

谭茂金, 张松扬. 页岩气储层地球物理测井研究进展. 地球物理学进展, 2010, 25(6): 2024~2030, DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-2903. 2010. 06. 018.

Tan M J, Zhang S Y. Progress in geophysical logging technology for shale gas researvoirs. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 2010, 25(6): 2024~2030, DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-2903. 2010. 06. 018.

页岩气储层地球物理测井研究进展

谭茂金^{1,2}, 张松扬³

(1. 地下信息探测技术与仪器教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 中国地质大学地球物理与信息技术学院, 北京 100083; 3. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘 要 页岩气是储存在页岩中以游离态和吸附态存在的天然气, 是一种非常规油气资源. 地球物理测井技术具有方法多、纵向分辨率高、信息量大、连续、方便、灵敏等优势, 能够获得沿井眼剖面的岩石物理参数, 是常规油气资源和非常规油气储层评价的重要手段. 文章综述了页岩气储层的地质特点, 总结了国内外页岩气测井系列和页岩气的测井响应特征. 针对测井信息的处理, 给出了基于测井有机碳含量(TOC)计算和成熟度指数(MI)的研究进展, 讨论了页岩岩性识别、矿物计算和裂缝的评价方法, 并对美国页岩气测井评价实例做了介绍. 最后, 指出目前页岩气测井技术存在的问题和未来的突破方向和思路, 对指导页岩气勘探和经济评价具有重要指导意义.

关键词 页岩气, 测井技术, 有机碳(TOC), 成熟度指数(MI), 参数计算

DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-2903. 2010. 06. 018

中图分类号 P631

文献标识码 A

Progress in geophysical logging technology for shale gas researvoirs

TAN Mao-jin^{1,2}, ZHANG Song-yang³

(1. Key Laboratory of Geo-detection (China University of Geoscience) Ministry of Education, Beijing 100083, China;

2. College of Geophysics and Information Technology, China University of Geology, Beijing 100083, China;

3. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract Shale gas is stored in the shale as gas of adsorbed and free state, so it is a kind of non-conventional resources. Geophysical logging technology has high vertical resolution and sensitivity, and can provide continuous petrophysical information along the borehole, so is an indispensable means of reservoir evaluation of conventional resource as well as unconventional resources. This paper summarizes the geological characteristics of shale gas reservoirs and the logging series for shale gas reservoirs at home and abroad, and discusses logging response characteristics of shale gas reservoirs. For logging data processing, total organic carbon content (TOC) calculations and maturity index (MI) based on the logging data are derived, and the research progress and calculation methods are given to discuss evaluation method for fractures shale. A case study in America is taken to introduce well logging and interpretation of shale reservoirs. Finally, some problems about the shale gas well logging and petrophysical parameter calculation are pointed out, and the breakthroughs and important research direction are also proposed, which is an important guide to shale gas exploration and economy evaluation.

Keywords Shale gas reservoirs, well logging technology, organic carbon (TOC), maturity index (MI), parameters calculation

收稿日期 2010-07-15; 修回日期 2010-10-20.

基金项目 油气资源与探测国家重点实验室开放课题(2009009)、中央高校基本科研业务费专项资金(2010ZY28)和国家重大专项“大型油气田及煤层气开发项目(2008ZX05023-005)”联合资助.

作者简介 谭茂金, 1973 年生, 男, 山东莱芜人, 博士, 副教授, 在中国地质大学(北京)从事地球物理测井教学和研究工作. 研究领域: 测井新技术和复杂储层解释评价. (E-mail: tanmj@cugb. edu. cn)

0 引言

油气能源的紧缺加快了页岩气(shale gas)、煤层气、天然气水合物等非常规油气的勘探进程^[1~3]. 从全世界范围看,页岩气资源前景巨大,主要分布在北美、中亚和中国、拉美、中东和北非、前苏联^[4~8]. 中国的页岩气层也具有良好的勘探前景. 随着国土资源部油气资源战略研究中心与中国地质大学(北京)在重庆彭水第一口页岩气勘探井的开钻,拉开了中国页岩气勘探开发的序幕.

页岩在地层组成上多为暗色泥岩与浅色粉砂岩的薄互层. 页岩气的赋存状态多种多样,除极少量溶解状态的天然气以外,大部分均以吸附状态赋存于岩石颗粒和有机质表面(约 20%~85%),或以游离状态赋存于孔隙和裂缝之中^[9~11]. 现在页岩气勘探的总体思路为:以岩心实验为基础,利用地质、钻井、测井和地震资料开展油藏描述工作,利用相关评价模型对厚层泥页岩目的层进行连续定量解释,计算资源量与可采储量. 同时,这也是页岩气综合研究的主要内容.

地球物理测井技术具有方法多、纵向分辨率高、信息量大、连续、方便、灵敏等优势,能够获得沿井眼剖面的岩石物理参数,是常规油气储层评价不可或缺的手段. 而且,近几年来,以成像、核磁共振、阵列声波、高分辨率感应为代表的测井新技术正在特殊油气藏和非常规油气藏的勘探中发挥越来越重要的作用.

目前,页岩气资源评价总体面临两个核心问题^[12,13]:

- (1)作为储层是否具有足够的天然气地质储量.
- (2)是否具备足够的渗流能力从而实现经济开采.

因此,储集层中赋存的天然气体积、储集层渗透率是评价页岩气藏的关键参数,有机质丰度、成熟度、甲烷吸附能力、孔隙度、含气饱和度、储层有效厚度、矿物组成、裂缝发育范围与方向及其围岩的封闭能力都是页岩气资源量计算和经济评价涉及的必要内容. 上述大多数参数基本上可通过测井技术得以实现.

但是,由于页岩气藏的岩性和赋存类型等特点不同于常规油气藏,目前对页岩气的测井机理和解释评价等相关研究工作还比较薄弱. 而且,由于页岩气吸附气的含量高,又有别于页岩气和天然气水合物. 现有的油气识别与评价理论与技术,已经远远不能满足页岩气勘探的需要,为此迫切需要深入开展

页岩气的测井响应机理与解释评价技术研究.

2 页岩气测井响应特征

2.1 页岩气储层地质地球物理特征

国内外研究表明,页岩气藏形成的有利地质条件包括^[9~11]:

(1)页岩富含有机质,有机碳含量一般大于 2%,大多在 2.5%~3.0%,有的高达 25%,有机质含量往往与页岩的生气率和吸附气量成正比.

(2)页岩气层具有一定的物性条件,总孔隙度一般在 3%~5%,有的可达 15%. 页岩气的产出一般是储集在基质孔隙和裂缝中的游离气优先被采出,其后才是吸附气;其基质渗透率很低,岩性致密,天然裂缝是形成工业产能的主要条件.

页岩气储层有什么特点,存在于什么岩性与储集空间中呢? 页岩可分为黑色页岩、钙质页岩、硅质页岩、炭质页岩、铁质页岩、油页岩等类型^[14,15]. 研究得出,页岩储集层的石英含量多超过 50%,有些高达 75%,且多呈粘土粒级,常以纹层形式出现,而有机质、石英含量都很高的页岩脆性较强,容易在外力作用下形成天然裂缝和诱导裂缝,有利于天然气渗流. 该现象说明岩性、岩石矿物成分是控制裂缝发育程度的主要内在因素,具有低泊松比、高弹性模量、富含有机质的脆性页岩才是页岩气资源的首要勘探目标. 例如,北美裂缝性页岩气的综合评价中往往采用地层元素分析(ECS)手段,通过谱分析图观测页岩的矿物含量. 对于泥岩裂缝的研究,目前常用的测井方法有微电阻率测井、声波测井、双侧向测井、成像测井等.

2.2 页岩气储层测井响应特征

页岩气储层测井的视电阻率曲线具高值. 一般泥质岩的视电阻率值都较低,但在泥岩裂缝含油气层段,表现出较高的视电阻率值(如图 1),反映其中油气的富集;声波时差测井曲线上呈现高值,其原因是裂缝的发育和油气存在均使声波时差变大;自然伽马曲线高异常,可能指示有油气聚集. 也反映了油气的原生性;地层倾角测井图倾向杂乱,与区域地层倾向不一致,表明泥质岩裂缝相对发育.

如图 2 为北美 Newark East 气田 Barnett 组页岩气层测井响应特征^[14,15]. 自然伽马测井响应为高值,体积密度低值,电阻率高值. 这一特征符合有机质丰度高的细粒碎屑岩往往伴随放射性元素含量增加、岩石密度降低、声波速度降低、电阻率增大以及氢和碳含量增加的一般规律,因此利用常规测井组

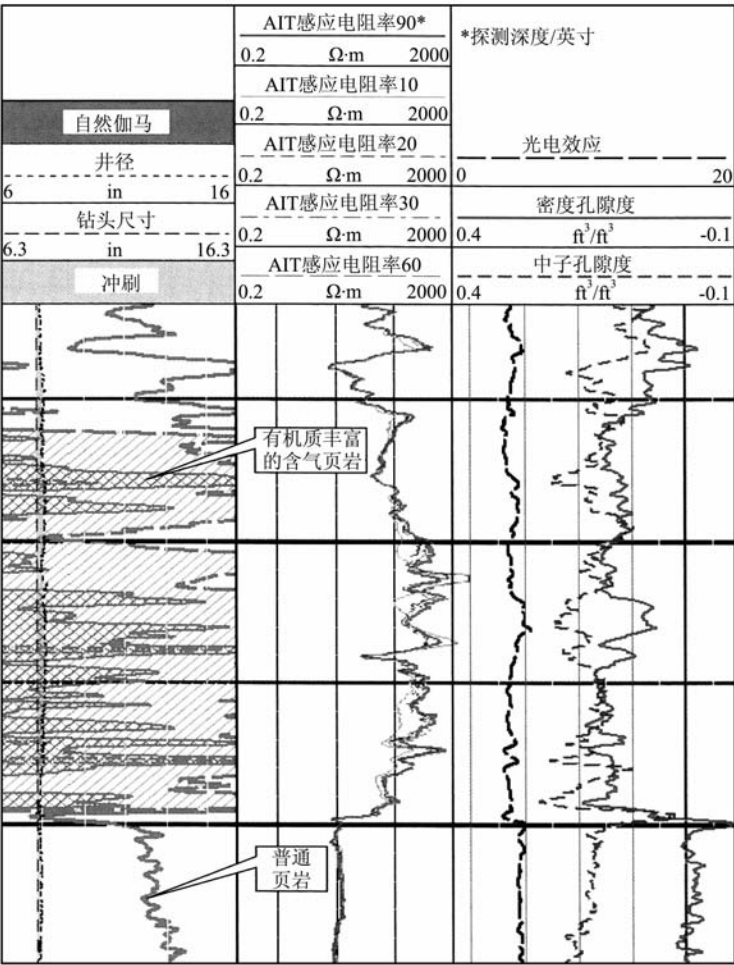


图1 页岩气的测井响应特征

Fig.1 Geophysical logging responses of shale gas reservoirs

合的响应特征,可以系统测量成熟泥页岩参数.四川盆地老井测井资料有限,通常只有1 m顶底电阻率、自然电位、自然伽马和井径测井,Barnett组页岩测井响应模式在该区并未得到充分体现.位于五百梯构造带的五科1井龙马溪组暗色页岩段总体上呈高自然伽马、低电阻率、高声波时差和局部低自然伽马、高电阻率的特征.不过川南地区龙马溪组自然伽马和电阻率值高、气显示较好的层段多为钙质页岩、深色泥岩夹灰岩条带,裂缝发育^[10,16].可见,四川盆地地下古生界海相粘土岩的岩石类型、成熟度、测井响应均有别于北美裂缝性硅质页岩,加之残余有机碳丰度相对较低,埋深较大(一般大于2700 m),页岩气资源量究竟有多少,是否具有经济可采价值,需要根据样品的全岩分析数据、等温吸附实验、目的层压力梯度、产层和围岩物性条件,并补充声、电等成像测井,作深入分析和评价.

3 页岩气测井评价技术

页岩气测井评价技术主要包括:岩性识别、矿物成分计算、页岩裂缝的识别、孔隙度的计算、有机碳含量计算、成熟度指数计算、含气饱和度的计算等.通过对页岩气藏地球化学机理和气藏评价方法的研究,总有机碳含量(TOC)和成熟度指标(MI)为页岩气评价的主要参数,总有机碳含量(TOC)与页岩气产率密切相关,且这两个参数可以通过测井资料确定.

3.1 有机碳(TOC)含量计算

许晓宏等^[17](1998)在已知 Δt 基线值为96.32 $\mu\text{s}/\text{ft}$,对应的 R_t 基线值为13 $\Omega \cdot \text{m}$ 的情况下,根据实际测井资料计算TOC值,并与地化样品分析的结果进行对比,显示两者具有很好的一致性,说明利用测井方法求取TOC值具有很好的可信性.运华

云等^[18](2000)主要是利用法国石油研究院提出的生油岩岩石模型,借助岩心、岩屑或井壁取心等样品的有机碳实验分析数据对常规测井曲线(主要是声波、电阻率等)进行标定,初步实现了利用测井采集的电阻率和声波等大量连续数据直接估算总有机碳含量.该方法在济阳坳陷下第三系沙三段烃源岩地层得到了可靠和精确的验证.现有的资料表明,此方法适用于胜利油田生油凹陷非成熟至中等成熟的生油岩评价,这对今后盆地的资源评价显示出极大的应用潜力.

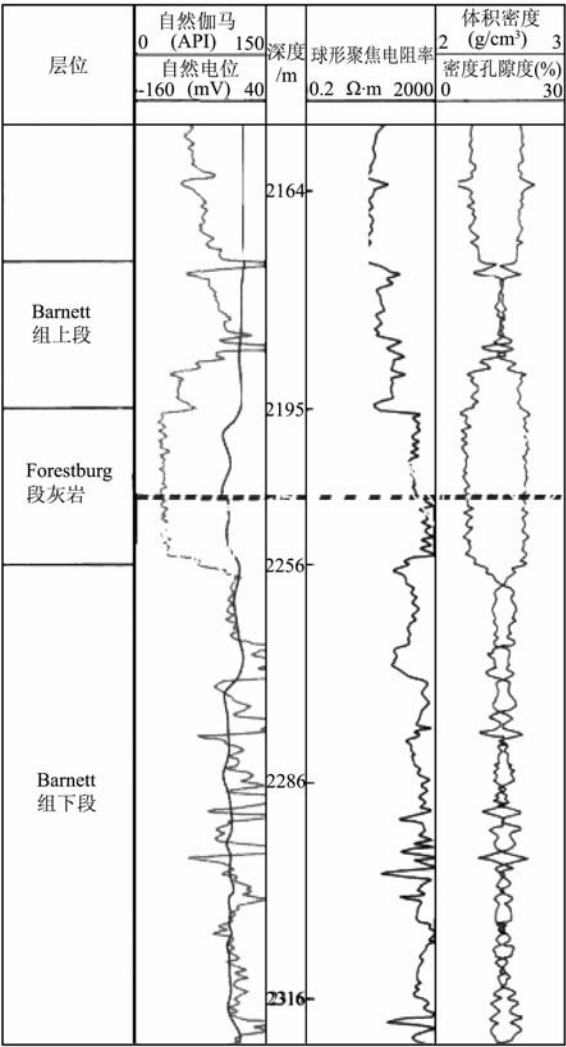


图2 北美 NewarkEast 页岩气层测井
Fig. 2 Logging responses of NewarkEast shale gas
reservoirs in North America

岳炳顺等^[19](2005)系统分析了东濮凹陷烃源岩测井资料的显示特征,根据地化资料与测井资料的对应关系,建立了利用测井资料确定烃源岩含量

的经验关系式,定量计算烃源岩有机碳含量(TOC)连续分布曲线,并对东濮凹陷实际资料进行了测井烃源岩评价,测井评价结果与地化评价结果有良好的一致性.

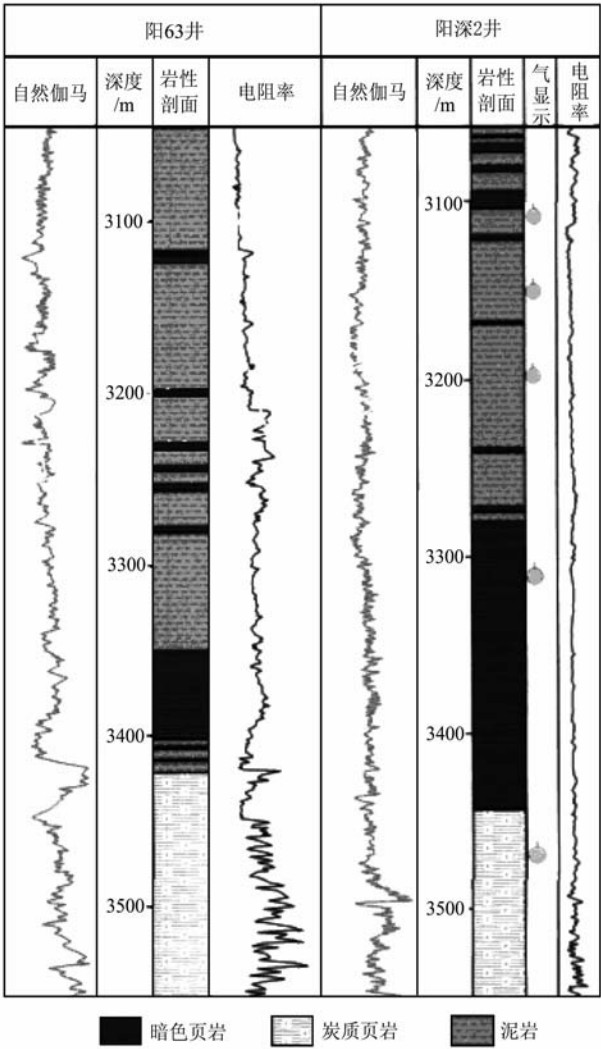


图3 川南页岩气层测井响应
Fig. 3 Logging responses of shale-gas reservoirs
in southern Sichuan

潘仁芳等^[20](2009)研究了,利用测井资料解释求取烃源岩的有机质丰度的方法声波时差—电阻率叠合法,即把刻度合适的孔隙度曲线叠加在电阻率曲线上,在缺乏有机质的岩石中,这两条测井曲线彼此平行,并重合在一起.而当测量地层为储层或富含有机质的烃源岩时,这两条曲线之间便存在差异.结合声波时差值(Δt),根据 $\Delta t/Rt$ 重叠关系推导出 $\Delta \lg Rt$ 的数学表达式,可找到成熟的页岩气烃源岩.

3.2 成熟度指数(MI)计算

页岩气层的成熟度指数(MI)可以由测井方法获取. 潘仁芳等^[20] (2009)研究了成熟度指数的计算方法,其公式中的数据来自于每个取样深度的密度孔隙度都大于最低值 9%、含烃饱和度大于最低值 25%时测井资料. 实测中,中子值与 MI 呈逆相关. 低中子值代表高含气量,在孔隙度大于 9%的基础上,当中子值显示低值,这代表高的含气量、短链碳氢化合物丰富,地层含水少,反映了高成熟度. 因为对含氢饱和度求平方根,中子孔隙度对于成熟度的影响会大于含氢饱和度. 并且还拟合了一个成熟度指数(MI)与油气比(GOR)之间的关系,表明成熟度指数(MI)计算的必要性.

3.3 页岩成份分析

页岩的矿物成分包括粘土矿物含量和类型、石英含量和灰质含量的计算. 这些矿物含量与储层孔隙度大小、储层质量有关. 目前,通常用自然能谱测井(NGS)或者元素俘获测井(ECS)定量分析组成页岩的矿物成份,准确判断页岩类型^[20,21]. 此外,光电吸收界面指数(Pe)也是分析页岩矿物成份、划分页岩类型的重要参考指标.

3.4 页岩层理与裂缝分析

利用测井资料描述砂岩、灰岩、火成岩等常规资源的层理、天然裂缝系统的几何结构的理论和方法已经比较成熟,其中最为直观、有效的是声电成像测井.

在泥岩裂缝发育层段,自然电位幅度和形态趋向于纯砂岩层,较小裂缝层自然电位和幅度趋向于高含泥质砂岩层. 低角度裂缝的有效性表现在电阻率曲线在高阻背景上的明显降低,曲线形状尖锐,一般呈负差异,说明横向延伸较远,幅度差越大,张开角度就越大,有效性就越好;应用于页岩裂缝识别的还有井径曲线的变化等^[22~33].

泥岩裂缝的识别也有学者在研究,也一些研究成果,但是还不准确,尤其是基于常规测井资料的裂缝识别和计算还仅限于定性的方法. 成像测井可以解决裂缝识别的问题,由于泥岩裂缝尺度小、倾角也小,很难与层理区分开来.

3.5 储层参数计算

如图 4 为北美 Harding & Shelton Group 公司某井的测井数据和处理成果剖面^[15]. 经数据处理后,计算的主要参数有孔隙度(POR)、有机碳含量(TOC)、含气饱和度(Gas saturation). 在目的层处,孔隙度约为 4.8%,TOC 约为 4.16%;含气饱和度约为 78.3%.

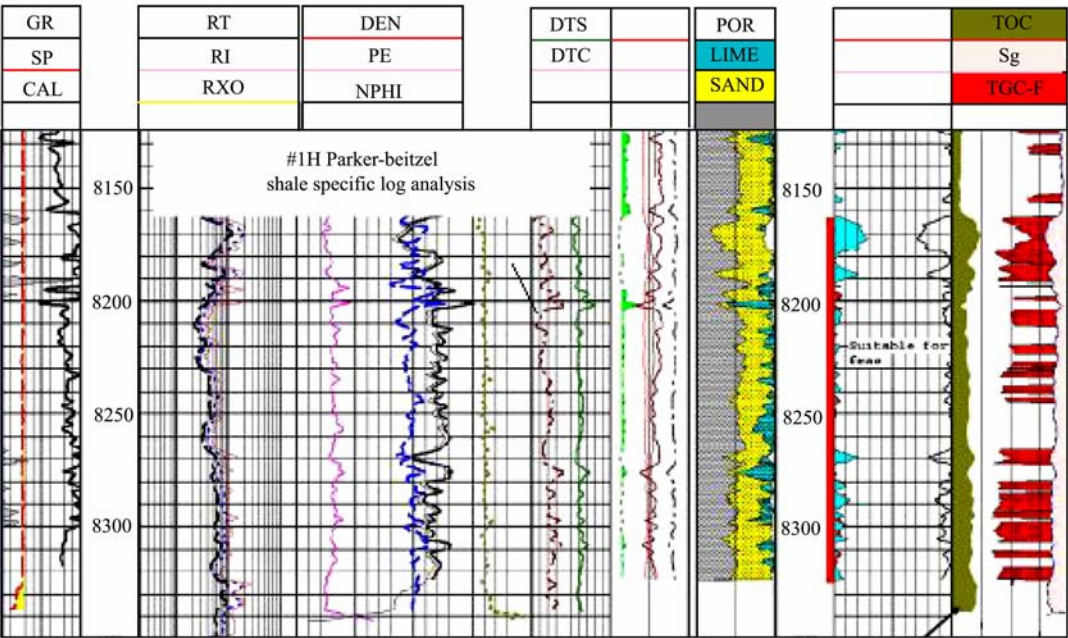


图 4 北美某井 Parker-Beitzer 地层测井数据与解释成果

Fig. 4 Logging data and interpretation results of Parker-Beitzer formation in North America

4 页岩气测井系列

根据调研资料分析,国外在页岩气测井方面基本是沿用现有油气井测井技术,有自然伽马、自然电位、井径、双侧向-微球聚焦电阻率、补偿中子、补偿密度、补偿中子等,自然能谱(NGS)、元素俘获(ECS)、声电成像、核磁共振、多极子声波测井技术目前还没有应用于页岩气的勘探中. 这些评价系列基本能够实现岩性识别、储层识别和划分以及矿物含量计算;在评价手段上已经可以做到计算孔隙度、总含气量、含气饱和度^[34~36].

5 问题与展望

综上所述,目前测井技术能够基本实现对页岩气储层的储层划分和有机炭含量的计算,但是这些方法和技术还停留在定性分析阶段,其定量分析计算均采取简单化、理想化物理模型、数学公式,其适用性尚有很大局限性.

为此,如何寻找页岩气层? 页岩气层具有怎样的测井响应特征? 页岩气层有多少含气量? 是否经济可采? 要回答这一系列问题,必须进行如下研究:

- (1) 烃源岩的有机质丰度的评价.
- (2) 储层划分、储层空间类型识别以及定量计算.
- (3) 含气量的计算.

这些工作国内外研究较少. 为此,必须围绕“页岩气层在哪”“储层岩石物理参数如何”“有多少含气量,是否值得开采”这三项基本问题,从岩石物理实验出发,深入分析实验结果,系统的研究测井响应机理,总结测井响应特征,利用数值模拟开展电法测井、核磁测井响应特征研究. 然后,针对页岩气测井信息非线性特征,开展数据处理方法研究:包括有机炭(TOC)含量计算方法和双重孔隙度和渗透率解释方法;研究核磁测井的孔隙体积和成像测井的裂缝识别与评价研究. 最后,开展页岩气层测井综合特征参数及含气量评价技术研究,确定含气指标. 最终,形成一套页岩气层测井响应理论与关键技术,为中国的页岩气测井作出贡献.

参 考 文 献 (References):

[1] 戴金星. 我国天然气资源及其前景[J]. 天然气工业,1999,19(1):326~328.
Dai J X. Natural gas resources and it's prospects in China [J]. Natural Gas Industry, 1999, 19(1):326~328.

[2] Gatens M. Unconventional gas in Canada:an important new resource [R]. Calgary:CERI 2005 Energy & Environment

[3] Roche P. Technology and prices help release shale-gas from" unconventional" status [J]. New Technology Magazine, Oct/Nov, 2006:15~20.

[4] Hamblin A P. The “shale-gas” concept in Canada; a preliminary inventory of possibilities[R]. GSC 2006 Open File Report 5384.

[5] Mobil Annual Report 2007[R]. Mobil,2007.

[6] BP Annual Report 2007[R]. BP,2007.

[7] Chevron Annual Report 2007[R]. Chevron,2007.

[8] 李玉喜. 我国非常规油气资源类型和潜力[R]. 国土资源部, 2007.
Li Y X. The type and potential of unconventional oil & gas resources [R]. Land and Resources, 2007.

[9] 张金川,徐波,聂海宽,等. 中国天然气勘探的两个重要领域 [J]. 天然气工业,2007,27(11):1~6.
Zhang J C, Xu B, Niehai W, *et al.* Chinese gas exploration in two important areas [J]. Natural Gas Industry, 2007,27(11): 1~6.

[10] 江怀友,宋新民,安晓璇,等. 世界页岩气资源与勘探开发技术综述[J]. 天然气技术, 2008,2(6):26~30.
Jiang H Y, Song X M, AN X X, *et al.* Global shale gas resources and its E & P technologies. Natural Gas Technology, 2008,2(6):26~30.

[11] 李建忠,董大忠,陈更生,等. 中国页岩气资源前景与战略地位[J]. 天然气工业, 2009,29(5):11~16.
Li J Z, Dong D Z, Chen G S, *et al.* Prospects and strategic position of shale gas resources in China [J]. Natural Gas Industry, 2009,29(5):11~16

[12] 张金川,金之钧,袁明生. 页岩气成藏机理和分布[J]. 天然气工业. 2004,24(7):15~18.
Zhang J C, Jin Z J, Yuan M S. Mechanism and distribution of Shale gas reservoir [J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(7):15~18.

[13] 孙超,朱筱敏,陈菁,等. 页岩气与深盆地气成藏的相似与相关 [J]. 油气地质与采收率,2007,14(1):26~31.
Sun C, Zhu X M, Chen J, *et al.* Similarity and relativity between Shale gas and deep basin gas [J]. Geology and Recovery, 2007,14(1):26~31.

[14] 蒲泊伶,包书景,王毅,等. 页岩气成藏条件分析—以美国页岩气盆地为例[J]. 石油地质与工程,2008,22(3):33~39.
Pu B L, Bao S J, Wang Y, *et al.* Shale Gas accumulation conduction analysis——A case study of shale gas basins in america. [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2008, 22(3):33~39.

[15] 李新景,胡素云,程克明. 北美裂缝性页岩气勘探开发的启示 [J]. 石油勘探与开发, 2007,34(4):392~400.
Li X J, Hu S Y, Chen K M. Suggestions from the development of fractured shale gas in north america. Petroleum Exploration And Development, 2007, 34(4): 392~400.

[16] 王世谦,陈更生,董大忠,等. 四川盆地地下古生界页岩气藏形成条件与勘探前景[J]. 天然气工业,地质与勘探, 2009,29

- (5):51~58.
- Wang S Q, Chen G S, Dong D Z, *et al.* Accumulation conditions and exploitation prospect of shale gas in the Lower Paleozoic Sichuan basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2009,29(5):51~58.
- [17] 许晓宏,黄海平. 测井资料与烃源岩有机碳含量的定量关系研究[J]. *江汉石油学院学报*,1998,20(3):8~12.
- Xu X H, Huang H P. Quantitative relationship between organic carbon content of logs data and source rocks [J]. *Jiangnan Petroleum Institute*, 1998,20(3):8~12.
- [18] 运华云,项建新,刘子文. 有机碳测井评价方法及在胜利油田的应用[J]. *测井技术*, 2000,24(5):372~376.
- Yun H Y, Xiang J X, Liu Z W. Estimation method of organic carbon log and its application in shengli oilfield[J]. *Well Logging Technology*, 2000,24(5):372~376.
- [19] 岳炳顺. 东濮凹陷测井烃源岩评价方法及应用[J]. *石油天然气学报*,2005,27(3):351~354.
- Yue B S. Dongpu depression logging source rock evaluation and its application [J]. *Oil and Gas Technology*, 2005,27(3):351~354.
- [20] 潘仁芳,伍媛,朱争. 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,(3):6~28.
- Pan R F, Wu Y, Song Z. Geochemical parameters for shale gas exploration and basic methods for well logging analysis [J]. *China Petroleum Exploration*, 2009,(3):6~28.
- [21] 王宣龙,李厚裕,冯红霞. 利用声波和自然伽马能谱分析泥岩裂缝储层[J]. *测井技术*,1996,20(6):432~435.
- Wang X L, Li H Y, Feng H X. Using gamma ray spectrometry of acoustic logs analysis fractured shale reservoirs [J]. *Well Logging Technology*,1996,20(6):432~435.
- [22] 李时涛,王宣龙,项建新. 泥岩裂缝储层测井解释方法研究[J]. *特种油气藏*. 2004,11(6):12~15.
- Li S T, Wang X L, Xiang J X. Log interpretation methods of mudstone fractured reservoir[J]. *Special Reservoir*,2004,11(6):12~15.
- [23] 苏晓捷. 河断陷盆地泥岩裂缝油气藏研究[J]. *特种油气藏*, 2003,10(5):29~41.
- Su X J. River rift basin of fractured shale reservoirs[J]. *Special Reservoir*,2003,10(5):29~41.
- [24] 周文. 裂缝性油气储集层评价方法[M]. 成都:四川科学技术出版社, 1998.
- Zhou W. Fractured oil & gas reservoir evaluation methods [M]. *Chengdu: Sichuan Science and Technology Press*, 1998.
- [25] 赵良孝,补勇. 碳酸盐岩储层测井评价技术[M]. 北京:石油工业出版社, 1994.
- Zhao L X, Bu Y. Logging evaluation techniques of carbonate reservoir [M]. *Beijing:Petroleum Industry Press*, 1994.
- [26] 孙建孟. 青海柴西地区常规测井裂缝识别方法[J]. *测井技术*, 1999,(4):15~17.
- Sun J M. Qinghai conventional logging in western Qaidam Fracture identification methods [J]. *Well Logging Technology*, 1999,(4):15~17.
- [27] 陈章明,张树林,万龙贵. 古龙凹陷北部青山口组泥岩构造裂缝的形成及其油气藏分布预测[J]. *石油学报*,1988,9(4):5~7.
- Chen M, Zhang S L, Wan L G. Gulong Qingshankou mudstone north of structural cracks and reservoir distribution prediction [J]. *Petroleum Technology*, 1988,9(4):5~7.
- [28] 王德新,江裕彬,吕从容. 在泥页岩中寻找裂缝性油、气藏的一些看法[J]. *西部探矿工程*,1996,8(2):12~14.
- Wang D X, Jiang Y B, Lü C R. Some views on fractured shale oil & gas reservoirs[J]. *Western China Exploration Engineering*, 1996,8(2):12~14.
- [29] 李勇明,郭建春,赵金洲. 裂缝性油藏压裂井产能数值模拟模型研究与应用[J]. *石油勘探与开发*, 2005,32(2):126~128.
- Li Y M, Guo J C, Zhao J Z. Simulation model of fracturing wells of fractured reservoir and it's application [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2005,32(2):126~128.
- [30] Curtis J B. Fractured shale-gas systems[J]. *AAPG Bulletin*, 2002,86(11):1921~1938.
- [31] Montgomery S. Barnett shale: a new gas play in the Fort Worth basin [J]. *Petroleum Frontiers Excerpt*,2004,20(1):1~6.
- [32] 曲寿利,季玉新,王鑫. 泥岩裂缝油气藏地震检测方法[M]. 北京:石油工业出版社,2003.
- Qu S L, Ji Y X, Wang X. Seismic detection method of mudstone fractured reservoir[M]. *Beijing: Petroleum Industry Press*, 2003.
- [33] 赖生华,刘文碧,李德发,等. 泥质岩裂缝油藏特征及控制裂缝发育的因素[J]. *矿物岩石*,1998,18(2):47~51.
- Lai S H, Liu W B, Li D F, *et al.* Mudstone fractured reservoir characteristics and the control factors of fracture development [J]. *Mineralogy and Petrology*, 1998,18(2):47~51.
- [34] 李艳丽. 页岩气储量计算方法探讨[J]. *天然气地球科学*, 2009,20(3):466~469.
- Li Y L. Shale gas reservoirs calculation method[J]. *Natural Gas Geology*,2009,20(3):466~469.
- [35] 袁士义,胡永乐,罗凯. 天然气开发技术现状、挑战及对策[J]. *石油勘探与开发*,2005,32(6):1~6.
- Yuan S Y, Hu Y L, Luo K. Status, challenges and countermeasures of gas development technology [J]. *Petroleum Exploration and Development*,2005,32(6):1~6.
- [36] 范泊江. 中国非常规天然气资源及前景分析[R]. 中国石油大学,2007.
- Fan B J. unconventional natural gas resources and prospects in China[R]. *China University of Petroleum*, 2007.