

引用: 刘国强. 非常规油气时代的测井采集技术挑战与对策[J]. 中国石油勘探, 2021,26(5):24-37.

Liu Guoqiang. Challenges and countermeasures of well logging data acquisition technology in unconventional petroleum exploration and development[J]. China Petroleum Exploration, 2021,26(5):24-37.

非常规油气时代的测井采集技术挑战与对策

刘国强

(中国石油勘探与生产分公司)

摘 要: 为积极应对中国主要含油气盆地已经或即将进入非常规油气勘探开发的发展趋势, 文章在概述非常规油气的储层、油气藏和工程三方面特点基础上, 系统分析了当前中国测井采集技术的现状、挑战及需求, 并对标国际领先技术, 系统性提出了相应发展对策, 即: (1) 升级常规电缆测井性能。研制并投产高精度高分辨率高安全型常规测井, 要求纵向分辨率为5~10cm, 密度测井精度为0.01~0.015g/cm³, 并采用高产额可控中子管技术实现密度和中子的无放射源安全测井。(2) 完善配套成像测井技术。一是重点研发短回波间隔(不大于0.2ms)、高纵向分辨率(10cm左右)和大信噪比(大于8)的同时探测纵向弛豫和横向弛豫二维核磁共振测井; 二是完善发展适用于致密储层的矿物组分精细计算和流体性质准确识别技术, 主要为元素全谱、多频介电、井下实时流体分析与测压及水平井多相流动成像等高性能成像测井技术; 三是发展方位超远探测三维声波测井技术, 精细描述水平井井旁地层结构、断裂系统、天然裂缝及压裂缝的空间展布。(3) 加快研发高性能过钻杆测井。测井项目至少应包括常规、电成像和阵列声波等测井技术, 并逐步配套元素全谱测井, 其资料精度和纵向分辨率与电缆测井相一致, 密度和中子测井采用小型化高产额可控中子管技术; 加大核磁共振测井的小型化攻关, 发展形成技术性能可匹配于电缆测井的过钻杆核磁共振测井。(4) 加大研发近钻头和远探边随钻测井技术。一是测井系列配套、针对性强, 发展包括自然伽马和电阻率等方位成像随钻技术, 其探测点距钻头小于1m; 二是方位远探边技术, 径向探测距离达20~30m, 方位分辨率至少为90°; 三是钻头前视探测技术, 可分辨钻头前方距离5m以上的地层界面或断层。

关键词: 非常规油气; 测井; 采集技术; 核磁共振测井; 过钻杆测井; 地质导向; 油气甜点

中图分类号: P631.82 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-7703.2021.05.003

Challenges and countermeasures of well logging data acquisition technology in unconventional petroleum exploration and development

Liu Guoqiang

(PetroChina Exploration & Production Company)

Abstract: The petroleum exploration in most of the domestic petroliferous basins has entered or will step into the stage of unconventional oil and gas exploration and development. The wireline logging technologies should be promoted to meet the development trend timely and effectively. The current situation, challenges and new requirement of logging technology in China are systematically analyzed by considering the characteristics of unconventional reservoir, oil and gas reservoir and engineering conditions. Finally, development countermeasures are proposed in detail by benchmarking international leading logging technology, which are: (1) Improve the performances of conventional wireline logging tools. The high-precision, high-resolution and high-safety conventional logging tools should be developed and put into production, with vertical resolution of 5-10 cm, density logging accuracy of 0.01-0.015 g/cm³. The high-yield controllable neutron tube technology will enable the safe density and neutron logging without radioactive source. (2) Develop high-performance imaging logging

作者简介: 刘国强(1964-), 男, 江西鄱阳人, 博士, 1993年毕业于中国石油勘探开发研究院, 教授级高级工程师, 现主要从事复杂油气藏测井评价与非常规油气甜点评价等方面的工作。地址: 北京市东城区东直门北大街9号石油大厦中国石油勘探与生产分公司, 邮政编码: 100007。E-mail: lgqi@petrochina.com.cn

收稿日期: 2021-07-21; 修改日期: 2021-09-02

technology. Firstly, focus on the technology of 2D NMR logging with short echo interval (no more than 0.2 ms), high vertical resolution (about 10 cm), high signal-to-noise ratio (more than 8), and simultaneous detection of longitudinal and transverse relaxation; Secondly, research fine calculation of mineral compositions and accurate determination of fluid properties applicable for tight reservoirs, such as the full spectrum of elements, multi frequency dielectric log, downhole real-time fluid analysis and pressure measurement tools, and horizontal well multiphase flow imaging logging technology; Thirdly, promote 3D acoustic logging technology with the capabilities of fine azimuth resolution and ultra-far detection to describe the stratigraphic structure near the borehole of horizontal well, fault system, and spatial distribution of hydraulic fractures. (3) Speed up the research on high-performance through-pipe logging tools. The logging items should include conventional logging, electric imaging logging and array acoustic logging. The element full spectrum logging should gradually be supplemented, with its data accuracy and vertical resolution consistent with those of wireline logging data. The density and neutron logging tools should adopt miniaturized, high-yield and controllable neutron tube technology. The miniaturization of NMR logging should be enhanced to develop through-pipe NMR logging with its technical performance matching with that of wireline logging. (4) Emphasize the research on near bit and far-detection edge LWD technology. First is to establish a complete LWD logging series including GR and resistivity azimuth imaging logging, with the distance of less than 1 m between the detection point and drill bit; Second is azimuth far-detection edge technology with radial detection range of 20-30 m and azimuth resolution of at least 90° ; Third is the forward-looking detection technology that can distinguish the formation interface or fault more than 5 m in front of the bit.

Key words: unconventional oil and gas, well logging, acquisition technology, nuclear magnetic resonance logging, through-pipe logging, geosteering, sweet spot

0 引言

随着勘探开发领域的不断拓广拓深,中国油气资源劣质化的趋势日渐明显,非常规油气已成为增储上产最重要的主体资源之一,鄂尔多斯、渤海湾、松辽、准噶尔和四川等中国诸多大型含油气盆地已经或即将进入非常规油气勘探开发时代,这契合世界油气上游业务发展史^[1-8]。非常规油气涉及面广,其概念的内涵与外延在国内外业界均存在较大的差异性^[9-11],本文所指的非常规油气仅包括致密油、致密气、页岩油和页岩气,且页岩油仅限于源储共存型中一高成熟页岩油^[10],这4类非常规油气均为目前非常规油气勘探开发的主要领域,当前95%以上的工作量、储量和产量均来源于其中。

经过近十几年持续的勘探评价和技术准备,中国石油非常规油气的勘探发现已实现了由点到面、由量变至质变的突破,截至2019年年底非常规油气累计探明地质储量中,致密油和页岩油为 $7.37 \times 10^8 \text{t}$,致密气为 $5.1 \times 10^{12} \text{m}^3$,页岩气为 $1.06 \times 10^{12} \text{m}^3$;2019年非常规油气年产量中,致密油和页岩油为 $175 \times 10^4 \text{t}$,致密气大于 $300 \times 10^8 \text{m}^3$,页岩气为 $80 \times 10^8 \text{m}^3$ 以上^[12]。

非常规油气具有储层致密、岩性复杂和流体类型多样等特点,且多呈薄互层宏观结构,非均质性和各向异性强,需以丛式井与水平井及大型压裂改造方式实现规模有效开发,这些地质、油气藏和工程等特点决定着其勘探开发过程中对测井技术有着诸多异于常规油气的特有技术需求。当前,无论是国产还是购买引进的测井井下探测仪器,大多数均是十几年甚至30年前针对常规油气储层特征而设计研发的,其采

集资料的针对性、有效性和时效性难以满足非常规油气勘探开发的技术需求。非常规油气时代,应发展非常规测井采集技术,为“七性关系”(岩性、物性、电性、含油气性、脆性、生烃特性和地应力各向异性)分析、“三品质”(烃源岩品质、储层品质和工程品质)评价和油气甜点优选^[9,13-14]奠定扎实的资料基础。

近年来,中国针对非常规油气的测井采集仪器研发进展良好,如研发三分量感应测井仪以评价薄互层的电各向异性^[15-16],研发元素俘获测井仪并正在完善发展元素全谱测井仪(可同时测取俘获伽马谱和非弹性散射伽马谱)^[17-19]以评价储层岩性特征和计算总有机碳含量(TOC),研发存储式测井仪^[20]以提高测井时效和降低遇阻遇卡概率等。这些技术的发展有效推动了非常规油气测井采集技术的进步,但同时还应看到,仍然存在诸多问题,一是这些测井仪的技术性能指标(包括精度、分辨率、稳定性、耐高温耐压指标及测量参数等)尚需改进提升,以更好地适用于非常规油气储层测井评价;二是未形成配套的测井技术系列,难以形成技术合力完整地满足非常规油气的测井采集技术需求。

为此,本文系统地分析了非常规油气勘探开发中测井采集技术所遇到的主要技术挑战与需求,并结合国内测井技术发展现状,针对非常规油气地质特点、油气藏特征和工程特点,对标国际领先技术水平,系统地提出了包括电缆测井、过钻杆测井和地质导向等三方面测井采集技术发展对策,冀以更好地发挥测井技术在非常规油气勘探开发中的提质提效作用,并尽快形成具有中国完全知识产权的测井新技术体系。

1 非常规油气的基本特点

从分析测井技术需求及其面临的主要地质和工程问题入手,概要地论述非常规油气的储层、油气藏和工程等3个方面的特点。

1.1 储层特点

非常规油气的储层特征明显有异于常规油气储层,其特点主要体现在:

(1) 细粒沉积,岩性复杂多样。中国陆相非常规油气储层的岩性可分为两类,一类是简单岩性的粉砂岩和细砂岩,如鄂尔多斯盆地延长组长 7_1 亚段和长 7_2 亚段页岩油与苏里格致密气、四川盆地沙溪庙组和须家河组致密气及松辽盆地泉头组泉四段致密油等;另一类是复杂岩性的混积岩,其矿物组分包括黏土质、粉—细砂质、白云质、灰质和黄铁矿等,分布广泛,如准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组与玛湖地区风城组、松辽盆地青山口组青一段、渤海湾盆地大民屯凹陷沙四段与沧东凹陷孔店组孔二段和四川盆地自流井组大安寨段等领域页岩油及四川盆地龙马溪组页岩气等。

(2) 储层致密且孔隙结构复杂,以微细孔喉为主。低孔隙度、低渗透率甚至超低孔隙度、超低渗透率是非常规油气储层最基本的特征,一般其基质孔隙度小于10%,覆压基质渗透率小于0.1mD(图1),明显低于常规油气储层。孔隙类型多样、孔隙结构复杂,多以溶蚀孔为主,并伴生有粒间残余孔、微裂隙和有

机质孔,天然裂缝一般不发育(图2)。当页岩油气中干酪根热演化程度较高时(如 R_o 大于1.2%),有机质孔较发育,如川渝地区龙马溪组页岩气储层,其孔隙度甚至可以超过基质孔隙度,且与总有机碳含量(TOC)呈正相关关系^[21],当然,此种关系的前提条件是未发生有机质孔坍塌现象,否则有机质孔隙度将随着热演化程度增高而降低^[22]。但对于热演化程度较低(一般 R_o 小于0.7%)的陆相页岩油,有机质孔并不发育,TOC的高低可能与储集空间发育程度并没有必然的关联性。

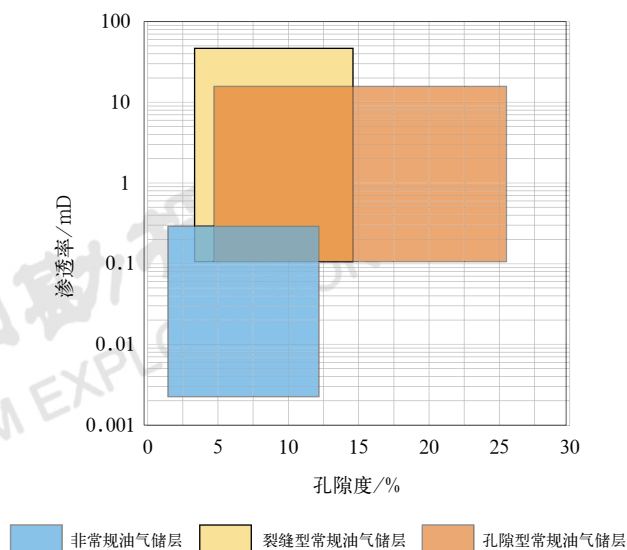


图1 非常规油气储层与常规油气储层的孔渗分布特征

Fig.1 Porosity and permeability distribution of unconventional and conventional oil and gas reservoirs

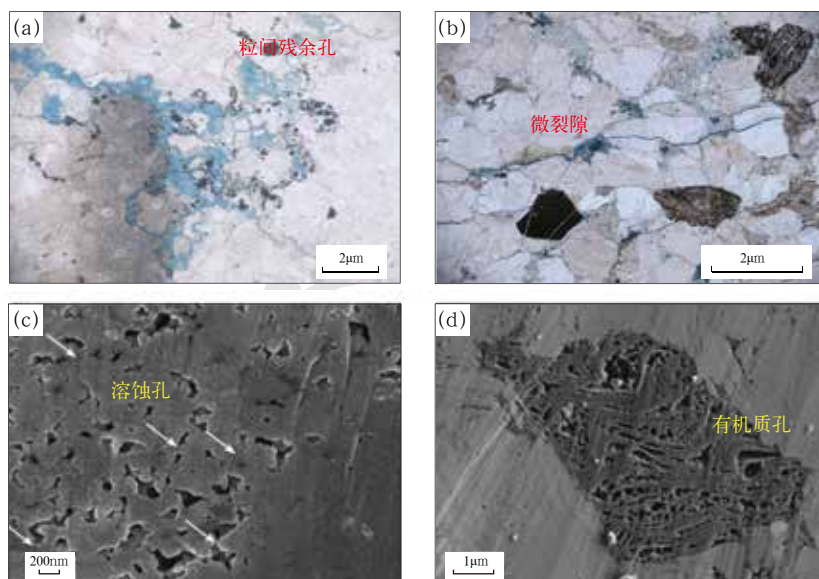


图2 非常规油气储层的主要孔隙类型

Fig.2 Main pore types of unconventional reservoir

非常规油气储层的孔喉半径小,基本小于 $3\mu\text{m}$,且孔喉分布的非均质性强。一般地,致密油气储层条件较页岩油气储层要好。

(3) 储层多呈纹层状、薄互层结构,各向异性强。受沉积环境控制,致密油气储层单层厚度相对较大,而页岩油气储层的单层厚度则要小得多,常为毫米级薄互层状的宏观结构^[23],渗透率、电学与声学测井响应等均表现出较强的各向异性,直井和水平井间的声学电学测井特征存在较大差异。

1.2 油气藏特点

致密油气和页岩油气等非常规油气均为源控成藏,但两者成藏模式有所不同,前者为源储互为独立个体但源储相邻的就近成藏模式,后者为源储一体或源储共存的就地成藏模式。

对于致密油气的就近成藏模式,来自烃源岩的油气在生烃增压作用下突破储层排替压力而持续地充注至相邻储层,其成藏的充分性和含油气饱和度的高低取决于烃源岩品质、储层品质和源储距离3个关键因素(成藏三要素),显然,烃源岩品质越好、储层品质越好及源储距离越小,成藏越充分,含油气饱和度越高^[14]。

对于页岩油气的就地成藏模式,烃源岩生成的油气就地充注至紧邻的无机和有机质储集空间,其成藏的充分性和含油气饱和度的高低取决于烃源岩品质和储层品质这两个关键因素(成藏两要素)。烃源岩品质和储层品质越好,成藏越充分,含油气饱和度越高;而且,由于高品质烃源岩的生烃增压作用强,油气可突破较大排替压力而运移至品质较差的储层成藏,因此,烃源岩品质对成藏的控制作用更大。

一般地,页岩油气储层含油气饱和度高,常分布于50%~90%,束缚水饱和度为10%~50%(与储层孔隙结构及黏土含量密切相关),基本不含可动水。致密油气储层的含油气饱和度差异大,其分布范围主要为40%~80%,成藏三要素中至少一个要素较差时,则其储层可产可动水,如松辽盆地南部的泉四段致密油和四川盆地须家河组致密气等。

基于各类非常规油气的成藏特点差异,其赋存的流体类型不尽相同,如表1所示。页岩油储层中液态原油具有3种赋存状态,可存在于无机孔缝、有机质孔和以吸附互溶态存在于干酪根表面及其内部^[24-25],其中,无机孔缝、有机质孔中可分布可动油和束缚油,但以可动油为主^[26],而干酪根表面及其内部则主要赋存束缚油和沥青。

表1 不同类型非常规油气的流体分布特点

Table 1 Occurrence of fluids in various types of unconventional oil and gas reservoirs

油气藏类型	可动油	束缚油	束缚水	可动水	游离气	吸附气	沥青	干酪根
致密油	✓	✓	✓	✓ ^①	✓ ^②		✓ ^②	
页岩油	✓	✓	✓	✓ ^①	✓ ^②	✓ ^②	✓	✓
致密气			✓	✓ ^①	✓			
页岩气	✓ ^③	✓ ^③	✓	✓ ^①	✓	✓	✓	✓

①典型致密油气和页岩油气储层中不含可动水,但如成藏不充分,则可能存在;

②可能存在,取决于油藏的成藏特性和原油性质等;

③可能存在,取决于页岩气藏的热演化作用和成藏特性等。

1.3 工程特点

成本控制是非常规油气勘探开发的永恒主题,所选用工程技术的最主要目的是最大限度地提高经济效益、提升最终可采储量(EUR)。因此,非常规油气的工程技术具有如下3个方面的显著特点:

(1) 采用丛式井平台的工厂化作业模式。以丛式井平台部署水平井和大斜度井,最大限度地增大油气泄流面积,并以大型压裂改造提高单井产量,以工厂化作业有序调配钻完井、测井(含射孔桥塞联作)和压裂等工序,降低工程成本,提高生产时效。

(2) 水平井实施成效直接决定开发效益。优选水平井窗体、井眼轨迹、水平段长度、井间距和地质导向工具等,做精做细钻井地质设计;优选近钻头和远探边随钻测井技术,提高储层或油气层钻遇率、井筒质量和钻井时效;结合储层品质和工程品质,优化分簇分段和压裂参数;评价压裂效果,为油气甜点段优选和压裂设计优化建立学习曲线。

(3) 安全高效地取全取准测井资料。水平井完井测井须一趟完成所有资料的采集,以尽可能地降低占井时间,为此,要求测井仪器性能稳定、故障率低、组合性能优异、抗遇阻遇卡能力强且资料质量可靠。

2 高性能电缆测井关键技术

电缆测井技术主要用于非常规油气探井、评价井和导眼井的资料采集,为“七性关系”分析、“三品质”评价和油气甜点评价奠定扎实的资料基础。针对非常规油气特点与技术需求,应重点发展以下三方面的电缆测井关键技术。

2.1 高精度和高分辨率技术

如前文所述,非常规油气为低孔低渗储层甚至超低孔超低渗储层,且多呈薄互层的宏观结构,因此测井仪器具备高精度和高纵向分辨率的性能是非常规油气勘探开发对测井技术的基本要求之一。

2.1.1 高精度仪器

测井仪器的高精度是指其采集的资料可达到储量规范所要求的孔隙度计算精度。测井计算孔隙度主要采用常规孔隙度测井(密度测井、声波测井和中子测井)及核磁共振测井,非常规油气储层对其精度要求分别论述如下。

2.1.1.1 常规孔隙度测井

常规孔隙度测井仪的高精度化可以满足大量仅采集常规测井资料井的孔隙度计算,但需明确具体的量化指标以指导高精度仪器的研发。为此,以石英砂岩为例,采用体积模型法模拟分析(模拟参数:含水饱和度为100%,骨架密度为 $2.65\text{g}/\text{cm}^3$,骨架声波时差为 $56\mu\text{s}/\text{ft}$,泥质含量为零)当前主打装备的密度测井和声波测井的孔隙度计算精度(图3)。由于中子测井的孔隙度计算精度差,所以未分析。若要达到相对误差小于或等于8%的国家储量规范所规定的孔隙度计算精度要求,由图3可以看出:

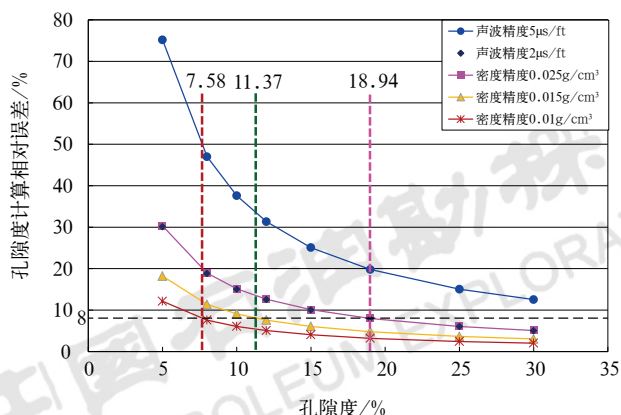


图3 不同精度密度测井仪和声波测井仪的孔隙度计算精度对比

Fig.3 Comparison of porosity computation accuracy by density and acoustic logging tools with different precision

(1) 对任何孔隙度大小的储层,精度为 $5\mu\text{s}/\text{ft}$ 的声波测井仪均不能满足。

(2) 精度为 $2\mu\text{s}/\text{ft}$ 的声波测井仪与精度为 $0.025\text{g}/\text{cm}^3$ 的密度测井仪的孔隙度计算精度基本相同,只有孔隙度大于18.94%的储层,才能达到此要求,显然,这两种精度的仪器并不适用于非常规油气,但它们却是目前占比应用95%以上的装备,其性能的更新升级十分迫切。

(3) 对于精度为 $0.015\text{g}/\text{cm}^3$ 和 $0.01\text{g}/\text{cm}^3$ 的密度测井仪,当储层孔隙度分别大于11.37%和7.58%时,满足非常规油气的孔隙度计算精度要求。

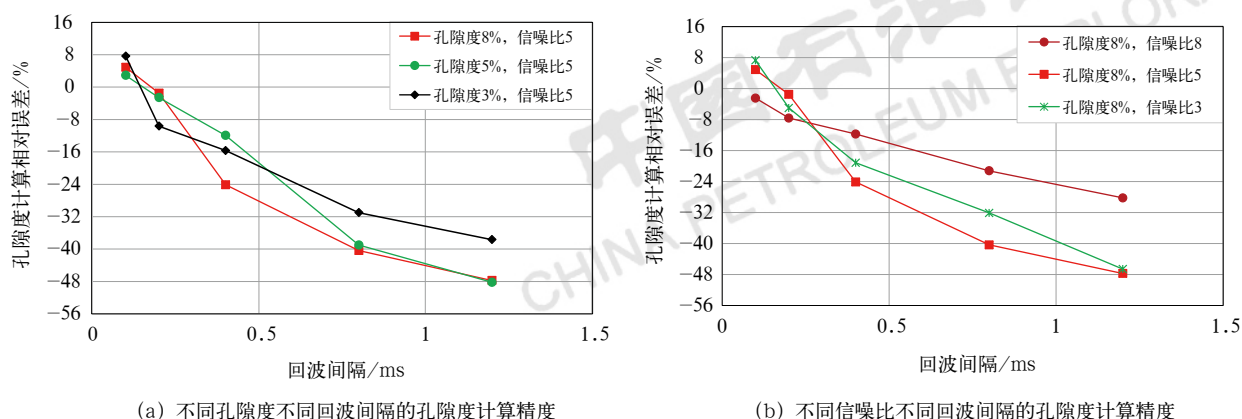
因此,应加快发展常规孔隙度测井尤其是密度测井的高精度仪器,可分两步推进。一是当前积极应对措施:将现有密度测井仪器的精度统一升高至 $0.01\text{g}/\text{cm}^3$;二是完全解决问题措施:加强技术研发,提高密度测井仪的性能,如提升探测器微弱信号检测灵敏度及其处理算法、优化仪器结构和完善井筒环境校正功能等,将密度测井仪的精度提高至 $0.005\text{g}/\text{cm}^3$,此时,即使孔隙度为3.8%的储层,其孔隙度计算相对误差仅为7.97%,完全满足非常规油气的孔隙度计算需求。

需要指出的是,对于复杂岩性储层,在应用高精度测井仪器采集资料的前提下,需进一步准确计算出各类主要矿物的含量和骨架参数,从采集资料质量和处理参数准确确定这两个方面共同提高孔隙度计算精度,两者缺一不可。

2.1.1.2 核磁共振测井

当地层不存在明显顺磁性矿物时,核磁共振测井所计算的孔隙度基本不受储层岩性影响,十分适用于复杂岩性尤其是混积岩等非常规油气储层的孔隙度计算,但这并不意味着任何一款核磁共振测井仪都是适用的,回波间隔和测量资料的信噪比是判断其适用性的关键参数。

采用数值模拟方法量化分析这两个参数对核磁共振测井的孔隙度计算精度的影响。根据非常规储层的孔喉分布特点、回波串信噪比及其核磁共振 T_2 谱特征,构建以微小孔隙为主、 T_2 峰值为10ms的高斯函数作为 T_2 分布模型,采用不同回波间隔模拟以CPMG脉冲序列激发获取不同孔隙度储层不同信噪比条件下的回波串信号(图4)。模拟过程中,设定等待时间为12s,噪声信号为随机信号。从图4可以看出:



(a) 不同孔隙度不同回波间隔的孔隙度计算精度

(b) 不同信噪比不同回波间隔的孔隙度计算精度

图4 核磁共振测井的回波间隔和信噪比对孔隙度计算精度影响的模拟分析

Fig.4 Simulation analysis of porosity accuracy by echo spacings and signal-to-noise ratios of NMR logging tool

(1) 随着回波间隔变大,核磁共振测井计算精度显著降低。当回波间隔不大于0.2ms,在资料信噪比为5时,即使储层孔隙度低至3%,核磁共振测井的孔隙度计算精度也能满足储量规范要求;而当回波间隔大于0.3ms,即使孔隙度为8%,也不能满足此要求。

(2) 资料信噪比越大,核磁共振测井的孔隙度计算精度越高,即通过提高资料的信噪比,可一定程度上提高孔隙度计算精度,但决定计算精度的关键因素还是回波间隔,即仪器的固有性能。

目前,大多数在用的核磁共振测井仪回波间隔为0.6ms,其致密储层的资料信噪比低(一般小于3),显然,此类核磁共振测井仪难以满足非常规油气的解释评价需求,需加大技术研发攻关,如重构磁体设计、优化测量方式、提升微弱信号拾取技术并改进提高信噪比处理算法等,研发出回波间隔小(不大于0.2ms)、资料信噪比较高(大于8)的核磁共振测井仪。

2.1.1.2 高分辨率仪器

一般地,将单层厚度为5~50cm的地层定义为薄层,由图5可以看出:

(1) 现有测井仪器的纵向分辨率基本可满足单层厚度为15~50cm薄层评价的需要,中油测井公司成功研发并投产应用的0.2m薄层测井技术系列^[27]则进一步提升了5~25cm薄层分辨能力。

(2) 非常规油气尤其是页岩油气储层的单层厚度小,多呈纹层状结构,单个纹层的厚度一般小于5cm,可定义为超薄储层。对于超薄储层,仅分辨率分别为0.5cm和2.5cm的电成像测井和介电扫描测井才能满足;其他测井仪器分辨率远大于5cm,其探测的地球物理信息为目的层和围岩的综合响应,且大

部分来自上下邻近的数个薄层,此类信息的应用将高算孔隙度值、低算含油饱和度值,易误导储层分类结果和流体识别结论,且致有效厚度划分不准。显然,需全面提高测井仪器的纵向分辨率。

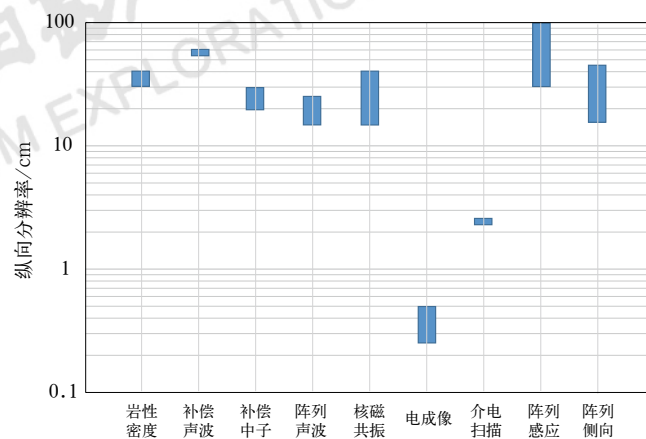


图5 常用测井仪器纵向分辨率对比

Fig.5 Comparison of vertical resolution of common logging tools

测井技术上,一直存在“分辨率越高,探测深度越浅,反之亦然”的跷跷板效应,如要提高纵向分辨率,则需“牺牲”仪器的探测深度。所幸的是,非常规油气储层侵入作用弱,即探测深度不是非常规油气所关注的重点,而应着重研发适用于超薄层的高分辨率探测技术,为此应:

(1) 研发高分辨率仪器的测井仪器系列,形成5cm分辨率的超薄层测井技术系列,为越来越重要且工作量快速增长的非常规油气勘探开发量身打造专有的超薄层测井仪器系列。

(2) 研究超薄层测井信息精细反演处理技术。一是可借鉴阵列感应测井所采用的“软聚焦”反演处理

技术,解决上述跷跷板效应,达到提升现有测井仪器分辨率的目的;二是基于数值模拟和岩石物理实验研究,建立各向异性强超薄层的物理模型及其反演处理技术,提取表征超薄层的测井信息。

2.2 精细全面油气探测技术

非常规油气流体赋存的复杂性和多样性(表1)决定着其对流体识别技术的发展需求更多、要求更高,并需研究饱和度计算新方法以提升计算精度。

2.2.1 电各向异性探测技术

电阻率测井始终是流体识别和饱和度计算最基本的首选方法,但对于非常规油气,则需先分析电各向异性特征。非常规油气储层的薄互层或页岩页理^[23]等宏观结构特性,以及开发部署中基本采用的水平井和丛式井(井斜角较大),均可产生较强的电各向异性^[28],但其形成机理不尽相同。

对于薄互层地层,当仪器纵向分辨率较低时,难以分辨出单一的砂岩层和泥岩层,导致测量的电阻率是各向异性作用下地层水平电阻率(R_h)与垂直电阻率(R_v)的综合响应值,未能反映地层真电阻率的变化特征。为了量化描述地层的电各向异性,定义电各向异性系数(λ)为垂直电阻率与水平电阻率之比的算术平方根,而且,按照水平电阻率为探测范围内各地层电阻率的并联、垂直电阻率为探测范围内各地层电阻率的串联的电磁场论原理,可推导出电各向异性系数为

$$\lambda = \sqrt{\frac{1}{(1+\varepsilon)^2} \left[\varepsilon^2 + \varepsilon \cdot \left(\frac{R_{sd}}{R_{sh}} + \frac{R_{sh}}{R_{sd}} \right) + 1 \right]} \quad (1)$$

$$R_v = \frac{\varepsilon \cdot R_{sd} + R_{sh}}{1 + \varepsilon} \quad (2)$$

$$R_h = \frac{R_v}{\lambda^2} \quad (3)$$

式中 R_{sd} ——砂岩电阻率, $\Omega \cdot m$;
 R_{sh} ——泥岩电阻率, $\Omega \cdot m$;
 ε ——测井仪器纵向分辨率内砂岩与泥岩的厚度比。

假定砂岩电阻率为 $50 \Omega \cdot m$, 泥岩电阻率为 $4 \Omega \cdot m$, 采用公式(1)至公式(3)可以模拟计算出水平电阻率、垂直电阻率和电各向异性系数,模拟结果见图6。图6指出:

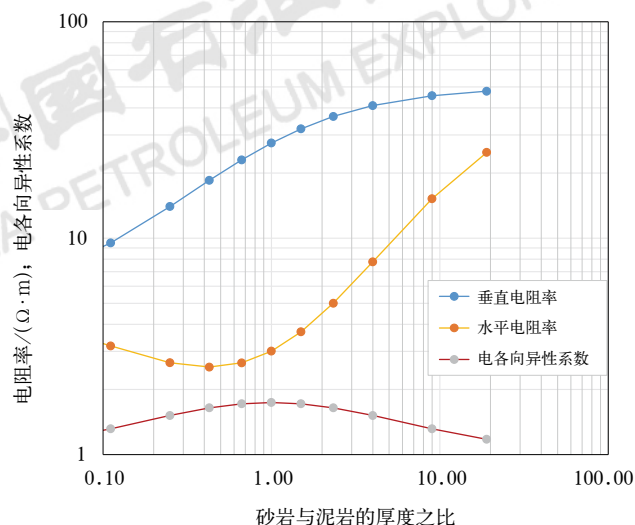


图6 砂泥岩薄互层的电各向异性特征

Fig.6 Electric anisotropy of thin interbedding of sand and mudstone

(1) 当 $\varepsilon=1$ 时, λ 最大, 即砂岩与泥岩厚度相等时, 电各向异性系数最大。当 $\varepsilon<1$ (砂岩厚度小于泥岩厚度) 时, 随着 ε 增加即砂岩厚度增大时, λ 增加; 当 $\varepsilon>1$ (砂岩厚度大于泥岩厚度) 时, 随着 ε 增加即砂岩厚度增大时, λ 减小。

(2) 垂直电阻率始终大于水平电阻率, 即水平电阻率主要反映泥岩的电学特性, 而垂直电阻率则主要反映砂岩电学特性。考虑到非常规油气储层的电阻率不高(一般小于 $200 \Omega \cdot m$), 常采用双感应测井或阵列感应测井, 其测量值(接近于水平电阻率)较储层真实值低, 且随着电各向异性增强, 其降低值越大。如此, 容易漏失掉油气层且低算含油饱和度, 难以满足绝对误差不大于 5% 的精度要求。

非常规油气开发生产中, 基本采用水平井和丛式井(井斜角大), 其电阻率测量值明显异于直井, 且此差异为探测范围内地层厚度、地层电阻率及井地角(井轴方向与地层法线间的夹角)等 3 个因素共同作用的结果。图 7 指出, 即使是同一套地层(以鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长 7_2 亚段为例), 水平井电阻率明显大于直井电阻率, 电各向异性系数在 1.2 左右。因此, 水平井测井评价中, 应在电各向异性校正基础上, 才可采用直井中所建立的流体识别电性图版, 否则易识别出假油气层(即高解释), 且所算含油饱和度偏高。

非常规油气储层的电阻率测井响应复杂, 应发展能够探测出电各向异性作用的电阻率测井技术, 测量出水平电阻率、垂直电阻率, 以及地层倾角与方位,

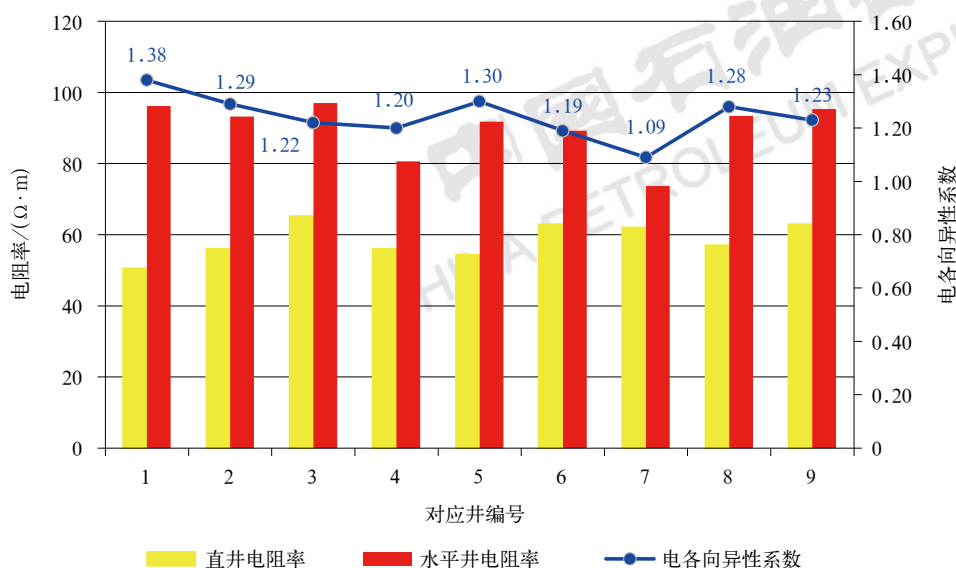


图7 直井与水平井电阻率对比

Fig.7 Resistivity comparison between vertical wells and horizontal wells

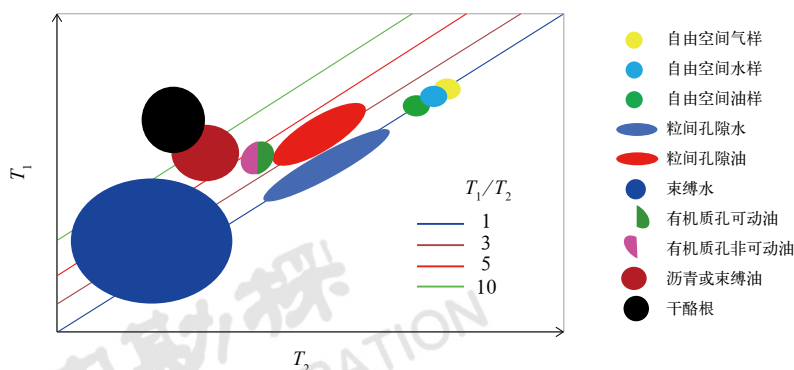
并借助其他高分辨率测井（如电成像测井）所确定的薄互层地层厚度，计算出目的层和围岩的电阻率真值，提升电阻率测井的流体识别符合率和饱和度计算精度。

2.2.2 复杂流体探测技术

识别非常规油气储层中多类型流体十分困难，为测井评价的瓶颈难题，必须发展针对性的新技术。遍视当今国内外测井技术，唯有二维核磁共振测井最为现实可行，是优先发展的核心技术。

二维核磁共振测井技术可以同时测量纵向弛豫 T_1

和横向弛豫 T_2 ，以此建立 T_1 — T_2 流体识别图版^[29-30]，如图8所示。根据各类流体的 T_1 和 T_2 分类标准，识别出可动油、束缚油、可动水、束缚水、天然气和沥青等，并可估算储层流体流度、黏度及气油比等评价页岩油甜点的关键参数，但其技术性能应达到以下要求：（1）小回波间隔（不大于0.2ms），高纵向分辨率（10cm左右）；（2）更短等待时间（1.0ms左右），更大负载循环的电磁脉冲序列；（3）多种针对低孔隙度储层和致密储层的测量模式；（4）低孔隙度储层和致密储层的测量资料信噪比较高（至少达到8）。

图8 T_1 — T_2 二维核磁共振精细划分流体类型示意图^[29]Fig.8 Schematic diagram of fine division of fluid types by T_1 — T_2 NMR crossplot^[29]

2.2.3 非电阻率油气饱和度探测方法

非常规油气储层的电性响应特征复杂，基于电阻率的经典饱和度计算模型保证其计算精度的难度大。因此，应发展非电阻率的含油饱和度探测方法，电阻

率方法与非电阻率方法配套使用，提高饱和度计算精度。目前，较好地适用于非常规油气的非电阻率饱和度和探测技术主要有介电扫描测井、元素全谱测井和核磁共振测井等。

2.2.3.1 介电扫描测井

介电扫描测井是基于地层水的介电常数与油气、岩石均存在显著差异(相差8~30倍)而敏感地探测出地层含水孔隙度,并将其与其他方法所确定的总孔隙度对比计算出油气饱和度^[31],即:

$$S_h = 1 - \frac{\phi_w}{\phi_t} \quad (4)$$

式中 ϕ_w ——介电扫描测井计算的地层含水孔隙度;

ϕ_t ——地层总孔隙度;

S_h ——油气饱和度。

从公式(4)中可以看出,相比于电阻率饱和度计算模型,该方法具有明显的优势:

(1) 无须地层电阻率,规避了非常规油气储层真电阻率不易求准的难题;

(2) 无须岩电参数,规避了非常规油气储层致密且孔隙结构复杂所带来的岩电参数实验室无法准确确定的难题;

(3) 介电扫描测井的分辨率高达2.5cm,非常适用于具有薄互层结构的非常规油气储层,尽管其探测深度浅(10cm左右),但对于侵入作用一般不强的非常规油气储层,没有太大影响。

公式(4)指出, ϕ_w 的计算精度至关重要,直接决定饱和度计算精度。因此,在 ϕ_w 反演处理前,需要准确确定:

(1) 地层混合骨架的介电常数,尤其是当储层的岩性复杂或在低频测量信息的介电常数反演时。考虑到黄铁矿的相对介电常数高达27且其在页岩油气储层中广泛发育,对混合骨架介电常数的影响程度大,应特别重视其含量的准确计算。

(2) 储层孔隙结构类型,以此选取针对性的反演模型。

(3) 地层水(对于典型非常规油气,地层水一般表现为束缚水)矿化度,以此校正低频(100MHz和20MHz等)测量信息所确定的介电常数。

为了充分发挥上述技术优势,应加快发展高分辨率多频介电测井技术,同时研究配套的反演处理方法,提高地层含水孔隙度反演精度,为非常规油气饱和度计算提供一种简便易行的新方法。

2.2.3.2 元素全谱测井

元素全谱测井通过所测量的非弹性散射伽马谱的解谱处理确定出地层总碳含量,在剔除其中的无机碳含量后,计算总有机碳含量,并据公式(5)估算含

油饱和度^[32]:

$$S_o = \frac{TOC \cdot \rho_{ma} \cdot (1 - \phi_t)}{\rho_o \cdot X_o \cdot \phi_t} \quad (5)$$

式中 S_o ——地层含油饱和度;

TOC ——地层总有机碳含量;

ρ_{ma} ——地层混合骨架密度(根据元素全谱测井所确定的精细矿物组分而计算),
g/cm³;

ϕ_t ——地层总孔隙度(由核磁共振测井或孔隙度测井确定);

X_o ——原油中的碳含量(可由实验室确定,一般为0.85%);

ρ_o ——原油密度(可由实验室确定,一般为0.75~0.85g/cm³), g/cm³。

在较易计算且精度可控的总孔隙度已知时,公式(5)的计算方法简单易行,其计算精度几乎完全取决于TOC计算精度,但元素全谱测井确定的TOC存在如下局限性:

(1) 元素全谱测井探测深度较浅(20cm左右),难以探测到原状地层中的天然气和轻质油(因地层钻开时,井壁附近的天然气快速散逸),所以,公式(5)不能应用于致密气、页岩气,以及含伴生气的致密油与页岩油的饱和度计算;

(2) 包括可能存在的干酪根和沥青中有机碳含量,致使含油饱和度计算偏高,需借助于其他测井方法确定并在预处理中将其剔除;

(3) 当地层的TOC<1%时,现有元素全谱测井计算的TOC存在较大误差,数值模拟(模型参数为纯石英砂岩,原油中的碳含量取0.85%,原油密度为0.8g/cm³)结果表明(图9):为了满足TOC>1%的条件,在含油饱和度为40%、50%、60%、70%和80%时,孔隙度下限分别为8.9%、7.25%、6.1%、5.27%和4.64%,表明现有元素全谱测井计算饱和度的方法仅适用于孔隙度大于5%的储层。

因此,针对上述局限性,应发展完善元素全谱测井技术:一是提升仪器探测碳元素的灵敏度并完善解谱方法,提高较低TOC的计算精度;二是研究确定出干酪根和沥青中的特有元素及其特征谱,并据此直接或间接地确定其TOC。如果能够做到这两点,元素全谱测井将有望成为适用面广、计算精度高的饱和度计算技术,一举破解致密油和页岩油的含油饱和度准确计算困难的瓶颈。

元素全谱测井可准确计算地层矿物含量并进一步确定骨架参数,是保障常规测井计算复杂岩性储层孔隙度精度的关键技术。

2.2.4 水平井多相流产液剖面测井技术

非常规油气储层非均质性强,需借助于水平井产液剖面测井量化分析压裂改造后的各射孔簇和压裂段的产液能力,包括产液量和产液类型等,改进油气甜点段优选方法和优化压裂设计方案,为其迭代式“学习曲线”的建立提供重要的第一手生产资料。相比于常规油气,非常规油气水平井的产液剖面测井技术性能要求更高,应能够达到:(1)仪器测量的产液量下限值(即启动流量)小,如不大于 2t/d 甚至 1t/d ,以满足每段产液量一般都较低的现实;(2)具有较准确的多相流体分辨能力,能够确定出可能共存的油、气、地层水和压裂液的日产量及其产出位置;(3)具有较强的复杂井筒环境适应能力,尤其是可较好解决井筒的多次上翘与下倾给测井作业所带来的难题。

针对上述技术要求,水平井产液剖面测井技术发展完善的重点应为:一是研发多相流流动成像测井技术,即沿井眼轴线阵列式地布置一系列微转子、电学探针和光学探头,连续实时地测量每一相的流速和持率,实时计算每相流体的流量;纵向分辨率高(1.5cm 左右),测量精度高($5\%\sim 10\%$);适用于大斜度井和水平井等井下复杂流态的产液剖面精细测量;二是研发智能示踪剂技术,提前将若干个不同类型示踪剂(包括水敏示踪剂和油敏示踪剂)置于完井设备或压裂液中,当其与储层流体相接触时,示踪剂释放于流体中,经地面的流体自动检测分析,快速地确定出放置示踪剂处储层所产流体类型和液量。

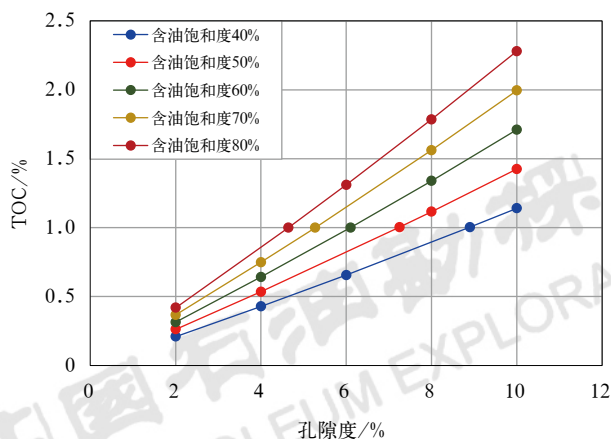


图9 不同孔隙度和含油饱和度条件下地层的总有机碳含量变化特征

Fig.9 Characteristics of TOC variations with porosity and oil saturation

2.3 方位超远探测三维声波测井技术

非常规油气勘探开发中,常以微地震监测技术评价水平井压裂裂缝三维展布特征,但误差大,只能做到定性或半定量判断,为此,应大幅提升目前在用的仅探测井旁 $20\sim 30\text{m}$ 缝洞储集体远探测声波测井技术^[33-34]的性能,研发形成一项全新技术——方位超远探测三维声波测井技术,使其可较准确地:(1)确定压裂裂缝延展的高度、长度和宽度,估算压裂波及体积,并据此估算最大可动用的油气储量;(2)分析井间压裂裂缝分布、井间储层连通性和井间干扰现象等,为水平井井间距优化提供第一手资料;(3)评价压裂后固井质量与套管损伤状况,优化完善后期射孔方案,并支持套损治理。

为实现上述应用,相应的技术性能应达到:(1)能够探测距井筒 $50\sim 100\text{m}$ 甚至 200m 范围内地层结构、断裂特征、天然裂缝展布,以及由压裂改造所产生的储层各向异性和非均质性;(2)至少具有 90° 的方位分辨能力;(3)能够分辨出压裂液—原状地层天然气或压裂液—原状地层石油的接触界面。

压裂裂缝所致声波各向异性远弱于天然缝洞储集体,这就要求方位超远探测三维声波测井仪的微弱信号拾取及其处理能力足够强大,为此,应采用声源强度大、发射频率宽并应用相控阵列等先进技术的交叉偶极声波技术,准确测量纵波、横波和斯通滤波的速度、幅度和相位等信息,并深度研发分析储层非均质性和各向异性的处理方法。

3 高性能过钻杆测井关键技术

非常规油气勘探开发的高时效和低成本需求,使发展高时效和高适用性的测井采集技术成为必然趋势,而加快研发高性能过钻杆测井技术是最为现实且应优先实施的技术对策。该技术以钻杆通径为通道下放测井仪器至指定深度后,从钻杆中释放出仪器并在钻杆上提过程中完成资料采集^[20],快速安全一次下井取全取准所要求的测井资料,作业时效高,可有效解决水平井测井仪器遇阻遇卡的瓶颈难题。此项技术应具有以下4个方面的显著特征。

3.1 小型化

仪器的小型化是过钻杆测井技术的首要关键要素,且要求小型化仪器的耐温耐压指标,以及资料精度、分辨率与信噪比等性能参数与常规电缆测井一致,

这势必给仪器设计与制造带来重大技术挑战,可充分利用芯片技术和3D打印等高端制造技术积极应对,大幅度减小仪器长度与直径,从根本上实现仪器的小型化。考虑到小型化仪器受井筒环境影响较大,并且水平井和直井的井筒环境影响机理存在较大差异,应借助地球物理测井理论方法并结合大数据智能分析技术,研发小型化仪器的水平井井筒环境自动校正算法并模块化集成于井下仪器,并在采集过程中自动完成井眼环境预处理。

3.2 高集成性

仪器的高集成性能是过钻杆测井技术另一个关键要素。只有仪器具备高集成性能,才能实现“一趟测”完成所有测井项目的采集。按照非常规油气水平井的不同生产需求,可分层次研发常规型、基本型和高端型等3类高集成过钻杆测井技术。常规型可包括自然伽马、(阵列)侧向/感应电阻率、密度、中子和声波时差等常规测井项目;基本型为常规型+偶极声波测井,并将自然伽马测井替换成自然伽马能谱测井;高端型为基本型+电成像和元素全谱等测井项目,并尽可能集成核磁共振测井。当然,过钻杆核磁共振测井技术研发难度大,过钻杆二维核磁共振测井技术研发难度则更大。然而,非常规油气储层品质评价和流体识别的难题决定了过钻杆核磁共振测井技术应用前景广阔,生产需求很大,需迎难而上重点研发并尽快突破。

地层孔隙压力对甜点评价、产量预测和EUR评估等方面均至关重要,但其准确计算的难度大,为此,应大力发展适用于致密储层的过钻杆地层压力测试技术,以测取流度下限低至 $0.1\text{mD}/(\text{mPa}\cdot\text{s})$ 储层的有效压力。此项技术类似于过钻杆核磁共振测井,生产需求很大,但研制难度大,也需重点研发并尽快突破。

高集成性不仅体现在不同类别测井项目集成于“一趟测”仪器串,更重要的是要发展一支仪器能够有机融合多支仪器的功能,实现真正的仪器高集成。斯伦贝谢公司新近推出的多功能脉冲中子测井(PNX)就很好地体现了这种思想,它集成了岩性扫描、中子、自然伽马、碳氧比和中子寿命等测井功能,仪器长度大为缩短,且便于生产组织。

测井技术高集成性是过钻杆测井的必然要求,也是裸眼井测井、随钻测井和套管井测井发展的必然趋势。

3.3 高可靠性

仪器的高可靠性是过钻杆测井技术高时效性的保障,即在采集过程中具有良好的耐温耐压性能和抗遇阻遇卡能力等,最大限度地降低其故障率,提高作业时效并保障资料质量。

测井的最大安全风险是放射源落井。为此,应攻克高性能中子管制造的技术瓶颈,实现密度和中子的无放射源测井,以先进技术手段杜绝放射源落井事故,且资料质量与有源测井保持一致。高性能中子管的技术指标应达到耐温 175°C ,耐压 140MPa ,井下工作时间至少 500h ,中子产额大于或等于 3.5×10^8 个/s,最小脉冲宽度为 $10\mu\text{s}$,上升沿时间和下降沿时间控制在 $2\mu\text{s}$ 以内。

3.4 高通用性

高通用性的过钻杆测井技术可以降低仪器购置成本,减少操作培训、仪器刻度、仪器调配和仪器维修等生产组织难度,主要体现在:

(1) 能够适用于水基钻井液与油基钻井液(页岩气和页岩油的水平井常采用油基钻井液),为此,应加大油基电成像测井技术研发;

(2) 至少形成适用于 $8\frac{1}{2}\text{in}$ 和 $6\frac{1}{2}\text{in}$ 这两类常规井筒尺寸的水平井所要求的仪器系列;

(3) 能够兼顾裸眼井和套管井测井,相关测井项目至少有自然伽马、自然伽马能谱、密度、中子、声波时差、阵列声波和元素全谱等;

(4) 具备 175°C 、 140MPa 的耐温耐压性能。

4 高性能水平井地质导向关键技术

水平井是实现非常规油气有效开发的主体技术之一,评价其实施成效的关键参数之一是储层钻遇率或油气层钻遇率,为此,应大力发展针对非常规油气地质特点的新型地质导向技术,其主要技术功能应达到以下要求。

(1) 敏捷快速反应:此为非常规油气薄互层储层所要求,可以采用近钻头导向技术系列来满足。技术系列至少应包括自然伽马、密度和电阻率等方位成像导向技术,探测点距钻头小于 1m ,及时分辨岩性界面,识别储层与油气层,实现油气水分布复杂的油气藏及“砂中找气”的水平井快速精准导向。

(2) 方位远探边:探测井周地层结构、断层分布及流体界面等因素所致各向异性特征,径向探测距离

达 20~30m 或以上,方位分辨率至少为 90°,保障复杂地层条件下的精准导向。为了实现上述功能,应优先发展方位声波远探边技术和方位电磁波远探边技术。

(3) 钻头前视探测:分辨钻头前方距离 5m 以上的地层界面或断层,提升横向连续性差和断层发育地层的导向追层能力。为此,应发展电磁波随钻前探测技术和声波随钻前探测技术。

(4) 实时地层建模:基于实时测井、录井和钻井等资料,动态修正地震—地质模型,科学决策下步导向策略。

5 采集资料质量控制的智能化技术

大数据智能化分析技术有助于测井采集资料质量的提升,是仪器硬件性能控制资料质量的重要补益。目前,应重点发展测量参数优化、资料预处理和质量评价等三方面的智能化分析技术,助力非常规油气测井采集技术的性能提升。

5.1 测量参数智能化实时优选技术

测井设计是测井采集质量控制极其关键的技术环节,但是,测井设计是基于邻井或推测的储层特征和井筒条件(井径、井斜、温度、压力、钻井液性能和侵入时间等)在测井前完成的。当地下情况复杂多变(非常规油气钻探过程中更是如此)时,会导致测井设计中所预置的测量参数(测量速度、测量模式、采集参数和推靠臂加压值等)针对性变差甚至误导采集。因此,应研发测量参数实时智能化优选技术,即在测井过程中依据储层特征和井眼条件的动态评价结果,智能化选取与之相适用的测量参数并及时提出测井项目的优化建议(取消项目或增加项目),提升资料的针对性和有效性,助力“该测的一定要测,不该测的一定不测”。

5.2 原始资料智能化实时预处理技术

测井资料的预处理是测井处理与解释的前提与基础。目前,预处理工作均是在室内进行,这带来两方面的问题:一是未能及时发现资料质量问题,现场常认为有些资料质量问题可在预处理环节消除,但实际工作中往往并不能全部做到;二是预处理所需井筒条件随深度和时间的变化而变化,但室内预处理时往往按深度段设置相对固定的井筒参数,未能针对此类变化尤其是非常规油气储层的地质特点而进行精细处

理。为解决上述问题,应以动态测取的不同深度与不同测量时间的井筒参数为基础,建立融合测井预处理原理与大数据智能算法的测井实时精细预处理方法。

5.3 资料质量智能化快速评定技术

测井资料一旦采集完毕,即需由测井监督及时地评定资料质量以决定是否存在重测或补测测井项目。但是,成像测井和扫描测井的复杂测量参数及非“所见即所得”特性,使及时准确判断其采集资料质量难度大,而监督的技术水平参差不齐则更突显此难度,此外,非常规油气勘探开发节奏快、井数多,难以逐井配置监督。为此,以测井标准规范为准绳,融合邻井或区块的储层特点与测井响应特征,以及本井的井筒条件、测量参数和质量控制曲线等方面信息开展大数据分析,建立测井资料质量的快速智能化评价方法,及时准确地评定资料质量。

6 认识与结论

针对非常规油气的地质特点、油气藏特征与工程特点及其对测井采集的技术需求,本文提出了电缆测井、过钻杆测井和地质导向等三方面的技术发展对策,以期打造形成具有中国完全知识产权的非常规油气测井采集技术体系,此技术体系具有以下三方面显著特征。

一是电缆测井技术高性能化:提升密度测井和核磁共振测井资料的精度和信噪比,保障致密储层孔隙度、渗透率和饱和度计算精度,以及孔隙结构精细评价;研发二维核磁共振测井和多频介电扫描测井,识别束缚油、可动油、束缚水、可动水和天然气等类型流体并较为准确地计算其饱和度;攻克高产额高稳定中子管制造的技术瓶颈,实现电缆测井、过钻杆测井和随钻测井中密度测井和中子测井无放射源测量且资料精度高;研发高纵向分辨率的三分量感应测井,能够分辨出厘米级的薄互层并评价其电各向异性,确定水平电阻率和垂直电阻率。

加大攻关力度,创新研发高度集成的多功能测井仪,以一支仪器完成多支仪器的采集任务,从而可在测井过程中动态地分析各测量参数间的匹配性与合理性,及时地去伪存真,保障资料质量,并减少下井次数、测井“井底口袋”和遇阻遇卡风险。此外,为了适用于越来越重要的深层非常规油气勘探开发中测井技术需求,应进一步提升仪器耐温耐压性能与稳定性,保障高温高压小井眼井条件下的作业时效与资料质量。

二是水平井测井技术配套化: 研发近钻头方位成像导向和远探边技术, 提高储层钻遇率与井筒质量; 研发高性能过钻杆测井技术, 一次下井安全快速地取全取准裸眼井测井资料, 支持压裂改造精细设计; 发展方位超远探测三维声波测井技术, 探测井旁 100m 范围内地层结构、断裂特征和天然裂缝展布, 并精细确定压裂裂缝的三维分布; 发展高性能固井质量评价技术, 精细描述井周不同方位的固井质量; 发展低启动流量的三相流动成像产液剖面测井技术, 动态且准确评价各压裂段的产液量及其液体性质, 支持油气甜点评价和压裂设计的学习曲线建立。形成“导、测、探”水平井测井全作业流程的完整配套技术体系。

三是资料质量控制的智能化: 结合储层特征和井筒条件, 智能化地动态选取与之相适用的测量参数, 提升资料的针对性和有效性; 结合井筒参数, 建立井下测井资料的智能化实时预处理技术; 以测井标准规范为准绳, 建立融合邻井知识与本井井筒条件与测量参数的资料质量智能化快速评价技术, 及时地给出资料质量的评级, 为是否需重测或补测测井资料提出建议。

致谢: 感谢胡法龙博士按照作者设计模型提供了核磁共振测井孔隙度计算精度影响因素分析的模拟数据。

参考文献

- [1] 刘嘉, 张焕芝, 杨金华, 等. 全球油气勘探开发形势及技术发展趋势[J]. 世界石油工业, 2019, 26(6): 6-11.
Liu Jia, Zhang Huanzhi, Yang Jinhua, *et al.* Global petroleum E & P and technology development outlook[J]. World Petroleum Industry, 2019, 26(6): 6-11.
- [2] 蔡勋育, 刘金连, 赵培荣, 等. 中国石化油气勘探进展与上游业务发展战略[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(1): 11-19.
Cai Xunyu, Liu Jinlian, Zhao Peirong, *et al.* Oil and gas exploration progress and upstream development strategy of Sinopec[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(1): 11-19.
- [3] 谢玉洪, 蔡东升, 孙晗森. 中国海油非常规气勘探开发一体化探索与成效[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(2): 27-32.
Xie Yuhong, Cai Dongsheng, Sun Hansen. Exploring and the effect of exploration and development integration in unconventional gas of CNOOC[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(2): 27-32.
- [4] 赵文智, 贾爱林, 位云生, 等. 中国页岩气勘探开发进展及发展展望[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(1): 31-44.
Zhao Wenzhi, Jia Ailin, Wei Yunsheng, *et al.* Progress in shale gas exploration in China and prospects for future development[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(1): 31-44.
- [5] 许坤, 郑冬冬, 林爽. 促进中国油气勘探开发对策探讨[J]. 石油科技论坛, 2019, 38(6): 6-14.
- [6] 杜金虎, 胡素云, 庞正炼, 等. 中国陆相页岩油类型、潜力及前景[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(5): 560-568.
- [7] 杨雷, 金之钧. 全球页岩油发展及展望[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(5): 553-559.
- [8] 潘继平. 非常规天然气资源开发政策困境及对策建议[J]. 石油科技论坛, 2019, 38(1): 1-7.
- [9] 赵政璋, 杜金虎. 非常规油气资源现实的勘探开发领域: 致密油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 2012.
- [10] 赵文智, 胡素云, 侯连华, 等. 中国陆相页岩油类型、资源潜力及与致密油的边界[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(1): 1-10.
- [11] 胡素云, 赵文智, 侯连华, 等. 中国陆相页岩油发展潜力与技术对策, 石油勘探与开发[J]. 2020, 47(4): 819-828.
- [12] 李国欣, 朱如凯. 中国石油非常规油气发展现状、挑战与关注问题[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(2): 1-13.
- [13] 杜金虎. 中国陆相致密油[M]. 北京: 石油工业出版社, 2017.
- [14] 刘国强, 李长喜. 陆相致密油岩石物理特征与测井评价方法[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [15] 党瑞荣, 秦瑶, 谢雁, 等. 三分量感应测井系统研究[J]. 石油地球物理勘探, 2006, 41(4): 484-488.
- [16] 郭晨, 陈晓亮, 卢圣鹏, 等. 基于三维有限差分方法的三分量感应测井正演模拟[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(34): 22-28.

- [17] 袁超, 周灿灿. 基于伽马能谱的元素测井发展历程及技术展望[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(4): 1867–1872.
Yuan Chao, Zhou Cancan. Development process and technology prospect of element logging based on gamma ray spectroscopy[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(4): 1867–1872.
- [18] 张锋, 刘军涛, 冀秀文, 等. 地层元素测井技术最新进展及其应用[J]. 同位素, 2011, 24(增刊1): 21–28.
Zhang Feng, Liu Juntao, Ji Xiuwen, *et al.* Development of formation element logging technique and its application[J]. Journal of Isotopes, 2011, 24(S1): 21–28.
- [19] 岳爱忠, 王树声, 何绪新, 等. FEM 地层元素测井仪研制[J]. 测井技术, 2013, 37(4): 411–416.
Yue Aizhong, Wang Shusheng, He Xuxin, *et al.* Development of formation element and mineralogy logging tool[J]. Well Logging Technology, 2013, 37(4): 411–416.
- [20] 童茂松, 曹宇欣, 孙旭光, 等. 多模式过钻杆测井系统设计与现场应用[J]. 测井技术, 2020, 44(5): 453–456.
Tong Maosong, Cao Yuxin, Sun Xuguang, *et al.* Design and application of multi-mode drill-pipe logging system[J]. Well Logging Technology, 2020, 44(5): 453–456.
- [21] 钟光海, 陈丽清, 廖茂杰, 等. 页岩气储层品质测井综合评价[J]. 天然气工业, 2020, 40(2): 54–60.
Zhong Guanghai, Chen Liqing, Liao Maojie, *et al.* A comprehensive logging evaluation method of shale gas reservoir quality[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(2): 54–60.
- [22] 仰云峰, 鲍芳, 腾格尔, 等. 四川盆地不同成熟度下志留统龙马溪组页岩有机孔特征[J]. 石油实验地质, 2020, 42(3): 388–397.
Yang Yunfeng, Bao Fang, Tengge, *et al.* Characteristics of organic matter-hosted pores in Lower Silurian Longmaxi shale with different maturities, Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(3): 388–397.
- [23] 蕙克来, 李克, 操应长, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长₇亚段富有机质页岩纹层组合与页岩油富集模式[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(6): 1244–1255.
Xi Kelai, Li Ke, Cao Yingchang, *et al.* Laminae combination and shale oil enrichment patterns of Chang₇ sub-member organic-rich shales in the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(6): 1244–1255.
- [24] 邹才能, 杨智, 崔景伟, 等. 页岩油形成机制、地质特征及发展对策[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1): 14–26.
Zou Caineng, Yang Zhi, Cui Jingwei, *et al.* Formation mechanism, geological characteristics and development strategy of nonmarine shale oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(1): 14–26.
- [25] 董明哲, 李亚军. 页岩油流动的储层条件和机理[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(3): 636–644.
Dong Mingzhe, Li Yajun. Reservoir conditions and mechanism of shale oil flow[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 636–644.
- [26] 卢双舫, 薛海涛, 王民, 等. 页岩油评价中的若干关键问题及研究趋势[J]. 石油学报, 2016, 37(10): 1309–1322.
Lu Shuangfang, Xue Haitao, Wang Min, *et al.* Several key issues and research trends in evaluation of shale oil[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(10): 1309–1322.
- [27] 童茂松, 张加举. 0.2m 高分辨率双侧向测井仪器信号幅度仿真[J]. 石油管材与仪器, 2019, 5(4): 19–22.
Tong Maosong, Zhang Jiaju. Signal amplitude analysis of 0.2m-vertical-resolution dual laterolog tool[J]. Petroleum Tubular Goods and Instruments, 2019, 5(4): 19–22.
- [28] 李潮流, 袁超, 李霞, 等. 致密砂岩电学各向异性测井评价与声电各向异性一致性分析[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(2): 427–434.
Li Chaoliu, Yuan Chao, Li Xia, *et al.* Anisotropy interpretation and the coherence research between resistivity and acoustic anisotropy in tight sands[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(2): 427–434.
- [29] Kausik R, Fella K, Rylander E, *et al.* NMR relaxometry in shale and implications for logging[J]. Petrophysics, 2016, 57(4): 339.
- [30] Vivek Anand, Mansoor Rampurawala Ali. New generation NMR tool from robust, continuous T_1 and T_2 measurements[C]. SPWLA 56th Annual Logging Symposium, 2015.
- [31] Wharton R P, Hazen G A. Electromagnetic propagation logging: advance in technique and interpretation[C]. USA: SPE Annual Technical Conference and Exhibition.
- [32] Craddock P R, Herron S L. Hydrocarbon saturation from total organic carbon logs derived from inelastic and capture nuclear spectroscopy[R]. New Orleans, Louisiana, USA: SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2013.
- [33] 魏周拓, 唐晓明, 苏远大, 等. 利用井中低频偶极横波进行声波远探测的新方法[J]. 地球物理学报, 2013, 56(10): 3573–3580.
Wei Zhoutuo, Tang Xiaoming, Su Yuanda, *et al.* A new acoustic remote sensing method utilizing borehole low-frequency dipole shear wave[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(10): 3573–3580.
- [34] Zhang Gong, Li Ning, Guo Hongwei, *et al.* Fracture identification based on remote detection acoustic reflection logging[J]. Applied Geophysics, 2015, 12(4): 473–481.