

◀专家视点▶

doi:10.11911/syztjs.201706001

国内非常规油气录井技术进展及发展趋势

王志战^{1,2}

(1. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室,北京 100101;2. 中国石化石油工程技术研究院,北京 100101)

摘要:非常规油气勘探开发给录井的探测分辨率、数据质量、录取参数齐全度和评价方法有效性带来了挑战。经过“十二五”攻关研究,研发了元素录井、钻井液核磁共振在线录井、小型化高分辨率三维核磁共振录井和前置式高分辨率气测录井等4项新技术,元素录井的元素采集种类从12种扩充到20种以上,填补了钻井液含油量的探测空白并实现了在线测量,岩样的孔喉尺度探测分辨率提高了10倍并将探测维度从一维拓展到三维,气体组分的探测分辨率从C₅提高到C₈或C₁₀;建立了水平井综合地质导向、致密砂岩油气层录井综合评价、页岩油气层录井综合评价3套方法。随着非常规油气地质体的复杂性及对降本、增产、增效需求的增强,微观结构探测、碳同位素分析、录井仪器一体化等技术及水平井三维立体导向、裂缝型页岩的地层压力随钻预测监测等方法将得到有效发展。

关键词:非常规油气;录井技术;高分辨率;评价方法;发展趋势

中图分类号:TE142 文献标志码:A 文章编号:1001-0890(2017)06-0001-07

Technical Progress and Developing Trends in Unconventional Oil and Gas Mud Logging in China

WANG Zhizhan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing, 100101, China; 2. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China)

Abstract: Unconventional oil and gas pose new challenges to mud logging, including detection resolution, data quality, the completeness of acquired parameters, the effectiveness of evaluation methods etc. Through the study of the “12th Five-Year Plan Period”, four innovative logging technologies, namely element logging, on-line logging of drilling fluid NMR, portable 3D NMR logging with high resolution and front setting gas logging with high resolution were developed, and improved the resolution of detecting the elements from 12 kinds to over 20 kinds in the element logging, which fills the gap of on-line detecting the oil content in drilling fluids. In addition, pore throat resolutions of core has been raised 10 times as high as the past, and the detection dimensions changed from 1D to 3D. At the same time, resolution for gas component was improved from C₅ to C₈ or C₁₀. Three kinds of comprehensive evaluation methods, including geosteering for horizontal wells, tight sand reservoir evaluation and gas shale evaluation, were established. With the increase of geological complexity and requirements for reducing cost, increasing production and efficiency, there is an incentive for developing technologies including microstructure detection, carbon isotope analysis, integration of logging instruments, 3D geosteering in horizontal wells, MWD of pore pressures in fractured shale etc.

Key words: unconventional oil and gas; mud logging technology; high resolution; evaluation methods; development trend

非常规油气资源勘探开发潜力巨大,正处于高速发展时期,是未来世界油气工业发展的方向^[1]。目前的非常规油气以致密砂岩油气和页岩油气为主,其地质和工程特点主要包括纳米级孔隙、源储一体或紧邻、油基钻井液、水平井和体积压裂等5个方面^[2],其地质评价参数多达10~15项^[3-4],给录井带来的挑战主要有4个方面:探测分辨率(元素组成、流体成分、孔喉尺度等)、数据质量(地质、工程、仪器等因素的影响)、录取参数的齐全度和评价方法的有

收稿日期:2017-09-22;改回日期:2017-11-20。

作者简介:王志战(1969—),男,山东栖霞人,1991年毕业于西北大学岩矿及地球化学专业,2006年获西北大学矿产普查与勘探专业博士学位,教授级高级工程师,主要从事低场核磁共振录井、地层压力随钻预测和监测、非常规油气录井综合评价技术研究。E-mail:wangzz.sripe@sinopec.com

基金项目:中国石化科技攻关项目“录井油气信息在线检测系统与分析技术研究”(编号:P12066)、“钻井液核磁共振在线录井技术研究”(编号:P13091)、“便携式高分辨率三维核磁共振录井仪研制”(编号:P14095),中国石油化工股份有限公司油田部项目“渤海凹陷页岩油层多维核磁共振先导试验”(编号:YTXD-PT1203D)和中石化石油技术服务有限公司项目“基于核磁共振录井的钻井液荧光判识与评价技术先导试验”(编号:JSG11018)联合资助。

效性。为此,录井工程围绕化学地层剖面的建立与应用、储层物性及孔隙结构快速识别评价、水平井地质导向及油基钻井液条件下的油气识别和非常规油气录井综合评价与工程应用等方面进行了深入研究,在高分辨率录井技术研发、非常规储层录井综合评价等方面取得了显著进展,为发挥录井的“多、快、好、省”技术优势^[5]及地质与工程一体化的“桥梁”作用、推动非常规油气的勘探突破、增储上产、降本增效业已并将继续产生重要影响。

1 录井技术进展

围绕非常规油气的地质与工程需求及非常规油气对录井技术所提出的挑战,着重开展了4项技术的研发,分别是元素录井、钻井液核磁共振在线录井、小型化高分辨率三维核磁共振录井和前置式高分辨率气测录井,其所解决的问题与地层的对应关系如图1所示。其中,元素录井通过检测岩屑中的元素成分进行岩石学、岩石地球化学、岩石力学的评价;小型化高分辨率三维核磁共振录井在检测岩样孔隙流体信息的基础上进行物性和孔隙结构评价;钻井液核磁共振在线录井和前置式高分辨率气测录井则是在井口在线检测地层钻开后进入钻井液中的地层流体信息。

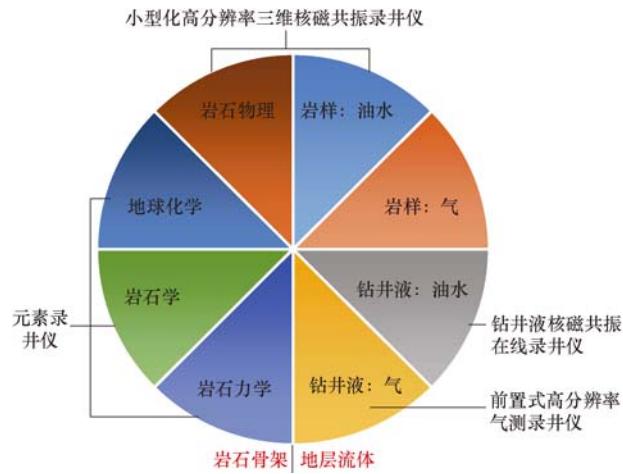


图 1 非常规录井仪器研发与检测对象的对应关系

Fig. 1 The relationship between the development of unconventional logging instrument and detecting objects

1.1 高分辨率元素录井技术

元素是岩石的基本组成成分,是岩性识别与地层对比的基础,也是非常规地层可钻性与可压裂性评价的重要指标。国外的代表性技术有2项^[5]:一是激光诱导击穿光谱(LIBS)技术,二是X射线荧光

(XRF)技术或X射线能谱分析仪(EDS)与扫描电镜(SEM)的集成技术,如LithoSCAN、RoqSCAN等,这2项技术可在页岩地层中采集45种以上的元素。国内录井公司研发了2种元素录井仪:一种是基于XRF原理的能量散射型(ED-XRF)元素录井仪,已实现工业化应用。这项技术的初始研发目的,是为了解决PDC钻头、空气钻条件下细小岩屑的岩性识别难题,采集的元素种类只有12种^[6];随着页岩气的勘探开发,为了更加精细地指导地质导向与分段压裂,将能采集到的元素种类扩充到20种左右^[7],但是受仪器原理及小型化的局限,有些元素采集不到,有些元素测量精度偏低。另一种是基于LIBS原理的元素录井仪,目前能采集22种元素^[8],仪器体积较大,尚未实现工业化应用。

元素录井作为一项重要的非常规油气勘探开发技术,Halliburton、Baker Hughes等公司均实现了商业化应用,前者将其LIBS技术定义为井场化学地层服务技术,后者将其RoqSCAN技术定义为地层精细评价与压裂优化技术^[5]。在国内,该项技术主要用于地质领域,除了用于岩性识别、地层对比(沉积旋回划分、层位或深度卡取和地质导向)外,还可应用于非常规地层的矿物转化^[9]、脆性评价^[10]、沉积环境识别、总有机碳含量(TOC)计算、Si成因判别及基于上述评价参数的页岩品质综合评价^[11]等,是甜点评价、分段压裂设计与优化的重要技术。其中,由元素到矿物的转化是元素录井的基本功能,借鉴这种思想,元素录井已能实现石英、长石、白云石、方解石、绿泥石、高岭石、伊利石和蒙脱石等8种主要矿物及黏土矿物的转化。脆性评价的方法有20多种,本着统一标准的原则,录井评价脆性的方法有2种:一是通过矿物含量计算脆性指数;二是统计脆性矿物的含量。在TOC、岩石力学等参数的计算方面,根据地层特性及仪器所能采集到的敏感元素,建立相应的计算模型,但计算模型具有差异性。

1.2 钻井液核磁共振在线录井技术

钻井液含油量的检测长期以来一直是录井的空白。致密油层、低气油比油层及PDC钻头、荧光钻井液的使用对钻井液含油量录井提出了迫切需求与高度要求。经过试验与比较,发现低场核磁共振在钻井液含油量检测方面具有其他技术所无法比拟的优势,如:1种纯流体只有1个弛豫峰,解决了因谱峰叠加导致混合流体识别难的问题,且谱峰的位置及面积信息与流体的黏度或密度相比于其他录井技术具有更

好的相关性。在确保该项技术应用于钻井液录井可行的基础上,将该项技术实现了在线录井,成为继气测录井之后,第二项含油气在线录井技术。仪器由自清洁在线自动进样装置、小型化核磁共振传感器、控制与反演模块等部分组成,由于采取了特殊的磁体结构设计,磁场强度达到 0.5 T,仪器质量约 20 kg;采取 T_2 谱检测,分析周期小于 1 min,含油率检测下限达 40 mg/L。目前,该项技术正在推广阶段。

聚磺钻井液、混油钻井液和油基钻井液等具有荧光的钻井液体系有利于钻井提速提效,但不利于油气显示发现,为了突破该瓶颈,进行了长期的录井技术研究和实践,主要是根据扣除背景值的谱图变化特征来判别真假油气显示^[12],研究方法有一定的效果,但难以定量,对于混入同源的原油、油基钻井液更是无能为力。为此,创新性地采用低场核磁共振技术,分别建立了聚磺钻井液^[13]、混油钻井液^[14]和油基钻井液^[15]3 种荧光钻井液体系下的油层识别模型及地层含油率反演模型、油质评价模型,实现了荧光钻井液条件下油层随钻判识的突破:首次发现磺化沥青等粉末状荧光添加剂不产生核磁共振烃类信号,对采用核磁共振技术发现油层没有影响,从而彻底解放对该类添加剂的使用限制;混油钻井液为水包油体系,钻井液中的添加油与地层油不相混合,在 T_2 谱上呈现彼此独立的峰,从而实现了油层的直观判别与定量评价;油基钻井液为油包水体系,地层油进入井筒后与钻井液基油混合,在 T_2 谱上不出现新峰,但通过对含油率、含油性的精细评价,可有效判别油层^[16]。

1.3 高分辨率三维核磁共振录井技术

具有低渗透特性的非常规油气藏对常规一维(T_2)核磁共振录井的孔喉尺度分辨率、孔隙流体分辨率提出了更高的要求,通过浸泡弛豫剂来测量含

油饱和度的方法变得不可行,二维($T_1 - T_2$ 、 $T_2 - D$)及三维($T_1 - T_2 - D$)核磁共振展现出无需弛豫剂浸泡就能直接区分不同孔隙流体的优势,但实验室用的高分辨率三维核磁共振仪器体积大、质量大(1.5~3.0 t),无法用于录井现场。为此,在保持大型仪器分辨率的基础上,通过特殊的磁体结构设计及采用固定梯度磁场,实现了仪器的小型化,磁场强度为 0.25 T,仪器质量约 40 kg,回波间隔为 0.06 ms,相比常规录井核磁,孔喉尺度及孔隙流体分辨率均提高了 10 倍,致密砂岩、页岩的孔隙度测量结果与大型核磁仪器、覆压孔渗仪测量结果的相关系数达到 0.90 以上, $T_2 - D$ 谱的测量周期小于 2 min。该项技术在录井领域首次实现了核磁共振的二维及三维测量。

非常规储层具有纳米级孔隙,高分辨率三维核磁共振录井技术在 T_2 谱上能够实现 1.5 nm(按表面弛豫率 50 nm/ms 计算)的孔喉尺度探测,如图 2(a)所示,在 $T_2 - D$ 二维谱上能够实现 300 nm 的孔隙流体探测。三维核磁共振能够给出 1 个三维谱($T_1 - T_2 - D$)、3 个二维谱($T_1 - T_2$ 、 $T_1 - D$ 、 $T_2 - D$)和 3 个一维谱(T_1 、 T_2 、 D),如图 2(b)所示。目前在岩样核磁共振录井领域主要用的是 $T_2 - D$ 二维谱和 T_2 一维谱。在分析国外核磁共振最新研究成果及相关领域国内、外分析测试成果^[17]的基础上,初步建立了基于 T_2 谱的页岩孔隙结构、物性精细评价模型及基于 $T_2 - D$ 二维谱的孔隙流体、润湿性评价方法。页岩孔隙按成因分为有机孔、无机孔和微裂缝,按尺度分为微孔、介孔和宏孔;孔隙流体按可动性或赋存形式分为束缚(吸附)、可动(游离)2 种状态。核磁共振孔隙结构模型的建立取决于不同成因孔隙类型的孔径分布范围是否界限分明,孔隙流体模型的建立取决于流体赋存状态的主控因素或不同赋存状态流体的分布规律,模型的建立同时受表面弛豫率、

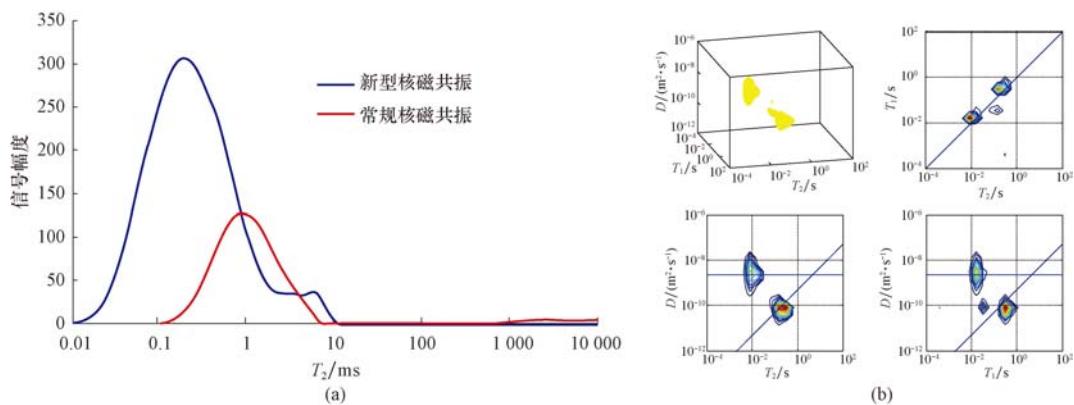


图 2 核磁共振孔喉尺度与孔隙流体探测分辨率的提高

Fig. 2 Enhancement of detection resolution on NMR pore sizes and pore fluids

胶结因子、受限扩散和内部梯度等因素的影响^[17-18]。

1.4 前置式高分辨率气测录井技术

相比传统的气测录井技术,前置式高分辨率气测录井技术采用模块化小型气相色谱仪,在井口直接检测钻井液中的气体组分,减少了气体从井口传输到仪器房内的管路延迟时间,并将测量参数从传统的C₁—C₅、CO₂、H₂S拓展到C₁—C₁₀、苯、甲苯、CO₂、O₂、H₂S、H₂、N₂等,苯及甲苯有助于识别水层或油(气)水界面,C₅以上的重组分可更有效地识别与评价油层,分析周期为C₁—C₅小于24 s,C₁—C₈小于50 s,C₁—C₁₀小于120 s,并研发了与之相配套的半透膜脱气器和机械式定量脱气器^[19]。半透膜脱气器的优势在于隔绝了与空气的接触;定量脱气器实现了脱气钻井液的恒容、恒温与恒压输送。该技术达到了国际先进水平,已实现工业化应用。

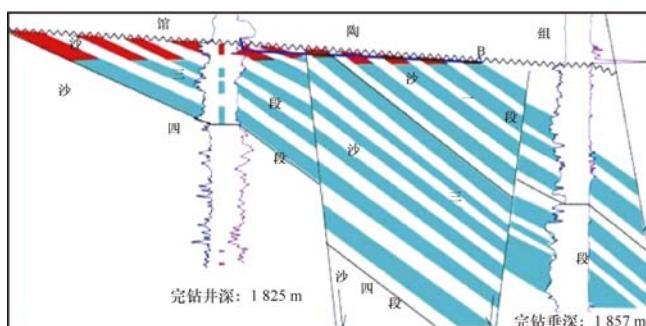
2 综合评价方法进展

录井综合评价方法的进展主要包括水平井综合

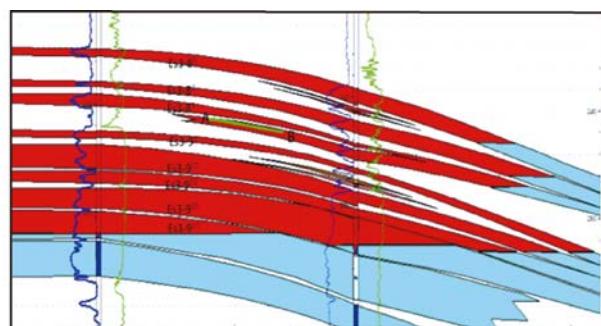
地质导向、致密砂岩油气层录井综合评价和页岩油气层录井综合评价3个方面。

2.1 水平井综合地质导向

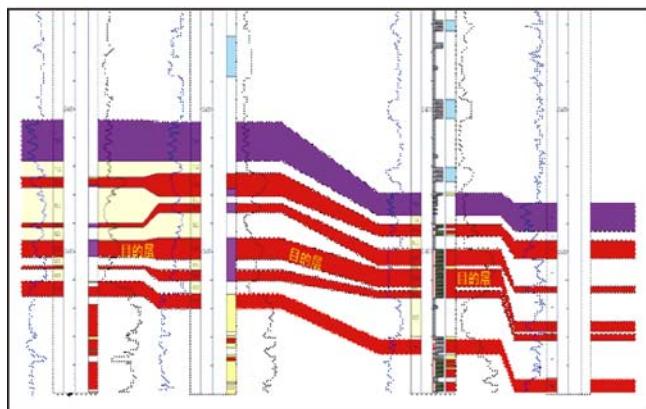
水平井是非常规油气藏的主要开发模式,而地质导向则是提高水平井优质储层钻遇率及井身质量的保证。水平井综合地质导向是人与技术的有机结合,经过多年的发展,管理上实现了地质、钻井、录井、定向、测井等多专业的融合,队伍上实现了定、录、导一体化,架构上实现了井场综合信息平台、三维地质导向系统、随钻技术支持系统的对接。水平井地质导向的关键技术有2项:进入目的层前的地层对比和预测技术、进入目的层后的地质解释与导向技术^[20]。前者主要依据综合地质建模与精细地层对比,提高入靶准确率;后者主要是结合地震及随钻资料准确解释钻遇地层的地质情况并指导钻头的前行方向,提高储层钻遇率^[21]。在大量实践的基础上,复杂油气藏的导向模式主要划分为底水型^[22]、倾伏型^[21]、阶梯型^[23]和断续型^[21]等4种类型,如图3所示。



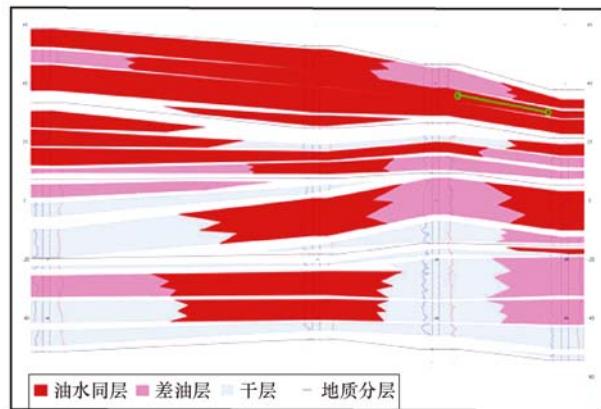
(a) 底水型



(b) 倾伏型



(c) 阶梯型



(d) 断续型

图 3 水平井地质导向中的 4 种复杂油气藏类型

Fig. 3 Four types of complex reservoirs produced using horizontal wells and drilled via geosteering

2.2 致密砂岩油气层录井综合评价

对于致密砂岩储层,靠一张图版来解释图 3 中的油气层类型,符合率难以满足要求。为此,将油气层综合解释分解为“三个识别”和“四个评价”,针对每个识别或评价问题建立或采用相应的图版或标准。“三个识别”的内容和步骤是有效储层识别、含水性识别^[24]、油气识别(图 4);“四个评价”的内容及步骤是物性评价、流体饱和度评价、油气性质评价、油气产能评价。“三个识别”与“四个评价”的有机结合,大幅度提高了致密砂岩储层的录井解释符合率及解释水平。

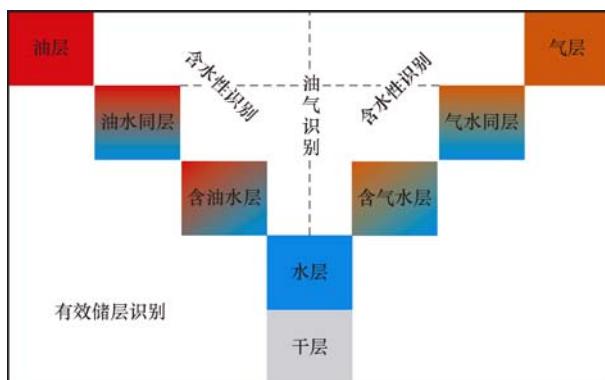


图 4 油气层解释中的“三个识别”

Fig. 4 “Three recognitions” in oil and gasstrata interpretation

确定有效储层下限值的录井方法主要有 2 种:一种是产层类型法,将同一层位各试油段的孔隙度及渗透率依据试油结论的不同绘制在同一坐标系内,确定有效储层孔隙度及渗透率下限值;另一种是油气产能法,建立单井日产油(气)量与物性参数或含油气参数之间的关系图版,依据相应标准确定有效储层的物性参数或含油气参数下限值,有效储层的识别过程也是对产能进行评价的过程。录井识别含水性的手段及方法很多,主要有 3 类方法:第一类是岩心滴水试验;第二类是根据图版进行识别;第三类是根据数据、曲线、谱图和图像的变化或特征进行识别。油、气识别主要有 3 种方法:一是组分或谱图特征法,主要看组分齐全程度及含油气丰度;二是图版法,如皮克斯勒图版、三角图版等;三是曲线特征法,如 3H 法等。通过上述思路与方法的有机结合,将图版应用于“三个识别”与“四个评价”的流程中,在胜利油田的应用结果显示,解释符合率由 73.5% 提高到 91.9%。

2.3 页岩油气层录井综合评价

针对页岩油气储层评价的多个参数,不同的单位或学者采用不同的分类及方法进行有利区带评价、目标评价和甜点评价。常见的参数分类有二分法(地质参数、工程参数,或储层品质、完井品质)^[25]、三分法(含油气性条件、工程技术条件、经济条件,或储层品质、完井品质、驱动力,或生油条件、储集条件、开采条件)^[26]和四分法(烃源岩质量、储层质量、潜力与前景、生产方式与产能)^[27]。常见的评价方法是在参数分类的基础上,进行赋分或先赋权重再赋分,根据分值先对每类条件进行评价,再进行总的评价,评价结论分为 3 类。基于评价参数间的相关性及录井评价的可操作性,建立了基于孔隙度、总有机碳、含油率/含气量和脆性矿物含量等 4 项参数的页岩油气录井综合评价方法,根据参数值的区间范围分为 I、II 和 III 类层,分别对应产能的高、中、低,并已形成行业标准^[28],评价指标与相关的页岩气国家标准^[29]、行业标准^[30]一致(见表 1)。

表 1 页岩气层录井评价标准

Table 1 Standards for mud logging evaluation for shale gas reservoir

评价参数	I 类	II 类	III 类
总有机碳含量, %	≥4	2~4	<2
孔隙度, %	≥5	2~5	<2
含气量/(m ³ · t ⁻¹)	≥5	2~5	<2
脆性矿物含量, %	≥40	30~40	<30

3 发展趋势

中国的页岩气勘探开发已迈向常压、深层,致密油气的开发也在向超深层发展,这对钻井提速、降本增效和增产增效提出了更高的要求,同时对录井提出了新的或更高的要求与挑战,录井技术与方法为满足勘探开发与石油工程的需要而创新发展,也将在实践中得以检验、完善和提升,只有最经济有效的录井技术与方法才能持续发展。

3.1 录井技术发展趋势

非常规油气开发属于低成本战略,录井项目尤其是开发井的录井项目被大幅度压缩,这就要求充分挖掘单项录井技术的潜力,派生更多的参数,实现更多的应用,解决更多的难题。元素录井技术的元素采集以功能与结果为出发点,优选最有效的技术,

不断提高采集元素的种类与精度,实现采集与成像功能的一体化,在采集过程中输出更多的派生参数与曲线,如矿物、伽马、孔隙度、总有机碳含量、杨氏模量和泊松比等,可以在工程甜点评价方面实现新的突破,同时可应用于地层可钻性评价,为钻头选型、井壁稳定和参数优化提供有力支撑;与随钻测井、地震等资料相结合,则可实现对钻头前方地层的预测与评价。2项高分辨率核磁共振录井技术在不断完善的基础上将向技术一体化、操作傻瓜化和控制智能化的方向发展。前置式高分辨率气测录井技术则应在不断提高定量采集程度及规模化应用的基础上,建立并集成不同油气层类型的解释图版与标准,充分发挥定量、快速和高分辨率的技术优势。

在不断发展与完善上述技术的同时,需要尽快发展储层微观孔隙结构探测^[31]、碳同位素分析等录井技术。储层微观孔隙结构探测以岩屑为分析对象,实现对岩石骨架结构及孔隙流体的立体观测,将数字岩心的功能移植到录井现场。该技术已在研发过程中,并取得了一定成果。碳同位素录井技术在国内尚属空白,国外主要有2种设备:一种是对钻井液气进行C₁^[32]或C₁—C₃^[33]同位素在线分析,另一种是对钻井液气及罐顶气进行C₁—C₃同位素离线分析,前者已在国内的海上油气井进行了多年的录井作业,后者正在国内页岩气井进行应用研究。在调研与应用的基础上,同位素录井可以用于评价油气成因与成熟度和储层连通性,实现渗透性、油气产能等方面的评价突破与仪器国产化的研发突破。

在不断完善与深化单项录井技术的基础上,从激发系统耦合和检测系统耦合2个方面进行创新,实现2项或多项录井仪器的一体化。激发系统耦合有白光与荧光一体化;检测系统耦合包括XRF与X射线衍射(XRD)一体化、EDS与SEM一体化、色谱与光谱一体化、色谱与质谱一体化和波谱与光谱一体化等^[34]。

3.2 录井方法发展趋势

非常规油气录井评价的目的有2个:一是准确评价甜点;二是为钻完井和储层改造提供技术支撑。水平井综合地质导向的发展趋势是增强对随钻测井资料的处理与综合评价,实现三维立体导向。页岩的地层压力成因机制主要有欠压实作用与生烃作用,而裂缝性页岩的地层压力成因则更为复杂,其预监测的难度与意义更大,需要建立基于不同成因压力贡献的综合性评价模型。在页岩气录井评价方

面,将逐步建立深层页岩气、常压页岩气的评价标准,形成针对不同页岩气对象的评价标准系列,实现评价指标与业界的统一。

4 结 论

1) 国内录井行业以需求为导向,以创新为引领,研发了高分辨率元素录井、钻井液核磁共振在线录井、高分辨率三维核磁共振录井和前置式高分辨率气测录井等4项适用于非常规油气的录井新技术及水平井地质导向、致密砂岩油气层录井评价和页岩油气层录井评价等3套综合评价方法。孔隙结构微观探测、气体碳同位素检测2项录井新技术及裂缝性页岩孔隙压力随钻预监测方法正在研发之中。

2) 随着非常规油气的发展,录井仪器将向技术一体化、操作傻瓜化和控制智能化的方向发展,录井方法将向应用多元化、评价精细化和指标统一化的方向发展。

参 考 文 献

References

- [1] 康玉柱,周磊.中国非常规油气的战略思考[J].地学前缘,2016,23(2):1-7.
KANG Yuzhu, ZHOU Lei. The strategic thinking of unconventional petroleum and gas in China[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(2):1-7.
- [2] 邹才能.非常规油气地质[M].2版.北京:地质出版社,2013.
ZOU Caineng. Unconventional oil and gas geology [M]. 2nd ed. Beijing: Geological Publishing House, 2013.
- [3] 涂乙,邹海燕,孟海平,等.页岩气评价标准与储层分类[J].石油与天然气地质,2014,35(1):153-158.
TU Yi, ZOU Haiyan, MENG Haiping, et al. Evaluation criteria and classification of shale gas reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(1):153-158.
- [4] 贾承造,邹才能,李建忠,等.中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景[J].石油学报,2012,33(3):343-350.
JIA Chengzao, ZOU Caineng, LI Jianzhong, et al. Assessment criteria, main types, basic features and resource prospects of the tight oil in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(3):343-350.
- [5] 王志战,翟晓薇,秦黎明,等.页岩油气藏录井技术现状及发展思路[J].录井工程,2013,24(3):1-5.
WANG Zhizhan, ZHAI Xiaowei, QIN Liming, et al. Overview on shale oil and gas logging technology[J]. Mud Logging Engineering, 2013, 24(3):1-5.
- [6] 王晓阳.X射线荧光元素录井技术在地质上的应用及新进展[J].录井工程,2014,25(2):39-42.
WANG Xiaoyang. Application and new progress of X-ray fluorescence element logging technology in geology[J]. Mud Logging Engineering, 2014, 25(2):39-42.
- [7] 黄锐,张新华,秦黎明.基于元素含量的页岩矿物成分及脆性评价方法[J].中国石油勘探,2014,19(2):85-90.
HUANG Rui, ZHANG Xinhua, QIN Liming. Method for evaluation of shale mineral components and brittleness on basis of element content [J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19 (2):85-90.
- [8] 余明军,李油建,李胜利,等.激光诱导击穿光谱自动识别泥岩颜色实验分析[J].录井工程,2015,26(1):5-8.
SHE Mingjun, LI Youjian, LI Shengli, et al. Automatic identifi-

- cation of mudstone color using laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) experiment[J]. Mud Logging Engineering, 2015, 26(1): 5–8.
- [9] 廖东良, 肖立志, 张元春. 基于矿物组分与断裂韧度的页岩地层脆性指数评价模型[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(4): 37–41.
- LIAO Dongliang, XIAO Lizhi, ZHANG Yuanchun. Evaluation model for shale brittleness index based on mineral content and fracture toughness[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(4): 37–41.
- [10] 张新华, 邹筱春, 赵红艳, 等. 利用X荧光元素录井资料评价页岩脆性的新方法[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(5): 92–95.
- ZHANG Xinhua, ZOU Xiaochun, ZHAO Hongyan, et al. A new method of evaluation shale brittleness using X-ray fluorescence element logging data[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(5): 92–95.
- [11] 刘江涛, 刘双莲, 李永杰, 等. 焦石坝地区奥陶系五峰组—志留系龙马溪组页岩地球化学特征及地质意义[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(3): 53–57.
- LIU Jiangtao, LIU Shuanglian, LI Yongjie, et al. Geochemistry characteristics and its geological significance of shale in the Ordovician Wufeng Formation and Silurian Longmaxi Formation, Jiaoshiba area[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(3): 53–57.
- [12] 王宇轩. 定量荧光录井污染背景值确定方法[J]. 录井工程, 2014, 25(1): 34–36, 39.
- WANG Yuxuan. Methods of determining contamination background value by quantitative fluorescence logging[J]. Mud Logging Engineering, 2014, 25(1): 34–36, 39.
- [13] 王志战, 秦黎明, 杜焕福, 等. 钻井液粉末状荧光添加剂的核磁共振特性[J]. 波谱学杂志, 2014, 31(3): 341–348.
- WANG Zhizhan, QIN Liming, DU Huanfu, et al. Effects of powdered fluorescent additives on NMR characteristics of drilling fluids[J]. Chinese Journal of Magnetic Resonance, 2014, 31(3): 341–348.
- [14] 王志战, 秦黎明, 盖姗姗, 等. 利用NMR技术判识混油钻井液条件下钻遇的油层[J]. 波谱学杂志, 2014, 31(4): 579–586.
- WANG Zhizhan, QIN Liming, GAI Shanshan, et al. The effects of oil-mixed drilling fluid on oil layer identification studied by NMR spectroscopy[J]. Chinese Journal of Magnetic Resonance, 2014, 31(4): 579–586.
- [15] 王志战, 魏阳旭, 秦黎明, 等. 油基钻井液条件下油层的NMR判识方法[J]. 波谱学杂志, 2015, 32(3): 481–488.
- WANG Zhizhan, WEI Yangxu, QIN Liming, et al. Oil layer identification by NMR with the use of oil-based drilling fluid [J]. Chinese Journal of Magnetic Resonance, 2015, 32(3): 481–488.
- [16] WANG Zhizhan, QIN Liming, LU Huangsheng, et al. Determining the fluorescent components in drilling fluid by using NMR method[J]. Chinese Journal of Geochemistry, 2015, 34(3): 410–415.
- [17] 王志战, 李新, 魏阳旭, 等. 页岩油气层核磁共振评价技术综述[J]. 波谱学杂志, 2015, 32(4): 688–698.
- WANG Zhizhan, LI Xin, WEI Yangxu, et al. NMR technologies for evaluating oil & gas shale: a review[J]. Chinese Journal of Magnetic Resonance, 2015, 32(4): 688–698.
- [18] WANG Zhizhan, QIN Liming, LU Huangsheng, et al. Two dimensional NMR analysis and evaluation of oil or gas shale [R]. SPE 176184, 2015.
- [19] 张卫, 陆黄生, 李三国. 新型钻井液油气含量检测系统[J]. 仪表技术与传感器, 2012(6): 71–73.
- ZHANG Wei, LU Huangsheng, LI Sanguo. Design of new gas logging system[J]. Instrument Technique and Sensor, 2012(6): 71–73.
- [20] 李一超, 王志战, 秦黎明, 等. 水平井地质导向录井关键技术[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(5): 620–625.
- LI Yichao, WANG Zhizhan, QIN Liming, et al. Key surface logging technologies in horizontal geosteering drilling[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(5): 620–625.
- [21] 孙坤忠, 刘江涛, 王卫, 等. 川东南JA侧钻水平井地质导向技术[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(4): 138–142.
- SUN Kunzhong, LIU Jiangtao, WANG Wei, et al. Geosteering drilling techniques of horizontal sidetracking Well JA, South-east Sichuan[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(4): 138–142.
- [22] 盖姗姗.“水上漂”油层水平井地质导向录井技术:以胜利油田G43-p17井为例[J]. 录井工程, 2016, 27(1): 33–35.
- GAI Shanshan. Geosteering logging technology for horizontal wells in "floating on water" reservoir: taking well G43-p17 in Shengli Oilfield as an example[J]. Mud Logging Engineering, 2016, 27(1): 33–35.
- [23] 崔越华, 张保国, 费世祥, 等. 致密砂岩储层地质导向技术研究及其应用:以苏里格气田XX区为例[J]. 天然气勘探与开发, 2015, 38(2): 63–67.
- CUI Yuehua, ZHANG Baoguo, FEI Shixiang, et al. Application of geosteering technique to tight sandstone reservoir: an example from one region in Sulige Gasfield[J]. Natural Gas Exploration & Development, 2015, 38(2): 63–67.
- [24] 王志战, 许小琼. 储层含水性与有效性的录井识别方法:以东营凹陷北部陡坡带为例[J]. 油气地质与采收率, 2010, 17(2): 67–69, 73.
- WANG Zhizhan, XU Xiaoqiong. Research on reservoir aquosity and reservoir validity identification based on mud-logging method: case of northern slope bell of Dongying Sag[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2010, 17(2): 67–69, 73.
- [25] 曾义金. 页岩气开发的地质与工程一体化技术[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(1): 1–6.
- ZENG Yijin. Integration technology of geology & engineering for shale gas development[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(1): 1–6.
- [26] 许长春. 国内页岩气地质理论研究进展[J]. 特种油气藏, 2012, 19(1): 9–16.
- XU Changchun. Research progress in shale gas geological theory in China[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2012, 19(1): 9–16.
- [27] 董大忠, 王玉满, 黄旭楠, 等. 中国页岩气地质特征、资源评价方法及关键参数[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(9): 1583–1601.
- DONG Dazhong, WANG Yuman, HUANG Xunan, et al. Discussion about geological characteristics, resource evaluation methods and its key parameters of shale gas in China[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(9): 1583–1601.
- [28] NB/T 14017—2016 页岩气录井技术规范[S].
- NB/T 14017—2016 Specification of shale gas surface logging techniques[S].
- [29] GB/T 31483—2015 页岩气地质评价方法[S].
- GB/T 31483—2015 Geological evaluation methods for shale gas [S].
- [30] DZ/T 0254—2014 页岩气资源/储量计算与评价技术规范[S].
- DZ/T 0254—2014 Regulation of shale gas resources/reserves estimation[S].
- [31] 李油建, 王葵舒, 孟韶彬, 等. 激光扫描共聚焦技术在录井储集层评价中的应用及展望[J]. 录井工程, 2017, 28(2): 4–8.
- LI Youjian, WANG Yanshu, MENG Shaobin, et al. Application and prospect of laser scanning confocal technique in reservoir evaluation of mud logging[J]. Mud Logging Engineering, 2017, 28(2): 4–8.
- [32] 袁胜斌, 黄小刚, 汪蕊, 等. 实时同位素录井技术应用[J]. 录井工程, 2017, 28(2): 9–12.
- YUAN Shengbin, HUANG Xiaogang, WANG Xin, et al. Application of real-time isotope logging technology [J]. Mud Logging Engineering, 2017, 28(2): 9–12.
- [33] ESTARABADI J, SHOEIBI A, FERRONI G, et al. The application of well site isotopic analysis for reservoir evaluation [R]. SPWLA-2016-VVVV, 2016.
- [34] 王志战. 录井技术与方法的创新机制[J]. 录井工程, 2017, 28(3): 1–5.
- WANG Zhizhan. Innovation mechanism of mud logging technology and method[J]. Mud Logging Engineering, 2017, 28(3): 1–5.