页岩气以多种形式赋存于孔隙中, 包括吸附态、游离态以及溶解态, 其中吸附气和游离气是页岩气储集的主要形式, 吸附气的含量变化范围为 20%~85%, 主要是吸附在干酪根或矿物表面上, 游离气主要存在于岩石孔隙与裂隙中, 溶解气所占比例较小, 主要溶解于干酪根、沥青质、残留水以及液态原油中 (张雪芬等, 2010)。

自 2008 年邹才能等在四川盆地南部古生界页岩储集层中首次发现纳米级孔隙之后, 纳米孔就成为泥页岩的一个新的研究热点。邹才能等用高分辨率场发射扫描电子显微镜首次发现了页岩中纳米孔, 并用 Nano-CT (X 射线断层成像技

术) 技术对其孔隙结构和空间形态进行了分析。另外, 低压  $\text{N}_2$  吸附、低压  $\text{CO}_2$  吸附以及高压压汞法是研究纳米孔隙孔大小和孔径分布的常见分析方法; 高压  $\text{CH}_4$  等温吸附很好地模拟了页岩储层吸附气体的过程, 也间接证明了纳米孔特殊的储气能力; 原子力显微镜可以对页岩中的纳米孔进行观测, 并得到其三维图像; 聚焦离子束刻蚀与高分辨场发射电镜联用系统 (FIB-FE-SEM) 能够根据需要制备观察面, 使得定点观察页岩储层的纳米级孔隙成为可能, 提供了纳米级图像分辨率, 能够对样品逐层切割并获取图像从而进行三维重构, 是非常适合页岩储层纳米级孔隙研究的实验方法; 小角度中子散射和超小角中子散射 (SANS 和 USANS) 可以得到页岩储层中纳米级孔隙的孔径分布和几何形态等结构特征。这些技术方法详细地表征了页岩中纳米级孔隙的大小、结构、形态、孔径分布等特征, 为我们推演页岩生烃过程及预测页岩气地质储量提供了有效的证据。

研究表明: 页岩储层孔隙主要处于纳米量级, 其孔隙类型可分为有机质纳米孔、粘土矿物粒间孔、岩石骨架矿物孔、古生物化石孔和微裂缝 5 种类型 (杨峰等, 2013)。页岩储层中的孔隙孔径分布较为复杂, 介孔 (2~50 nm) 为最主要的孔隙类型, 也含有一定量的微孔 (<2 nm) 和大孔 (>50 nm); 其中, 微孔和介孔提供了主要的比表面积和孔体积, 介孔的存在可以促进气体渗流, 微孔则主要起储集作用; 纳米孔结构不规则, 有圆柱形孔、裂缝形孔、楔形孔、墨水瓶孔等 (陈尚斌等, 2012)。这些研究结果让我们认清了页岩气的主要储集场所和渗流途径, 也加深了我们对页岩气成藏机理的认识。

页岩储层中对含气量的表述有五个关键参数: 热成熟度、总有机碳含量 (TOC)、吸附气含量、储层厚度和气体地质储量 (Curtis, 2002)。其中, 热成熟度和 TOC 对其含气量有重要影响, 与纳米孔的关系也更为密切。有研究表明孔的形成是热演化和有机质转变的结果, 即在碳氢化合

基金项目: 中国科学院“百人计划”项目

作者简介: 谷渊涛, 男, 1990 年生, 硕士研究生, 主要从事纳米地球化学研究。E-mail: guyuantao@mail.gyig.ac.cn

\* 通讯作者, E-mail: wanquan@vip.gyig.ac.cn

物的产生过程中有机质发生热分解形成孔隙 (Loucks et al., 2009)。但是, 目前对于纳米孔的成因及其与热演化和 TOC 之间的关系并不是很清楚。前人对这方面也缺乏研究。因此我们应该综合上述方法, 取不同热成熟度和 TOC 的页岩样品来研究其纳米孔的大小、形态和孔径分布等特

征, 从而得到纳米孔的大小、形态和孔径分布随热成熟度和 TOC 的变化规律, 进而推测页岩储层纳米孔的形成演化过程及其与热演化和 TOC 之间的关系。这些研究可以让我们更深入的了解页岩气的生成和储集过程, 为寻找新的页岩气有利区提供信息。

## 参 考 文 献:

- 陈尚斌, 朱炎铭, 王红岩, 刘洪林, 魏伟, 方俊华. 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. *煤炭学报*, 2012, 37(3): 438-444.
- 高慧丽. 唤醒沉睡的页岩气. *山东国土资源*, 2010, 26(4): 60-61.
- 姜福杰, 庞雄奇, 欧阳学成, 郭继刚, 金聪, 霍志鹏, 王庆. 世界页岩气研究概况及中国页岩气资源潜力分析. *地学前缘*, 2012, 19(2): 198-211.
- 杨峰, 宁正福, 胡昌蓬, 王波, 彭凯, 刘慧卿. 页岩储层微观孔隙结构特征. *石油学报*, 2013, 34(2): 301-311.
- 杨峰, 宁正福, 张世栋, 胡昌蓬, 杜立红, 刘慧卿. 基于氮气吸附实验的页岩孔隙结构表征. *天然气工业*, 2013, 33(4): 135-140.
- 张雪芬, 陆现彩, 张林晔, 刘庆. 页岩气的赋存形式研究及石油地质意义. *地球科学进展*, 2010, 25(6): 597-604.
- 邹才能, 朱如凯, 白斌, 杨智, 吴松涛, 苏玲, 董大忠, 李新景. 中国油气储层中纳米孔首次发现及其科学价值. *岩石学报*, 2011, 27(6): 1857-1864.
- Clarkson C R, Solano N, Bustin R M. Pore structure characterization of North American shale gas reservoirs using USANS/SANS, gas adsorption, and mercury intrusion. *Fuel*, 2013, 103:606-616.
- Curtis John B. Fractured shale-gas systems. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(11): 1921-1938.
- Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, Jarvie D M. Morphology, genesis, and distribution of nanometer-scale pores in siliceous mudstones of the mississippian barnett shale. *Journal of Sedimentary Research*, 2009, 79(11-12): 848-861.