

剩余油饱和度的测井评价方法

张铁轩

中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249

摘要 目前能够过套管测量剩余油饱和度的方法主要有过套管电阻率测井、碳氧比测井、中子寿命测井、中子伽马注钆测-渗-测、脉冲中子-中子测井(PNN)等。综述了套后剩余油饱和度的测井评价方法,分析了各种方法的测量原理、技术应用、适用性及实例,总结了目前应用较为广泛的剩余油饱和度测井评价方法。

关键词 剩余油饱和度;水淹层;过套管电阻率测井;脉冲中子测井

中图分类号 P631.8

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)08-0104-06

Well Logging Residual Oil Saturation Evaluation Methods

ZHANG Tiexuan

State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

Abstract The major logging methods employed to investigate the residual oil saturation in the cased hole include through-casing resistivity logging, carbon-oxygen ratio logging, neutral lifetime logging, neutral GR logging by injecting gadolinium into the reservoir and pulsed neutral-neutral logging (PNN). These residual oil saturation logging methods are reviewed in this paper, with the focus on their interpretation of field data, covering the working principle, geological applications and the technical capability of these methods. The latest developed through-casing resistivity logging tool by Russia, named as ECOS, enjoys many technical advantages in residual oil saturation calculation, hydrocarbon leakage zone evaluation, and reservoir management determination. As a relative mature technique, the carbon-oxygen ratio logging could be employed to calculate the oil saturation and the water salinity and to investigate the water flooded zones, as is more suitable for studies in the formation with low salinity and large saturation. The neutral lifetime logging is one of the most important methods to determine the residual oil saturation, but it is valuable just for perforated zones with medium or low salinity. Comparatively, the method of the neutral GR logging by injecting gadolinium into the reservoir is more useful for studies in the formation with low salinity.

Keywords residual oil saturation; water-flooded zone; through-casing resistivity logging; pulsed neutron logging

0 引言

中国是世界上注水开发油田比例较高的国家之一,注水开发的油田储量占总储量的85%以上,原油的稳产基本上依靠已开发油田的控水稳油、综合治理等挖潜措施。进入注水开发中后期后,剩余油高度分散,高、低含水区域分布无序,经典意义上的油水界面或油水驱替前缘已不存在。为了能够采取正确的开发对策,须搞清地下油水分布,确定剩余油富集区域。

预测地下剩余油分布的方法主要有测井、数值模拟、油藏工程物质平衡、生产动态分析等,其中测井方法是通过井

筒采集地层信息最多、覆盖面最广、采样密度最大、最能实时反映地层条件下各项参数的技术,是监测静态和动态含油饱和度的重要手段^[1]。20世纪50年代以来,使用测井方法确定剩余油饱和度的研究取得一定进展。进入21世纪后,剩余油饱和度测井方法的发展集中于套后测量以及与先进的产液剖面测井方法结合为开发提供动态井间剩余油分布等方面^[2]。

以求解剩余油饱和度为主的测井方法,又称为剩余油饱和度测井^[3]。目前能够过套管测量的剩余油饱和度测井方法主要有过套管电阻率测井、碳氧比测井、中子寿命测井、中子伽马注钆测渗测、脉冲中子-中子测井(PNN)等。这些方法的

收稿日期:2009-12-31

作者简介:张铁轩,博士研究生,研究方向为声波测井、电缆地层测试器、水淹层测井评价,电子信箱:ztx5106@yahoo.com.cn

解释应用主要是结合邻井的注水情况及其他资料,以识别套管外储层的水淹层位为主,半定量确定储层剩余油饱和度,每种方法都有其适用性和局限性。

1 过套管电阻率测井方法

过套管电阻率测井是一种电阻率测井方法,实现在套管内对套管外地层电阻率的测量,由于具有比核测井更好的探测特性和动态探测范围等优势,逐渐成为套管井看好的测井新技术。20世纪90年代,美国斯仑贝谢测井公司研发了过套管电阻率测井仪器(简称CHFR),并于2002年起在中国部分油田进行商业化应用。俄罗斯近几年开发了一套过套管电阻率测井仪器(简称ECOS),与CHFR相比具有分辨率较高、适用性较强、操纵成本较低等独特优点,在俄罗斯的石油天然气田、加拿大部分油田进行了测井服务,获得巨大成功^[12-13]。2006年以来,辽河、大庆油田先后引进ECOS,成功完成现场实验,现已有数百口井投入生产。过套管电阻率测井方法具有良好的应用前景。

1.1 测量原理

过套管电阻率测井、裸眼电阻率测井在物理上的显著区别是,井眼套管本身充当一个巨型电极引导电流离开井眼。电流遵循最低电阻的路径形成电路,当电流选择低阻钢套管路径或地层路径时,大部分电流将流过钢套管路径,高频交流电几乎全部留在套管内部,但会有一小部分低频交流电流或直流电流泄漏到地层中。管内绝大部分电流沿套管流到地面回路电极,极小部分以极低频率在钢套管内壁流动的电流视钢套管为传输线,视钢套管周围地层介质为导电介质,渗漏到地层,再流回到地面回路电极。通过检测渗漏到地层中的这部分电流,就可计算出地层电阻率^[4-11]。

1.2 技术应用

1) 优化油藏管理措施。在油田开发中后期,过套管电阻率测井资料用于确定油水界面、划分水淹层、计算剩余油饱和度,可为油层产能接替、水淹状况评价及剩余油分布规律研究提供技术手段,为区域开发方案调整提供理论依据。

2) 寻找和评价漏失油气层。对于技术发展水平落后或疏忽、漏判、错判导致遗失的油气层和多年开采后重新饱和的油气层,可利用过套管电阻率测井资料与其他资料一起进行老井复查挖潜和重新评价。

3) 补充裸眼地层电阻率资料。井壁垮塌严重、井眼内存在特殊流体或施工条件不好等因素导致无法进行裸眼井测井时,可利用套管井测井技术获取与裸眼井测井资料一样的过套管地层电阻率并进行地层评价。

1.3 适用性分析

过套管电阻率的探测深度在2~10m,远大于核测井方法的探测深度^[14]。纵向分辨率1m,电阻率测量范围0~300Ω·m。俄罗斯过套管电阻率测井仪器在测量时不需洗井,简化了操作步骤,降低了作业成本;但采用5m/点的点测方式进行测量,耗时较长。实践表明,过套管电阻率测井解释方法适用于

均质性较强、渗透率较高的油藏,需借助更多的油藏工程动态信息对低渗透、微裂缝发育的油藏进行综合解释^[15]。目前缺乏量化的过套管电阻率测井仪器的使用环境(包括套管、围岩、水泥环等),影响了校正方法,没有建立完备的测后质量控制体系,这制约了过套管电阻率测井方法的应用效果。

1.4 实例分析

图1为2007年中国北部某油田注水开发多年的老区块的ECOS测井曲线图。在非渗透层,过套管电阻率与裸眼井电阻率测井曲线一致;在渗透层,由于经过多年注水开发,使油层动用程度发生变化,过套管、裸眼井电阻率测井曲线存在差异;36层上部电阻率达到30Ω·m左右,该层仍具油层特征,具有开发潜力。

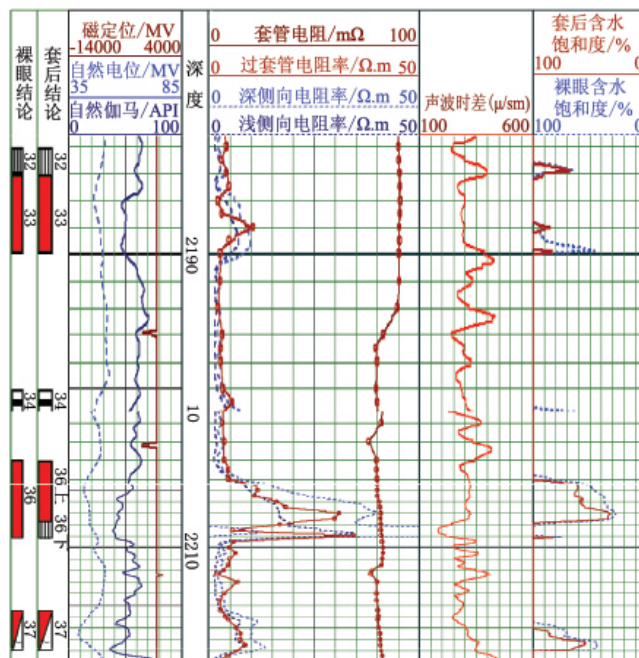


图1 某井ECOS测井曲线

Fig. 1 ECOS logging curves

2 碳氧比测井方法

碳氧比测井是目前套管井中解释水淹层的一种有效方法,是一项比较成熟的测井技术,在寻找剩余油方面取得了显著成效。近几年来,国际三大测井公司相继推出了双源距碳氧比测井仪器,使碳氧比测井的应用效果得到大幅提高,在中国各油田得到广泛应用。

2.1 测量原理

碳氧比测井仪通过中子发生器向地层发生能量为14.3MeV的中子束,当高能的中子与井眼中不同的核素发生碰撞时,由于中子能量和核的种类不同,将产生2种不同类型的伽马射线:非弹性散射伽马射线和俘获伽马射线。由于相互作用的核素不同,这2种射线的能量级不同,所以很容易通过开不同的能量窗口而被区别并记录下来,碳氧比测井仪通过记录地层中各种元素的非弹性散射和俘获射线的

数量,反应地层中各种元素的含量。碳元素和氧元素是油和水的代表元素,可根据测得的碳氧比值计算和评价储层的含油饱和度^[3]。双源距碳氧比存在碳氧比模式和俘获模式2种工作状态,在俘获模式下可通过远近探测器记录中子俘获截面。此外,双源距碳氧比测井仪是由长、短源距的接收探头组成,长源距记录的是井筒到地层的总响应,而短源距记录的则是井筒内的响应,通过长、短源距碳氧比曲线的校正处理可消除井筒内原油粘污的影响。

2.2 技术应用

1) 计算地层含油饱和度。双源距碳氧比测井仪器可提供2种地层含油饱和度的计算方法:① 碳氧比模式下,在砂岩地层普遍应用C/O比和Si/Ca计算水淹层的剩余油饱和度,该方法受到地层水矿化度的影响^[3];② 俘获模式下,已知地层孔隙度和地层水矿化度,通过储集层岩石的俘获截面(SIGMA)计算储层的含油饱和度。

2) 指示地层水矿化度,识别水淹层、判断水淹级别,重新评价产能、监测生产动态等。对双源距补偿测量方法,由于能够排除井眼的影响,应用范围相当广泛,可用于套管变形、由于洗井造成污染的井等特殊井眼条件下的套后地层探测。

2.3 适用性分析

理论上,碳氧比测井方法不受矿化度影响,但大量实践证明,该方法仅适用于低矿化度、孔隙度大于15%的地层,且须在井筒内有井液的情况下进行测量;在新井固井7天后方可进行测井,测井前须用通井规通井并洗井;碳氧比探测深度在较浅、井眼严重垮塌的地层探测不到真正的地层信息。这在一定程度上制约了碳氧比测井方法的应用。

2.4 实例分析

图2是中国东部某油田注水开发多年后的一口生产井的双源碳氧比测井解释成果图,该井因高含水而关井。解释结果表明,未动用的8、9、11层仍有较多剩余油。据此,采油厂开8、9、11层,结果日产油11t、水8m³,含水降到了42.1%,平均日增油10t。

3 中子寿命测井方法

当油田综合含水在80%以上时,指示C元素含量明显减少,仪器测量相对误差增大,尤其是当地层水矿化度大幅升高时,碳氧比能谱测井资料的应用受到限制,在这种情况下中子寿命测井方法显示出了优势,能较为准确求取高矿化度地层水油藏的剩余油饱和度,并进行水淹层测井评价。

3.1 测量原理

高能快中子由中子源飞向地层,与介质元素的原子核发生一系列弹性、非弹性碰撞后,能量减小,速度减慢,形成一个具稳定能级的热中子,在其“寿命”之内,很容易被某些原子俘获,而不易被另一些原子俘获。度量元素俘获热中子能力特征量是热中子俘获截面。利用岩石骨架和地层流体间热中子宏观俘获截面大小的差异可以划分油、气、水层。

对高矿化度地层水油田,利用中子寿命测井可有效区别

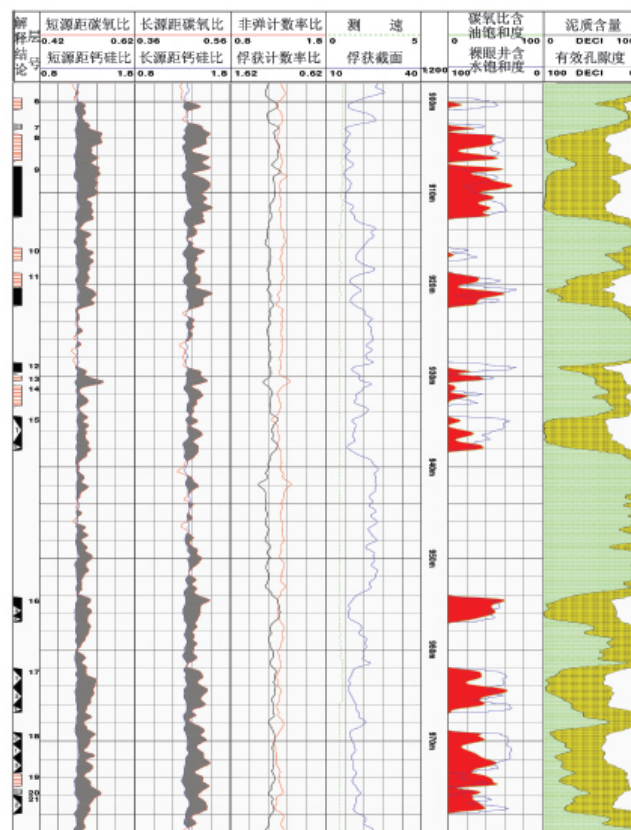


图2 某井双源距碳氧比测井解释成果
Fig. 2 Dual-spacing C/O logging results

油水层,但对淡水油田,油和水的俘获截面相近,无法用其判断油水层。在低矿化度地层水油田,通常采用注入具有高俘获截面的硼酸液的施工方法进行中子寿命测井,在注硼前后分别测一条俘获截面曲线;水层由于渗入了硼酸液,俘获截面明显增大,而纯油层俘获截面无变化;如果把2条俘获截面重叠在一起,纯油层或未射孔层基本重合,而在含水高层则存在差异,且含水饱和度越高,2条曲线差异越大。

3.2 技术应用

1) 利用热中子的俘获截面计算地层剩余油饱和度,是目前确定剩余油饱和度的重要方法^[11]。

2) 分析油藏的水淹规律,准确划分水淹级别,寻找潜力层;加深对单井剩余油分布的认识;直观准确地确定窜槽井段;有效认识射孔层内纵向上的水淹状况及厚层的油、气、水界面;辅助认识地层漏失或堵塞现象。

3.3 适用性分析

中子寿命测井只能应用在已射孔的套管井中,同时地层孔隙度须大于15%。普通中子寿命测井仅适用于高矿化度地层(矿化度大于50g/L),硼中子寿命测井可适用于中、低矿化度的地层^[16-17]。硼中子寿命测井方法能较准确地判断油井层间剩余油饱和度分布状况,对有效厚度大于0.5m的油层,其判断更为准确^[18]。从解释角度看,目前这种方法主要以结合邻井的注水情况及其他一些资料来识别套管外储层的水淹层位为主,对储层剩余油饱和度仅是一种估算,还无法上升到

准确的定量评价;从工艺角度看,在实施过程中一些具有较高压力的强水淹层无进硼现象,硼元素在一些物性较差的强水淹层扩散前后引起的俘获截面曲线离差较小,不同井曲线的离差与水淹状况之间没有统一的解释标准,工艺技术仍需进一步的研究与调整^[19]。

3.4 实例分析

图3为中国北部某油田某注水开发井中测得的注硼中子寿命测井成果图。该井在测量之前含水率达到了99%。由图3可见,第8层为强出水层。采取措施封掉第8层后,日增油7t,含水率降为74%。

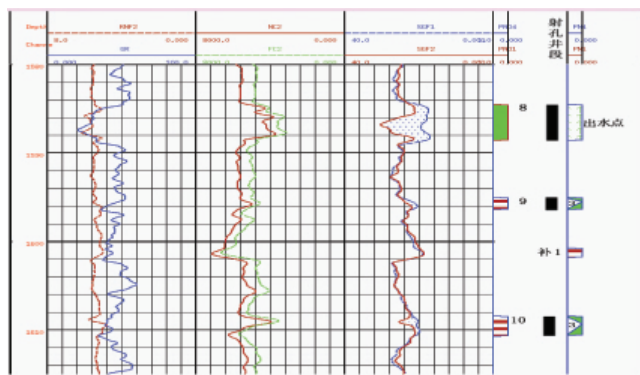


图3 某井注硼中子寿命测井解释成果

Fig. 3 Logging results presentation of Borite-neutron lifetime log

4 中子伽马注钆测-渗-测方法

硼中子寿命测井方法在中国已测井数量近千口井,并取得了良好效果。但该方法使用中子发生器作为脉冲中子源,仪器结构复杂、难以维修、更换中子管困难、测井费用昂贵,难以大范围应用。为此,近年发展出一种新的、可替代中子寿命的测-渗-测方法,即中子伽马注钆测-渗-测确定剩余油饱和度方法^[20-22]。

4.1 测量原理

Am-Be 中子源向周围放出快中子,快中子与地层原子核发生多次碰撞减速,变成热中子,热中子被地层的原子核俘获,释放出伽马光子,用伽马仪记录单位时间内的伽马光子数量,也就是记录热中子俘获伽马计数率,采用注钆测-渗-测方法,根据2次测井资料计算出剩余油饱和度。

钆的热中子微观俘获截面 σ 远大于氯和硼,在低矿化度注水开发油田的生产井中,许多产油层被水淹或存在水淹部位,在测完基线之后注入钆水溶液,使油层的水淹部位渗入钆离子,再测渗后的曲线。油层是亲油憎水的,水层是亲水憎油的,油层在注水开发水洗过程中逐渐由亲油变成了亲水,越是含水饱和度高的水淹层渗入的钆离子越多,这样就扩大了不同含水饱和度地层的热中子宏观俘获截面的差别。

4.2 技术应用

与中子寿命技术相比,中子伽马注钆测渗测方法在低矿化

度地层具有更强的剩余油识别能力,能够监测油层水驱动用状况划分水淹级别、识别水淹层,确定窜槽,监测地层污染^[23];判定地层堵塞和检测压裂效果。并具有仪器维修方便、生产成本低等特点。

4.3 适用性分析

中子伽马注钆测-渗-测方法只能应用在已射孔的套管井中,同时地层孔隙度要大于10%。在定量解释剩余油饱和度时,由于需要采用地层孔隙度、束缚水饱和度等其他资料,以及受注钆工艺参数、最佳测井时间等影响,因此需进一步加强渗流理论研究和实验,完善工艺设计及校正图版,提高其解释精度。

4.4 实例分析

图4为中国北部某油田的一口稠油井,吞吐后期含水100%。中子伽马注钆测-渗-测结果表明,15层上部剩余油饱和度较高,动用程度差,是主要挖潜层;17、18层剩余油饱和度很低,无开采价值。

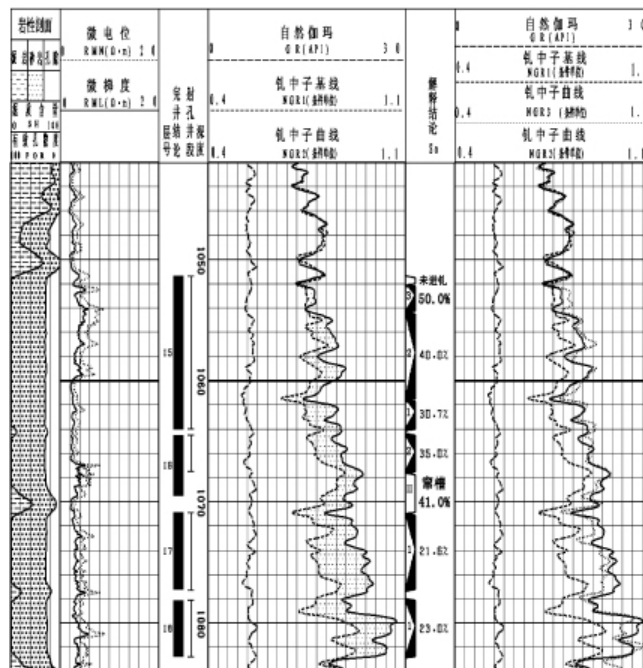


图4 在某口蒸汽吞吐稠油开发井中进行的中子伽马注钆测井解释成果

Fig. 4 Logging results presentation of gadolinium-injected neutron gamma logging for one heavy oil production well undertaking huff and puff

5 PNN 测井方法

21 世纪以来,为彻底解决中子寿命等脉冲中子测井方法在低矿化度情况下很难取得准确的剩余油饱和度问题,奥地利 Hotwell 公司推出一种新型饱和度测井仪-脉冲中子-中子测井仪(简称 PNN 饱和度测井仪),在多个国家进行了广泛应用,并于2003年进入中国市场,先后在大港、胜利、辽河、新疆等多个油田进行商业化应用,取得较好的应用效果,为老油

田开发后期的剩余油挖潜提供了一种新监测手段。

5.1 测量原理

中子发生器向地层发射 14MeV 的快中子,经过与地层中元素的非弹性、弹性散射和俘获等相互作用过程,生成可供测量的超热中子、热中子和次生伽马射线。热中子经过井内流体、套管、水泥环和地层后被 He-3 中子计数管探测到,利用热中子计数率来求出热中子的宏观俘获截面,从而研究地层及孔隙流体性质。与记录俘获伽马射线的中子寿命测井方法不同,PNN 直接记录俘获反应前后的热中子计数率^[24-25]。

5.2 技术应用

利用 PNN 长短源距计数率比值曲线计算中子孔隙度;在套管井中进行油井生产动态监测,提供残余油气储量,划分油气水界面,判断产层流体窜流情况;在裸眼井中与电阻率等测井方法综合应用,更为精确地判断岩性,提供泥质含量等储层参数;有效识别气层。

5.3 适用性分析

从仪器设计原理分析,PNN 不记录热中子被俘获过程中产生的伽马射线,而记录热中子本身,避免了其他脉冲中子仪器在低矿化度、氯元素少的地层下不能获得高计数率的缺点,能保证低矿化度地层条件下剩余油饱和度的准确测量。张锋等^[26]通过 PNN 测井方法的蒙特卡罗模拟研究得出,PNN 测井适合的地层水矿化度范围为 10~100g/L,当地层水的矿化度为 50g/L 时 PNN 适于测井的孔隙度下限约为 10%。在实践应用中,由于孔隙度、矿化度、含油饱和度、井眼等因素对计数率的影响尚不能得到有效校正,在流体识别方面还需进一步研究和提高。此外,采用中子管作为中子发生器,虽然工作时间可延长到 100~200h,但更换中子管的昂贵费用增加了生产成本。

5.4 实例分析

图 5 是中国北部某油田探井中测得的 PNN 测井解释成果图。根据 PNN 的解释结果分析,该井 15、16 层平均孔隙度分别为 18.9%、17.4%,该层段显示了较好的含烃饱和度,PNN 平均含水饱和分别为 51.2%、51.4%,建议对该层进行测试,射开 15、16 层后,日产气 21430m³。

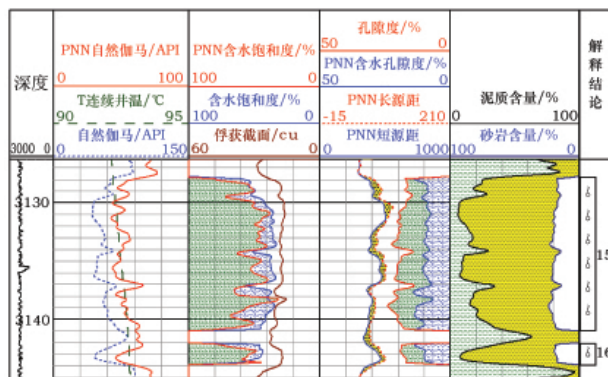


图 5 某探井中测得的 PNN 测井解释成果
Fig. 5 PNN logging results in an exploration well

6 结论

1) 测井方法确定剩余油饱和度的研究近年有了较大发展,集中于套后测量方法的研究,以及与先进产液剖面测井方法相结合为油田开发提供动态的井间剩余油分布等方面。

2) 在中国,以俄罗斯过套管电阻率仪器为代表的过套管电阻率测井技术近年有了较为广泛的应用,与传统的核测井方法相比在套后剩余油监测方面具有独到优势,可以提供直观的套后电阻率曲线,属于开创性技术。过套管电阻率测井方法研究在中国尚处起步阶段,没有建立完备的测后质量控制体系;完善环境影响校正、泥质校正、饱和度定量计算等解释处理软件,是过套管电阻率测井方法急需解决的问题。

3) 作为传统的剩余油饱和度测井方法,碳氧比、脉冲中子测井等核测井方法应用范围广泛,在各种地层条件、施工条件下具有较为丰富的经验,在各个油田逐渐形成了较为稳定、适合的测井体系。总体来说,各种核测井方法都具有其适应性,要根据孔隙度、地层水矿化度等储层条件,确定具体的剩余油监测测井系列,与套管检测、固井质量检测、生产动态监测等其他测井方法一起对储层进行综合评价,才能达到剩余油饱和度监测的最优化结果。

参考文献 (References)

- [1] 赵培华. 中国油田开发水淹层测井技术 [C]//陆大卫,王春利 编. 剩余油饱和度测井评价新技术. 北京:石油工业出版社,2003:1-5.
Zhao Peihua. Water flooded zone evaluation logging technique for the oilfield development in China [C]//Lu Dawei, Wang Chunli. New Logging Technique for Residual Oil Saturation Evaluation. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 1-5.
- [2] 霍树义. 放射性测井技术在油田开发中的应用 [J]. 油气采收率技术, 1999, 2(3): 48-58.
Huo Shuyi. Oil and Gas Recovery Technology, 1999, 2(3): 48-58.
- [3] 孙建孟. 油田开发测井 [M]. 东营:中国石油大学出版社,2004:136-173.
Sun Jianmeng. Oilfield development logging [M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2004: 136-173.
- [4] Kaufman A A. The electrical field in a borehole with a casing [J]. Geophysics, 1990, 55(1): 29-38.
- [5] Singer B S, Fanini O, Strack K M, et al. Measurement of formation resistivity through steel casing [C]//SPE/SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Texas: Society of Petroleum Engineers, 1995: 30628-MS.
- [6] Hamada G M, King F U, Hegazy A A, et al. Hydrocarbon potential monitoring in gas sandstone reservoirs using TDT and CHFR techniques [C]//SPE/EUROPEC/EAGE Conference and Exhibition. London: Society of Petroleum Engineers, 2007: 105003-MS.
- [7] Backe K R, Lile O B, Lyomov S K. Characterizing curing cement slurries by electrical conductivity [J]. SPE Drilling & Completion, 2001, 16(4): 207-207.
- [8] Zhang X, Singer B S, Fanini O, et al. Through-casing resistivity: 2D and 3D distortions and correction techniques [C]//SPE/SPWLA 36th Annual Logging Symposium. Paris: Society of Petrophysicists & Well Log Analysts, 1995: 1995-PP.
- [9] Tchambaz M, Belhadj B. Reservoir monitoring with the CHFRPLUS in water injection oilfields, Libya examples [C]//SPE/SPE Annual Technical

- Conference and Exhibition. Colorado: Society of Petroleum Engineers, 2003: 84598-MS.
- [10] Tabarovsky L A, Cram M E, Tamarchenko T V, *et al.* Through casing resistivity (tcr): Physics, resolution and 3-D effects [C]/SPE/SPWLA 35th Annual Logging Symposium. Paris: Society of Petrophysicists & Well Log Analysts, 1994: 1994-TT.
- [11] Herold B H, Benimeli D, Levesque C, *et al.* Combinable through-tubing cased hole formation resistivity tool [C]/SPE/SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Texas: Society of Petroleum Engineers, 2004: 90018-MS.
- [12] 孙金浩. 俄罗斯过套管电阻率测井技术适用性研究 [J]. 国外测井技术, 2009, 169: 34-38.
Sun Jinhao. *World Well Logging Technology*, 2009, 169: 34-38
- [13] 聂锐利, 谢进庄, 李洪娟, 等. 过套管电阻率技术在大庆油田剩余油饱和度评价中的应用[J]. 大庆石油学院学报, 2004, 28(5): 16-19.
Nie Ruili, Xie Jinzhuang, Li Hongjuan, *et al.* *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2004, 28(5): 16-19.
- [14] 王汝信. 新一代过套管井地层电阻率测井技术及应用 [J]. 吐哈油气, 2004, 9(1): 66-70.
Wang Ruxin. *Tuha Oil and Gas*, 2004, 9(1): 66-70.
- [15] 徐春华, 侯加根, 赵喜元, 等. 过套管电阻率测井在克拉玛依低渗储层的应用[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2008, 30(4): 55-59.
Xu Chunhua, Hou Jiagen, Zhao Xiyuan, *et al.* *Journal of Xi'an Petroleum University: Natural Science*, 2008, 30(4): 55-59.
- [16] 宋长伟, 李刚, 郭志强. 用硼中子寿命测井确定低渗透砂岩储层剩余油饱和度[J]. 测井技术, 1999, 23(3): 176-179.
Song Changwei, Li Gang, Guo Zhiqiang. *Well Logging Technology*, 1999, 23(3): 176-179.
- [17] 谭圣君, 陈营. 硼中子寿命测井确定剩余油分布[J]. 油气地质与采收率, 2001, 8(2): 76-78.
Tan Shengjun, Chen Ying. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2001, 8(2): 76-78.
- [18] 葛玲, 曹宝良, 韩秀芹. 硼中子寿命测井在大庆萨南油田的应用效果评价 [C]/陆大卫, 王春利 编. 剩余油饱和度测井评价新技术. 北京: 石油工业出版社, 2003: 76-83.
Ge Ling, Cao Baoliang, Han Xiuqin. Application evaluation of boron neutron lifetime log in Daqing Sa'nan oilfield [C]/Lu Dawei, Wang Chunli. *New Logging Technique for Residual Oil Saturation Evaluation*. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 76-83.
- [19] 赵英, 王进宝, 白永彤, 等. 注硼中子寿命测井技术在砂岩油田开发中的应用[J]. 测井技术, 2001, 25(6): 432-436.
Zhao Ying, Wang Jinbao, Bai Yongtong, *et al.* *Well Logging Technology*, 2001, 25(6): 432-436.
- [20] Khisamutdinov A I, Numerical method of identifying parameters of oil-water saturation by nuclear logging [J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 1999, 50: 615-625.
- [21] Carpentier B, Arab H, Pluchery E, *et al.* Tar mats and residual oil distribution in a giant oil field offshore Abu Dhabi [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2007, 58: 472-490.
- [22] 刘东生. 一种新的剩余油饱和度测井方法——注钆中子伽马测井[J]. 石油仪器, 2009, 23(1): 67-70.
Liu Dongsheng. *Petroleum Instruments*, 2009, 23(1): 67-70.
- [23] 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.* *Journal of Oil and Gas Technology*, 2007, 29(1): 81-83.
- [24] 张予生. 用 PNN 测井资料确定储层的剩余油饱和度 [J]. 国外测井技术, 2004, 19(2): 21-23.
Zhang Yusheng. *World Well Logging Technology*, 2004, 19(2): 21-23.
- [25] 胡玲妹, 刘存辉, 徐建平, 等. PNN 饱和度测井技术在大港油田的应用[J]. 石油钻采工艺, 2009, 31(增刊 1): 57-62.
Hu Lingmei, Liu Cunhui, Xu Jianping, *et al.* *Oil Drilling & Production Technology*, 2009, 31(Suppl 1): 57-62.
- [26] 张锋, 徐建平, 胡玲妹, 等. PNN 测井方法的蒙特卡罗模拟结果研究 [J]. 地球物理学报, 2007, 50(6): 1924-1929.
Zhang Feng, Xu Jianping, Hu Lingmei, *et al.* *Chinese Journal of Geophysics*, 2007, 50(6): 1924-1929.

(责任编辑 刘志远)

第6届国际稀土开发与 应用研讨会

时 间: 2010年8月
地 点: 北京

主办单位: 中国稀土学会

通信地址: 北京市海淀区学院南路76号
中国稀土学会办公室 (100081)
电 话: 010-62182748
传 真: 010-62173501
电子信箱: csre@cs-re.org.cn