

# 页岩气地质评价实验测试技术研究进展

丁安徐 李小越 蔡 潇 陈 磊 吴艳艳

中国石油化工股份有限公司华东分公司石油勘探开发研究院, 江苏 扬州 225007

**摘 要:** 页岩气地质评价中的总有机碳、热成熟度及有机质类型、含气量、孔隙度、矿物组成及裂缝发育程度等诸多参数需要通过实验测试来获取, 而常规油气的实验测试方法并不完全适用于页岩气。调查了页岩气地质评价实验测试技术现状, 将其划分为含气性分析、地球化学分析、岩石物性分析、岩石学分析、岩石力学分析等五大类, 论述了页岩气实验测试技术的研究进展和参考测试标准。研究表明, 页岩气实验测试技术将向微观发展, 从纳米级甚至原子级来研究页岩中的孔隙结构及流体赋存状态。但中国页岩气实验目前尚处于探索研究阶段, 因此亟需建立适合中国地质条件的页岩气实验技术体系。

**关键词:** 页岩气; 地质评价; 实验技术; 测试标准; 孔隙结构

DOI: 10.3969/j.issn.1006-5539.2014.02.013

## 0 前言

页岩气是指主体位于暗色泥页岩或高碳泥页岩中, 以吸附或游离状态为主要存在方式的天然气。天然气也存在于夹层状的粉砂岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、甚至砂岩地层中, 表现为典型的“原地”成藏模式<sup>[1-2]</sup>。页岩气在成藏机理上既具有吸附、游离、水溶等多重特征, 又具有自生、自储、自保、储层致密等特点<sup>[3-4]</sup>。

页岩气地质评价主要控制因素包括总有机碳、热成熟度及有机质类型、含气量、孔隙度、矿物组成及裂缝发育程度等。无论是页岩气的选区评价、储量计算或开发阶段, 页岩气实验测试技术都有无可替代的作用。作为一种非常规天然气, 常规油气的实验测试方法并不完全适用于页岩气。前人对页岩气实验测试技术进行了梳理<sup>[5-7]</sup>, 但在页岩孔隙结构分析技术等方面不够完善, 本文结合文献调研和测试经验对页岩气地质评价实验技术系列进

行了总结, 以期为我国页岩气勘探开发提供参考。

## 1 页岩气地质评价实验分类

李玉喜等人<sup>[8]</sup>、胡昌蓬等人<sup>[9]</sup>归纳了页岩气地质评价的主要内容, 其中含气量、总有机碳、成熟度、孔隙度、渗透率、矿物组成等参数都是采用实验技术手段获取。北美的页岩实验测试技术发展相对完善, 如Weatherford、Corelab、Schlumberger等公司, 但各公司的实验体系分类不同, 主要有气体评价、地球化学、常规岩芯分析、特殊岩芯分析、岩石学等几大类。国内学者将页岩气评价总结为生气能力、储气能力和易开采性三大方面<sup>[10]</sup>, 包括气体组分、含气量、等温吸附、岩石学、地球化学、致密岩石专项分析等六类。由于页岩气的特殊性, 其研究内容不同于其他油气资源, 页岩微观孔隙结构应是岩石物性研究的重点。本文将页岩气地质评价实验划分为含气性、地球化学、岩石物性、岩石

收稿日期: 2013-11-28

基金项目: 中国石油化工股份有限公司先导项目“页岩气含气量测试技术方法研究”(34600012-11-Z-ZC0613-192); 中国石油化工股份有限公司华东分公司科技项目“页岩气关键实验技术研究”(HDF/KJ 2011-01)

作者简介: 丁安徐(1982-), 男, 重庆开县人, 工程师, 硕士, 主要从事非常规油气实验地质研究。

学、岩石力学等五大类,分析项目见表1。

表1 页岩气地质评价实验分析项目

| 测试领域 | 分析项目  | 实验目的                   |
|------|---|------------------------|
| 含气性  | 含气量、等温吸附、气体组分及同位素   | 页岩吸附能力,页岩气资源量、组成、成因及来源 |
| 地球化学 | 总有机碳、岩石热解、镜质组反射率、有机质类型、沥青“A”及族组分                          | 页岩气生气物质基础              |
| 岩石物性 | 孔隙度、脉冲渗透率、基质渗透率、真密度、块体密度、氩离子抛光-扫描电镜、CT扫描、比表面积、孔径分布、核磁共振参数 | 页岩气储存空间和流体运移通道         |
| 岩石学  | 薄片鉴定、X衍射全岩分析及黏土矿物组成、扫描电镜                                  | 页岩的矿物组成是否利于开采          |
| 岩石力学 | 泊松比、弹性模量、抗压强度、抗拉强度、软化系数                                   | “甜点段”选层和压裂设计           |

## 2 页岩气地质评价实验测试技术

### 2.1 含气性分析

#### 2.1.1 含气量

含气量是页岩含气性评价、储量预测的关键参数。按赋存状态分,页岩气包括游离气、吸附气和溶解气<sup>[11-12]</sup>。按测定过程分,页岩气包括损失气、解吸气和残余气<sup>[13-15]</sup>。在页岩纳米级孔隙中,即使改变温压条件,气体也仅能以分子或分子团的状态进行扩散<sup>[16]</sup>。利用解吸法得到的实测页岩含气量既有吸附气也有游离气<sup>[17-18]</sup>。

目前,国内外主要采用解吸法测定页岩含气量,包括损失气量、解吸气量和残余气量。在行业标准 SY/T 6940-2013《页岩含气量测定方法》发布前,含气量测定一直参考煤层气标准 GB/T 19559-2008 和 ASTM D 7569-2010,不同的是实验温度采用两阶解吸法,前3 h为钻井液循环温度,3 h后为地层温度。含气量测定关键在于损失气量计算,通常采用美国矿务局 USBM 法直线回归来估算,尽量避免或少用不稳定数据点来计算。唐颖等人及 Shtepani E 等人提出利用直线回归与多项式回归的加权平均或者采用非线性回归来计算损失气量。李玉喜等人则建议二次取心确定解吸气含量。由于损失气计算方法并不适用于游离气,王飞宇等人<sup>[19]</sup>提出了根据流体饱和度计算游离气与溶解气的算法。

#### 2.1.2 等温吸附

等温吸附实验是在相同温度、不同压力条件下进行吸附实验,获得等温吸附曲线,并根据 Langmuir 单

分子层吸附理论,计算出表征页岩对气体吸附特性的 Langmuir 体积和 Langmuir 压力。目前尚无页岩的实验标准,将页岩粉碎后参考煤的等温吸附实验方法进行测试<sup>[20-21]</sup>,但其适用性值得商榷,同时尚不能确定 Langmuir 理论是否适用于页岩的含气性评价<sup>[22-23]</sup>。等温吸附实验方法主要有重量法<sup>[24-25]</sup>和容量法(体积法)<sup>[26]</sup>,采用平衡水饱和的湿样容量法参考 GB/T 19560-2008,采用抽真空干燥的干样容量法参考 SY/T 6132-1995。

#### 2.1.3 气体组分及同位素

气体组分对页岩气开发的经济评价十分重要,甲烷同位素数据可用于页岩气成因、来源、储层连续性 & 区域分布等研究。气样在含气量测定过程中采用排饱和盐水直接法采集。气体组分分析参考 GB/T 13610-2003,甲烷同位素分析参考 GB/T 18340.2-2010。

### 2.2 地球化学分析

#### 2.2.1 总有机碳

总有机碳测试有碳硫测定法、燃烧法、热解气相色谱分析法以及氯仿沥青“A”测定法等,目前最常用的是碳硫测定法。GB/T 19145-2003 中用稀盐酸将样品的无机碳去除后,将样品置于 1 200℃的 O<sub>2</sub> 流中燃烧,以红外探测器检测其总有机碳含量。岩石热解报告中的有机碳含量为 600℃下燃烧后计算得到<sup>[27]</sup>,与总有机碳含量并非同一概念,使用时应注意区分。

#### 2.2.2 热成熟度

岩石热解参数、镜质组反射率、可溶物抽提物的化学组成特征、干酪根自由基含量及时间温度指数等都用来表征烃源岩的热成熟度。岩石热解分析参考 GB/T 18602-2001,镜质组反射率测定参考 SY/T 5124-2012。镜质体主要存在于泥盆纪之后的沉积层中,泥盆纪之前的海相地层中很难找到,通常将海相镜质组反射率换算成等效“陆相”镜质组反射率<sup>[28]</sup>。

#### 2.2.3 有机质类型

有机质类型评价的指标及技术很多,包括干酪根显微组分鉴定、干酪根元素比、岩石热解分析以及干酪根碳同位素等,应用最多的是干酪根显微组分鉴定<sup>[29]</sup>,鉴定参考 SY/T 5125-1996。干酪根镜鉴时,应将干酪根薄片和全岩光片结合使用,最好使用光薄片相互验证。

### 2.3 岩石物性分析

#### 2.3.1 孔隙度与渗透率

孔隙度大小直接控制着游离气的含量,渗透率则是判断页岩气是否具有开发经济价值的重要参数。孔隙度测试有波义尔定律双室法、压汞、气体吸附、核磁共振、扫描电镜等方法。页岩的孔隙度和渗透率测试,国外最常用的是美国天然气研究协会(Gas Research

Institute)研发的GRI法<sup>[30-32]</sup>,利用Dean-Stark法抽提得到饱和度,根据颗粒密度与块体密度计算孔隙度,采用压力脉冲衰减法测试岩心渗透率和基质渗透率。此外,Cui X等人<sup>[33]</sup>提出了一种以波义耳定律为基础,根据气体比重关系来测试孔隙度和渗透率的方法,邹才能等人<sup>[16]</sup>提出用孔隙“连通率”,即纳米级孔隙的连通程度来表示渗透能力。

### 2.3.2 孔隙结构

孔隙系统是页岩气储层的重要评价参数,可以运用X射线成像、扫描电镜(SEM)、透射电镜(TEM)或者扫描声学显微镜(SAM)研究页岩微观结构<sup>[34]</sup>。页岩遇水易膨胀和改变物性,目前常用氩离子抛光技术进行样品前处理。氩离子抛光-扫描电镜技术可以直观描述页岩孔隙的几何形态、连通性和充填情况,统计孔隙密度和优势方向等,其观察孔径下限为2 nm<sup>[35-36]</sup>。聚焦离子束-扫描电镜(FIB-SEM)分辨率一般优于2 nm<sup>[37]</sup>。Curtis M E等人<sup>[38]</sup>利用FIB-SEM得到了500张厚度10 nm的页岩切片图像,组合了三维多孔介质模型。原子力显微镜(AFM)不受观察环境的限制,分辨率为1 nm,扫描范围为0~50 μm<sup>[39]</sup>。Javadpour F等人<sup>[40]</sup>首次运用AFM对纳米孔的气体流动开展了研究。近年来,计算机断层扫描(CT)技术在油气藏评价的应用与研究也日益增多<sup>[41]</sup>。邹才能等人<sup>[42]</sup>采用X光成像Nano-CT系统,揭示了页岩纳米级三维岩石孔隙结构特征,最高分辨率达50 nm,该技术能有效表征页岩内部纳米孔的孔径大小、形状、变化规律及孔隙率等。

### 2.3.3 比表面积与孔径分布

SEM虽可直接观察纳米级孔隙,但在测定孔径分布时统计代表性较差。压汞法与气体吸附法可测得页岩的孔径大小分布,有效表征页岩的非均质性。压汞法参考SY/T 5346-2005,其探测上限为1 mm;气体吸附法参考GB/T 19587-2004和SY/T 6154-1995,其探测下限为0.35 nm,二者联合应用可以表征微孔到大孔范围的孔径分布<sup>[43]</sup>。由于方法的假设与理论模型不同,重叠部分的符合度不是很高,预热也可能造成部分原生孔裂隙结构被破坏<sup>[36]</sup>。

### 2.3.4 核磁共振参数

孔隙内流体的弛豫时间和平均孔径相互对应,利用 $T_2$ 弛豫时间分布可以评价孔隙大小及孔径分布。与渗透率相比,可动流体百分数能更好地评价页岩气储层渗流能力及开发潜力<sup>[44]</sup>。核磁共振岩心分析参考SY/T 6490-2007,该技术在页岩气领域的应用还处于探索阶段,孙军昌等人<sup>[45]</sup>结合气水离心等技术标定了页岩可动流体 $T_2$ 截止值的平均值为8.29 ms。

## 2.4 岩石学分析

### 2.4.1 薄片鉴定

页岩纹层发育,富含有机质、黏土矿物、硅质及碳酸盐矿物等,与普通泥岩具有显著差异,但目前尚无页岩专属的鉴定标准,页岩薄片鉴定仍参考SY/T 5368-2000。针对传统岩石薄片鉴定中肉眼观察定量困难和主观性强等问题,叶润青等人<sup>[46]</sup>提出了基于多尺度分割的岩石图像矿物特征信息提取方法。

### 2.4.2 X射线衍射全岩和黏土矿物分析

X射线衍射技术(XRD)是鉴定、分析和测量固态物质物相的一种基本方法,测试参考SY/T 5163-2010。XRD能对岩石矿物进行半定量分析,可以测定页岩中石英、斜长石、钾长石、碳酸盐矿物、黏土矿物等矿物的含量<sup>[47]</sup>,给出岩石的矿物组成,这对页岩气的地质评价和压裂选层极为重要。

## 2.5 岩石力学分析

页岩气开发需要对储层进行压裂改造,岩石力学性质也是储层评价的重要内容之一。岩石力学性质一般通过三轴或单轴力学实验获取动态或静态下的弹性模量、泊松比、抗压强度、抗拉强度、软化系数等岩石力学参数,测试参考GB/T 23561。为避免岩石结构及力学性质发生较大变化,多采用冷冻法保存岩心和液氮钻取制样技术。此外,李庆辉人等<sup>[47]</sup>提出用岩石弹性参数和矿物组成综合评价页岩的脆性。

## 3 结论

国内页岩气实验还处于探索研究阶段,页岩气专项实验尚未建立统一的实验标准,多项关键实验技术与设备还依赖于国外。因此,当前亟需建立适合中国地质条件的页岩气实验技术体系、规范流程和质量标准。

随着非常规油气事业的快速发展,其实验技术将向微观发展,从纳米级甚至原子级来研究页岩中的孔隙结构、流体赋存状态及流动和扩散规律等,纳米油气透视镜、纳米油气驱替等前沿技术将被应用于页岩气研究。纳米孔中存储的气体可能具有复杂的热力学状态,深入研究页岩微观孔隙结构对页岩气资源评价和成藏机理研究,乃至页岩气勘探开发均有重要意义。为满足页岩气勘探开发一体化的需要,在地质评价过程中还应考虑页岩敏感性评价,结合国内外页岩储层伤害机理研究及常规油气储层保护实验方法,研发页岩敏感性评价及储层保护实验新技术。

## 参考文献:

- [1] 张金川, 薛会, 张德明, 等. 页岩气及其成藏机理 [J]. 现代地质, 2003, 17(4): 466.  
Zhang Jinchuan, Xue Hui, Zhang Deming, et al. Shale Gas and its Accumulation Mechanism [J]. Geoscience, 2003, 17(4): 466.
- [2] 王祥, 刘玉华, 张敏, 等. 页岩气形成条件及成藏影响因素研究 [J]. 天然气地球科学, 2010, 21(2): 22-26.  
Wang Xiang, Liu Yuhua, Zhang Min, et al. Conditions of Formation and Accumulation for Shale Gas [J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(2): 22-26.
- [3] 董大忠, 程克明, 王世谦, 等. 页岩气资源评价方法及其在四川盆地的应用 [J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 33-39.  
Dong Dazhong, Cheng Keming, Wang Shiqian, et al. An Evaluation Method of Shale Gas Resource and its Application in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5): 33-39.
- [4] 刘成林, 葛岩, 范柏江, 等. 页岩气成藏模式研究 [J]. 油气地质与采收率, 2010, 17(5): 1-5.  
Liu Chenglin, Ge Yan, Fan Baijiang, et al. Study on Shale Gas Accumulation Mode [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2010, 17(5): 1-5.
- [5] 刘弋生, 谢军, 武浩宇. 页岩气储层评价技术的方法—实验分析技术 [J]. 内江科技, 2012, 33(3): 101-102.  
Liu Yisheng, Xie Jun, Wu Haoyu. The Method of Reservoir Evaluation for Shale Gas—Experiment Technology [J]. Nei Jiang Ke Ji, 2012, 33(3): 101-102.
- [6] 肖钢, 唐颖. 页岩气及其勘探开发 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.  
Xiao Gang, Tang Ying. Shale Gas and its Exploratory Development [J]. Beijing: Higher Education Press, 2012.
- [7] 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 qing, Huang Ruicheng, Gao Qiang, et al. Research Advance in the Experiment Technology for Shale Gas [J]. Rock and Mineral Analysis, 2012, 31(6): 931-938.
- [8] 李玉喜, 乔德武, 姜文利, 等. 页岩气含气量和页岩气地质评价综述 [J]. 地质通报, 2011, 30(2-3): 308-317.  
Li Yuxi, Qiao Dewu, Jiang Wenli, et al. Gas Content of Gas-Bearing Shale and its Geological Evaluation Summary [J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2-3): 308-317.
- [9] 胡昌蓬, 徐大喜. 页岩气储层评价因素研究 [J]. 天然气与石油, 2012, 30(5): 38-42.  
Hu Changpeng, Xu Daxi. Study on Shale Reservoir Evaluation Factors [J]. Natural Gas and Oil, 2012, 30(5): 38-42.
- [10] 李延钧, 刘欢, 刘家霞, 等. 页岩气地质选区及资源潜力评价方法 [J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2011, 33(2): 28-34.  
Li Yanjun, Liu Huan, Liu Jiaxia, et al. Geological Regional Selection and an Evaluation Method of Resource Potential of Shale Gas [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science Technology Edition), 2011, 33(2): 28-34.
- [11] 唐颖, 张金川, 刘珠江, 等. 解吸法测量页岩含气量及其方法的改进 [J]. 天然气工业, 2011, 31(10): 108-112.  
Tang Ying, Zhang Jinchuan, Liu Zhujiang, et al. The Methods and Improvements of Desorption Measurements for Shale Gas Content [J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(10): 108-112.
- [12] 潘仁芳, 陈亮, 刘朋丞. 页岩气资源量分类评价方法探讨 [J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2011, 33(5): 172-174.  
Pan Renfang, Chen Liang, Liu Pengcheng. Shale Gas Resource Evaluation Methods of Classification [J]. Journal of Oil and Gas Technology(J. JPI), 2011, 33(5): 172-174.
- [13] 董谦, 刘小平, 李武广, 等. 关于页岩含气量确定方法的探讨 [J]. 天然气与石油, 2012, 30(5): 34-37.  
Dong Qian, Liu Xiaoping, Dong Qingyuan, et al. Determination of Gas Content in Shale [J]. Natural Gas and Oil, 2012, 30(5): 34-37.
- [14] Shtepani E, Noll L A, Elrod L W, et al. A New Regression-Based Method for Accurate Measurement of Coal and Shale Gas Content [C]. Paper 115405 Presented at the 2008 SPE Eastern Regional/AAPG Eastern Section Joint Meeting, 11-15 October 2008, Pittsburgh, Pennsylvania, USA. New York: SPE, 2008.
- [15] 刘洪林, 邓泽, 刘德勋, 等. 页岩含气量测试中有关损失气量估算方法 [J]. 石油钻采工艺, 2010, 32(增刊): 156-158.  
Liu Honglin, Deng Ze, Liu Dexun, et al. Method for Estimating Loss Gas in Shale Gas Content Testing [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2010, 32(S): 156-158.
- [16] 邹才能, 杨智, 陶士振, 等. 纳米油气与源储共生型油气聚集 [J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 13-25.  
Zou Caineng, Yang Zhi, Tao Shizhen, et al. Nano-Hydrocarbon and the Accumulation in Coexisting Source and

- Reservoir [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(1): 13-25.
- [17] 王香增, 张金川, 曹金舟, 等. 陆相页岩气资源评价初探: 以延长直罗-下寺湾区中生界长7段为例[J]. *地学前缘*, 2012, 19(2): 192-196.
- Wang Xiangzeng, Zhang Jinchuan, Cao Jinzhou, et al. A Preliminary Discussion on Evaluation of Continental Shale Gas Resources: A Case Study of Chang 7 of Mesozoic Yanchang Formation in Zhiluo-Xiasiwan Area of Yanchang [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(2): 192-196.
- [18] Ambrose R J, Hartman R C, Diaz-Campos M, et al. Pore-scale Considerations for Shale Gas in Place Calculations [C]. Paper 131772 Presented at the SPE Unconventional Gas Conference, 23-25 February 2010, Pittsburgh, Pennsylvania, USA. New York: SPE, 2010.
- [19] 王飞宇, 贺志勇, 孟晓辉, 等. 页岩气赋存形式和初始原地气量(OGIP)预测技术[J]. *天然气地球科学*, 2011, 22(3): 501-510.
- Wang Feiyu, He Zhiyong, Meng Xiaohui, et al. Occurrence of Shale Gas and Prediction of Original Gas in-Place(OGIP) [J]. *Natural Gas Geoscience*. 2011, 22(3): 501-510.
- [20] 张志英, 杨盛波. 页岩气吸附解吸规律研究[J]. *实验力学*, 2012, 27(4): 492-497.
- Zhang Zhiying, Yang Shengbo. On the Adsorption and Desorption Trend of Shale Gas [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2012, 27(4): 492-497.
- [21] 刘洪林, 王红岩. 中国南方海相页岩吸附特征及其影响因素[J]. *天然气工业*, 2012, 32(9): 5-9.
- Liu Honglin, Wang Hongyan. Adsorptivity and Influential Factors of Marine Shales in South China [J]. *Natural Gas Industry*, 2012, 32(9): 5-9.
- [22] 方俊华, 朱炎铭, 魏伟, 等. 页岩等温吸附异常初探[J]. *吐哈油气*, 2010, 15(4): 317-320.
- Fan Junhua, Zhu Yanming, Wei Wei, et al. Preliminary Study of Abnormalities of Shale Isothermal Adsorption Experiment [J]. *Tuha Oil & Gas*, 2010, 15(4): 317-320.
- [23] 熊伟, 郭为, 刘洪林, 等. 页岩的储层特征以及等温吸附特征[J]. *天然气工业*, 2012, 32(1): 1-4.
- Xiong Wei, Guo Wei, Liu Honglin, et al. Shale Reservoir Characteristics and Adsorption Characteristics [J]. *Natural Gas Industry*, 2012, 32(1): 1-4.
- [24] Busch A, Alles S, Gensterblum Y, et al. Carbon Dioxide Storage Potential of Shales [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2008, (2): 297-308.
- [25] Billemont P, Coasne B, De Weireld G. An Experimental and Molecular Simulation Study of the Adsorption of Carbon Dioxide and Methane in Nanoporous Carbons in the Presence of Water [J]. *Langmuir: the ACS Journal of Surfaces and Colloids*, 2011, 27(3): 1015-1024.
- [26] Chareonsuppanimit P, Mohammad S A, Robinson R L, et al. High-Pressure Adsorption of Gases on Shales: Measurements and Modeling [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, (95): 34-46.
- [27] 杨任政, 刘涛, 黄子舰, 等. 岩石热解油气组份综合评价仪实验及地质应用[J]. *石油仪器*, 2001, 15(4): 20-23.
- Yang Renzheng, Liu Tao, Huang Zijian, et al. Rock Pyrolysis Gas Analyzer Component Evaluation Experiments and Geological Application [J]. *Petroleum Instruments*, 2001, 15(4): 20-23.
- [28] 刘祖发, 肖贤明, 傅家谟, 等. 海相镜质体反射率用作早古生代烃源岩成熟度指标研究[J]. *地球化学*, 1999, 28(6): 580-587.
- Liu Zufu, Xiao Xianming, Fu Jiamo, et al. Marine Vitrinite Reflectance as Index of Maturity for Early Paleozoic Source Rock [J]. *Geochemistry*, 1999, 28(6): 580-587.
- [29] 李志明, 徐二社, 秦建中, 等. 烃源岩评价中的若干问题[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2010, 25(6): 8-12.
- Li Zhiming, Xu Ershe, Qin Jianzhong, et al. Several Issues of Hydrocarbon Source Rock Evaluation [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science)* 2010, 25(6): 8-12.
- [30] Luffel D L, Guidry F K. New Core Analysis Method for Meas-Uring Reservoir Rock Properties of Devonian Shale [J]. *JPT*, 1992, 11: 1184-1190.
- [31] Luffel D L, Hopkins C W, Schettler Jr P D. Matrix Permeability Measurement of Gas Productive Shales [C]. Paper 26633 Presened at the 68th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, 3-6 October 1993, Houston, Texas, USA. New York: SPE, 1993.
- [32] Guidry F K, Luffel D L, Curtis J B. Development of Laboratory and Petrophysical Techniques for Evaluating Shale Reservoirs: Des Plaines, Illinois, Gas Technology Institute, GRI-95/0496, 1995.
- [33] Cui X, Bustin R M, Brezovski R, et al. A New Method to Simultaneously Measure In-Situ Permeability and Porosity under Reservoir Conditions: Implications for Characterization

- of Unconventional Gas Reservoirs [C]. Paper 138148 Presented at the Canadian Unconventional Resources & International Petroleum Conference, 19–21 October 2010, Calgary, Alberta, Canada. New York: SPE, 2010.
- [34] 魏明强, 段永刚, 方全堂, 等. 页岩气藏孔渗结构特征和渗流机理研究现状 [J]. 油气藏评价与开发, 2011, 1(4): 73–77.  
Wei Mingqiang, Duan Yonggang, Fang Quantang, et al. Current Research Situation of Porosity & Permeability Characteristics and Seepage Mechanism of Shale Gas Reservoir [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2011, 1(4): 73–77.
- [35] 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 Shujing, Han Hui, Weng Qingping, et al. Scanning Electron Microscope Analysis of Porosity in Shale [J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2012, 31(5): 432–436.
- [36] 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 Taixian. Characteristics of Pore Structure of Marine Shales in South China [J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(9): 1–4.
- [37] 陈晶, 徐军, 陈文雄. 一种可用于微米–纳米级矿物研究的新技术–FIB [J]. 地质通报, 2003, 22(5): 371–373.  
Chen Jing, Xu Jun, Chen Wenxiong. Which Can be Used Micro–Nano Grade Mineral Research New Technologies–FIB [J]. Geological Bulletin of China, 2003, 22(5): 371–373.
- [38] Curtis M E, Ambrose R J, Sondergeld C H. Structural Characterization of Gas Shales on the Micro–and Nano–Scales [C]. Paper 137693–MS Presented at the Canadian Unconventional Resources and International Petroleum Conference, 19–21 October 2010, Calgary, Alberta, Canada. New York: SPE, 2010.
- [39] 张颖, 陈大钧, 李竞, 等. 胶乳水泥的原子力显微结构研究 [J]. 钻井液与完井液, 2011, 28(1): 47–51.  
Zhang Ying, Chen Dajun, Li Jing, et al. Study of Latex Cement Slurry System with AFM [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2011, 28(1): 47–51.
- [40] Javadpour F, Fisher D, Unsworth M. Nanoscale Gas Flow in Shale Gas Sediments [J]. JCPT, 2007, 46(10): 16–21.
- [41] 高建, 吕静. 应用 CT 成像技术研究岩芯孔隙度分布特征 [J]. CT 理论与应用研究, 2009, 18(2): 50–56.  
Gao Jian, Lv Jing. Study of Porosity Distribution Features Using X–Ray CT [J]. CT Theory and Applications, 2009, 18(2): 50–56.
- [42] 邹才能, 朱如凯, 白斌, 等. 中国油气储层中纳米孔首次发现及其科学价值 [J]. 岩石学报, 2011, 27(6): 1857–1864.  
Zou Caineng, Zhu Rukai, Bai Bin, et al. First Discovery of Nano–pore Throat in Oil and Gas Reservoir in China and its Scientific Value [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(6): 1857–1864.
- [43] 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 Hua, Zhang Shuichang, Liu Shaobo, et al. Determination of Organic–Rich Shale Pore Features by Mercury Injection and Gas Adsorption Methods [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 33(3): 419–427.
- [44] 李太伟, 郭和坤, 李海波, 等. 应用核磁共振技术研究页岩气储层可动流体 [J]. 特种油气藏, 2012, 19(1): 107–109.  
Li Taiwei, Guo Hekun, Li Haibo, et al. Research on Movable Fluids in Shale Gas Reservoirs with NMR Technology [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2012, 19(1): 107–109.
- [45] 孙军昌, 陈静平, 杨正明, 等. 页岩储层岩芯核磁共振响应特征实验研究 [J]. 科技导报, 2012, 30(14): 25–30.  
Sun Junchang, Chen Jingping, Yang Zhengming, et al. Experimental Study of the NMR Characteristics of Shale Reservoir Rock [J]. Science & Technology Review, 2012, 30(14): 25–30.
- [46] 叶润青, 刘瑞卿, 张良培. 基于多尺度分割的岩石图像矿物特征提取及分析 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(4): 1253–1261.  
Ye Runqing, Liu Ruiqing, Zhang Liangpei. Mineral Features Extraction and Analysis Based on Multiresolution Segmentation of Petrographic Images [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41(4): 1253–1261.
- [47] 李庆辉, 陈勉, 金衍, 等. 页岩气储层岩石力学特性及脆性评价 [J]. 石油钻探技术, 2012, 40(4): 17–22.  
Li Qinghui, Chen Mian, Jin Yan, et al. Rock Mechanical Properties and Brittleness Evaluation of Shale Gas Reservoir [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(4): 17–22.