

# 中国南方富有机质页岩孔隙结构及演化规律初探

王亮, 丁安徐

中国石化华东分公司石油勘探开发研究院, 江苏扬州, 225007

随着页岩气勘探开发的不断深入, 中国南方地区成为页岩气开发的热点区域, 特别作为国内最为成功页岩气田的焦石坝地区, 平均单井产量可达数十万立方/每天。目前中国南方地区的页岩气勘探主要集中于志留系、寒武系及二叠系, 其有机质含量高, 热演化程度多已进入高成熟甚至过成熟阶段。

## 1 中国南方富有机质页岩孔隙类型

页岩多为低孔低渗储层, 孔隙度多低于 10%。而中国南方富有机质页岩孔隙类型多样, 一般将其分为两大类: 无机孔隙及有机孔隙。无机孔隙主要包括: 微裂缝、粒间孔、粒内孔及晶间孔; 而有机孔隙则包括有机质孔及生物化石孔(如笔石)等。各类孔隙的结构特征及成因列于表 1 中。通过氩离子抛光—扫描电镜图像分析, 对孔隙进行定量统计, 发现中国南方页岩孔隙类型组成不尽相同, 虽然有机质含量普遍较高, 但部分地层页岩孔隙中无机孔隙反而占据较大比例, 如黔中地区寒武系九门冲组(TOC 含量最高达 10%)。而川东南志留系龙马溪组页岩中则发育大量的有机质孔。从目前的勘探开发成果来看, 有机质孔对于页岩气的富集起着重要的作用, 是页岩气赋存最为重要的场所。

通过对中国南方数十口页岩气井的页岩样品中的有机质孔进行氩离子抛光—扫描电镜分析(图 1), 我们发现不同地区的页岩有机质孔的形态结构呈现出一定的规律性: 在页岩气产量较高地区, 页岩的有机质孔占据较大的比例, 且孔隙圆度较高, 非均质强, 与此相伴的是较高的压力系数及适中的热成熟度( $R_o$  约 2.5%)。以焦石坝地区为例, 其有机质孔所占比例高达 50%以上, 成为孔隙结构的主

导, 也是页岩气赋存的主要位置。随着生排烃的进行, 地层压力系数降低以及热成熟度的升高, 有机质孔受挤压变形且不断被分割, 孔径变小, 圆度降低, 表现出明显的棱角。在漫长的地质年代中, 这一过程反复进行, 最终会导致有机质孔不断变小, 非均质性变弱, 同时圆度有所恢复。

因此有机质孔结构形态在一定程度上也能够反映页岩气的赋存状态与保存条件。

## 2 有机质孔演化规律初探

为了进一步弄清页岩中有机质孔的演化过程, 笔者选取了部分中国南方页岩样品进行高温高压热模拟实验, 并对模拟实验后的固体残渣进行了比表面孔径、氩离子抛光—扫描电镜、有机碳、全岩等一系列分析测试, 发现了一些有机质热演化过程中出现的规律性现象。

(1) 热模拟实验初期, 部分与黄铁矿颗粒共生的有机质率先消耗, 导致此类黄铁矿颗粒呈“孤岛”状, 为孔隙所包围; (2) 部分块状有机质内部发育一个或数个大孔, 孔隙边缘组成为有机/矿物复合结构, SEM 下可显著区分; (3) 随着热演化的进一步加深, 有机质内部出现大量圆度极高的孔隙, 但此类孔隙中并未发现(2)中的复合环带结构; (4) 热演化后期, 有机质大多呈细密的蜂窝状, 孔径偏低, 多为数十纳米, 分布均匀, 连通性较差; (5) 随着热演化程度的加深, 整个页岩孔隙结构中微孔孔隙比例不断增加。

当然, 以上这些现象也仅限于以上热模拟实验所得出, 还需大量的样本来验证和进一步的深入研究。

注: 本文为中国石化科技项目(编号 P12014)的成果。

收稿日期: 2015-02-02; 改回日期: 2015-02-28; 责任编辑: 费红彩。

作者简介: 王亮, 男, 1985 年生, 博士, 工程师, 主要从事非常规油气电镜分析研究。Email: wangliang207@mails.ucas.ac.cn。

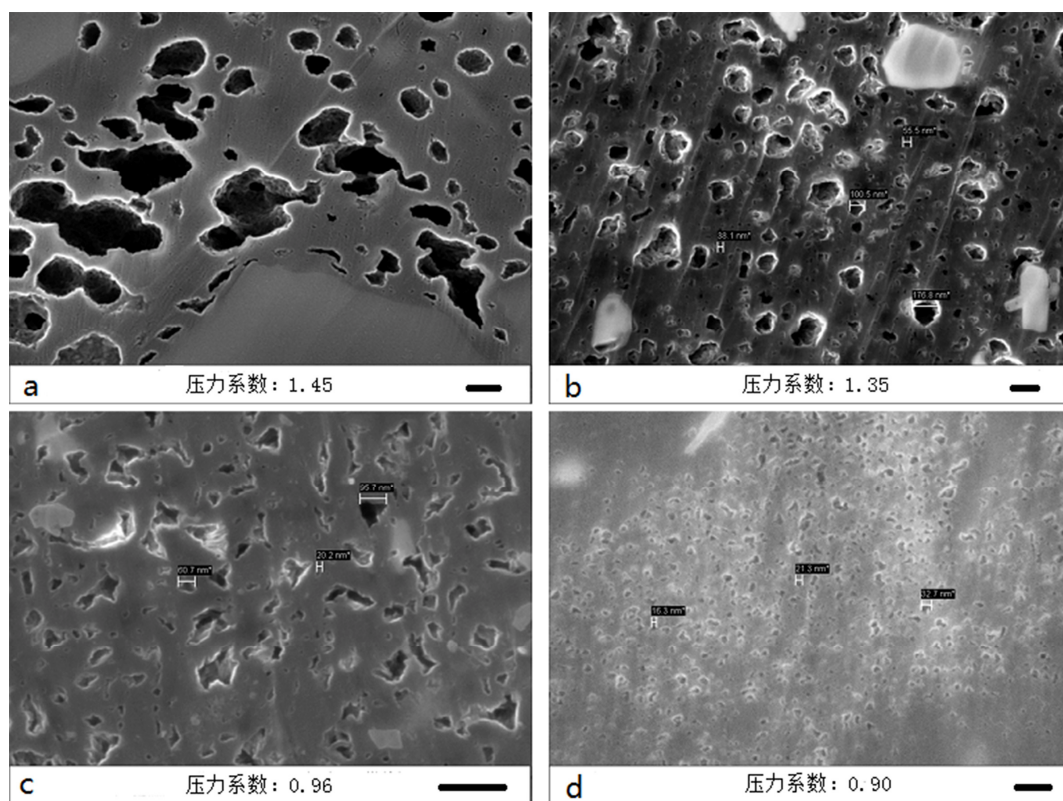


图 1 中国南方页岩有机质孔 SEM 图像

a, b, c: bar=200nm; d: bar=100nm

表 1 中国南方页岩孔隙结构类型

储集空间类型	孔径范围	特征描述	成因
微裂缝	<2um	宽度一般小于 2um, 长度由几微米到数厘米不等	应力 (构造及成岩)
粒间孔	<10um	颗粒间孔隙或矿物间的接触部分, 一般为数百纳米及其以下	压实残余、溶蚀或收缩
粒内孔	<1um	数纳米到数百纳米不等, 包括颗粒内微孔及粘土矿物解理缝	溶蚀
晶间孔	<1um	矿物晶体间的孔隙, 主要位于粘土矿物及黄铁矿部分	结晶
有机质孔	<1um	数纳米至数百纳米不等, 有机质颗粒内生烃所形成孔隙	排烃
生物化石孔	/	生物化石骨架未被充填的空间	生物骨架

### 参 考 文 献 / References

- 曹华, 龚晶晶, 汪贵锋. 2006. 超压的成因及其与油气成藏的关系. 天然气地球科学, 17(3): 422~425.
- 董大忠, 程克明, 王玉满, 等. 2010. 中国上扬子区下古生界页岩气形成条件及特征. 石油与天然气地质, 31(3): 288~299.
- 胡海燕. 2013. 富有机质 Woodford 页岩孔隙演化的热模拟实验. 石油学报, 34(5): 820~825.
- 焦淑静, 韩辉, 翁庆平, 等. 2012. 页岩孔隙结构扫描电镜分析方法研究. 电子显微学报, 31(5): 432~436.
- 汤庆艳, 张铭杰, 余明, 等. 2013. 页岩气形成机制的生烃热模拟研究. 煤炭学报, 38(5): 742~747.
- 王亮, 陈云燕, 刘玉霞. 2014. 川东南彭水地区龙马溪组页岩孔隙结构特征. 中国石油勘探, 19(5): 80~88.
- 于炳松. 2013. 页岩气储层孔隙分类与表征. 地学前缘, 24(4): 211~219.