

我国脉冲中子测井技术发展综述

张 锋

(中国石油大学(华东)地球资源与信息学院, 山东 青岛 266555)

摘要: 脉冲中子测井是以脉冲中子源产生快中子,与井眼和地层物质元素原子核发生作用,通过记录 γ 射线或热中子,从而进行含油饱和度、孔隙度及水流量等地质和工程参数确定的测井技术。概述了国外几种饱和度测井和氧活化水流测井技术及国内对仪器的引进和应用情况,总结了国内中子寿命和碳氧比能谱测井仪的研发历程,并对我国脉冲中子测井技术的发展前景和突破口进行了阐述。

关键词: 脉冲中子测井技术;技术引进;自主研发

中图分类号: P631.817

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2009)S0-0116-08

Summary of Development for Pulsed Neutron Well Logging Technology in Our Country

ZHANG Feng

(College of Geo-Resources and Information, China University of Petroleum, Qingdao 266555, China)

Abstract: The pulsed neutron well logging is a logging technology that the geological and project parameters of oil saturation, porosity and water flow can be determined by recording gamma ray or thermal neutron, which are produced through reaction of fast neutrons produced by pulsed neutron source with nuclei in bore hole and formation material. Several kinds of logging technology to determine oil saturation and oxygen activation water flow, as well as the introduction and application of these instruments in domestic, were sketched out. The research and development of neutron lifetime and carbon oxygen ratio spectrum logging instrument in domestic were summarized simultaneously, and the prospect and breakthrough in pulsed neutron well logging technology in our country were elaborated.

Key words: pulsed neutron well logging technology; technology introduction; independent research and development

随着我国油田进入高含水开发后期,开采难度越来越大,常规生产测井技术已不能满足

需求,高水平的油藏动态监测技术对石油开发具有重要的应用意义,而脉冲中子测井技术则

是当前确定油藏剩余油饱和度分布规律、了解注水和产液剖面、调整注采方案、提高采收率的主要手段。国内测井行业在引进国外脉冲中子测井仪器进行油田服务的同时,业已开展大量的研发工作,脉冲中子测井技术已在油田实际生产中得到广泛应用。

1 脉冲中子测井技术^[1-2]

脉冲中子测井是以脉冲中子与地层相互作用为物理基础的核测井方法,通过在井眼(或探孔)中井下中子发生器产生快中子,快中子进入井眼、地层后与原子核发生非弹性散射、弹性散射、辐射俘获和中子活化反应,利用 γ 或中子探测器记录 γ 能谱、 γ 或热中子时间谱等信息资源来进行地层参数评价,主要包括脉冲中子饱和度测井、脉冲中子氧活化水流测井以及脉冲中子孔隙度测井等技术。

1.1 脉冲中子饱和度测井

脉冲中子饱和度测井又分为碳氧比能谱测井和中子寿命(宏观俘获截面 Σ)测井,这是1种利用脉冲中子源,以一定的脉冲宽度和重复周期向地层发射中子束,通过测量非弹性散射 γ 能谱和热中子或 γ 时间谱来确定地层含油饱和度的测井技术。

1) 碳氧比能谱测井

碳和氧分别是原油和水的指示元素,地层中能 with 快中子发生非弹性散射而产生 γ 射线的核素主要为 ^{12}C 、 ^{16}O 、 ^{28}Si 和 ^{40}Ca ,发生非弹性散射产生的 γ 射线能量分别为4.43、6.13、1.78和3.73 MeV。根据不同反应的时间分布,按时间先后,仪器开有脉冲门、俘获门等,分别接收非弹性散射 γ 射线和俘获 γ 射线,利用多道脉冲幅度分析器进行 γ 能谱分析,测量非弹性散射 γ 射线和俘获 γ 射线的强度,进而确定地层中存在的各种核素及其浓度,获取含油饱和度等地层参数。

碳氧比能谱测井主要用在孔隙水的矿化度低、不稳定或未知条件下,在套管井中确定地层的含油饱和度,特别是测定注水开发油层的剩余油饱和度。另外,利用碳氧比能谱测井还可划分水淹层,指示岩性、孔隙度、泥质和地层水矿化度等参数。

2) 中子寿命测井

高矿化度地层水热中子宏观俘获截面比石

英、白云石和方解石等孔隙性岩石骨架矿物大1个数量级,是淡水或原油截面的2~5倍,利用热中子寿命可确定含水饱和度。测井时,用脉冲中子源向地层发射14 MeV中子,测量经地层慢化而又返回井眼内的热中子或俘获 γ 射线,根据计数率随时间的衰减,计算出地层的热中子宏观俘获截面 Σ 或寿命 τ ,可在裸眼井,特别是套管井中获得地层的含水饱和度。另外,可划分油、水、气层,监测油、水或气、水界面的变化,应用于孔隙度等的求取。

1.2 脉冲中子氧活化水流测井

水中稳定核素 ^{16}O 与14 MeV中子发生(n,p)反应,转变为放射性核素 ^{16}N 。 ^{16}N 的半衰期为7.13 s,释放出的 γ 射线能量为7.12和6.13 MeV。这些高能 γ 射线能穿透井中的流体、油管、套管和水泥环,如果高能脉冲中子发生器到 γ 射线探测器的距离为S,水流从发生器到探测器经历时间为t,那么,水的流动速度则为 $v=S/t$ 。在流动截面已知情况下,即可准确计算出各层的分层注入量。

1.3 脉冲中子孔隙度测井

斯仑贝谢公司于1991年研制出了可投入实用的加速器型超热中子孔隙度测井仪APS^[3]。APS使用了由近、中、远3个超热中子探测器和1个热中子探测器组成的阵列探头,集补偿超热中子孔隙度、超热中子寿命及热中子寿命于一体,除了利用短源距测量结果来改善补偿超热中子测井的薄层分辨能力外,还利用了有时间延迟功能的脉冲中子-中子测量,具有更好的薄层分辨性能的优点。

2 国外脉冲中子测井技术的进展

2.1 国外研发的脉冲中子测井仪^[4-10]

目前,国外的发展趋势是缩小仪器直径,采用高效晶体和多个探头以及1支仪器兼容中子寿命测井、碳氧比测井和元素测井等多种测量功能,将仪器通过油管下入井内,在套管内可测定剩余油饱和度,评价油层水淹情况,还可测得地层孔隙度等地层参数。

1) 储层饱和度仪 RST 和 RST-Pro

1991年,斯仑贝谢公司推出了新一代脉冲中子能谱仪器——储层饱和度仪(RST)。1999年,又推出了RST-Pro仪器。RST具有非弹

性-俘获、俘获- Σ 等3种测量模式,其中,非弹性-俘获模式的每个周期中包含1个脉冲中子发射和3个采集时间门;俘获- Σ 模式的每个测量周期含有2个脉冲(1个长脉冲和1个短脉冲),它是通过GSO闪烁晶体探头测量快中子与地层核素发生的非弹性散射、俘获自然释放出来的次生 γ 射线,以进行能谱分析和热中子衰减时间分析,求取储层的C/O比和宏观俘获截面 Σ 的测井方法。

2) RMT 测井仪

RMT测井仪是哈利伯顿公司生产的新型脉冲中子测井仪,其主要技术特点是双脉冲中子发射、多种测量模式,非弹性模式(C/O测井模式)脉冲中子发射频率为10 kHz;俘获模式(TMDL多门热中子衰减时间测井模式)脉冲中子发射频率为800 Hz。仪器外径为54 mm,可在内径为61~244 mm的油管或套管内测井。

3) RPM 测井仪

RPM测井仪是阿特拉斯公司生产的小直径脉冲中子测井仪,它可实现脉冲中子俘获(PNC)测量、脉冲中子能谱(C/O)测量、脉冲中子持率(PNHD)测量、中子活化水流测量和示踪测量(PRISM),其中,中子活化水流测量又包括含水量(HYDL)测量和环空水流(AFL)测量。

4) PND-S 测井仪

康普乐公司生产的PND-S测井仪采用两种脉冲发射方式向地层发射高能快中子,一种采用固定频率(1 428 Hz)发射,通过非弹 γ 能谱求取C/O来确定含油饱和度;另一种采用伺服发射方式(200~1 000 Hz),即脉冲中子发射序列先以1 428 Hz频率发射,初步确定地层的热中子寿命,然后确定相应的频率(200~1 000 Hz)来发射中子,通过俘获 γ 时间谱求取热中子寿命 τ 。

5) PNN 测井仪

PNN(pulsed neutron-neutron)测井仪是脉冲中子-中子测井仪的简称,由奥地利HOT-WELL公司生产。该测井仪是通过远和近两支 ^3He 计数管探测热中子,由热中子的时间谱求出地层的宏观截面、进而求取含水饱和度的新一代的套管井储层评价测井仪器。

2.2 国外脉冲中子测井仪的引进及其在我国油田开发中的应用

从20世纪90年代末期开始,除了斯伦贝

谢公司因仪器封锁外,国内多家测井公司从国外引进了上述脉冲中子饱和度和测井仪,如中石化胜利测井公司引进了PND-S测井仪,中海油服油田事业部引进了RPM测井仪,中油国际、华北油田和大庆油田测井公司分别引进了RMT测井仪,大港油田股份公司测试公司和中海油服油田事业部分别引进了PNN测井仪。引进的国外脉冲中子测井仪在国内、外油田开发中发挥了重要作用。

袁秀婷等^[11]利用PND测井技术在碳酸盐岩储层饱和度评价方面得以应用;梁军彬^[12]根据PND-S测井仪在特高含水油田进行定量求取剩余油饱和度、指导制定补孔措施、识别和重新认识气层、定量评价储层动用程度、指导井组注采调整方面得到了有效应用。

张唯聪等^[13]利用RMT测井技术在松辽盆地、渤海湾地区和西部油田中进行了油藏剩余油监测,在判断岩性、反映层内水淹差异、指示产层出砂、识别含气层位、确定堵水层位、识别油水界面和再挖潜老井方面取得了较好效果;范小秦等^[14]在低渗透率砾岩储层中利用RMT测井技术能够很好地判断岩性与储层物性和油水层、识别低电阻率油层和水淹层、确定注水受效层位、在稠油开发区确定蒸汽驱油效果,该技术更适合低孔隙度、低渗透率、有多种混合水注入的砾岩储层;徐静等^[15]在水淹层评价中利用RMT测井技术准确提供地层的孔隙度、渗透率、含油饱和度等诸多地层参数。

黄志洁等^[16-17]利用RPM测井技术在海上油田监测中来判断水淹层位、确定油水界面及饱和度、识别气层,同时定期动态监测与生产动态相结合,了解储层的动用情况,为挖潜、调整提供依据。

张予生^[12]和邹军^[18]对PNN测井技术在国内的应用状况做了介绍。另外,斯伦贝谢公司利用他们的RST饱和度测井仪在国内从事技术服务。

3 我国脉冲中子饱和度和测井仪器的研发进展

3.1 中子寿命测井仪器

1975年,西安石油仪器总厂研制的FC731型中子寿命测井仪现场试验成功,并通过石油

部鉴定,至1978年,已累计生产25套仪器。1984年,FC841型过油管中子寿命测井仪投入现场使用。1993年,西安石油仪器总厂SKC数控测井系统中的SMJ-A中子寿命测井仪通过科研鉴定。1995年,SKC数控测井系统中的SMJ-B中子寿命测井仪通过科研鉴定,至2003年,SMJ系列产品已累计生产41套。20世纪90年代末期^[19],西安石油仪器总厂成功研制出SMJ-C和SMJ-D双探头、可变门单芯中子寿命测井仪,即通过自动跟踪地层 τ 值的变化来选取门定时及其组合方案,从而达到减小统计涨落影响的目的。2004年,中国石油集团测井有限公司技术中心研制的NLT-A型中子寿命测井仪^[20]不仅具有较好高温性能,仪器长度与同类仪器相比也大为缩短,数据采集、通讯及控制电路同时对2个中子探头进行时间谱采集,形成2个时间谱。在确定含水饱和度、盐间油识别、油层水淹级别评价、天然气探测、薄层划分、射孔和固井质量评价等方面发挥了应有的作用。

目前,国内、外出现的4种利用中子寿命的剩余油作业测井方法是测-注-测、测-吐-测、测-堵-测和时间推移测井,其适应对象主要是高矿化度地层。对于低矿化度地层,通过采用适当的施工工艺和配方,使低矿化度地层水中溶有硼化物或钆酸,即硼中子寿命测井^[21]和钆中子寿命测井^[22],同样可通过对高俘获截面的响应来观测剩余油含量。

3.2 碳氧比能谱测井仪

1963年,大庆油田开始碳氧比能谱测井方法研究,1979年,研制成我国第1支点测碳氧比能谱测井仪NP-3型;1984年,大庆油田NP-4型连续测量碳氧比能谱测井仪研制成功;1992年,NP-5型中深井碳氧比能谱测井仪研制成功。从20世纪80年代开始,西安石油仪器总厂研究碳氧比能谱测井仪,1990年,研制成功用于配接3700地面系统和SKC-A地面系统的COPJ-A型碳氧比能谱测井仪;1995年,进一步研制成功配接SKC-B数控测井系统中的COPJ-B型碳氧比能谱测井仪^[23],仪器外径90 mm,采用1个 $\phi 50$ mm \times 100 mm的NaI晶体,能量动态范围为0.66~8.5 MeV,能量分辨率不大于9%,其非弹门和俘获门的宽度可

根据实际情况设定,一般非弹门的宽度为10 μ s,延迟5 μ s后,开30 μ s的俘获门,在孔隙度35%的饱和油和饱和水砂岩C/O比值不小于0.22。由于NaI晶体的探测效率低,井眼流体对C/O比测量的影响较严重。清华大学吉朋松等^[24]提出了利用双BGO晶体进行C/O比能谱测井的设想,1994年,大庆油田BGO探测器碳氧比能谱测井仪研制成功,并在油田进行现场应用^[25]。

1996年,大庆油田SNP-1型高精度碳氧比能谱测井仪研究成功,含油饱和度的测量精度由原来的 $\pm 15\%$ 提高到 $\pm 9\%$,并于1997年推出SNP-2型150 $^{\circ}\text{C}$ 碳氧比能谱测井仪,1999年,研制了双探测器碳氧比能谱测井仪。2000年,伴随粒子碳氧比能谱测井仪^[26]研制成功,在利用氘氚反应产生中子的同时,产生反冲 α 粒子,在出射角上一一对应,若中子向前飞,则 α 粒子向后反冲,两者夹角为 180° 。伴随 α 粒子探测器对氘靶所张开的角度的反方向确立了快中子关联的飞行方向,控制飞行时间,确定了一个快中子的作用范围,只有在此范围内,快中子与原子核的非弹性散射 γ 射线才能被记录下来。伴随粒子碳氧比能谱测井纵向分辨率为0.4 m,可随时进行测量,不受俘获本底、井眼、套管、水泥环等环境因素的影响,定点测量极大地降低了放射性统计误差。

大庆油田有限公司测试技术分公司郑华等^[27-28]通过蒙特卡罗方法进行仪器参数的最优化设计,研制成功DDCO-2型双源距碳氧比测井仪器。该仪器用高性能BGO晶体组成近、远探测器组,提高了计数效率,近、远探测器晶体尺寸分别为 $\phi 35$ mm \times 35 mm和 $\phi 50$ mm \times 150 mm,对2个 γ 探测器分别采集3种谱,即时间谱、非弹总能谱和俘获能谱。在35%孔隙度砂岩条件下,仪器远、近C/O比动态范围分别达到25%和22%,测量地层含油饱和度精度达到8%,已应用于国内多家油田,获得了较好的应用效果。

2004年,大庆油田测试技术分公司郑华等^[29]研制成功了小直径脉冲中子综合测井仪。测井仪采用2个 γ 射线探测器,源距约30和50 cm,有碳氧比测井模式、中子寿命测井模式和氧活化测井模式。具有实时测量地层热中子

宏观俘获截面、近远探测器非弹性散射及俘获 γ 计数率比值、连续氧活化等功能,测井资料能在岩性、泥质含量、孔隙度、饱和度、层位产水等方面提供更丰富的实用信息。

3.3 脉冲中子氧活化水流测井仪

在油田注水和生产实践中经常遇到的问题之一是注入水或产出水在套管与井眼环型空间通道的垂直运动,及时对注入水的漏失状况和生产井的产水位置进行监测,以便采取适当的控制措施。1993年,国外相关研究人员开始了活化测井研究,形成了脉冲氧活化测井技术,已成为套管外水流测井优先选用的测井方法。目前,投入商业运作的氧活化测井仪主要有斯伦贝谢公司的水流测井仪WFL^[30]和哈利伯顿公司的能谱水流测井仪SPWL^[31],其中,WFL外径为42.9 mm,包括3个源距分别为30.48、60.96和457.2 cm的 γ 探测器,通过测量活化水到达探测器所经历的时间,结合源距便可计算出水流速度。SPWL测量部分包括1个发生器和2个探测器,测量未活化水段塞前沿从发生器到达探测器的时间,用测量时间谱计数率曲线下降的半幅点来确定水流速度,可在正常和倒置2种模式下工作,以实现上下2种垂直方向水流速度的测量。可用于一级和二级水处理井机械完整性测试、水平井断裂口识别、注入剖面测井、注入井漏失区域识别、产出剖面测井、生产井漏失区域识别、水流方向识别和聚合物注入工程有效性评价等,这些国外仪器在国内油田开发中得到了一定的应用。

国内从20世纪90年代开始研制氧活化水流测井仪器。1996年,大庆油田研制成氧活化水流测井仪。2000年,大庆油田测试技术公司龚杰等^[32]研制成功MZY-DD1脉冲中子氧活化测井仪;MZY-DD2型氧活化测井仪于2001年底研制成功,于2002年投入油田推广应用。MZY-DD2为单向氧活化仪器,仅测量流量、自然 γ 和磁性定位3组数据,无法同时录取井温、压力数据。仪器主要由磁性定位器、中子发生器、近远中探测器、信号采集与传输电路以及电源短节组成,中子管的中子产额为 $5 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$,探测器为3组NaI晶体探测器。仪器两端均可与电缆头连接。测井时,根据井下管柱及工具情况判断水流方向,确定仪器连接方式,当水流

向下时,仪器中子源在上,探测器在下;当水流向上时,探测器在上,中子源在下。

由于水流方向不同要求采用不同的模式,测量工艺复杂,测量两个方向水流井的同时,需两次取下仪器,延长了测井时间、增加了测井不安全因素及工作量。因此,大庆油田又研制成功了上、下各有1个中子源的水流测井仪DCS^[33],采用上、下中子源分别工作的模式,由电路控制上、下中子源;4个 γ 射线探测器,目的是增加仪器的测量范围;当仪器测量下水流时,上中子源工作;当仪器测量上水流时,仪器的下中子源工作。该仪器的特点是,测量1口井时,可通过选择上、下中子源,随时测量上水流或下水流,不用将仪器起出井筒来调换中子源的方向,增加了仪器测量的灵活性,同时又大大降低了测井工艺程序,提高了工作效率。

2005年,大庆油田又对DSC做了改进^[34],仪器采用“双发单收”模式,即采用1组 γ 能谱探测器、两个高能脉冲中子发生器的组合结构。在设计上参照了原脉冲中子氧活化仪器的结构,在保证仪器测量范围不变情况下,将原有的4个 γ 能谱探测器改为3个,缩短了仪器总体长度,保证了仪器成功下井。

2005年,大庆油田测试公司对MZY-DD2型氧活化测井仪进行改进。改进后,仪器外径为38 mm,兼有中子寿命测量方式,用1个中子发生器实现双向测量,配有6个探测器,其中,两个探测器放在中子发生器上部,在氧活化方式测井时,测量向上方向的水流;在中子寿命方式测井时,测量地层的 Σ ,两个 γ 探测器的源距以约45、75 cm为佳;另外4个探测器置于中子发生器下方;在氧活化方式时,用于测量向下方向的水流,其中的1个探头兼测自然 γ ,由时间谱可求出 Σ 、长短源距计数率比 $R_{N/F}$ 曲线,其中,长短源距计数率之比可用于估算孔隙度和定性指示地层是否含气;由能谱求出Si与Ca的计数率比曲线,用于指示地层岩性;长源距探测器测得的俘获与非弹计数率比RCI曲线有助于区分气层和低孔隙度地层^[35]。

脉冲中子氧活化水流测井技术可验证配注效果、判断地层大孔道、分析调剖效果和检验井下工具泄漏等应用^[36]。该技术不受井内流体粘度的影响,在注聚合物井中录取注入剖面时,

可为观察注聚调剖后不同时期地层的吸水情况提供新的监测途径。另外,还可了解层间注入状况,细分厚层内的吸入状况^[37]。该井只有2个射开层位,且均为大厚层,测井结果不仅显示Ng5⁵层底部的吸水比顶部好,且在上部注聚大厚层Ng5³层中,其主要吸水部位在层段的下部,层段上部不吸水。

4 我国脉冲中子测井技术的发展前景

目前我国的脉冲中子测井技术尚处于起步和发展的初期,一些技术和工艺与国外相比还有差距。在国外开始对我们实行技术封锁,已无法从国外引进相关测井仪器和设备的今天,为了我国石油资源的勘探与开发,必须重视脉冲中子测井基础方法研究,以形成具有自主知识产权的测井技术,寻找脉冲中子测井技术研发的突破点,在一定领域内形成自己的测井仪器。首先从以下3个方面着手进行研发。

1) 多功能脉冲中子饱和度测井技术

目前,测井仪器的发展方向是功能化、组合化和模块化,需开展具有多种测量参数、进而获取多种地层信息的测井技术研发,通过对脉冲中子管、探测器系统电路和工艺的最优化设计,开发出能够同时获取 γ 能谱、时间谱等测量系统,以求实现多功能脉冲中子饱和度测井技术。现今,张锋等提出的“脉冲中子双谱饱和度测井技术”以及中石化胜利测井公司共同研制的多功能脉冲中子饱和度测井仪即是利用多探测器系统同时记录能谱和时间谱,通过设计合理的脉冲和测量时序,在1次下井中可获取C/O比、中子寿命、元素含量、孔隙度等多种信息。

2) 随钻脉冲中子测井技术

国外的随钻测井技术已发展很长时间,而国内才刚刚起步,需从原理和方法上进行技术创新。由于化学中子源的紧缺和环保的限制,未来核测井的发展方向是使用可控源,需大力开展随钻测井中脉冲中子孔隙度、通过中子- γ 测量地层密度、中子寿命以及能谱测井技术研究。

3) 可控源补偿中子孔隙度测井技术

电缆测井中补偿中子孔隙度测井主要利用镅-铍中子源,应开展利用D-D和D-T中子管

进行补偿中子孔隙度研究。

参考文献:

- [1] 黄隆基. 核测井原理[M]. 东营:中国石油大学出版社,2000:125-162.
- [2] 楚泽涵,高杰,黄隆基,等. 地球物理测井方法与原理(下)[M]. 北京:石油工业出版社,2008:159-201.
- [3] FLANAGAN W D. A new generation nuclear logging system[C]// SPWLA 32nd Annual Logging Symposium. [S. l.]: [s. n.], 1991.
- [4] 张付明. 套管井剩余油饱和度测井新技术[J]. 测井技术,2003,27(增刊):50-55.
ZHANG Fuming. New logging technology for residual oil saturation in cased well [J]. Well Logging Technology, 2003, 27(Suppl.): 50-55 (in Chinese).
- [5] 辛力,赵平,赵小青. 改进型储层饱和度仪(RST-Pro)[J]. 大庆石油地质与开发,2001,20(4):71-73.
XIN Li, ZHAO Ping, ZHAO Xiaoqing. Improved reservoir saturation tool (RSTPro)[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2001, 20(4): 71-73(in Chinese).
- [6] 张子生. 一种新的确定储层剩余油饱和度的测井技术——PNN测井仪器及其应用[J]. 石油仪器,2005,19(3):27-28.
ZHANG Yusheng. New well logging technology of determining reservoir saturation: PNN logging tool and its application[J]. Petroleum Instruments, 2005, 19(3): 27-28(in Chinese).
- [7] JACOBSON L, ETHRIDGE R, SIMPSON G. A new small-diameter, high-performance reservoir monitoring tool[C]// The SPWLA39th Annual Logging Symposium. [S. l.]: [s. n.], 1998.
- [8] ELSHAHAWI H, GAD K, WILLIAM A. Enhanced C/O logging as an effective cased hole saturation monitoring solution case histories from the Gulf of Suez, SPE71743[R]. [S. l.]: [s. n.], 2001.
- [9] ROBERT D, PATRICK D, SORAN W. Quantitative use of computer models in calibration of the computalog, pulsed neutron thermal decay tool [C]// SPWLA 33rd Annual Logging Symposium. [S. l.]: [s. n.], 1992.
- [10] GILCHRIST W A, PRATI E, PEMPER R, et al. Introduction of a new through-tubing multi-

- function pulsed neutron instrument, SPE56803 [R]. [S. l.]: [s. n.], 1999.
- [11] 袁秀婷,张书经. PND测井在塔河油田碳酸盐岩储层中的应用[J]. 中国西部油气地质, 2006, 2(1):114-118.
YUAN Xiuting, ZHANG Shujing. The application of PND in carbonate reservoirs of Tahe Oilfield[J]. China Western O&G Geology, 2006, 2(1): 114-118(in Chinese).
- [12] 梁军彬. PND-S测井技术在特高含水油田的应用[J]. 测井技术, 2003, 27(4):338-342.
LIANG Junbin. Application of pulsed neutron decay-spectrum logging (PND-S) in higher water oilfield[J]. Well Logging Technology, 2003, 27(4): 338-342(in Chinese).
- [13] 张唯聪,侯世华,刘玉艳,等. RMT测井仪在某些油田中的应用[J]. 测井技术, 2003, 27(2): 151-154.
ZHANG Weicong, HOU Shihua, LIU Yuyan, et al. Applications of RMT in some China oilfields[J]. Well Logging Technology, 2003, 27(2): 151-154(in Chinese).
- [14] 范小秦,姚振华,徐春华,等. RMT测井在克拉玛依油田中低渗透率砾岩油藏注水开发中的应用[J]. 测井技术, 2008, 32(2):180-185.
FAN Xiaoqin, YAO Zhenhua, XU Chunhua, et al. Application of RMT in water-flooded conglomerate reservoir with low-permeability of Karamay Oilfield[J]. Well Logging Technology, 2008, 32(2): 180-185(in Chinese).
- [15] 徐静,高伟,楚延军,等. RMT在宝浪油田水淹层评价中的应用[J]. 西南石油大学学报:自然科学版, 2008, 30(6):135-137.
XU Jing, GAO Wei, CHU Yanjun, et al. The application of RMT in evaluation water-flooded reservoir in Baolang Oilfield [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Natural Science Edition, 2008, 30(6): 135-137(in Chinese).
- [16] 黄志洁,邱细斌. 储层性能监测仪(RPM)及其应用[J]. 石油仪器, 2004, 18(2):43-46.
HUANG Zhijie, QIU Xibin. RPM tool and its application[J]. Petroleum Instruments, 2004, 18(2): 43-46(in Chinese).
- [17] 黄志洁,王林根,徐凤阳,等. 动态监测技术在海上某1油气田的应用[J]. 测井技术, 2008, 32(3):281-284.
HUANG Zhijie, WANG Lingen, XU Fengyang, et al. Application of monitoring technology in the offshore oil-gas field[J]. Well Logging Technology, 2008, 32(3): 281-284(in Chinese).
- [18] 邹军. 利用PNN储层参数测试技术改善超稠油水平井生产效果[J]. 内蒙古石油化工, 2007(9): 62-63.
ZOU Jun. Improve production effect in heavy oil horizontal well with PNN reservoir parameter testing technique[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2007(9): 62-63(in Chinese).
- [19] 汪永安,张德民,刘应,等. SMJ-D中子寿命测井仪及其典型应用[J]. 测井技术, 1999, 23(增刊): 526-529.
WANG Yongan, ZHANG Demin, LIU Ying, et al. SMJ-D neutron lifetime logging tool and its typical application[J]. Well Logging Technology, 1999, 23(Suppl.): 526-529(in Chinese).
- [20] 鲁保平,刘锐熙,张秋建,等. NLT-A中子寿命测井仪[J]. 测井技术, 2004, 28(6):551-554.
LU Baoping, LIU Ruixi, ZHANG Qiu Jian, et al. New NLT-A neutron lifetime tool[J]. Well Logging Technology, 2004, 28(6): 551-554(in Chinese).
- [21] 刘应,汪戈壁. 低矿化度地层硼-中子寿命测井[J]. 测井技术, 1998, 22(2):137-140.
LIU Ying, WANG Gebi. Borite-neutron lifetime log in low salinity zone[J]. Well Logging Technology, 1998, 22(2): 137-140(in Chinese).
- [22] 戴家才,郭海敏,秦民君,等. 钆中子寿命测井在低孔低渗油藏中的应用[J]. 石油天然气学报, 2007, 29(1):81-83.
DAI Jiakai, GUO Haimin, QIN Minjun, et al. Application of Gd-neutron lifetime logging in low-porosity and low-permeability reservoir[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2007, 29(1): 81-83(in Chinese).
- [23] 李龙,杨联会,左东梅,等. COPJ-B型碳氧比能谱测井仪[J]. 石油仪器, 2000, 14(3):19-21.
LI Long, YANG Lianhui, ZUO Dongmei, et al. COPJ-B type C/O spectral logging tool[J]. Petroleum Instruments, 2000, 14(3): 19-21(in Chinese).
- [24] 吉朋松,庄人遴,林谦,等. 双BGO晶体能谱测井[J]. 核电子学与探测技术, 1997, 17(2): 116-119.
JI Pengsong, ZHUANG Renlin, LIN Qian, et al. Dual-BGO detectors spectral well logging tool

- [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 1997, 17(2): 116-119(in Chinese).
- [25] 杨荫祖,丁希金,陆海英. 大庆 BGO 探测器碳氧比能谱测井仪器. 解释和应用效果[J]. 国外测井技术, 1997, 12(增刊): 218-220.
YANG Yinzu, DING Xijin, LU Haiying. Daqing BGO detector C/O spectral well logging tool and its interpretation and effect of application[J]. World Well Logging Technology, 1997, 12(Suppl.): 218-220(in Chinese).
- [26] 吴丽萍,牛为民. 应用于薄差层的伴随粒子碳氧比能谱测井仪[J]. 大庆石油地质与开发, 2003, 22(4): 70-74.
WU Liping, NIU Weimin. Associated particle C/O spectral logging tool applied in thin layers[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2003, 22(4): 70-74(in Chinese).
- [27] 董建华,刘宪伟,王晶. DDCO-2 型双源距碳氧比能谱测井仪[J]. 石油仪器, 2002, 16(6): 21-23.
DONG Jianhua, LIU Xianwei, WANG Jing. DDCO-2 type dual-spacing C/O spectral well logging tool[J]. Petroleum Instruments, 2002, 16(6): 21-23(in Chinese).
- [28] 郑华,刘宪伟,董建华. 双源距碳氧比测井技术研究[J]. 测井技术, 2005, 29(2): 159-163.
ZHENG Hua, LIU Xianwei, DONG Jianhua. Research about dual detector carbon/oxygen logging[J]. Well Logging Technology, 2005, 29(2): 159-163(in Chinese).
- [29] 郑华. 脉冲中子伽马综合测井[J]. 大庆石油地质与开发, 2007, 26(6): 124-130.
ZHENG Hua. Intergrated pulsed-neutron gamma ray logging[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2007, 26(6): 124-130(in Chinese).
- [30] 任晓荣,鲁保平,黄剑雄. 脉冲氧活化测井技术[J]. 测井技术, 1999, 23(5): 385-388.
REN Xiaorong, LU Baoping, HUANG Jianxiong. Pulsed oxygen activation logging technique[J]. Well Logging Technology, 1999, 23(5): 385-388(in Chinese).
- [31] 韩玉堂,林梁,李婧. 能谱水流测井技术的研究和推广[J]. 测井技术, 2002, 26(4): 306-310.
HAN Yutang, LIN Liang, LI Jing. Researches on spectra water flowing logging technology and its application[J]. Well Logging Technology, 2002, 26(4): 306-310(in Chinese).
- [32] 龚杰,李凤. MZY-DD1 脉冲中子氧活化测井仪[J]. 石油仪器, 2002, 16(2): 24-26.
GONG Jie, LI Feng. MZY-DD1 pulsed neutron oxygen activation logging tool[J]. Petroleum Instruments, 2002, 16(2): 24-26(in Chinese).
- [33] 陈业亭,杨旭东. DSC 脉冲中子氧活化测井仪在大庆油田的应用[J]. 石油仪器, 2008, 22(4): 19-20.
CHEN Yeting, YANG Xudong. Application of DSC pulsed neutron oxygen activation logging tool in Daqing Oilfield[J]. Petroleum Instruments, 2008, 22(4): 19-20(in Chinese).
- [34] 孙秀梅,严青伍,王佳平. 脉冲中子氧活化测井仪的改进及应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2005, 24(3): 99-100.
SUN Xiumei, YAN Qingwu, WANG Jiaping. Improvement and application of pulsed neutron oxygen activation logging tool[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2005, 24(3): 99-100(in Chinese).
- [35] 彭向阳,龚杰,黄志刚,等. MZY-DD2 氧活化测井仪应用局限性及改进建议[J]. 同位素, 2006, 19(4): 210-213.
PENG Xiangyang, GONG Jie, HUANG Zhigang, et al. Application limitation and improvement plan of MZY-DD2 oxygen activated logging tool[J]. Journal of Isotopes, 2006, 19(4): 210-213(in Chinese).
- [36] 梁宝庆. 脉冲中子氧活化测井仪典型应用分析[J]. 石油仪器, 2007, 21(3): 89-90.
LIANG Baoqing. Typical application analysis of pulsed neutron oxygen activation logging tool[J]. Petroleum Instruments, 2007, 21(3): 89-90(in Chinese).
- [37] 郭体军,山永兰,李峰,等. 脉冲中子水流测井在孤岛注聚区的应用[J]. 石油天然气学报, 2005, 27(5): 605-607.
GUO Tijun, SHAN Yonglan, LI Feng, et al. Application of pulsed neutron water flowing logging in Gudao injection-polymer zone[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2005, 27(5): 605-607(in Chinese).