

页岩气储层测井评价方法研究

李俊^{1,2} 唐书恒^{1,2} 张松航^{1,2} 赵俊斌^{1,2}

(1. 中国地质大学(北京) 海相储层演化与油气富集机理教育部重点实验室 北京 100083;
2. 中国地质大学(北京) 页岩气资源勘查与战略评价国土资源部重点实验室 北京 100083)

摘要:为了建立适用于页岩气评价的测井解释体系,对比分析了页岩气测井与常规测井的差异,选取国外页岩气勘探实例,说明了测井组合在识别含气页岩层上的应用,根据页岩气勘探需求,对页岩气储层测井评价方法进行探讨。结果表明:常规测井组合能够满足页岩气层的识别要求;传统测井与特殊测井系列组合可用于求取孔隙度、含气量等储集参数,还可用于估算总有碳含量(TOC)、成熟度指数等关键指标;一些特殊测井技术多用于裂缝的识别与岩石力学参数评价。常规测井与特殊测井各有优势,加强对常规测井与特殊测井结合应用的研究应是未来探索方向。

关键词:页岩气;测井技术;响应特征;储层识别;地质评价

中图分类号:TE133 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2016)03-0141-06

Study on methods of logging evaluation of shale gas reservoirs

Li Jun^{1,2} Tang Shuheng^{1,2} Zhang Songhang^{1,2} Zhao Junbin^{1,2}

(1. MOE Key Laboratory of Marin Reservoir Evolution and Hydrocarbon Accumulation Mechanism China University of Geosciences(Beijing) Beijing 100083 China;
2. Key Laboratory of Shale Gas Resources Strategy Evaluation Ministry of Land and Resources China University of Geosciences(Beijing) Beijing 100083 China)

Abstract: In order to build logging interpretation system in the shale gas evaluation, the differences between shale gas logging and common logging were comparatively analyzed. By selecting an example of shale gas exploration, the application on identifying gas bearing shales was illustrated and the methods of logging evaluation of shale gas reservoirs were discussed. The results showed that the common logging method could meet the demand of identifying gas bearing shales and the combination of common and special logging were available for calculating the reservoir parameters of porosity, gas content as well as some key factors like TOC, maturity index; the special logging technology were used for recognizing the fissures and evaluating the parameters of rock mechanics. Both common logging and special had their specific advantages. To enhance the study of combined application of common and special logging should be the future direction.

Key words: shale gas; logging technology; response character; reservoir identification; geological evaluation

0 引言

页岩气作为一种非常规能源,在世界范围内分布广泛。美国具有丰富的页岩气资源,是目前实现页岩气商业化开采最成功的国家,并有较长的开发历史;我国页岩气资源十分可观,以南方海相页岩气储层为代表,揭示了良好的勘探开发前景。加速推进页岩气的勘探开发,对于改善我国能源环境、优化能源结构、缓解常规油气资源紧缺的现状具有十分

重要的意义。

作为页岩气勘探开发中的重要技术手段,地球物理测井能快速捕获多种地层信息,再结合相应的解释技术,可以有效识别储层并对地层进行评价^[1]。相较于复杂且昂贵的钻井取心与岩心实验室分析,测井技术具有快速高效的优势。页岩气储层属于低孔、特低渗储层^[2],非均质性较强,它的成藏特点和评价方法与常规气藏差异明显,这为常规测井技术和解释理论的适用性提出了难题,也为新的

收稿日期:2015-09-18;责任编辑:曾康生 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2016.03.027

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41272176)

作者简介:李俊(1991—)男,重庆人,硕士研究生。Tel:18811794899,E-mail:li1991@hotmail.com

引用格式:李俊,唐书恒,张松航,等.页岩气储层测井评价方法研究[J].煤炭科学技术,2016,44(3):141-146.

Li Jun, Tang Shuheng, Zhang Songhang, et al. Study on methods of logging evaluation of shale gas reservoirs [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(3): 141-146.

测井技术提供了发展空间。

国内外针对页岩气测井技术及储层测井评价技术的研究在不断创新与进步。页岩气测井系列的选择在不断优化,一些新技术的应用不断成熟,例如元素俘获能谱测井(ECS)技术。斯伦贝谢公司(Schlumberger)最新仪器元素扫描测井可直接获取碳元素含量,在页岩气评价中具有良好的应用前景,但是成本太高。目前,国内针对页岩气测井评价的研究还较少,测井评价技术的方法及应用还不成熟,具有较大的研究价值。笔者旨在通过对国内外页岩气测井技术的调研,总结页岩气的测井响应特征,探讨测井技术在页岩气储层识别和地层评价上的应用,分析页岩气测井技术的发展方向,从而能更好地指导勘探开发工作。

1 页岩气测井技术及其含气页岩识别

1.1 页岩气测井技术简介

国外在页岩气测井领域开展工作较早,斯伦贝谢公司在北美页岩气田的勘探实践基础上,建立了包括自然伽马、电阻率、声波时差、中子、密度、电阻率成像(FMI)和元素俘获能谱(ECS)等测井技术在内的页岩气测井系列,其中,元素俘获能谱测井、电阻率成像测井和声波扫描测井被认为是页岩气测井的关键技术^[3]。

泥页岩及其所含的烃类气体对常规测井有良好的响应,故以探测地层电性、放射性和声波传播特性为主的常规测井系列对页岩气储层适配性较好;又由于页岩气特殊的成藏规律和储层物性特征,常规的测井方法和解释理论并不能完全适用于页岩气储层。传统测井技术在识别页岩气储层、确定储层有效厚度等方面具有十分重要的应用;而一些特殊测井技术,如ECS、FIM等测井方法的应用,更有效地解决了页岩矿物成分确定、裂缝发育指标评价等难题^[4]。同时测井技术还在确定压裂层位、提供破裂压力等参数方面,具有十分重要的作用。

1.1.1 常规测井系列

常规测井技术主要指以探测地层电性、放射性、以及声波传播特性等一系列测井方法,包括自然电位、自然伽马、井径、深浅侧向电阻率、声波时差、岩性密度与补偿中子等测井技术,能满足页岩气储层的识别要求。

普通页岩与含气页岩可以通过自然伽马加以区

分;自然电位测井能划分有效储层;而深浅电阻率测井可以反映页岩的含气性;声波时差与补偿中子测井在含气页岩地层中呈高值,并随含气量的增加而变大;密度测井值常随页岩含气量的增加而变小^[5]。

1.1.2 特殊测井系列

核磁共振测井、元素俘获能谱测井、声电成像测井、偶极声波测井等特殊测井技术^[6],在地层矿物成分含量的计算、岩石力学参数的求取,以及裂缝发育指标的评价等方面具有很明显的特点和优势,目前国外对这些特殊测井技术应用较多。

元素俘获能谱测井可求取地层元素和黏土矿物含量,可以通过ECS获得相关物性参数,同时在评价地层孔隙度和有机碳含量计算上也有应用。偶极声波测井能提供横波时差、纵波时差信息,然后利用相关软件进行各向异性分析处理,可以判断地层最大、最小水平应力方向并计算其大小;它还可用于求取泊松比、杨氏模量、破裂压力等岩石力学参数,从而指导压裂方案的设计。声、电成像测井具有可视性、高分辨率和高井眼覆盖率的特点,对识别裂缝类型、指导页岩储层压裂改造具有重要意义^[7],也可用于评定储层的开发效果。

1.2 含气页岩的识别

在页岩气勘探中,识别出含气层当属首要任务,而常规测井系列可以满足识别页岩气层的基本要求。含气页岩与普通页岩相比,其测井响应表现为具有高自然伽马、高电阻率、高声波时差、高中子孔隙度、低地层体积密度和低光电效应这样“三高两低”或“四高两低”的特点,具体的页岩气常规测井响应特征见表1。

表1 页岩气测井响应特征

Table 1 Response characteristics of shale gas well logging

测井曲线	曲线特征	影响因素
自然伽马	高值(>100 API),泥质含量高;有机质中可能含局部低值	有放射性高的物质
井径	扩径	泥岩地层常显扩径,外加有机质的存在会加剧扩径现象
声波时差	相对高值,有周波跳跃	含气量增加会使时差值增大;遇裂缝发生周波跳跃
中子孔隙度	高值	天然气含氢量低
地层密度	中低值	含气量大使密度值偏低;有机质使测量值偏低
岩性密度	低值	含气量增大使得测量值偏小
深浅电阻率	高值	泥质使电阻率偏低,但有机质电阻率极大,测量值常为高值

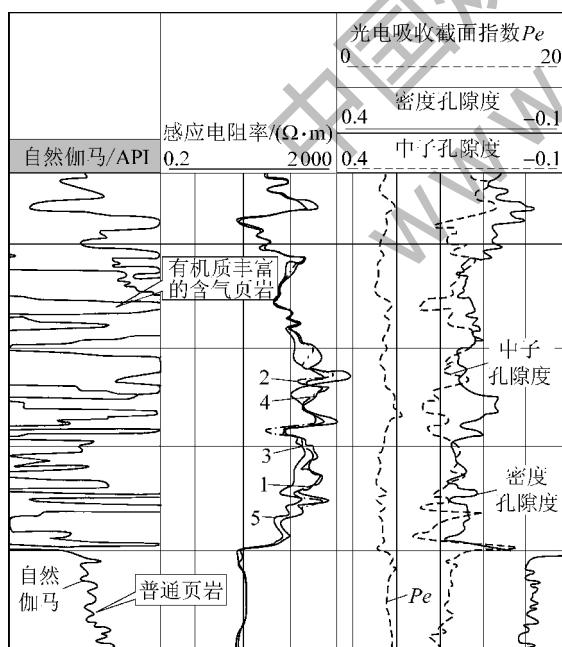
页岩中的有机质和黏土矿物常对放射性元素具有较强的吸附能力,又由于有机质多形成于铀元素含量较高的还原环境,故使得含气页岩普遍具有异常高的自然伽马值。

泥岩由于导电性好,常呈低阻特征,而有机质为极性分子,不导电,会使得电阻率增大^[8],同时,由于烃类的存在使电阻率进一步增大,所以成熟的富有机质泥页岩普遍具有高电阻率的特征。

页岩气储层较为致密,孔隙度小,声波时差为高值,遇到裂缝气层会有周波跳跃现象,当页岩有机质含量增加时,其声波时差会增大。

含气页岩地层的密度值为低值。地层密度值反映的是地层的电子密度,而电子密度正比于地层体积密度。随着有机质和烃类气体含量增加将会使地层密度值更低^[9]。

基于上述页岩气的测井响应特征,可以借助相应常规测井组合的方法来识别页岩气层。国外有学者^[10]利用自然伽马、电阻率、密度和中子测井组合方法得出了含气页岩的典型测井曲线,对比分析了美国俄克拉荷马州密西西比系 Woodford 页岩(图1):上部地层自然伽马、电阻率表现为高值,密度、Pe 值相对偏低,为含气页岩;下部地层电阻率和自然伽马值明显偏低,为普通页岩。



1—5 探测深度分别为 25.4、45.8、76.2、152.4、228.6 cm

图 1 测井组合识别含气页岩层^[11]

Fig. 1 Shale gas reservoirs identified by well logging combination method

2 页岩气储层测井评价技术与方法

在识别出含气层后,便可开展页岩气储层的定性、定量评价。应用测井技术对页岩气储层进行评价包括多个方面:主要有针对地层孔隙度、渗透率、含气饱和度等物性参数在内的储层储集参数评价;有针对有机质类型、总有机碳含量以及热成熟度等指标在内的储层潜力评价;还有针对储层岩石力学参数以及裂缝发育状况的评价。

2.1 页岩气储层储集参数评价

页岩气储层的储集物性参数主要指地层的孔隙度、渗透率、含气饱和度(游离气、吸附气),应用测井技术可以对这些物性参数加以评价。所采用的方法是传统的三孔隙度测井与电阻率测井组合法,还可根据 QFM(石英-长石-云母)模型由 ECS 测得的元素含量换算有关骨架参数的方法来计算含气页岩的孔隙度。QFM 为一岩性处理解释模型,其中,通过硫元素测井值可以计算硬石膏和黄铁矿的含量,储层剩余部分被认为是由石英、长石、云母矿物组成(即 QFM),可用于换算求取孔隙度所需的骨架参数。

2.1.1 页岩孔隙度

密度测井作为传统的三孔隙度测井之一,常用以求取地层孔隙度,其中相关公式为

$$I = \frac{(\rho_{ma} - \rho_b)}{(\rho_{ma} - \rho_f)} \quad (1)$$

式中: I 为岩石的孔隙度; ρ_{ma} 为岩石骨架的密度; ρ_b 为密度测井读数; ρ_f 为孔隙流体的密度。

对于页岩气储层,鉴于总有机碳含量(TOC)的影响较大,密度测井孔隙度计算公式可以修正为^[12]

$$\rho_b = \rho_{ma}(1 - \phi - V) + \rho_f\phi + \rho V \quad (2)$$

$$\phi = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_f} \left(\frac{\rho_{ma}}{\rho} V - V + 1 \right) \quad (3)$$

式中: ϕ 为孔隙度; ρ 为有机质的密度测井值; V 为有机质的体积分数。

近年来有学者将一些特殊测井技术应用到求取孔隙度参数上来^[13]。例如通过 ECS 测井可以测得地层元素的含量,然后根据相关解释模型,可以将其换算为计算孔隙度的有关参数^[14]。相关公式如下:

$$\rho_{ma} = 2.620 + 0.049 W_{Si} - 0.227 W_{Ca} + 1.993 W_{Fe} + 1.193 W_S \quad (4)$$

$$N_g = 0.408 - 0.889 W_{Si} - 1.014 W_{Ca} -$$

$$0.257 W_{Fe} + 0.675 W_S \quad (5)$$

式中: N_g 为骨架的中子测井参数; W_{Si} 为 ECS 测井得到的 Si 元素的含量; W_S 为 S 元素含量; W_{Ca} 为 Ca 元素含量; W_{Fe} 为 Fe 元素含量。

2.1.2 含气量与含气饱和度

地层的电阻率随含气量的增大而增大。常规油气测井中,含气饱和度 S_{wT} 常通过阿尔奇公式来估算求取。

$$S_{wT} = \sqrt{\frac{aR_w}{\phi^m R_t}} \quad (6)$$

式中 R_w 为地层水电阻率; R_t 为地层电阻率; a 、 m 、 n 为岩层电性参数, m 也称胶结系数。

在非常规储层中,含气量通常是通过地球化学分析和测井解释相结合的技术来获取。页岩气主要由吸附气和游离气组成,所以需要分别求取吸附气和游离气含量。国外的处理思路(图 2)主要为:一方面通过岩心实验室分析来获取吸附气含量,另一方面,通过测井解释估算总的含气量,最后计算得到游离气含量^[15]。例如,斯伦贝谢公司是先依据等温吸附曲线和温度、压力等地层参数来计算吸附气含量;然后利用 ELANplus 测井解释程序求得游离气含量。

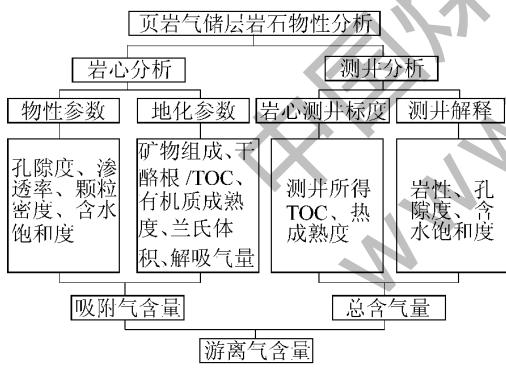


图 2 游离气含量求取流程

Fig. 2 Getting free gas content workflow

2.2 页岩气储层潜力评价

鉴于页岩气储层自生自储的成藏特征,故要评价当下储层的含烃量和生烃潜力,有必要首先获知有机质类型和总有机碳含量(TOC)^[16];其次,热成熟度也是评价的关键参数。除了常用的地球化学方法,测井解释方法也能用于评价这些指标。

2.2.1 总有机碳含量(TOC)的测井评价

总有机碳含量(TOC)是评价页岩气生烃潜力的重要指标^[17]。 ΔlgR 法是当下应用较多并且较为成熟的估算 TOC 的测井解释方法。此外,计算 TOC

还有元素测井指示法、自然伽马指示法等其他方法。目前,国外正在利用 ECS 测井技术发展一种新的 TOC 解释方法,它基于 ESC 测井所获得的主要元素的丰度,通过元素组合关系换算成地层的矿物成分,来定量地确定干酪根的含量^[18]。

ΔlgR 法是埃克森(Exxon) 和埃索(Ess) 公司于 1979 年开发出的一门技术。通过测井资料来识别含有有机质岩层并求取总有机碳含量,具体方法为使用孔隙度测井曲线和电阻率测井曲线相叠合,应用较广并且较为精确的是声波测井曲线与电阻率测井曲线的组合^[19],同时也可以用密度和中子测井曲线与电阻率测井曲线进行叠加。声波时差与电阻率测井曲线叠加计算 ΔlgR 的方程是为

$$\Delta lgR = \lg \frac{R}{R_o} + K(\Delta t - \Delta t_o) \quad (7)$$

式中: R 为岩石的实测电阻率 $\Omega \cdot m$; R_o 为泥岩对应于 Δt 值时的电阻率; Δt_o 为实测的声波时差值; Δt_0 为非烃源岩的声波时差值; K 是基于所采用的孔隙度测井单位的刻度系数。

根据经验公式^[20]得有机碳含量 w (TOC) 为

$$w(TOC) = (\Delta lgR) \times 10^{2.297 - 0.168 L_m} \quad (8)$$

式中: L_m 为热成熟度,与 R_o 呈一定函数关系。

2.2.2 热成熟度指标的估算

有机质热成熟度是评价高含气和高产页岩气储层的关键地球化学参数^[21],它会影响页岩中的吸附气含量。

镜质组反射率 R_o 是评价有机质成熟度级别的关键参数,主要通过实验室分析测试得到,有学者也在尝试用测井资料对其进行评估,常使用的方法是电阻率测井法和中子—密度测井重组合法。

页岩气层的成熟度指数 MI 也可通过测井方法获取:

$$MI = \sum_{i=1}^N \frac{N}{\phi_{n9i}(1 - S_{w75i})^{1/2}} \quad (9)$$

式中: N 为取样深度处含水饱和度不大于 75%、密度孔隙度不小于 9% 的数据样本总数; ϕ_{n9i} 为各点中子孔隙度不小于 9% 时的读数; S_{wi} 为各点的含水饱和度; S_{w75i} 即满足上述条件的各点的含水饱和度。

$$S_{wi} = \left(\frac{R_w}{\phi_{d9i}^m R_i} \right)^{1/2} \quad (10)$$

其中: ϕ_{d9i} 为各点中密度孔隙度大于或等于 9% 时的读数; R_i 为电阻率读数; R_w 为地层水电阻率; m 作为胶结系数,在泥岩或页岩中 $m=2$ 。用上述公式

求取成熟度指数 MI 时,所采用的数据点要求是密度孔隙度不小于 9%、含烃饱和度大于 25% 的深度点,满足上述条件的页岩层段被视为有效层段。

2.3 岩石力学参数与裂缝发育指标评价

在页岩气的开发中,对储层进行压裂改造必不可少。利用测井技术对地层的相关岩石力学参数进行预先评价,对压裂方案的设计具有重要的指导意义。主要依托的是特殊测井技术(如偶极声波测井、全波列声波测井等)与相关岩石物理试验分析^[22]。在获取测井资料的基础上,结合实验室岩石物理分析,通过建立相应计算模型来求取岩石力学参数,进而可以预测和检测压裂效果。

页岩中裂缝的发育情况对页岩气开采意义重大。首先,裂缝可以增大储层的运聚空间,改善储层渗滤性能并增加游离气含量;其次,裂缝还可以增加页岩的比表面积,有助于提高吸附气的含量^[23]。前已述及,电阻率成像测井(FIM)在裂缝的识别与评价中发挥着重要作用。由于具有高分辨的阵列电极,FIM 能够获取井壁的二维电阻率图像,用相关解释软件对成像测井数据经行处理后,便可对裂缝的发育指标进行评价。

3 结语

在页岩气勘探开发中,测井技术在评价页岩气储层、获取储层参数等方面的应用日益增多,作用日渐增大。常规测井技术可以有效地进行页岩气储层的识别与评价,但并不能完全满足页岩气储层评价的要求;一些特殊测井技术,如元素俘获能谱测井(ECS)、成像测井(FIM)等,在确定岩石矿物成分、识别储层裂缝等方面更有优势,还可以参与评价孔隙度和 TOC 等物性参数。基于我国页岩气的地质特点和勘探现状,综合国内外页岩气的勘探开发实践表明,常规测井技术和测井评价方法在页岩气勘探开发中具有十分重要的作用;同时,ECS 测井、成像测井等特殊测井技术的作用不可忽视,加强对它们的研究和应用,对我国的页岩气勘探开发工作会有很大的帮助。

参考文献(References):

- [1] Passey Q R,Cleaney S,Kulla J B.A practical model for organic richness from porosity and resistivity logs [J].AAPG Bulletin,1990,74:1777-1794.
- [2] 刘大猛,李俊乾,李紫楠.我国页岩气富集成藏机理及其形成条件研究[J].煤炭科学技术,2013,41(9):66-70.
- [3] 吴庆红,李晓波,刘洪林,等.页岩气测井解释和岩心测试技术:以四川盆地页岩气勘探开发为例[J].石油学报,2011,32(3):484-488.
- [4] 刘双莲,陆黄生.页岩气测井评价技术特点及评价方法探讨[J].测井技术,2011,35(2):112-116.
- [5] Liu Shuanglian,Lu Huangsheng.Evaluation methods and characteristics of log evaluation technology in shale gas [J].Well Logging Technology,2011,35(2):112-116.
- [6] 徐效英,王峰,梁亚林.煤层气指标的测井解释[J].煤炭科学技术,2001,29(7):19-20.
- [7] Xu Xiaoying,Wang Feng,Liang Yalin.Logging interpretation of coal bed methane index [J].Coal Science and Technology,2001,29(7):19-20.
- [8] 肖立志,刘堂宴,傅容珊.利用核磁共振测井评价储层的捕集能力[J].石油学报,2004,25(4):38-41.
- [9] Xiao Lizhi,Liu Tangyan,Fu Rongshan.Application of nuclear magnetic resonance log to trapping capability evaluation [J].Acta Petrolei Sinica,2004,25(4):38-41.
- [10] Curtis J B.Fractured Shale-gas Systems [J].AAPG Bulletin,2002,86(11):1921-1938.
- [11] Zhu Dingwei,Wang Xiangzeng,Ding Wenlong,et al.Application of logging data in the identification of high quality shale gas reservoirs:An example from the Chang-7 black shale in southeastern Ordos Basin [J].Journal of Xi'an Shiyou University:Natural Science Edition,2013,28(2):25-29.
- [12] 潘仁芳,赵明清,伍媛.页岩气测井技术的应用[J].中国科技信息,2010,4(7):16-18.
- [13] Pan Renfang,Zhao Mingqing,Wu Yuan.Application on shale gas logging technology [J].China Science and Technology Information,2010,4(7):16-18.
- [14] Schmoker J W.Determination of organic matter content of appalachian devonian shale from gamma ray logs [J].AAPG Bulletin,1979,63(9):1504-1537.
- [15] 肖昆,邹长春,黄兆辉,等.页岩气储层测井响应特征及识别方法研究[J].科技导报,2012,30(18):73-79.
- [16] Xiao Kun,Zhou Changchun,Huang Zhaoxue,et al.Summary on logging response characteristics and identification methods for shale gas reservoir [J].Science & Technology Review,2012,30(18):73-79.
- [17] 莫修文,李舟波,潘保芝.页岩气测井地层评价的方法与进展[J].地质通报,2011,30(2/3):400-405.
- Liu Dameng,Li Junqian,Li Zinan.Research on enrichment and accumulation mechanism of shale gas and its formation conditions in China [J].Coal Science and Technology,2013,41(9):66-70.

- Mo Xiuwen ,Li Zhoubo ,Pan Baozhi.Method and advance of shale gas formation evaluation by means of well logging [J].Geological Bulletin of China 2011 ,30(2/3) : 400–405.
- [13] 方锡贤,王光鹏,梁华伟等.气测录井资料在安深1井页岩油气评价中的应用[J].石油地质与工程 2011 ,25(5) : 34–37.
Fang Xixian ,Wang Guangpeng ,Liang Huawei ,et al.Application of gas logging data in Anshen 1 well shale rockhydrocarbon evaluation [J].Petroleum Geology and Engineering 2011 ,25(5) : 34–37.
- [14] 刘博.利用测井资料有效识别油页岩技术及其应用:以松辽盆地南部地区为例[D].长春:吉林大学 2010: 23–25.
- [15] Ross D J K ,Bustin R M.Characterizing the shale gas resource potential of Devonian–Mississippian strata in the Western Canada sedimentary basin: Application of an integrated formation evaluation [J].AAPG bulletin 2008 ,92(1) : 87–125.
- [16] 齐宝权,杨小兵,张树东等.应用测井资料评价四川盆地南部页岩气储层[J].天然气工业 2011 ,31(4) : 44–47.
Qi Baoquan ,Yang Xiaobing ,Zhang Shudong ,et al.Logging evaluation of shale gas reservoirs in the southern Sichuan Basin [J].Natural Gas Industry 2011 ,31(4) : 44–47.
- [17] 石文睿,王蓉,黄强等.川东鄂西某页岩气井录井解释评价研究[J].录井工程 2012 ,23(1) : 25–29.
Shi Wenrui ,Wang Rong ,Huang Qiang ,et al.The study for the interpretation and devaluation of mud logging and well logging for a shale gas well in Eastern Sichuan–Western Hubei Area [J].Mud Logging Engineering ,2012 ,23(1) : 25–29.
- [18] 罗蓉,李青.页岩气测井评价及地震预测、监测技术探讨[J].天然气工业 2011 ,34(4) : 34–39.
Luo Rong ,Li Qing.Log evaluation seismic prediction and monitoring techniques of shale gas reservoirs [J].Natural Gas Industry ,2011 ,34(4) : 34–39.
- [19] 张培先.页岩气测井评价研究:以川东南海相地层为例[J].特种油气藏 2012 ,19(2) : 12–15.
Zhang Pexian.Logging evaluation of shale gas: a case study of marine shale in southeastern Sichuan [J].Special Oil & Gas Reservoirs 2012 ,19(2) : 12–15.
- [20] Jarvie D M ,Hill R J ,Ruble T E ,et al.Unconventional shale–gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north–central Texas as one model for thermogenic shale–gas assessment [J].AAPG Bulletin 2007 ,91(4) : 475–499.
- [21] 潘仁芳,伍媛,宋争.页岩气勘探的地球化学指标及测井分析方法初探[J].中国石油勘探 2009 ,14(3) : 6–9.
Pan Renfang ,Wu Yuan ,Song Zheng.Geochemical parameters for shale gas exploration and basic methods for well logging analysis [J].China Petroleum Exploration 2009 ,14(3) : 6–9.
- [22] 郝建飞,周灿灿,李霞等.地球物理测井评价综述[J].地球物理学进展 2012 ,27(4) : 1624–1632.
Hao Jianfei ,Zhou Cancan ,Li Xia ,et al.Summary of shale gas evaluation applying geophysical logging [J].Progress in Geophysics 2012 ,27(4) : 1624–1632.
- [23] 汪吉林,刘桂建,王维忠等.川东南龙马溪组页岩孔裂隙及渗透性特征[J].煤炭学报 2013 ,38(5) : 772–777.
Wang Jilin ,Liu Guijian ,Wang Weizhong ,et al.Characteristics of pore–fissure and permeability of shales in the Longmaxi Formation in southeastern Sichuan Basin [J].Journal of China Coal Society 2013 ,38(5) : 772–777.
- [24] 李启翠,楼一珊,史文专等.FMI成像测井在四川盆地页岩气地层中的应用[J].石油地质与工程 2013 ,27(6) : 58–60.
Li Qicui ,Lou Yishan ,Shi Wenzhan ,et al.Application of FMI imaging logging in shale gas formation of Sichuan basin [J].Petroleum Geology and Engineering 2013 ,27(6) : 58–60.