

文章编号: 1004-1338(2011)02-0112-05

页岩气测井评价技术特点及评价方法探讨

刘双莲, 陆黄生

(中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101)

摘要: 测井技术是页岩气勘探开发的关键技术之一。从调研北美页岩气成功勘探开发实例入手, 在储层地质背景研究的基础上, 分析了页岩气与常规油气层测井评价方法的主要差异。根据页岩气勘探开发需求, 探讨了中国页岩气测井系列的选择依据与测井评价技术。提出页岩矿物成分和储层结构评价、页岩储层标准的建立、裂缝类型识别与岩石力学参数评价等方面的研究, 可以作为页岩气测井技术评价的重点。研究表明, 深层页岩气测井评价技术是中国与国外的最大差别, 也是中国页岩气测井评价技术的核心问题。

关键词: 测井评价; 页岩气; 矿物成分; 储层标准

中图分类号: P631.84 **文献标识码:** A

Evaluation Methods and Characteristics of Log Evaluation Technology in Shale Gas

LIU Shuanglian, LU Huangsheng

(Research Institute of Petroleum Engineering, SINOPEC, Beijing 100101, China)

Abstract: Logging is one of the important technology in shale gas reservoir E&P. On the basis of North American successful E&P examples, analyzed is the main difference between shale gas and conventional oil/gas evaluation. According to the demand of shale gas E&P, discussed is the basis of selecting logging series and items of log evaluation technology, and pointed out the next key study on shale gas that is mainly around how to determine mineral element of shale, evaluate reservoir structure, build reserve standard, identify types of shale fracture, and evaluate parameters of rock mechanics, etc. Our study shows that logging evaluation on deep depth is the biggest difference between China and overseas, and it's also the core question on shale gas logging evaluation in China.

Key words: log evaluation, shale gas, mineral element, reservoir standard

0 引言

测井技术是页岩气勘探开发的关键技术之一, 页岩气与常规油气层存在多方面巨大差异, 决定了页岩气与常规油气层测井评价方法不同。首先是储集状态的不同。页岩气具有低孔隙度、特低渗透率及自生自储的特点, 表明其测井解释评价属于低孔隙度低渗透率储层的解释评价范畴; 其次是储层流体的赋存状态不同。页岩气常以吸附状态赋存于页岩中, 游离气少, 表明储层含气的测井响应特点面临新探索。第三是储层岩性复杂且不同于常规油气层。目前已知达到商业开采价值的页岩气储层多为硅质含量大于 28%、微裂缝发育的页岩储层, 表明

页岩气测井解释模型将完全不同于常规油气层。凡此种种, 加之中国页岩气储层埋藏深等因素, 其测井评价技术必将成为中国页岩气勘探开发的核心问题之一。本文尝试对世界(主要是美国)页岩气勘探开发成功实例进行调研, 分析测井技术在页岩气勘探开发中的应用情况, 探讨适合中国页岩气的测井评价技术。

1 世界页岩气发展简况分析

1.1 页岩气勘探开发现状

页岩气于 1821 年^[1-3]在美国阿帕拉契亚盆地发现, 是国外最早认识的天然气, 至今已有近 200 年的历史。同年在美国纽约州弗雷多尼亚市钻了第 1 口

作者简介: 刘双莲, 女, 1970 年生, 高级工程师, 博士, 从事测井解释与评价工作。

商业性页岩气井, 1880 年发现 Ohio 页岩气 (Sandy 气田)。1976 年, 美国能源部在美国东部启动页岩气项目, 开始页岩气资源的勘探开发, 相对应的勘探开发技术也随之发展。其中, 水力压裂技术发展于 20 世纪 50、60 年代, 水平井技术于 20 世纪 80 年代在 Ohio 页岩进行了实验, 而真正投入生产的第 1 口有效水平井是 2003 年对 Barnett 页岩的钻探, 至 2006 年, 该技术开始在全美国推广。

页岩气勘探开发方面, 常规测井技术在解决页岩储层识别、有效储层厚度的确定等方面发挥了重要作用; 一些特殊测井技术方法如元素俘获能谱测井、成像测井等方法的应用, 在一定程度上解决了页岩矿物成分确定与储层裂缝识别等难题。同时测井技术在确定页岩气资源量、页岩储层产能大小、压裂层位、破裂压力等参数方面, 起着越来越重要的作用^[4-8]。

1.2 主要产层的地质背景简介

页岩气资源调查表明, 全球页岩气资源潜力巨大, 但页岩气开发很局限, 仅美国与加拿大完成大量工作, 其中美国开发技术最成功。以美国主要页岩气产气盆地为例, 北美地台有 101 个盆地, 油气田数量大约 35 000 个, 从寒武系至新近系均有油气发现^[9-12], 产层及其分布与北美大陆地质背景密切相关。已知页岩气盆地主要分布在被动大陆边缘演化为前陆盆地的区域和古生界克拉通地台区, 页岩气主要产自古生代较老岩层。北美含气页岩富集带具有多种成熟程度, 天然气成因和沉积环境复杂。高质量倾油海相烃源岩(腐泥型和混合型)多发育在海进体系域时期/高水位体系域初期。页岩储层上/下发育的致密碳酸盐岩, 一方面阻止了油气垂向运移, 使之在黑色页岩层系中得以保存; 另一方面也有助于大型水力压裂的裂缝控制^[13-14]。

1.3 已发现页岩气的主要类型及其控制因素

按天然气成因将页岩气藏分为热成因型、生物成因型和混合成因型^[15]。其中热成因型页岩气藏主要受页岩热成熟度控制, 生物成因型页岩气藏的主控因素为地层水盐度和裂缝, 目前生物气为主的产区主要分布在盆地边缘。

1.4 页岩气储层特点

通常页岩储层致密、物性差, 孔隙度约为 4%~6%, 基质渗透率小于 $0.001 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 具有低压、低含气饱和度(一般 30% 左右)和低产特点, 产层厚度几十至几百米。已开发页岩产层中硅质含量很高(一般大于 28%)且脆性大, 微裂缝比大型裂缝更重要。实践表明, 储层有机碳含量 $TOC \geq 2$ 时页岩气藏才具有商业价值(见表 1)。

2 中国页岩气研究进展及存在问题

2.1 中国页岩气勘探开发主要面临的问题

近几年中国已开展页岩气资源普查工作, 结果表明中国页岩气资源非常丰富。在中国南方、华北、东北、西北均大量分布。但与国外相比, 中国页岩气勘探开发正处于起步阶段。从中国页岩气资源分布和地质背景与国外页岩气资源相比, 中国页岩气资源的开发还面临以下几方面的问题。

(1) 形成背景复杂。中国页岩气储层主要形成于海相与滨海相沉积环境条件下, 页岩黏土含量较高, 储层有效厚度、有机质成熟度、储层有机碳含量等均异于美国^[16-19], 成藏与开采条件差异较大。

(2) 储层埋深大。国外已成功勘探开发的页岩储层埋深浅, 中国页岩储层总体埋深大^[20-22], 如美国页岩气层深度在 800~2 600 m, 而四川盆地页岩气层埋深在 2 000~3 500 m^[23-26]。中国在页岩气的勘

表 1 美国主要含气页岩储层特征统计

主要特征参数	Haynesville	Banett	Fayetteville	Marcellus
埋深/m	3048~3962.4	1645.9~2926.08	365.76~2286	1524.0~2438.4
厚度/m	60.96~91.44	60.96~152.4	15.24~60.96	15.24~91.44
总有机碳含量/%	4.0	2.0~7.0	2.0~5.0	5.3~7.8
平均测井孔隙度/%	10	7	4~12	5.5~7.5
含水饱和度/%	15~20	23~35	15~50	12~35
单位面积储量/($\times 10^8 \text{ m}^3/\text{mile}^2$)	42.48~63.71	21.24~56.63	8.5~16.99	8.5~42.48
预测采收率/%	25~30	25~50	35~40	30
平均单井可采储量(水平井)/($\times 10^8 \text{ m}^3$)	1.27~2.41	0.64	0.62	1.06

* 非法定计量单位, 1 Mile=1 609.344 m
© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

探开发相应配套技术少,开发难度大。

(3) 缺乏核心技术。页岩储层具有低产、无自然产能、生产周期长的特点,以水平井、压裂方式开采为主,测井判断储层产能难度大,中国这方面缺乏经验。

2.2 测井技术在页岩气研究中的进展

(1) 页岩气层识别。含气页岩测井响应与普通页岩相比,具有自然伽马强度高、电阻率大、地层体积密度和光电效应低的特点(见图1),高自然伽马强度被认为是页岩中干酪根的函数。

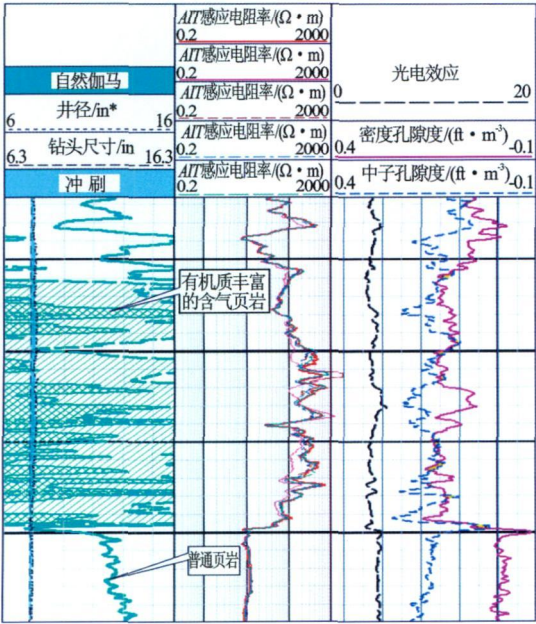


图1 页岩储层的测井曲线图

* 非法定计量单位, 1 ft = 12 in = 0.304 8 m, 下同

(2) 页岩气测井评价参数。运用相关测井评价系统对页岩矿物成分、总孔隙度、有效孔隙度、含气孔隙度、含水孔隙度、含水饱和度、总有机物含量、干酪根、游离气和吸附气等定量估算;在各有效参数估算基础上,估算单井地质储量和产量。

(3) 页岩气储层潜力评价。页岩气储层的潜力

评价主要体现在岩性(矿物)识别、有效厚度判定、有机碳含量与成熟度计算^[27-28]、裂缝识别与地层压力预测等方面。

(4) 主要测井系列。从当前调研情况看,目前应用于页岩气储层的测井系列主要为常规测井系列,包括自然伽马、井径、自然电位、声波、密度、中子与电阻率测井主要目的是为了进行页岩储层的识别与储层物性评价。在勘探阶段应用了一些特殊测井系列,如为了精确分析页岩的矿物成分,应用了元素俘获能谱测井。

3 页岩气测井系列、解释方法及研究方向

3.1 页岩气与其他储层测井解释的差异性分析

(1) 成藏与存储方式不同。页岩具自生自储的特点,页岩气主要以吸附状态存在,游离气较少;而常规油气主要以游离状态存在。

(2) 储层性质不同。页岩气储层属致密储层,其岩性与裂缝是影响页岩气开发的重要因素,与常规油气藏相比,岩石矿物组成与裂缝识别尤为重要(见表2)。

(3) 评价侧重不同。页岩气储层有机碳含量、成熟度等相关参数的评价极为关键;常规油气藏主要是评价其含油性。

(4) 开采方式不同。页岩气储层均需经过压裂改造才能开发,因此对压裂效果的预测至关重要。

3.2 页岩气测井技术系列探讨

(1) 常规测井系列。包括自然伽马、自然电位、井径、深浅侧向电阻率、岩性密度、补偿中子与声波时差测井,能满足页岩储层的识别要求。

自然伽马强度能区分含气页岩与普通页岩;自然电位能划分储层的有效性;深浅电阻率在一定程度上能反映页岩的含气性;岩性密度测井能定性区分岩性;补偿中子与声波时差在页岩储层为高值。通常密度随着页岩气含量的增加变小、中子与声波

表2 页岩气藏与其他天然气藏的主要特征对比

	气藏类型	常规天然气	致密砂岩气	页岩气	煤层气
	圈闭类型	构造、岩性或地层	岩性、地层或构造	岩 性	岩 性
	封闭条件	顶面、底面、侧面	顶面、底面、侧面	储集层	储集层
	储层岩性	砂岩、碳酸盐岩等	砂岩、碳酸盐岩等	页 岩	煤 层
储层物性	孔隙度/ %	> 10~ 30	< 10	< 6	1~ 2
	渗透率/(× 10 ⁻³ μm ²)	> 50~ 1000	< 0.1	< 0.001	1~ 50
	气源特征	外部	外部	内部	内部
	运移特征	近距离运移 长距离 运移	近距离运移 长距离运移	不需要	不需要

时差测井随着页岩气含量的增加而变大^[29],因此利用常规测井系列能有效地区分页岩储层。

但该系列对于页岩储层矿物成分含量的计算、裂缝识别与岩石力学参数的计算等方面存在不足,常规测井系列并不能完全满足页岩储层评价的要求,因此还需开展特殊测井系列的应用。

(2) 特殊测井系列。应用于页岩储层的特殊测井系列可选择元素俘获能谱(ECS)测井、偶极声波测井、声电成像测井等。

ECS元素测井可求取地层元素含量,由元素含量计算出岩石矿物成分。它所提供的丰富信息,能满足评价地层各种性质、获取地层物性参数、计算黏土矿物含量、区别沉积体系、划分沉积相带和沉积环境、推断成岩演化、判断地层渗透性等的需要。

偶极声波测井能提供纵波时差、横波时差资料,利用相关软件可进行各向异性分析处理,判断水平最大地层应力的方向,计算地层水平最大与最小地层应力,求取岩石泊松比、杨氏模量、剪切模量、破裂压力等重要岩石力学参数,满足岩石力学参数计算模型建立的要求,指导页岩储层的压裂改造。

声、电成像测井具有高分辨率、高井眼覆盖率和可视性特点,在岩性与裂缝识别、构造特征分析方面具有良好的应用效果。识别页岩储层裂缝的类型,对指导页岩气的改造、评定页岩储层的开发效果有着重要的意义。

3.3 页岩气测井评价技术探讨

(1) 页岩气有效储层评价技术。主要依托常规测井系列,可在一定程度上满足页岩气储层的孔隙度、渗透率、含气饱和度的评价需要。

(2) 岩石力学参数评价技术。主要依托特殊测井系列与岩石物理实验^[30-31],如全波列声波测井、偶极声波测井等,结合岩石物理分析,建立岩石力学计算模型,计算岩石力学参数,进行压裂效果预测与压裂效果检测等。

(3) 页岩气矿物成分和储层结构评价技术。主要依托常规测井、特殊测井组合系列及岩石物理实验^[32-34],在岩石物理实验的基础上,利用岩心刻度测井技术,进行页岩气矿物成分分析和裂缝评价,确定页岩矿物成分、裂缝类型,寻找高产稳产层。

(4) 综合测井评价解释方法。综合利用测井、岩心、录井等资料^[34],建立页岩气储层参数的解释模型,评价页岩气储层的有机碳含量、有机质成熟度、有效厚度,建立页岩储层的评价标准。

页岩矿物成分、储层结构评价、页岩储层标准的

建立、裂缝类型识别与岩石力学参数评价等方面的研究,是下一步页岩气测井评价技术的重点。

3.4 页岩气测井技术研究方向探讨

中国页岩气储层与国外相比,地质条件和分布特点存在重大差异。相对美国,中国页岩气黏土含量相对较高,硅质含量相对较低,脆性物质较少,埋藏深度深。因此,具有中国特点的地质问题成为制约中国页岩气研究及勘探的因素之一,故美国的页岩气产业发展模式难以复制。针对中国页岩气储层的特点,建议关注4方面的页岩气测井技术研究。

(1) 页岩气储层岩石物理实验研究。其目的重在探索建立适合中国地质背景的测井解释模型,为测井解释提供依据。主要体现为进行流体及储集空间结构实验研究。着手页岩的物性参数、阿尔奇公式参数、饱和度、储层矿物成分、裂缝特征描述、岩石力学参数分析等。

(2) 页岩矿物成分分析。其目的在于弄清页岩储层的矿物构成及确定储层岩石骨架,为孔隙度等参数计算提供依据。页岩气储层为低孔隙度特低渗透率致密储层,页岩气的有效开发都需经过储层改造,页岩中脆性矿物成分含量的高低决定了储层改造的效果,因此,对页岩矿物成分的有效分析,为提高页岩气的开发效率有着重要的意义。

(3) 岩石力学参数评价。其目的为水平井储层压裂提供参考依据。当前普遍认为页岩储层识别容易开采难。页岩气在储层中主要以吸附气存在,页岩气的开采主要以水平井开采技术为主。因此,侧重岩石力学参数评价,可为钻井、钻井液及储层改造提供其必需的参数。

(4) 深层页岩气评价技术。其研究的主要目的在于为降低中国深层页岩气勘探开发风险提供技术依据。针对中国现状,深层页岩气储层的测井解释技术不能完全借鉴国外成功经验,需加强成像测井、元素俘获能谱测井在页岩气评价技术中的应用,建立页岩有效储层研究方法、储层产能评价与研究方法,建立适合中国深层页岩特点的测井评价技术。

4 结 论

(1) 中国页岩储层不同于国外页岩储层。中国页岩储层通常埋藏深度大,沉积环境差,页岩储层中硅质、钙质等含量较低,黏土含量相对较高,国外页岩储层的评价方法不完全适用于中国,中国面临的是深层页岩储层评价方法研究。

(2) 页岩气储层评价方法与评价重点不同于常

规油气。它们在沉积环境、成藏与储存方式、储层性质上都存在较大的差异,评价的侧重点大不相同。现有测井评价方法主要针对常规油气储层而建立,主要计算储层孔隙度、渗透率、含油气饱和度等参数;而页岩气储层评价还要参与页岩矿物成分、储层结构评价、有机质含量计算、裂缝类型识别与岩石力学参数评价等。

(3) 页岩储层的测井解释模型不同于常规油气。页岩气主要以吸附状态存在于储层,游离状态少,其岩性及物质构成不同于常规油气,因此需要测井解释模型的重新探索。

参考文献:

- [1] 谭蓉蓉. 美国页岩气工业始于1821年[J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 6.
- [2] 李大荣. 美国页岩气资源及勘探历史[J]. 石油知识, 2004(1): 61.
- [3] 钱家麟, 王剑秋, 李术元. 世界油页岩资源利用与发展趋势[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2006, 36(6): 876-887.
- [4] F K Guidry, ResTech Houston, J W Walsh. Well Log Interpretation of a Devonian Gas Shale: An Example Analysis[J]. SPE 26932, 1993: 393-394.
- [5] Bob Shelley, Bill Grieser. Data Analysis of Barnett Shale Completions[J]. SPE, 100674, 2008.
- [6] 刘洪林, 王莉, 王红岩, 等. 中国页岩气勘探开发适用技术探讨[J]. 油气井测试, 2009, 18(4): 68-71.
- [7] 张言译, 郭振山. 页岩气藏开发的专项技术[J]. 国外油田工程, 2009, 25(1): 24-27.
- [8] 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, 28.
- [9] 李新景, 吕宗刚, 董大忠, 等. 北美页岩气资源形成的地质条件[J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 27-32.
- [10] 黄玉珍, 黄金亮, 葛春梅, 等. 技术进步是推动美国页岩气快速发展的关键[J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 7-10.
- [11] 李世臻, 乔德武, 冯志刚, 等. 世界页岩气勘探开发现状及对中国的启示[J]. 地质通报, 2010, 29(6): 918-924.
- [12] 安晓璇, 黄文辉, 刘思宇, 等. 页岩气资源分布、开发现状及展望[J]. 资源与产业, 2010, 12(2): 103-109.
- [13] John B Urtis, 杨登维. 裂缝性页岩气系统[J]. 石油地质科技动态, 2003(2): 62-78.
- [14] 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.
- [15] 李登华, 李建忠, 王社教, 等. 页岩气藏形成条件分析[J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 22-26.
- [16] 蒲泊伶, 蒋有录, 王毅, 等. 四川盆地下志留统龙马溪组页岩气成藏条件及有利地区分析[J]. 石油学报, 2010, 31(2): 225-230.
- [17] 张金川, 姜生玲, 唐玄, 等. 我国页岩气富集类型及资源特点[J]. 天然气工业, 2009, 29(12): 109-114.
- [18] 聂海宽, 张金川, 张培先, 等. 福特沃斯盆地 Barnett 页岩气藏特征及启示[J]. 地质科技情报, 2009, 28(2): 87-93.
- [19] 唐嘉贵, 吴月先, 赵金洲, 等. 四川盆地页岩气藏勘探开发与技术探讨[J]. 钻采工艺, 2008, 31(3): 38-42.
- [20] 吴月先, 钟水清. 川渝地区页岩气藏勘探新选向研讨[J]. 青海石油, 2008, 26(3): 7-12.
- [21] 王世谦, 陈更生, 董大忠, 等. 四川盆地下古生界页岩气藏形成条件与勘探前景[J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 51-58.
- [22] 刘洪林, 王莉, 王红岩, 等. 中国页岩气勘探开发适用技术探讨[J]. 油气井测试, 2009, 18(4): 68-71.
- [23] 蒋志文. 页岩气简介[J]. 云南地质, 2010, 29(1): 109-110.
- [24] 张言. 页岩气藏开发的专项技术[J]. 国外油田工程, 2009, 25(1): 24-27.
- [25] 朱华, 姜文利, 边瑞康, 等. 页岩气资源评价方法体系及其应用——以川西坳陷为例[J]. 天然气工业, 2009, 29(12): 130-134.
- [26] Bill Grieser, Jim Bray. Identification of Production Potential in Unconventional Reservoirs[J]. SPE106623, 2007: 1-6.
- [27] Rick Lewis, David Ingraham, Marc Percy. New Evaluation Techniques for Gas Shale Reservoirs[Z].
- [28] 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(7): 16-18.
- [29] 邹德江, 于兴河. 低孔低渗砂岩储层特征及岩石物理实验分析[J]. 石油地质与工程, 2008, 22(1): 12-14.
- [30] Richard Merkel. 致密含气砂岩的综合岩石物理模型研究[J]. 刘延梅译. 测井与射孔, 2007, 10(3): 51-57.
- [31] 石玉江, 张海涛, 侯雨庭, 等. 基于岩石物理相分类的测井储层参数精细解释建模[J]. 测井技术, 2005, 29(4): 328-332.
- [32] Rick Rickman, Mike Mullen, etc. A Practical Use of Shale Petrophysics for Stimulation Design Optimization: All Shale Plays are not Clones of the Barnett Shale[J]. SPE 115258, 2008.
- [33] Manika Prasad, Arpita Pat Bathija, etc. Rock Physics of the Unconventional. The Leading Edge[J]. 2009, 28(1): 34-37.
- [34] 王兰生, 邹春艳, 郑平, 等. 四川盆地下古生界存在页岩气的地球化学依据[J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 59-62.

(收稿日期: 2011-01-10 本文编辑 王小宁)