

# 页岩气测井地层评价的方法与进展

莫修文, 李舟波, 潘保芝

MO Xiu-wen, LI Zhou-bo, PAN Bao-zhi

吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130026

College of Geo-exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, Jilin, China

**摘要:**页岩气测井地层评价主要围绕 3 个方面展开:①页岩气地层的岩性和储集参数评价,包括孔隙度、饱和度、渗透率等;②页岩的生烃潜力评价,主要包括干酪根的识别与类型划分、有机质含量、热成熟度等一系列指标的定性或定量解释;③岩石力学参数和裂缝发育指标的评价。特别是在资源调查和勘探的初期,如何从烃源岩中寻找最有利的页岩气藏富集,是地球物理测井的首要任务。近几年,国外在页岩气测井评价方面的工作主要体现在对 ECS 测井和高分辨率成像测井的应用。另外有研究表明,感应测井与岩石介电常数有关的 X 分量负异常与干酪根的存在及其类型之间有一定的相关性。

**关键词:**页岩气;测井;地层评价

中图分类号:P618.1

文献标志码:A

文章编号:1671-2552(2011)02/03-0400-06

Mo X W, Li Z B, Pan B Z. Method and advance of shale gas formation evaluation by means of well logging. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(2/3):400-405

**Abstract:**Formation evaluation with well logging for shale gas are mainly in: (1) Interpretation of lithology and reservoir parameters such as porosity, saturation, and permeability, etc. (2)Source rock detection which may involve kerogen identification and classification, evaluation of TOC or organic maturity. (3) Evaluation of mechanical parameters and fracture identification. Especially in the early stage of exploration, well logging could be a crucial way for geologists to observe some potential targets. Recently, new advances on well logging application in shale gas are relevant to ECS and FMI. A new research also demonstrates that the negative abnormal in X-signal measurement on account of dielectric permittivity might be a very useful indication for some specific kerogen.

**Key words:** shale gas; well logging; strata evaluation

页岩气是储存在泥岩、页岩或者粉砂质较重的细粒沉积岩中的天然气。在常规油气勘探和开发领域,人们把泥岩、页岩当成盖层和隔层,对地层进行岩石物理性质评价时通常把它们忽略,导致页岩气地层的测井评价方法及相关研究非常薄弱。但是随着常规油气资源的日益紧缺,非常规的页岩气资源已经日益受到各国的重视。中国也已经意识到页岩气对解决能源问题的重要性。因此,研究与之配套的页岩气勘探和开发技术,是我们面临的一项紧迫任务。

页岩气的地层评价涉及到很多方面的内容和技术,如地质学、地球化学、地球物理学、钻井工程、开发等。评价的目标、内容和手段,在勘探与开发的不同阶段又有一定的变化。测井作为一种高效的地球物理探测技术,在页岩气勘探和开发的不同阶段都将发挥重要的作用。首先,利用测井资料发现和评价页岩气层是一种高效经济的方法。与昂贵的钻井成本和低效并不低廉的取心、实验分析相比,测井可以快速而准确地在钻孔中直接获取地层的多种物理性

收稿日期:2010-11-16;修订日期:2010-11-30

资助项目:国家自然科学基金项目《基于孔隙组分的泥质砂岩导电模型理论与实验研究》(批准号:40874057)和吉林大学科学前沿与交叉创新项目《页岩气测井地层评价关键技术研究》(编号:421030554423)

作者简介:莫修文(1970-),男,教授,从事地球物理测井的教学与科研工作,主要研究领域为复杂岩性的油气储层和非常规油气资源的测井解释与地层评价。E-mail:moxw@jlu.edu.cn

质,并通过一定的解释理论和技术,高效地对地层做出精细的评价。随着技术的进步,测井所采集的地层物理信息的数量和精度也在不断提高;其次,应该注意到页岩在矿物组成、岩石物性和渗流特性上与砂岩有着很大的区别,因此传统测井解释理论和方法对于页岩气层并不能完全适用,测井地层评价的内容和方法也有一定区别;另外,与常规油气等资源勘探相比,页岩气测井地层评价的内容也有一定的独特性。例如对页岩气藏来说,页岩本身既是源岩又是储层,天然气在页岩中的存在方式既有游离的又有吸附的。

总体来说,目前页岩气测井地层评价主要围绕着3个方面展开:①页岩气地层的岩性和储集参数评价,包括孔隙度、含气量(包括吸附气、游离气)、渗透率等参数;②页岩的生烃潜力评价,主要包括干酪根的识别与类型划分、有机质含量、热成熟度等一系列指标的定性或定量解释;③岩石力学参数和裂缝发育指标的评价。特别是在资源调查和勘探的初期,如何从烃源岩中寻找最有利的页岩气藏富集,是地球物理测井的首要任务。

近几年,国外在页岩气测井评价方面主要体现在对元素俘获测井(ECS)、高分辨率测井和电阻率成像测井(FMI)的应用。另外有研究表明,感应测井X分量中包含的岩石介电常数异常与干酪根的存在及其类型之间有一定的相关性。

本文将结合页岩气地层评价诸多工作中的一系列问题,对测井地层评价的技术进行有选择性的阐述,并对近几年的新进展进行简略的介绍。

## 1 页岩气评价中的测井技术简述

页岩气勘探、开发与石油等其它资源的勘探手段有相似之处,所采用的地球物理测井方法和仪器基本是相同的。国外在页岩气勘探与开发中,普遍采用了斯仑贝谢、贝克-休斯、哈里伯顿等国际测井服务公司的先进技术。地球物理测井是在钻孔中研究地层物理性质的一系列探测方法的统称。当前国内外使用的先进探测仪器都集成了电子信息、计算机控制、数据处理、应用物理等多个领域中最先进的技术,它们对地层物理性质探测的数量和质量都达到了前所未有的高度。总体来说,目前在油气勘探领域使用的测井技术大致可以分为下述几种类型<sup>[1]</sup>。

(1)以探测地层的电性为主的一系列测井方法,如普通电极系测井、侧向测井、感应测井、自然电位

测井、介电测井等。

(2)以探测地层的放射性为主的一组方法,如自然伽马测井、能谱测井、中子测井、密度测井、元素测井等。

(3)以探测地层的声波传播特性和弹性参数为主的一组方法,如声波速度测井、声幅测井、声波全波测井等。

除此之外,有时还使用一些其它的测井方法,如磁测井、重力测井、温度测井等。这些方法应用范围虽然不广泛,但它们对于解决一些特定的地质或者工程问题往往非常有用。

随着理论和技术的进步,测井仪器也经历了模拟—数字—数控—成像的演变过程。目前国内外常用的先进方法有电阻率扫描成像、声波成像、阵列感应、核磁成像等。

页岩气勘探中涉及的岩石类型、流体性质和研究任务决定了它使用的测井与油气勘探中的测井系列基本是相同的。因此,上述常用的测井方法在页岩气勘探中同样有着广泛的应用,可以提供关于目的层尽可能详尽的岩石物理信息。

## 2 页岩生烃潜力评价中的测井解释

页岩是否具有生烃能力,产生的是油还是气,主要与页岩中所含的有机物总量、类型,促成化学分解的微量元素和热成熟度有关。在一定的条件下,有机物先是变成干酪根,它是形成烃类物质的主要来源。研究表明,干酪根可分为4种类型,每种类型都直接关系到其所要产烃的类型,即是油还是气。第1和第2类(海洋或湖泊环境下的干酪根)易于产油,第3类(陆相环境的干酪根)则易于产气,中间混合型干酪根(尤其是第2和第3类)在海相页岩中最为普遍(图1)<sup>[2]</sup>。划分干酪根类型的一种常用的依据是其含H量。该方法认为含H量高的干酪根主要产油,相反H含量低的干酪根则产气。干酪根中的H耗尽之后,即使还有一定数量的C成分,碳氢化合物的形成过程也将自然终止。

因此,研究页岩中的有机物总量、成熟度、微量元素,确定干酪根的类型和含H量,将有助于明确页岩气的成藏潜力。

除了用地球化学分析的方法确定这些指标以外,用测井资料可以评价干酪根的类型、有机质含量和反应其成熟度的镜质体反射率 $R_o$ 。

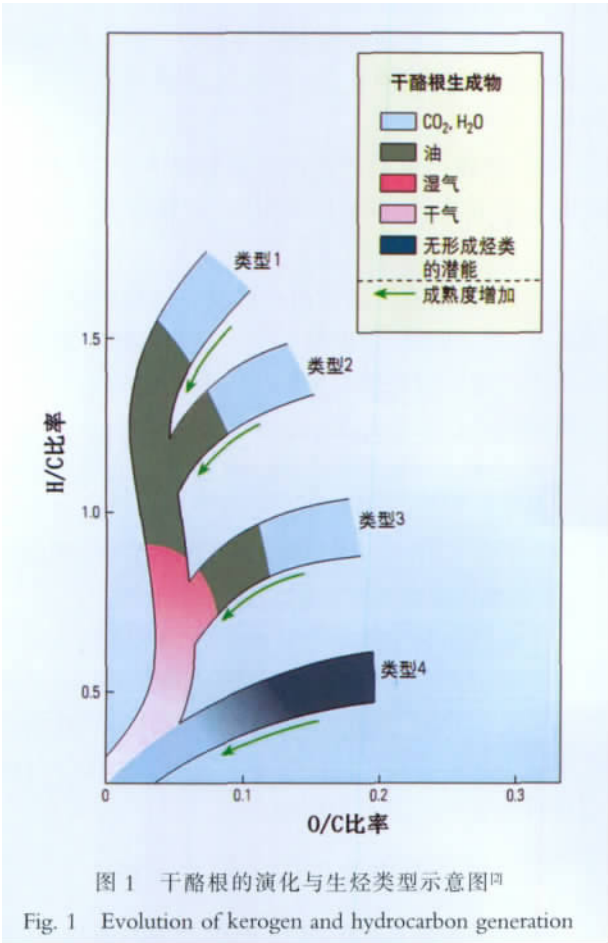


图 1 干酪根的演化与生烃类型示意图<sup>[4]</sup>  
Fig. 1 Evolution of kerogen and hydrocarbon generation

2.1 根据测井资料计算总有机质含量(TOC)

通常情况下，干酪根的形成多是在一个放射性元素 U 含量比较高的还原环境中,因而它使自然伽

马曲线出现高值。另外,干酪根的低密度,通常介于 0.95~1.05g/cm<sup>3</sup> 之间,会降低地层的体积密度。此外,根据 ECS 测井测得的主要元素的丰度,也可以定量地确定干酪根的含量。

总有机质含量(TOC)与干酪根的含量、类型密切相关,因此通过求得 TOC 可以知道地层的生烃能力。下面是目前比较常用的估算 TOC 的测井解释方法。

(1) $\Delta \lg R$  法<sup>[3]</sup>

$$\Delta \lg R = \lg \frac{R}{R_{\text{基线}}} + K \cdot (\Delta t - \Delta t_{\text{基线}})$$

$$TOC = (\Delta \lg R) \cdot 10^{2.297 - 0.1688 \cdot LOM}$$

式中: $\Delta \lg R$  为经过一定刻度的孔隙度曲线(如声波测井)与电阻率曲线的幅度差; $R$  为测井得到的地层电阻率; $R_{\text{基线}}$  为非源岩的电阻率基线; $\Delta t$  为声波测井读数; $\Delta t_{\text{基线}}$  为非源岩的声波测井基线; $K$  为刻度系数,取决于孔隙度测井的单位; $TOC$  为总有机质含量; $LOM$  为热成熟度,它与镜质体反射率有一定的函数关系。

(2)体积密度法

利用岩心分析得到页岩的颗粒密度与 TOC 进行回归,如图 2 所示。有某些地区具有如下的关系<sup>①</sup>:

$$TOC = -0.1477\rho_{\text{骨架}} + 0.4458$$

式中: $TOC$  为总有机质含量; $\rho_{\text{骨架}}$  为岩石的颗粒密度。

此外,计算 TOC 还有自然伽马指示法、元素测井指示法等。例如,国外目前正在利用 ECS 测井发展一种 TOC 解释方法,该方法通过解释地层的矿

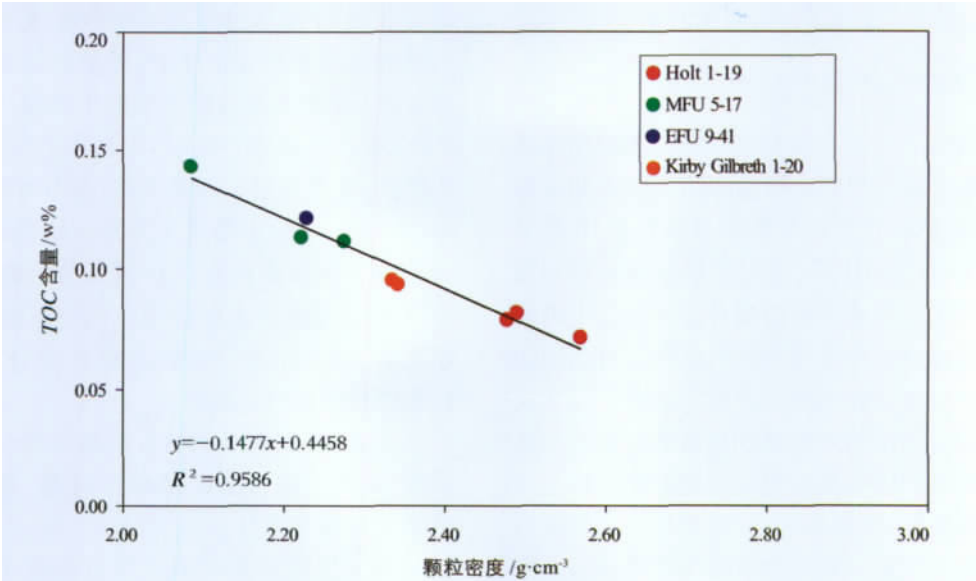


图 2 利用颗粒密度计算 TOC 含量的回归公式<sup>①</sup>

Fig. 2 TOC regression with grain density



物成分与元素组合关系,建立有机质与测井参数之间的关系,从而达到评价烃源岩的目的。

2.2 热成熟度指标的测井解释

指示岩样成熟度的指标有很多种,如镜质体反射率  $R_o$ 、基于显微镜测量的孢子颜色热变指数 (TAI)、热解温度  $T_{max}$  和牙形石色变指数 (CAI)。事实上,其它的指数通常与镜质体反射率  $R_o$  值有一定的相关性。

(1)镜质体反射率  $R_o$  的估算

在实验室,  $R_o$  是在显微镜下测量并进行刻度后得到的。现在,也有人在尝试用测井资料对其进行评估,常用的方法有电阻率法和中子-密度重组合法(图 3)<sup>②</sup>。

(2)热成熟度指数 MI

曾经有学者提出,可以定义一个热成熟度指数 MI,用测井方法采用如下公式计算<sup>[4]</sup>:

$$MI = \sum_{i=1}^N \frac{N}{\Phi_{n9i}(1-S_{w75i})^{1/2}}$$
$$S_{wi} = \left( \frac{R_w}{\Phi_{di}R_i} \right)^{1/2}$$
$$\Phi_{di} = \Phi_d - 0.09$$

式中:  $N$  为取样深度处密度孔隙度不小于 9%、含水不高于 75%的数据样本总数;  $\Phi_{n9i}$  为密度孔隙度不低于 9%时各点的中子孔隙度;  $S_{wi}$  为各点的含水饱和度;  $S_{w75i}$  为符合上述条件的各点的含水饱和度  $S_{wi}$ ;  $R_w$  为地层水的电阻率;  $\Phi_d$  为密度孔隙度;  $\Phi_{di}$  为密度孔隙度中不低于 9%的各点读数;  $R_i$  为数据点的深电阻率读数。

用上述公式求出的成熟度指数是综合有效层并眼测试数据计算出来的一个平均值。所采用的数据要求是密度孔隙度都大于 9%、含烃饱和 25%的深度点。

近些年的研究发现,在一些特殊的页岩层中能观测到介电常数对感应测井有很大影响。例如,在美国俄克拉荷马和得克萨斯某些页岩层中,测得的感应测井原始数据中出现很大的负 X 分量信号,而在邻近的砂岩和页岩中则没有这种情况。研究表明这些大的负 X 分量对应着非常高的介电常数。如果介电常数是造成这种现象的原因,信号大小应与频率有关。通过对原始数据进行系统的检查,也证实了这种相关性。图 4 是对已知是烃源岩的 Woodford 页岩层的感应测井数据进行模拟和反演的结果<sup>[5]</sup>。对不含碳氢化合物页岩的感应测井曲线反演,得到

的介电常数极其微小。因此,岩层的高介电常数异常有可能被作为识别烃源岩的一种标志。

3 含气页岩储集参数的测井解释

页岩的孔隙度、含气饱和度(游离气、吸附气)等储集参数是评价其地质储量,特别是含气量和生产能力的重要指标。

3.1 确定含气页岩的孔隙度

岩心分析可以提供这些参数并用于刻度测井

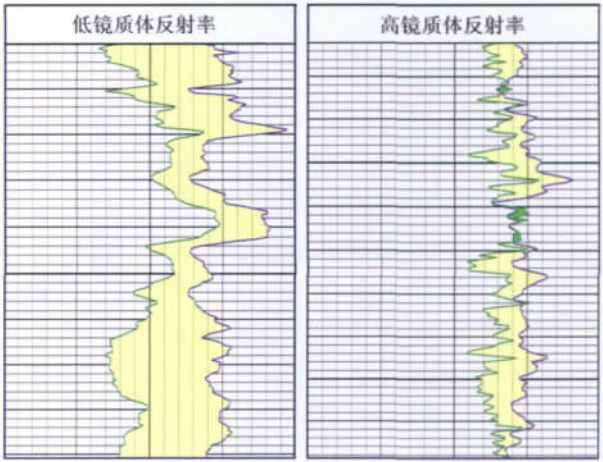


图 3 利用中子-密度组合指示镜质体反射率的测井方法<sup>②</sup>  
Fig. 3 To indicate vitrinite reflectance with CNL-DEN overlap

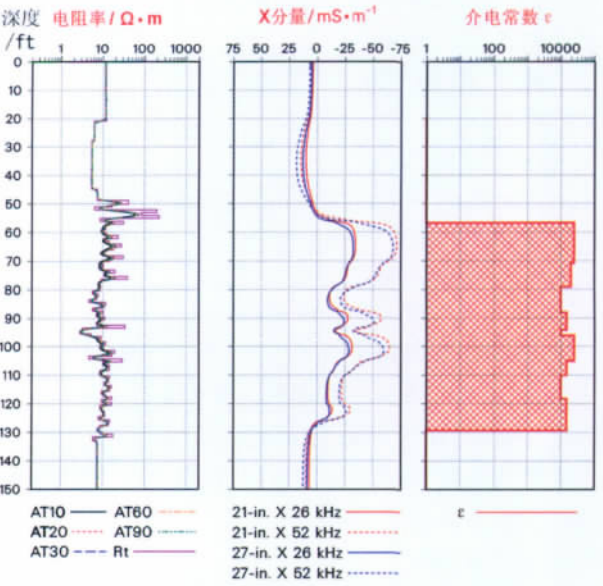


图 4 烃源岩感应测井 X 分量异常及其反演结果<sup>⑤</sup>  
Fig. 4 X-signal abnormal and dielectric permittivity inversion in source rock

响应特征之间的相关性。目前,页岩气地层储集参数的测井解释,主要还是利用传统的三孔隙度测井与电阻率测井的组合法。考虑到 TOC 的影响,密度测井孔隙度计算公式可以修改为:

$$\rho_{\text{测井}}=\rho_{\text{骨架}}(1-\Phi-V_{\text{TOC}})+\rho_{\text{流体}}\Phi+\rho_{\text{TOC}}V_{\text{TOC}}$$
$$\Phi=\frac{\rho_{\text{骨架}}-\rho_{\text{测井}}\left(\frac{\rho_{\text{骨架}}\text{TOC}}{\rho_{\text{TOC}}}-\text{TOC}+1\right)}{\rho_{\text{骨架}}-\rho_{\text{流体}}}$$

式中: $\rho_{\text{测井}}$ 为密度测井读数; $\rho_{\text{骨架}}$ 为岩石骨架的密度值; $\rho_{\text{流体}}$ 为岩石孔隙中流体的密度值; $\rho_{\text{TOC}}$ 为岩石中有机质的密度值; $\Phi$ 为岩石的孔隙度; $V_{\text{TOC}}$ 为有机质的体积含量。

由于页岩中的粘土矿物具有独特的理化性质,要准确地给出解释参数是一件比较困难的事情。参数不准确,会降低测井解释孔隙度的精度。

随着 ECS 测井的应用日益增多,这个问题就很容易解决,近几年已经有学者根据 QFM 模型,发展了由 ECS 测得的元素含量换算有关解释参数的方法,如粘土的重量百分比可以由下式获得<sup>③</sup>:

$$W_{\text{粘土}}=1.91(1-2.139W_{\text{硅}}-2.497W_{\text{钙}}-1.99W_{\text{铁}})$$

式中: $W_{\text{粘土}}$ 为地层中粘土的重量百分比; $W_{\text{硅}}$ 为 ECS 测井得到的 Si 元素的含量; $W_{\text{钙}}$ 为 Ca 元素含量; $W_{\text{铁}}$ 为 Fe 元素含量。

同理,由 ECS 测井得到的页岩骨架密度为:

$$\rho_{\text{骨架}}=2.620+0.0490W_{\text{硅}}-0.2274W_{\text{钙}}+1.993W_{\text{铁}}+1.193W_{\text{硫}}$$

而骨架的中子测井参数为:

$$N_{\text{骨架}}=0.408-0.889W_{\text{硅}}-1.014W_{\text{钙}}-0.257W_{\text{铁}}+0.675W_{\text{硫}}$$

3.2 估算含气饱和度

页岩气的勘探实践表明,含气量越高,测得的地层电阻率也就越大,这与常规油气藏的规律是一致的。因此,很多人依旧采用常用的阿尔奇公式来估算含气饱和度。

斯仑贝谢对这个问题是分 2 步进行的。首先,根据地区的等温吸附曲线和测井得到的地层温度、压力,计算地

层的吸附气含量。这个过程比较繁琐,因为等温吸附曲线是在特定的温度和压力下得到的。要得到地层条件下的吸附气含量,要经过一系列的校正<sup>④</sup>。其次,在精确得到粘土矿物的含量、类型和地层孔隙度的基础上,利用双水模型,采用 ELAN-Plus 优化解释程序,得到游离气饱和度。图 5 就是这样得到一个页岩气层的处理实例。

4 页岩气开发中的测井解释技术

页岩的孔隙度和基岩渗透率都非常低,如果页岩中裂缝发育,在一定程度上可以补偿基质的低渗

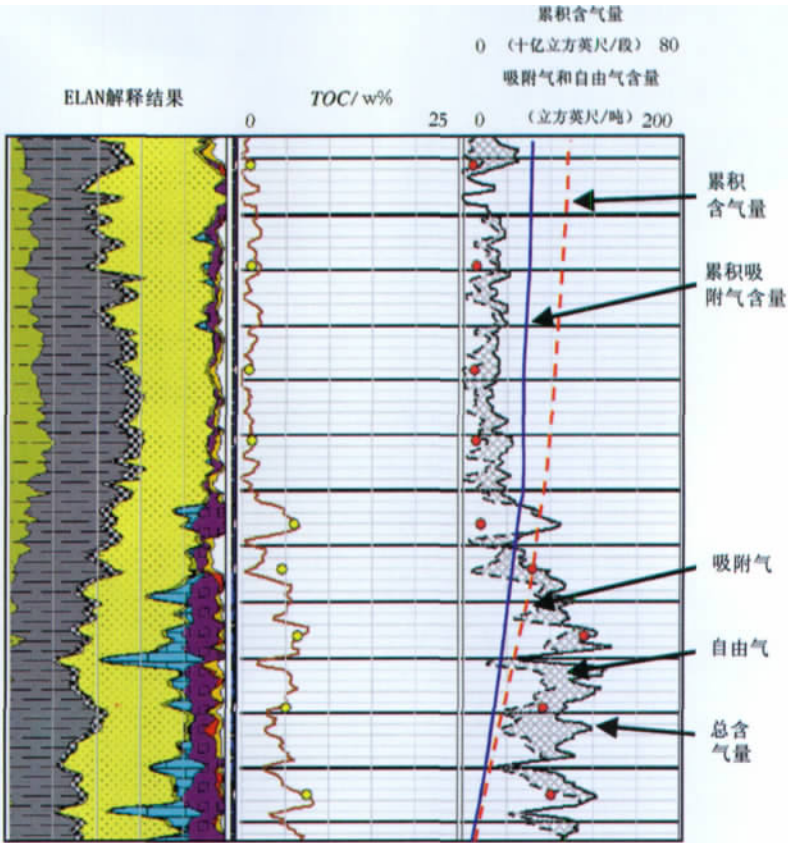


图 5 利用 ELAN-Plus 程序得到的页岩气解释结果<sup>④</sup>

Fig. 5 Shale gas interpretation with ELAN-Plus

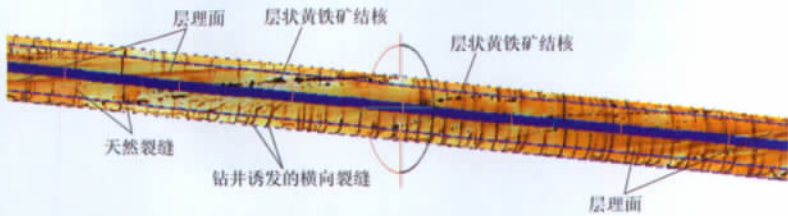


图 6 水平井 FMI 测井实例<sup>④</sup>

Fig. 6 An example of FMI from horizontal well

透率。因此,在页岩气的开发阶段,应首先考虑如何提高系统的渗透率,即页岩基质和天然裂缝的综合渗透率。这往往需要采取一系列的增产措施,最主要的就是压裂改造。

为了更好地利用储层中的天然裂缝,并且使井筒穿越更多的储层,越来越多的作业者都在应用水平钻井技术。虽然该技术在石油工业中并不是一项新技术,但它对扩大页岩气的开发却有着重大的意义<sup>[4]</sup>。

在识别和评价裂缝中,电阻率扫描成像测井发挥着重要作用。它采用高分辨的阵列电极测量井壁范围内的二维电阻率图像,对天然缝、诱导缝、微裂隙等都有着良好的分辨能力。图6是一口水平井成像测井的实例,从图中可以看到,各类裂缝都有良好的指标,通过成像测井数据处理和解释软件,可以实现对裂缝的定量评价。

为了取得良好的压裂效果,有必要利用测井对地层的岩石力学参数进行预先评价。这将为设计合理的压裂方案和施工提供重要参考。

## 5 结论和建议

页岩气的评价涉及的技术和内容非常广泛,无论是在烃源岩潜力评价阶段,还是在天然气储量计算阶段或开发阶段,测井技术和测井解释方法作为高效、快速的地球物理探测和分析手段,可以为地质学家和开发工程师提供丰富的评价指标。但是由于页岩气在岩性,尤其是成藏机制方面的独特性,常规油气勘探采用的测井评价方法难以完全适应,需要针对页岩气地层的特点,开发新的解释技术。同时,ECS测井、成像测井等特殊测井技术,对于

页岩气的勘探和开发都是极为重要的。尤其是ECS测井,目前在国外页岩气勘探开发中起着非常重要的作用,它对岩石的矿物解释具有不可替代的作用,加强对它的研究和应用,对于中国的页岩气勘探将会有很大的帮助。

在普查和选区阶段,由于钻井数量的限制,测井资料的研究和应用还非常稀少。但是作为一项在各阶段都能起到重要辅助作用的技术,建议加强和支持这方面的研究,以便将来能及时地为勘探和开发服务。

**致谢:**在成文过程中得到国土资源部油气资源战略研究中心姜文利、李玉喜等专家的支持和帮助,在此表示感谢。

## 参考文献

- [1]李舟波.钻井地球物理勘探[M].北京:地质出版社,2006.
- [2]斯仑贝谢公司.页岩气藏的开采[J].油田新技术,2006,(3):19-21.
- [3]Passey Q R, Creaney S, Kulla J B, et al. A Practical Model For Organic Richness From Porosity and Resistivity Logs[J]. AAPG Bull., 1990,74(12):1777-1794.
- [4]潘仁芳,伍缓,宋争.页岩气勘探的地球化学指标及测井分析方法初探[J].2009,(3):6-9.
- [5]Barbara I Anderson, Thomas D Barber, Martin G Lüling, et al. Observations of Large Dielectric Effect on Induction Logs,or,Can Source Rocks be Detected with Induction Measurements [C]//SPWLA 47<sup>th</sup> Annual Logging Symposium.2006.
- [6]Rick Lewis, David Ingrhham, Marc Pearch, et al. New Evaluation Techniques for Gas Shale Reservoirs[C]//Reservoir Symposium. Schlumberger:2004.
- ① Greg Twombly, Heather Lohman, Steve Stepanek. Shale Gas in New Zealand. 2007.
- ② Lee Utley. Unconventional Petrophysical Analysis in Unconventional Reservoirs. 2005.
- ③ Michael M Herron, Susan L Herron, James A Grau, et al. Real-Time Petrophysical Analysis in Siliciclastics from the Integration of Spectroscopy and Triple-Combo Logging, SPE 77631. 2002.