

# 渝东南龙马溪组页岩气储层物性特征

陈乔<sup>1</sup>, 谭彦虎<sup>1</sup>, 王莉莎<sup>1</sup>, 王森<sup>1</sup>, 廖开贵<sup>1</sup>, 刘洪<sup>2</sup>, 姚光华<sup>3</sup>, 王其军<sup>4</sup>, 杨波<sup>5</sup>

1. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 401122
2. 重庆地质矿产研究院, 重庆 400042
3. 重庆矿产资源开发有限公司, 重庆 400042
4. 西南石油大学石油工程学院, 成都 610500
5. 中国石化西南油气分公司工程监督中心, 四川德阳 618000

**摘要** 页岩气储层的物性特征是决定页岩气开发方案的重要因素。通过对渝东南下志留统龙马溪组页岩露头岩心的实验测试, 研究了渝东南地区页岩气储层的物性特征。结果表明, 渝东南龙马溪组页岩地层为层理发育, 频散现象明显, 但随着层理倾角的逐渐增加, 波速整体呈下降趋势; 页岩的孔隙度变化范围为 1.5%~2.5%, 渗透率变化范围为  $2.5 \times 10^{-4} \sim 1.3 \times 10^{-3}$  mD, 孔径分布以中孔隙为主, 大孔隙较少, 基本上没有微孔隙, 毛管力较大; 页岩的石英含量高, 黏土含量低, 为硬脆性页岩, 脆性参数为 0.49~0.77, 平均为 0.58; 黏土成分以伊利石为主, 含少量绿泥石和伊/蒙混层, 不含蒙脱石, 膨胀性能弱。研究结果为渝东南地区页岩气储层的开采方式选择、失稳机理分析以及压裂液方案设计提供了依据。

**关键词** 渝东南; 龙马溪组; 页岩气储层; 物性特征

**中图分类号** P534

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.36.001

## Reservoir Physical Characteristics of Shale Gas in Longmaxi Formation in Southeastern Chongqing

CHEN Qiao<sup>1</sup>, TAN Yanhu<sup>1</sup>, WANG Lisha<sup>1</sup>, WANG Sen<sup>1</sup>, LIAO Kaigui<sup>1</sup>, LIU Hong<sup>2</sup>, YAO Guanghua<sup>3</sup>, WANG Qijun<sup>4</sup>, YANG Bo<sup>5</sup>

1. Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 401122, China
2. Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing 400042, China
3. Chongqing Mineral Resources Development Co. Ltd, Chongqing 400042, China
4. School of Petroleum Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China
5. Engineering Supervision Center of Southwest Branch Co., China Petrochemical, Deyang 618000, Sichuan Province, China

**Abstract** The physical experiments on the shale outcrop core in the Longmaxi formation in southeastern Chongqing show that the Porosity variation is in the range of 1.5%~2.5%, the permeability is in the range of  $2.5 \times 10^{-4} \sim 1.3 \times 10^{-3}$  mD; the Shale beddings and the dispersion phenomenon are clearly seen, but their extents gradually increase with the angle of bedding, and the wave velocity decreases. The pore size distribution is changed, with less large pores, basically with no micro pore, and with a large capillary force. The rock quartz content is high, the clay content is relatively low, as typical of the hard brittle shale. At the same time, the clay is dominated by illite, with a small amount of chlorite and illite/smectite mixed layer, not including montmorillonite, the expansion extent is small, the brittle shale parameters are between 0.49~0.77, the average value is 0.58. Test results provide some guidance for the shale mining method selection, the instability mechanism and the fracturing fluid design scheme in the shale gas development in the region.

**Keywords** southeast of Chongqing; longmaxi formation; reservoir of shale gas; physical properties

### 0 引言

页岩气是一种重要的非常规天然气资源, 已受到世界范

围的高度重视<sup>[1-4]</sup>。渝东南地区作为页岩气独立矿种的发现地已成为政策规划和资本注入的重点区域。目前, 围绕该地

收稿日期: 2013-07-29; 修回日期: 2013-11-23

基金项目: 重庆市科技攻关计划重大项目 (CSTC2012ggC90002)

作者简介: 陈乔, 博士, 助理研究员, 研究方向为页岩气勘探开发基础理论, 电子信箱: chenqiao@cigit.ac.cn; 谭彦虎 (通信作者), 博士, 高级工程师, 研究方向为石油天然气地质勘查, 电子信箱: tyhpku@cigit.ac.cn

区页岩气储层勘探开发已开展了大量的科研工作。张琴等<sup>[5]</sup>以下志留统龙马溪组地质理论为指导,选取可能影响含气量的因素进行相关性分析,确定了龙马溪组页岩气的资源量为 $1.77 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。任珠琳等<sup>[6]</sup>通过野外露头观察,讨论下古生界黑色页岩的分布特点,选定下志留统龙马溪组为有利层位。韩双彪等<sup>[7]</sup>在下志留统龙马溪组页岩露头观察、岩心取样及实验测试的基础上,从富有机质页岩分布、有机质类型及含量、成熟度、孔渗性、含气量等方面研究了页岩气聚集条件与资源潜力。武景淑等<sup>[8]</sup>对以下志留统龙马溪组页岩气为勘探目标的渝页1井的岩心进行系统采样,并进行一系列地球化学测试,分析了页岩孔隙结构与矿物组成的相关关系。吴礼明等<sup>[9]</sup>采用应力场模拟中的薄板弯曲模型趋势面分析法对具有海相富有机质页岩的龙马溪组地层进行了裂缝发育程度和分布特征的预测。上述研究主要集中在页岩气分布、成藏机理、含气性评价、有机质含量、微观孔隙结构特征描述等方面,研究目的偏向于资源评价和有利区域优选。本文通过渝东南龙马溪组页岩露头岩心物性实验测试,从页岩气开发的角度分析研究该地区页岩气储层的物性特征。

## 1 页岩露头采集及岩样制备

渝东南地区位于重庆的东南部和四川盆地的东部,南与黔北交接,东与湘西为邻。该地区属于上扬子前陆盆地,位于川中隆起与黔中隆起之间,是上扬子板块的重要组成部分。

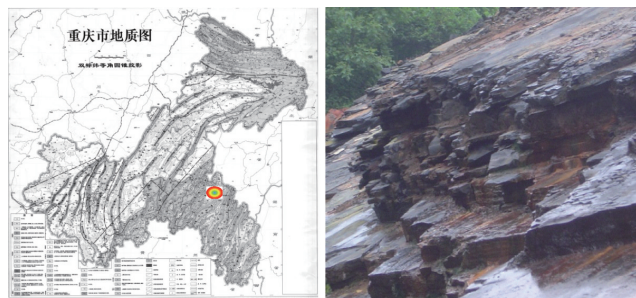


图1 页岩露头剖面  
Fig. 1 Outcrop section

分。渝东南地区古生代主要沉积海相地层,其中下古生界出露最完整,在该地区分布面积超过了50%,上古生界发育不完整,部分地层出现缺失,中生界和第四系覆盖于老地层之上。其中龙马溪组在该地区保存良好,且出露广泛,为该地区野外露头研究提供了有利条件。因此,选择古生界下志留统龙马溪组为研究对象采集了页岩露头。图1为经过现场勘查选取的采集地层剖面照片,从中可以看出该地层岩石层理高度发育,层理界限水平分布,由厚度为1mm左右十分平直的纹层组成,为暗黑色页岩。

层理发育使页岩具有显著的各向异性。随着在长水平井段页岩气钻井过程中井漏、垮塌等失稳问题发生越来越频繁,层理成为一个不可忽略因素而被人们广泛关注<sup>[10,11]</sup>。同时,层理的非均质性导致地层的地应力、弹性模量和断裂韧性较差,以及层理界面强度等力学参数的复杂性,对储层压裂设计中裂缝延伸方向和大小的控制有很大影响。

考虑渝东南下志留统龙马溪组页岩的层理性,遵从GB/T50266-99“工程岩体实验方法标准”的要求,制定岩样制备方案:采集页岩露头同一层位的岩块,先用切割机切成便于钻孔的小岩块,将小岩块放置到以液氮为工作介质的钻机上钻取标准小岩柱岩样。具体的钻取方案如图2所示,按层理面与岩块端面的夹角 $\alpha$ 进行取样, $\alpha$ 从 $0^\circ$ 到 $90^\circ$ ,每隔 $30^\circ$ 取一组岩样,每组10个岩样(小岩柱),共计40个岩样。

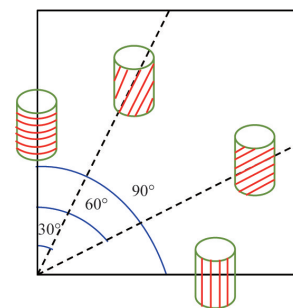


图2 岩样钻取方案  
Fig. 2 Design of core plugs

## 2 页岩孔渗及声波速度特性

实验中用来测量页岩孔隙度的仪器为HKGP-3型致密岩心气体孔渗测量仪,但由于页岩孔隙极小,该仪器只能用于测量孔隙度而不能准确测量渗透率。因此根据气测渗透率原理自行组装了页岩渗透率测量装置,其设计原理为:通过氮气瓶在岩样两端建立压力差,在一定的压力下,使气体流过岩心进入含肥皂水的滴定管,气体的溢出会使滴定管内的肥皂泡向上移动,即刻记录肥皂泡移动前后的距离。由于岩心渗透率不同,通过岩心的流量、压力也不同,可按式(1)计算出渗透率值。渗透率测量装置的测量精度为 $0.1 \mu\text{D}$ 。

$$K = \frac{2Q_0 P_0 \mu L}{A(P_1^2 - P_2^2)} \times 10^{-1} \quad (1)$$

式中, $K$ 为渗透率, $\text{mD}$ ;  $P_0$ 为大气压力, $\text{MPa}$ ;  $Q_0$ 为大气压 $P_0$ 下的体积流量, $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $\mu$ 为气体黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $L$ 为被测岩样长度, $\text{mm}$ ;  $A$ 为岩心截面积, $\text{cm}^2$ ;  $P_1$ 、 $P_2$ 为岩心进出口压力, $\text{MPa}$ 。

测试结果如图3所示,可以看出页岩的渗透率和孔隙度都比较小,孔隙度变化范围为 $1.5\% \sim 2.5\%$ ,平均值为 $1.9\%$ ;渗透率变化范围在 $1 \times 10^{-4} \sim 1.3 \times 10^{-3} \text{mD}$ ,平均值为 $7.6 \times 10^{-4} \text{mD}$ 。下志留统龙马溪组页岩埋深超过 $1000 \text{m}$ ,沉积物粒度小,长期经受地层压实和胶结作用,使得地层孔隙极不发育,形成了该地区特低孔低渗的页岩储层,因此,需要进行大规模的储层改造形成具有导流能力的通道才能实现商业化开采。

利用油气藏地质及开发工程国家重点实验室研制的承压型多频率超声波测量仪<sup>[12]</sup>,开展声波透射实验,采用25、

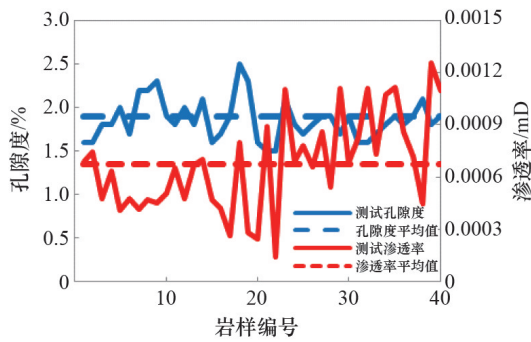


图3 岩样孔隙度及渗透率测试结果

Fig. 3 The test results of porosity and permeability

50、100、250、490kHz 5种频率纵波换能器,对4组岩样(共40个小圆柱形岩样)进行超声波测试。通过分析得到不同层理角度岩样在不同频率下的声波速度如图4所示,可以看出,25kHz下的波速最小,100kHz下的波速最大,490kHz下的波速跳动很大且不稳定,50kHz和250kHz 2个频率下的波速比较接近,由此表明页岩地层的频散现象很明显,不同频率下的波速变化最大可达1000m/s左右。

页岩试样取自同一层位,孔隙度较小。从图4可以看出,孔隙度在1.6%~2.2%左右变化时不同岩样间波速的波动较小;18号岩样的波速有个明显的下降,该岩样的孔隙度为 $\varphi=2.5\%$ ,说明尽管页岩的孔隙结构和孔隙度相对砂岩和碳酸盐偏小,但是声波仍然可以较好地反映孔隙度,孔隙度出现跃变时,波速跟随变化。

定义表征层理走向的红线与岩心轴线的夹角为层理倾

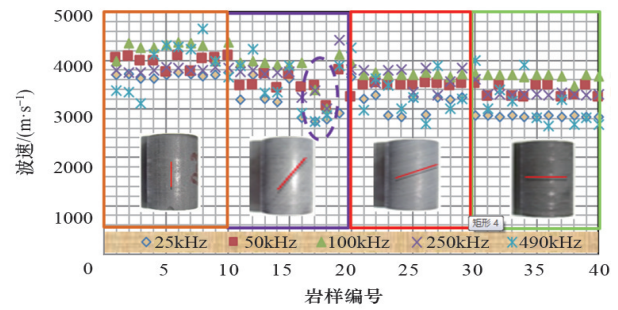


图4 不同频率下的岩样波速

Fig. 4 Rock acoustic velocity results

角。随着层理倾角的逐渐增加,波速整体呈下降趋势。这是因为层理倾角增加时,透射波在单位距离途经的层理数目越多,所消耗的时间和能量相应越大,导致波速逐渐降低。该规律可为非均质页岩地层钻井过程中预测地层岩石剖面强度,分析钻井水平井失稳机理提供重要依据。

孔渗、声波是页岩物性的宏观表征,对页岩微观结构描述还需进一步开展孔径分布等研究。

### 3 页岩孔径分布规律

页岩孔径分布是研究毛管力的基本参数,通过对孔径分布的研究可以确定泥页岩毛管力大小范围。有关孔径尺寸的分类有多种方法,一般采用IUPAC分类法<sup>[13]</sup>,按照每一类孔在吸附等温线上的特征吸附效应划分:孔径小于2nm的为微孔隙,介于2~50nm的为中孔隙,大于50nm的为大孔隙。

实验结果如图5所示,可以看出页岩的孔径分布范围很

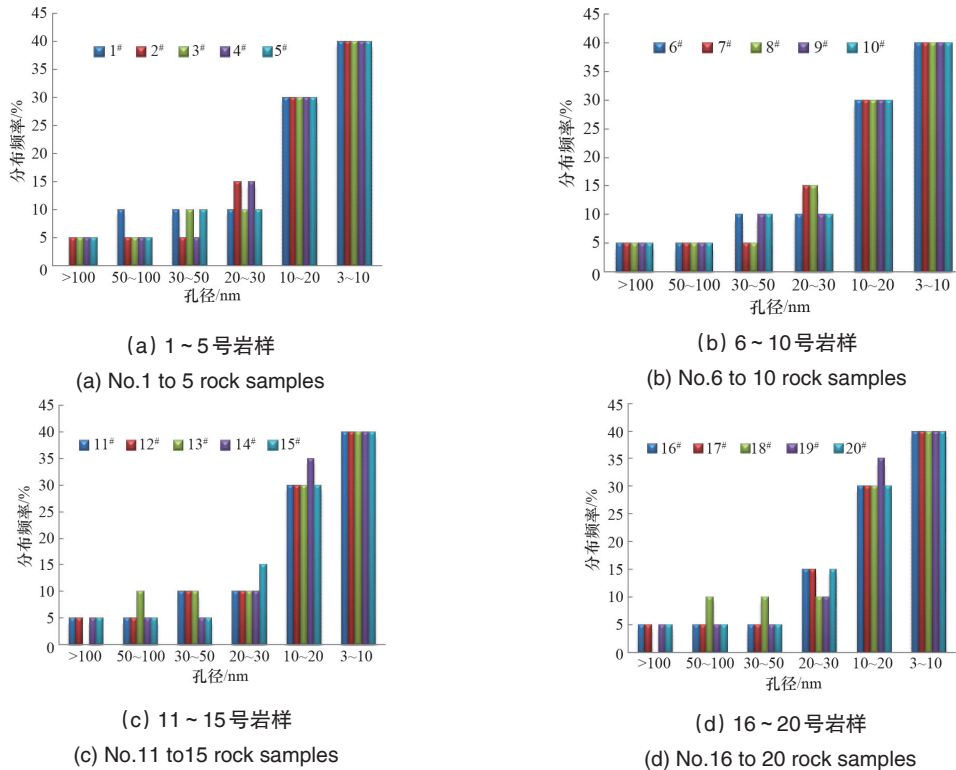


图5 岩样的孔径分布

Fig. 5 The pore size distribution results

大,多数为2~50nm的中孔隙,且以20nm以下的孔隙为主,占页岩总孔隙体积分数75%以上;大于50nm的大孔隙较少,基本上没有小于2nm的微孔隙。该地区页岩的平均孔径较小,所以页岩的毛管力比较大。

#### 4 页岩矿物组成及脆性特征

##### 4.1 页岩矿物组成

本次实验制备了20份岩心样品,利用PANalytical公司的X'Pert PRO粉末X-射线衍射仪,采用X射线衍射分析技术(XRD)进行全岩矿物组分分析,结果如图6所示。可以看出岩样的主要矿物成分为石英、正长石、斜长石、方解石、白云石、黄铁矿和黏土,其中石英、斜长石和黏土的含量均超过10%,石英含量(平均值)占45%以上。

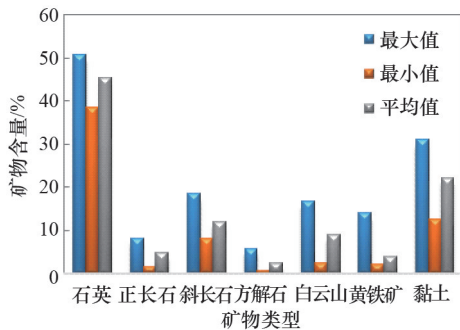


图6 岩样的矿物组分相对含量

Fig. 6 Relative content of mineral components

将岩样研磨成粉末状(约40g),采用沉降法对黏土矿物进行抽提。将抽提出的样品(含水)在玻璃板上制成定向薄膜,经高温烘干进行X衍射测试,结果如图7所示。可以看出,岩样主要含伊利石、绿泥石及伊/蒙混层,其中黏土类型以伊利石为主,含量为77%~88%,平均含量为82%;其次是绿泥石和伊/蒙混层,绿泥石含量为6%~18%,平均含量为12%;伊/蒙混层含量为2%~10%,平均含量为6%,不含蒙脱石。

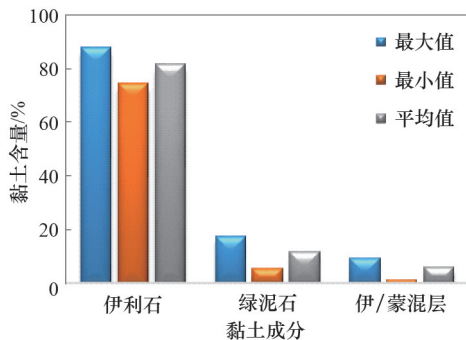


图7 岩样的黏土组分相对含量

Fig. 7 Relative content of clay fractions

利用FEI公司生产的Quanta450环境扫描电子显微镜对岩心样品的矿物赋存状态及微观形态进行分析,结果如图8所示。可以看出,页岩富含石英颗粒,有少量的蜂窝状-半蜂

窝状的伊/蒙混层,主要以伊利石为主,包含少量的片状白云母以及云母向伊利石转化的状态,与矿物组分分析结果吻合很好。

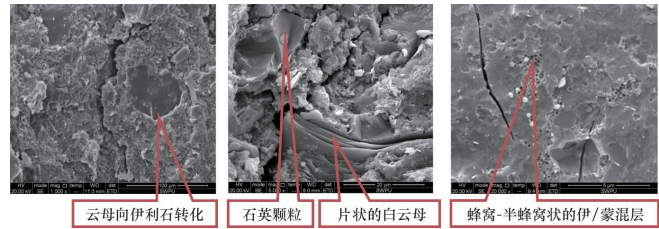


图8 岩样的电镜扫描结果

Fig. 8 Scanning electron microscope results

##### 4.2 页岩脆性特征

页岩的脆性特征影响页岩气储层的可压性,脆性系数是表征页岩脆性特征的重要参数,该参数主要用来评价压裂的难易程度。根据矿物组分和动态弹性参数对脆性系数进行计算分析。

基于矿物组分的脆性系数计算方法为<sup>[14]</sup>

$$B = \frac{W_{\text{qtz}} + W_{\text{carb}}}{W_{\text{total}}} \quad (2)$$

式中, $B$ 为脆性系数; $W_{\text{qtz}}$ 为石英含量,%; $W_{\text{carb}}$ 为碳酸盐含量,%; $W_{\text{total}}$ 为总矿物含量,%。

基于动态弹性参数的脆性系数计算方法,首先通过声速计算动态的弹性模量、泊松比等岩石力学参数(公式(4)和公式(5)),然后计算岩石的脆性系数<sup>[15]</sup>,即

$$B = \frac{\bar{E} + \bar{\nu}}{2} \quad (3)$$

式中, $\bar{E}$ 、 $\bar{\nu}$ 分别为弹性模量与泊松比归一化后的均值。

$$\nu = \frac{\left[\left(\frac{v_p}{v_s}\right)^2 - 2\right]}{2\left[\left(\frac{v_p}{v_s}\right)^2 - 1\right]} \quad (4)$$

$$E = \rho v_s^2 \left[ 3\left(\frac{v_p}{v_s}\right)^2 - 4 \right] / \left[ \left(\frac{v_p}{v_s}\right)^2 - 1 \right] \quad (5)$$

式中, $v_p$ 、 $v_s$ 分别为纵波速度和横波速度,m/s; $\rho$ 为密度,g/mm<sup>3</sup>。

岩样脆性系数的计算结果如图9所示,可以看出,基于矿物组分计算的岩样脆性系数为0.49~0.65,平均为0.57,页岩

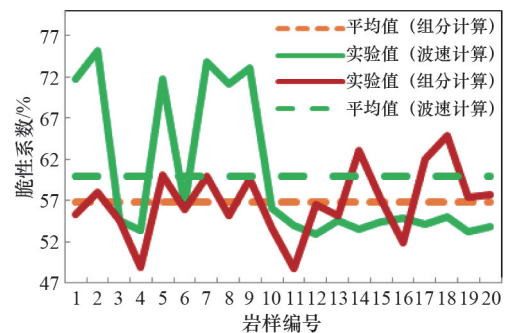


图9 岩样的脆性系数计算结果

Fig. 9 Brittleness coefficient results

的脆性矿物含量较高,尤其是石英平均含量超过了45%,是页岩脆性系数较高的直接原因。利用声波速度计算测试的岩样脆性系数为0.54~0.77,平均为0.60,普遍偏高,说明本区域龙马溪组页岩脆性更强,可压性更好。同时,页岩的脆性特征也决定了其压裂设计中的液体用量、支撑剂浓度及用量的选择。根据北美页岩压裂实践经验<sup>[6]</sup>,本区域页岩压裂设计中考虑到岩石脆性,应选择液体用量多、支撑剂浓度低且用量少的压裂液。

## 5 结论

(1) 渝东南下志留统龙马溪组页岩具有层理发育、致密、低孔、低渗的特点,页岩孔隙度范围为1.5%~2.5%,渗透率范围为 $2.5 \times 10^{-4} \sim 1.3 \times 10^{-3}$  mD,孔径分布以中孔隙为主,大孔隙较少,基本上没有微孔隙。

(2) 页岩地层的频散现象明显,但依然可以较好地反映岩石孔隙度的跃变和层理倾角的增减变化。

(3) 页岩的石英含量高,黏土含量相对低,为硬脆性页岩,黏土成分以伊利石为主,含少量绿泥石和伊/蒙混层,不含蒙脱石,膨胀性能弱。

(4) 基于矿物组分和利用声波速度计算的页岩脆性系数为0.49~0.77,页岩脆性较强,可压性较好。

研究结果已作为渝东南地区页岩气储层开采方式选择、失稳机理分析以及压裂液方案设计的依据,对于指导该区域页岩气开发具有重要意义。

## 参考文献(References)

- [1] 邹才能,董大忠,王社教,等. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(6): 641-653.  
Zou Caineng, Dong Dazhong, Wang Shejiao, et al. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(6): 641-653.
- [2] 张金川,徐波,聂海宽,等. 中国页岩气资源勘探潜力[J]. 天然气工业, 2008, 28(6): 136-140.  
Zhang Jinchuan, Xu Bo, Nie Haikuan, et al. Natural Gas Industry, 2008, 28(6): 136-140.
- [3] 张大伟. 加速我国页岩气资源调查和勘探开发战略构想[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(2): 135-139.  
Zhang Dawei. Oil & Gas Geology, 2010, 31(2): 135-139.
- [4] 董大忠,程克明,王玉满. 中国上扬子区下古生界页岩气形成条件及特征[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(3): 288-299.  
Dong Dazhong, Cheng Keming, Wang Yuman. Oil & Gas Geology, 2010, 31(3): 288-299.
- [5] 张琴,刘洪林,拜文华,等. 渝东南地区龙马溪组页岩含气量及其主控因素分析[J]. 天然气工业, 2013, 33(5): 35-39.  
Zhang Qin, Liu Honglin, Bai Wenhua, et al. Natural Gas Industry, 2013, 33(5): 35-39.
- [6] 任珠琳,李婉君,杨超,等. 渝东南地区下古生界黑色页岩分布特点及有利勘探目标[J]. 录井工程, 2013, 24(1): 77-80.  
Ren Zhulin, Li Wanjun, Yang Chao, et al. Mud Logging Engineering, 2013, 24(1): 77-80.

- [7] 韩双彪,张金川,邢雅文,等. 渝东南下志留统龙马溪组页岩气聚集条件与资源潜力[J]. 煤炭学报, 2013, 38(1): 168-173.  
Han Shuangbiao, Zhang Jinchuan, Xing Yawen, et al. Journal of China coal society, 2013, 38(1): 168-173.
- [8] 武景淑,于炳松,张金川,等. 渝东南渝页1井下志留统龙马溪组页岩孔隙特征及其主控因素[J]. 地学前缘, 2013, 20(3): 260-269.  
Wu Jingshu, Yu Bingsong, Zhang Jinchuan, et al. Earth Science frontiers, 2013, 20(3): 260-269.
- [9] 吴礼明,丁文龙,张金川,等. 渝东南地区下志留统龙马溪组富有机质页岩储层裂缝分布预测[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(9): 43-46.  
Wu Liming, Ding Wenlong, Zhang Jinchuan, et al. Journal of oil and gas technology, 2011, 33(9): 43-46.
- [10] 刘向君,杨超,陈乔,等. 孔洞型碳酸盐岩地层超声波实验研究[J]. 天然气工业, 2011, 31(8): 56-59.  
Liu Xiangjun, Yang Chao, Chen Qiao, et al. Natural Gas Industry, 2011, 31(8): 56-59.
- [11] 王倩,王鹏,项德贵,等. 页岩力学参数各向异性研究[J]. 天然气工业, 2012, 32(12): 62-65.  
Wang Qian, Wang Peng, Xiang Degui, et al. Natural Gas Industry, 2012, 32(12): 62-65.
- [12] 陈乔,刘向君,刘洪,等. 层理性页岩地层超声波透射实验[J]. 天然气工业, 2013, 33(8): 140-144.  
Chen Qiao, Liu Xiangjun, Liu Hong, et al. Natural Gas Industry, 2013, 33(8): 140-144.
- [13] Rouquerol J, Avnir D, Fairbridge C W, et al. Recommendation for the characterization of porous solids[J]. Pure and Applied Chemistry, 1994, 66: 1739-1758.
- [14] 李庆辉,陈勉,金衍,等. 页岩脆性的室内评价方法及改进[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(8): 1680-1685.  
Li Qinghui, Chen Mian, Jin Yan, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(8): 1680-1685.
- [15] Rickman R, Mullen M, Petre E, et al. A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization all shale plays are not clones of the Barnett Shale[R]. Denver, Colorado USA: SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2008.
- [16] Wang Fred. Production fairway: speed rails in gas shale[C]. 7th Annual Gas Shale Summit, Dallas, Texas, USA, 2008.

(责任编辑 韩星明)

## 《科技导报》“卷首语”栏目征稿

“卷首语”栏目每期邀请一位中国科学院院士和中国工程院院士就重大科技现象、事件,以及学科发展趋势、科学研究热点和前沿问题等,撰文发表个人的见解、意见和评论。本栏目欢迎院士投稿,每篇文章约2000字,同时请提供作者学术简历、工作照和签名电子文档。投稿邮箱:kjdbbjb@cast.org.cn。