

应用四中子饱和度测井技术指导油井分层采油

曾磊¹, 陈金科², 边松伟¹, 米立和³, 罗保军¹, 高鸿泉¹

- 1. 中国石油集团渤海钻探工程有限公司油气井测试分公司 河北廊坊 065000
- 2. 中国石油渤海钻探工程有限公司井下作业分公司 河北任丘 062500
- 3. 中国石油华北油田分公司采油四厂 河北廊坊 065007

通讯作者: Email: zenglei@cnpc.com.cn

引用: 曾磊, 陈金科, 边松伟, 等. 应用四中子饱和度测井技术指导油井分层采油[J]. 油气井测试, 2023, 32(5): 67-73.

Cite: ZENG Lei, CHEN Jinke, BIAN Songwei, et al. Application of four-neutron saturation logging technology to guide stratified oil production [J]. Well Testing, 2023, 32(5): 67-73.

摘要 针对油井在多层合采情况下, 采用其他方法和资料不易确定剩余油的分布情况, 利用四中子饱和度测井资料的解释资料分析各产层的物性、含油性, 确定生产潜力层段。四中子饱和度测井用镅铍中子源向地层发射快中子, 快中子与地层中的元素发生一系列反应, 通过长短源距四个探测器记录中子-中子、中子-伽马双物理过程得到中子-中子、中子-伽马共四个计数率, 进而计算地层的泥质含量、孔隙度、含油气饱和度, 评价套后地层物性特征及剩余油分布状况。C 区块的 A 井在多层合采时的含水率很高, 利用四中子饱和度测井资料解释结果分析产层的物性和含油性, 指导分层采油, 制定合理的分采方案, 关闭高含水层段、生产低含水层段, 取得了较好的应用效果, 可为油气田开发方案的制定或调整提供可靠依据。

关键词 四中子; 饱和度测井; 中子-中子; 中子-伽马; 双物理过程; 套后; 剩余油; 分层采油

中图分类号: TE357 **文献标识码**: B **DOI**: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2023.05.012

Application of four-neutron saturation logging technology to guide stratified oil production

ZENG Lei¹, CHEN Jinke², BIAN Songwei¹, MI Lihe³, LUO Baojun¹, GAO Hongquan¹

- 1. Well Testing Company, CNPC Bohai Drilling Engineering Company Limited, Langfang, Hebei 065000, China
- 2. Downhole Services Company, CNPC Bohai Drilling Engineering Co., Ltd., Renqiu, Hebei 062500, China
- 3. The Fourth Exploit Factory of PetroChina Huabei Oilfield Company, Langfang, Hebei 065007, China

Abstract: In view of the difficulty in determining the distribution of remaining oil by other methods and data in multi-layer combined production of oil Wells, the interpretation data of four-neutron saturation logging is used to analyze the physical properties and oil content of each production layer and determine the production potential interval. Americium beryllium neutron source is used in four-neutron saturation logging to emit fast neutrons to the formation, which react with the elements in the formation in a series of ways. The neutron-neutron and neutron-gamma dual physical processes are recorded by four detectors with short and short source spacing to obtain four counting rates of neutron-neutron and neutron-gamma, and then the shale content, porosity and oil-gas saturation of the formation are calculated. Evaluate the physical properties of the formation and the distribution of remaining oil. Well A in Block C has a high water content in multi-layer combined production. The interpretation results of four-neutron saturation logging data are used to analyze the physical properties and oil content of the production layer, guide the stratified oil production, formulate a reasonable production plan, close the high aquifer section and produce the low aquifer section. Good application results have been obtained, which can provide a reliable basis for the formulation or adjustment of the oil and gas field development plan.

Keywords: four-neutron; saturation logging; neutron-neutron; neutron-gamma; dual physical processes; after sleeve; residual oil; stratified oil production

国内很多老油田经过多年注水开发后, 进入“高含水、高采出程度”阶段, 地下剩余油分散, 稳油控水的难度日益增大。从经济角度来看, 现在提倡利用老井增加产油量, 故需对老井的水淹状况、剩

余油状况进行评估, 该工作一般是利用裸眼井测井资料, 但很多裸眼井测井资料已经录取多年, 地下水情况可能已经发生很大变化, 所以需要补充套后饱和度测井资料。另外, 某些新钻井由于井况复

杂等各种原因,没有进行裸眼井测井,下入套管生产后,需要套后测井补充岩性、孔隙度、含油气饱和度等资料,为油田制定或调整开发方案提供依据^[1-2]。

目前,多数套后饱和度测井采用放射性方法,如C/O测试仪^[3]、中子寿命测井仪^[4]、储层性能监测仪(RPM)^[5]、储层监测仪(RMT)^[6]、储层饱和度测井仪(RST)^[7]、脉冲中子衰减能谱测井仪(PND)^[8]、脉冲中子-中子(PNN)测井仪^[9]、热中子成像(TNIS)测井仪^[10]、脉冲中子全谱饱和度测井仪(PSSL)^[11]等。上述方法或仪器在某些区块取得了较好的效果,但在某些区块仍不能满足生产实际的需要。四中子饱和度测井^[12-15]采用镅铍化学中子源,综合中子-中子、中子-伽马双物理过程中探测到的信息计算地层的泥质含量、有效孔隙度、含油饱和度等参数,对地层的孔隙度、矿化度要求相对较低,特别适合于油质轻、气油比高的地层,在识别水淹层、分析剩余油等方面有较好的效果。赵璐阳^[16]针对低矿化度、低孔隙度储层常规饱和度测井应用效果差的问题,引入了四种子测井技术,通过现场多井次的成功应用,较准确的评价了套后剩余油分布情况。

熊葵等^[17]总结了华北油田目前应用的各种套后饱和度测井技术的原理及优缺点,建立了相应的解释模型、解释图版,提高了饱和度测井技术的符合率。刘萍等^[18]针对岔河集油田目前油藏已处于高含水开发阶段,剩余油分布复杂等问题,运用常规技术认识层间潜力及治理挖潜难度大,为解决油田开发后期剩余油监测问题引进了四中子饱和度测井,应用四中子饱和度测井解释结果卡层补孔见到明显增油效果,措施成功率由66.7%提升至83.3%。杜双军^[19]针对油田开发的高含水阶段,有效且准确的评价水淹层及其剩余油饱和度十分困难的问题,通过对比分析了裸眼井测井资料与套后饱和度测井资料对研究区块水淹层定性识别方法的评价效果,利用多重迭代法建立裸眼井测井资料饱和度解释模型,并结合套后饱和度测井资料建立起砂砾岩水淹层剩余油饱和度的动态评价方法。王丽等^[20]针对水淹层地层流体矿化度发生变化问题,导致电阻率计算剩余油饱和度的方法存在应用误差,通过并联电路导电模型,利用迭代计算方法,优选印度尼西亚方法解决水淹层剩余油饱和度计算难题。有些油井在多层合采情况下的含水率很

高,但可能并不是所有的产层都是高含水,故需要关闭那些高含水率层段而生产低含水率层段;由于有些井用其他方法或资料又不易确定到底是哪些产层的含水率很高、哪些产层的含水率较低,故利用四中子饱和度测井资料的解释评价结果,分析各产层的物性、含油性,确定生产潜力层段,为指定分层开采方案提供依据。

1 四中子饱和度测井技术

四中子饱和度测井技术采用镅铍中子源向地层发射快中子,通过中子-中子、中子双物理过程评价岩性、物性和含油性;仪器结构合理、技术指标先进;具有测量参数简单、测速快、施工高效的技术优势。

1.1 基本原理

四中子饱和度测井采用镅铍(AmBe)中子源,向地层发射平均能量为4.5 Mev的快中子,快中子与地层中的元素发生各种反应,主要有以下两种过程,这两种物理过程是四中子饱和度测井技术评价岩性、物性及含油性的基础。

(1) 中子-中子过程

快中子的能量在碰撞过程中逐渐减弱,变为热中子,直至被俘获,这一过程称为快中子的热化过程,在这一过程中起主要作用的元素是氢。热中子在地层中会被其它的原子俘获,高的俘获截面会降低热中子的计数,在这一阶段起主要作用的元素是氯、硼。

(2) 中子-伽马过程

快中子与地层中的原子进行反应,会发出伽马射线,主要来源于快中子与原子核发生碰撞、热中子被俘获、电场电离;同时伽马射线在地层中会发生光电效应、康普顿效应等,伽马计数会降低,这一过程与地层密度有着密切的关系,伽马射线在穿过高密度的物质时计数率会降低。

1.2 仪器结构与技术指标

四中子饱和度测井仪的结构主要包括中子源、温度探头、高能伽马探头、自然伽马探头、磁定位、长源距伽马探头、短源距伽马探头、短源距中子探头、长源距中子探头,自然伽马探头、磁定位用于深度校正。该仪器既可以采用电缆实时测试,也可以采用存储测试方式。

四中子饱和度测井仪的主要技术指标:外径43 mm、耐温150℃、耐压105 MPa、测速可以达到

5 m/min、径向探测深度 70~90 cm、中子源强度 5Ci。四中子饱和度测井得到的主要曲线有:短源距中子中子计数率(SNN)、长源距中子中子计数率(LNN)、短源距中子伽马计数率(SNG)、长源距中子伽马计数率(LNG)、

自然伽马曲线(GR)、温度曲线(UHT)、磁定位(CCL)等。

1.3 技术优势

与很多采用脉冲中子源的饱和度测井技术相比,四中子饱和度测井的典型特点是采用 AmBe 化学源,具有以下优点:测量参数简单、测速快、施工高效,适用于长井段测量;不存在消耗中子管造成成本较高、测井仪可靠性不佳、技术复杂不利于推广应用等问题。四中子饱和度测井比较适合于油质好、原油密度低的区块,对轻质油、含气层有较好响应,对孔隙度的要求较低,适用于测量井段长、含油层系多、储层物性差异大及复杂岩性的情况。

四中子饱和度测井采用中子-中子、中子-伽马双物理过程,而储层饱和度测井仪(RST)、储层性能监测仪(RPM)、脉冲中子衰减能谱测井仪(PND)是采用中子-伽马单物理过程,脉冲中子-中子(PNN)、热中子成像(TNIS)则采用中子-中子单物理过程,中子-中子、中子-伽马过程对计算解释孔隙度等重要参数的影响刚好是相反的,故四中子饱和度测井计算的孔隙度、含油饱和度、泥质含量等参数会有助于减小其他因素的影响,使计算解释的结果更接近于真实值,有利于客观评价地层物性特征及套后剩余油分布情况。

2 资料解释

四中子饱和度测井资料的解释是利用中子-中子、中子-伽马双物理过程获得的 4 条计数率曲线,通过解释模型、解释图版,对储层的物性、含油性做出解释评价。

2.1 解释模型

(1) 黏土曲线

在四中子饱和度测井中,除了可以采用 GR 计算泥质含量外,一般采用黏土曲线 QC(Quad Clay)计算泥质含量,因为黏土的主要代表元素是铝,高岭石、蒙脱石、伊利石都含有铝元素,砂岩的主要代表元素为硅,在发生水化反应时,铝元素产生的伽马射线要远大于硅及其他元素,故采用铝作为黏土的指示性元素计算泥质含量更准确。在含高 GR 矿

物或受到放射性污染的层段,用此方法计算泥质含量非常有利。

(2) 总孔隙度

总孔隙度 QTP 的计算综合中子-中子和中子-伽马双物理过程,即利用两个中子计数率和两个伽马计数率,有助于消除流体性质对测量结果的影响。

$$QTP = m(\ln SNN + \ln LNG - \ln LNN - \ln SNG) + n \quad (1)$$

式中:QTP 为总孔隙度,%;SNN 为四中子饱和度测井的中子-中子短源距探测器计数率,cps;LNN 为中子-中子长源距探测器计数率,cps;SNG 为中子-伽马短源距探测器计数率,cps;LNG 为中子-伽马长源距探测器计数率,cps;m、n 为校正系数。

(3) 流体指示曲线

流体指示曲线 QL 结合中子-中子和中子-伽马两种测量方式,有助于放大流体信息,与总孔隙度 QTP 配合,识别孔隙流体。

$$QL = a(\ln SNG + \ln LNG - \ln SNN - \ln LNN) + b \quad (2)$$

式中:QL 为根据四中子饱和度测井资料计算的流体指示曲线,%;a、b 为区域经验系数。

(4) 含油饱和度

$$S_o = F \frac{QTP - QL}{\phi_w - \phi_o} \quad (3)$$

式中:S_o 为含油饱和度,%;F 为地层因素,小数;φ_w 和 φ_o 分别是 100% 含水与 100% 含油时的总孔隙度 QTP 和流体指示曲线 QL。

(5) 中子孔隙度

中子孔隙度 DDN 利用两个中子计数率计算孔隙度,可以与裸眼井测井资料中的补偿中子孔隙度类比,主要受地层含氢指数影响,可以用来辅助识别气层。

(6) 相对密度

中子、伽马的计数率随密度升高均升高,但密度变化对伽马的影响程度大于对中子的影响程度。相对密度的主要用途是识别高密度物质、致密夹层和气层。

根据公式(3),可以利用总孔隙度(QTP)和流体指示曲线(QL)分离程度来判断含油性,油水密度差异明显或地层水氯离子含量较高时才会造成 QTP 和 QL 分离明显;含油饱和度与 QTP 和 QL 分离大小和油的密度、地层水矿化度有关。在其他条件相近的情况下,油的密度越小、地层水矿化度越高、QTP 和 QL 之间的包络面积越大,反映了含油饱和

度越高。表 1 反映了 ($QTP-QL$) 与原油密度、地层水矿化度的关系,在相同的含油饱和度情况下,油的密度越小、地层水矿化度越高则 ($QTP-QL$) 越大;图 1 也反映了含油饱和度与 ($QTP-QL$) 的关系,即在其他条件大体相同的情况下, ($QTP-QL$) 随含油饱和度增大而增大, QEP 为有效孔隙度,由总孔隙度经泥质校正得到。

表 1 ($QTP-QL$) 与原油密度、地层水矿化度的关系
Table 1 Relation between ($QTP-QL$) and oil density and formation water salinity

原油密度/ ($g\cdot cm^{-3}$)	地层水矿化度/($mg\cdot L$)				
	4 000	6 000	10 000	15 000	20 000
1.08	1.2	1.8	2.9	4.3	5.6
1.00	2.3	2.9	4.0	5.4	6.7
0.97	2.9	3.4	4.6	5.9	7.3
0.93	3.4	4.0	5.1	6.5	7.8
0.88	4.5	5.1	6.3	7.6	8.9
0.83	5.7	6.3	7.4	8.7	10.1

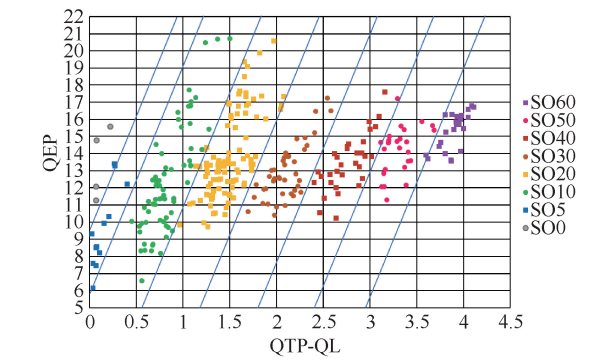


图 1 QEP 与 ($QTP-QL$) 交会图
Fig.1 crossplot of QEP and ($QEP-QL$)

2.2 解释图版

储层的含油性既可以通过计算含油饱和度来判断,也可以通过直观的方法来判断。一般来说,未水淹储层的计数率形态和常规电阻率形态基本一致;水淹层一般物性比较好,水淹后的含氢指数明显升高。水淹程度越高,计数率越接近于泥岩。在四中子饱和度测井的解释成果图上,调整长源距中子伽玛计数率 (LNG) 和长源距中子中子计数率 (LNN) 的左右刻度,使 LNG 和 LNN 在泥岩段重合,根据储层处 LNG 和 LNN 分离程度判断含油性,图 2 是根据大量经过试油投产验证过的不同水淹程度储层数据制作的 (LNN/LNG) 与有效孔隙度的交会图,从该交会图可以看出,水淹程度越高通常有效孔隙度也增大,可能是储层孔隙受到注入水冲刷所致;水淹程度越高, (LNN/LNG) 越小,分析原因是储层水淹程度造成 LNG 和 LNN 降低的程度不一样,水

淹程度越高, LNN 降低比 LNG 降低的越显著,所以 (LNN/LNG) 越小。

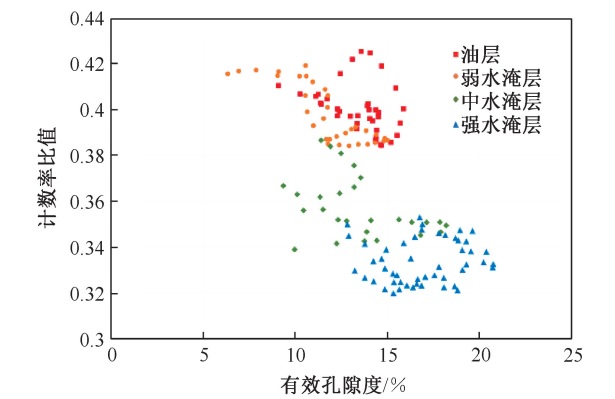


图 2 (LNN/LNG) -有效孔隙度交会图
Fig.2 crossplot of (LNN/LNG) and QEP

根据四中子饱和度测井资料解释计算的泥质含量、孔隙度、含油饱和度制作了水淹级别划分图版(见图 3)和划分标准(见表 2)。

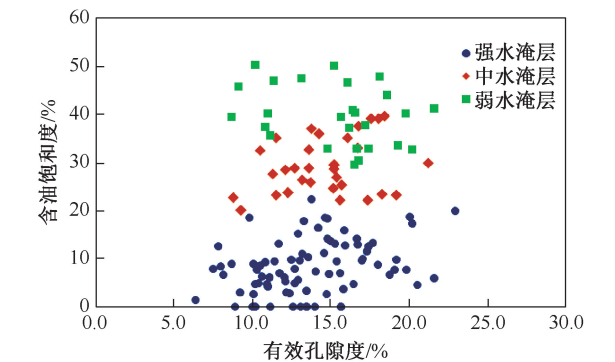


图 3 四中子饱和度测井资料识别水淹层图版
Fig.3 Identification plate of water flooded layer using Quad Neutron data

表 2 四中子饱和度测井资料划分水淹层标准
Table 2 Classification criteria of water flooded layer using Quad Neutron data

类别	孔隙度 /%	含油饱和度 /%	泥质含量 /%
强水淹层	≥ 12	≤ 15	≤ 25
中水淹层	≥ 10	15~30	≤ 30
弱水淹层	≥ 9	≥ 30	≤ 35

3 应用实例

位于 C 区块的 A 井与 3 口注水井相连通,共射开 20 个层,历史上经过数次大套层段卡水、回采均见效不明显,长期高含水、低产油,平均日产液 27 t、日产油 0.3 t,含水率高达 99.3%。重新梳理生产历史后,以沉积微相特征研究为基础,以油藏单元理论为指导,评价该井所有小层所在砂体

的潜力,初步判断该井部分射开层水淹程度较高,剩余油主要集中在砂体边角未受水驱波及范围内,以及因层间物性差异造成开采不均衡而形成的剩余油富集区。

油层水淹后,物性、含油性、电性等都会发生一定程度的变化,单靠完井裸眼测井资料很难准确掌握目前的剩余油分布,同时一口油井受多口注水井注水影响,仅分析动态见效关系也很难判断到底是哪口井造成水淹。为分析该井剩余油状况,为下步储层改造措施提供依据,进行了四中子饱和度测井。

四中子饱和度测井资料解释评价表明:18 号层(2 112.0~2 114.6 m)的平均有效孔隙度 19.7%,*QTP* 与 *QL* 包络存在含油显示,含油饱和度 28.1%,存在剩余油潜力,解释为中水淹层;26 号层(2 254.6~2 258.2 m)是已射孔生产层,该层有效孔隙度 21.2%,*QTP* 与 *QL* 包络存在含油显示,含油饱和度 32.5%,存在剩余油潜力,解释为中水淹层;31 号层(2 363.0~2 364.8 m)有效孔隙度 13.5%,物性较差,*QTP* 与 *QL* 包络有含油显示,含油饱和度 21.2%,解释为差油层;32 号层(2 372.2~2 374.4 m)有效孔隙度 21.1%,物性较好,*QTP* 与 *QL* 包络有含油显示,含油饱和度 26.5%,解释为油水同层;52 号层(2 597.8~2 602.6 m)是已射孔生产层,有效孔隙度 20.3%,*QTP* 与 *QL* 包络有含油显示,含油饱和度 28.5%,存在剩余油潜力,解释为中水淹层;53 号层(2 613.0~2 615.0 m)有效孔隙度 21.4%,*QTP* 与 *QL* 包络有含油显示,含油饱和度 28.8%,解释为油水同层。应用四中子饱和度测井解释评价各储层的水淹、剩余油情况,表明该井潜力层、潜力待落实层、无潜力层分散交互,如实施卡堵水,工序复杂且增油风险大。结合各生产层岩性、电性、物性、历史出油情况、水驱动用情况的综合分析,将该井按物性和水淹程度分为四段,图 4 是 A 井分采方案示意图,表 3 是 A 井分采层段划分表。

通过前期动静态分析和四中子饱和度测井结果相结合,认为该井层间干扰严重,但前期大套层卡水、回采并没有认清到底哪些层出水。经过对该井各生产层电性、物性、历史出油情况、水驱动用情况的综合分析,将该井按物性和水淹程度分为四段生产,初步判断主力出油层段为Ⅱ、Ⅳ段。分采开井后,经前期逐段生产认识,认为Ⅰ、Ⅲ段已高含水,剩余潜力较小,Ⅱ、Ⅳ段仍有较大剩余潜力。在

Ⅱ、Ⅳ段合采时,初期日增油 7 t,后期日增油稳定在 4 t 左右。表 4 是 A 井分采结果数据表。

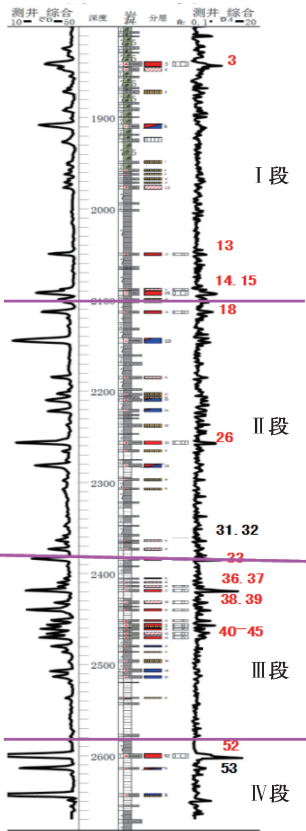


图 4 A 井分采方案示意图

Fig. 4 zonal production scheme diagram of well A

表 3 A 井分采层段划分表				
Table 3 Zonal production layer division table of well A				
层号	地质认识	四中子饱和度测井结论	综合评价	分段
3	无潜力	强水淹层	无潜力	Ⅰ段
13	无潜力	强水淹层		
14	无潜力	中水淹层		
15	无潜力	中水淹层		
18	有潜力	中水淹层	有潜力	Ⅱ段
26	有潜力	中水淹层		
31	未动用	差油层		
32	未动用	油水同层		
33	有潜力	强水淹层	需认识	Ⅲ段
36	不落实	强水淹层		
37	不落实	干层		
38	无潜力	干层		
39	无潜力	强水淹层		
40	不落实	强水淹层		
41	不落实	强水淹层		
43	不落实	强水淹层		
44	不落实	干层	有潜力	Ⅳ段
45	不落实	干层		
52	有潜力	中水淹层		
53	未动用	油水同层		

表 4 A 井分采结果数据表
Table 4 Zonal production result data table of well A

分采程序	分采安排				日产液/t	日产油/t	含水率/%	分采结论
	生产段	关闭段						
1	补孔 31、32、53 号层,生产Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ段	Ⅰ段	22.3	0.2	99	含油水层,多层段合采,认识不清。		
2	Ⅲ段	Ⅰ、Ⅱ、Ⅳ段	14.4	0.15	99	含油水层,强水淹,无潜力。		
3	Ⅱ、Ⅳ段	Ⅰ、Ⅲ段	13.4	4.5	67	油水同层,有潜力。		
4	Ⅱ段	Ⅰ、Ⅲ、Ⅳ段	10.4	3.1	70.6	油水同层,有潜力。		
5	Ⅱ、Ⅳ段	Ⅰ、Ⅲ段	12.7	3.7	70.5	油水同层,有潜力。		

由表 4 可见,说明四中子饱和度测井的解释评价结论是正确的。例如,四中子测井认为Ⅲ段的 33、36、39、40、41、43 号层为强水淹层,37、38、44、45 号层为干层,单独生产Ⅲ段的时候,含水率确实高达 99%;四中子测井认为Ⅱ段的 18、26 号层为中水淹层,未动用的 31 号层是差油层、32 号层是油水同层,所以Ⅱ段有较大的剩余油潜力,单独生产Ⅱ段的时候,含水率确实只有 70.6%;四中子测井认为Ⅱ、Ⅳ段剩余油潜力较大,当关闭Ⅰ、Ⅲ段而仅生产Ⅱ、Ⅳ段的时候,含水率大幅度下降,仅有 67%、70.5%。

4 结论

(1) 中子饱和度测井依靠中子-中子、中子-伽马双物理过程的探测信息,采用叠加的处理方法,减小了环境的影响,能比较准确地获取地层的泥质含量、物性及含油气性等信息。

(2) 在四中子饱和度测井资料的解释评价中,应该密切结合区块的背景信息,使解释模型的选取、参数调整更符合区块实际,从而提高解释符合率。

(3) 四中子饱和度测井在油气田应用的成功案例证明其在套管井的水淹层分析、剩余油评价、指导油井分层采油方面有较好的应用效果,为油气田的开发方案的制定或调整提供可靠依据。

致谢:感谢若克(北京)技术有限公司提供有关技术资料。

参考文献

[1] OLOWOYEYE O I, ANYANWU C, ADEBARI A, et al. Solving formation evaluation challenges using a combination of open and cased hole logging technology [C]// SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition, 2020.

[2] 王贺琳. 复杂结构井的过套管测井技术应用[J]. 石油地球物理勘探, 2006, 41(3): 357-362.

WANG Helin. Application of cased-hole logging technique

in omplex structural well[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2006, 41(3): 357-362.

[3] 王振, 梁国武, 邱飞等. 砂泥岩储层碳氧比测井泥质校正方法[J]. 油气井测试, 2022, 31(4): 23-30.

WANG Zhen, LIANG Guowu, QIU Fei, et al. Shale correction method for C/O logging in sand-shale reservoirs [J]. Well Testing, 2022, 31(4): 23-30.

[4] 李冀秋, 惠志伟, 郑志雄. 注硼中子寿命测井资料的应用[J]. 油气井测试, 2003, 12(4): 30-32.

LI Jiqiu, HUI Zhiwei, ZHENG Zhixiong. The Application of Injecting Boron Neutron Lifetime Logging Data [J]. Well Testing, 2003, 12(4): 30-32.

[5] 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. The reservoir performance monitor and its application [J]. Petroleum Instruments, 2004, 18(2): 43-46.

[6] 胡全发, 李晓宇, 郝身立, 等. RMT 剩余油饱和度测井技术在塔河油田的应用[J]. 石油管材与仪器, 2015, 1(1): 81-83.

HU Quanfa LI Xiaoyu HAO Shenli, et al. Application of RMT Residual Oil Saturation Logging Technology in Tahe Oilfield [J], Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2015, 1(1): 81-83.

[7] 张宗健, 李厚裕, 朱留方. RST 测井在水驱油藏中的应用[J]. 测井技术, 1997, 21(6): 432-435.

ZHANG Zongjian, LI Houyu, ZHU Liufang. Application of RST to Water-flooded Field [J]. Well Logging Technology, 1997, 21(6): 432-435.

[8] 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. Application of PND Well Logging in Carbonate Reservoir in the Tahe Oilfield [J]. West China Petroleum Geosciences, 2006, 2(1): 114-118.

[9] 张予生. 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): 27-31.

ZHANG Yusheng. A New logging technology of as certaining saturation of remained oil [J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2005, 19(3): 27-31.

[10] 张予生, 李康, 刘春辉. 热中子成像测井技术在吐哈油

- 田的应用[J]. 测井技术, 2015, 39(5): 652-655.
- ZHANG Yusheng, LI Kang, LIU Chunhui. et al. On the Applications of TNIS in Tuha Oilfield [J]. Well Logging Technology, 2015, 39(5): 652-655.
- [11] 张洪, 邱金权, 张智峰等. 脉冲中子全谱饱和度测井在青海油田的应用[J]. 测井技术, 2014, 38(5): 627-633. ZHANG Hong, QIU Jinquan, ZHANG Zhifeng, et al. Applications of Pulsed Neutron Full-spectra Saturation Logging in Qinghai Oilfield [J]. Well Logging Technology, 2014, 38(5): 627-633.
- [12] HUGHES M, KRAMER H, RAMLI M N, et al. Successful application of through casing saturation technology to increase oil production in an offshore mature well [R]// IPTC-17903-MS, the International Petroleum Technology Conference, Kuala Lumpur, Malaysia, 10-12 December 2014.
- [13] SALIMOV F L, PLUGIN S, KRAMER H. Successful application of through casing logging technology to increase oil production in a brown field well [R]// SPE-171144-MS, the SPE Russian Oil and Gas Exploration and Production Technical Conference and Exhibition, Moscow, Russia, 14-16 October 2014.
- [14] 林学春, 刘文钰, 袁洪波, 等. 过套管四中子测井新技术在油气田开发中的应用[J]. 测井技术, 2021, 45(2): 185-190. LIN Xuechun, LIU Wenyu, YUAN Hongbo, et al. Application of Quad-Neutron Logging Through Casing Technology in Oil & Gas Field Development [J] Well Logging Technology, 2021, 45(2): 185-190.
- [15] KRAMER H, YAXLEY T, WILLIAMS J. Successful application of horizontal through pipe petrophysical technology to model the Montney formation [R]//SPE Canadian Unconventional Resources Conference, Calgary, Canada, 2014.
- [16] 赵璐阳. 四中子测井在剩余油评价中的应用[J]. 测井技术, 2020, 44(4): 381-386. ZHAO Luyang. Application of quad-neutron logging in residual oil evaluation [J]. Well Logging Technology, 2020, 44(4): 381-386.
- [17] 熊葵, 杨晓东, 陈菲, 等. 华北油田套后饱和度测井技术优选[J]. 测井技术, 2021, 45(3): 260-266. XIONG Kui, YANG Xiaodong, CHEN Fei, et al. Optimization of post casing saturation logging technology in Huabei oilfield [J]. Well Logging Technology, 2021, 45(3): 260-266.
- [18] 刘萍, 周明顺, 高振涛, 等. 四中子饱和度测井在岔河集油田复杂储层的应用 [C]//中国石油学会石油物探专业委员会, 中国地球物理学会勘探地球物理委员会. 2022 年中国石油物探学术年会论文集(下册). 石油地球物理勘探编辑部, 2022: 4.
- [19] 杜双军. 砂砾岩水淹层测井解释与剩余油饱和度评价方法研究 [D]. 长江大学, 2022.
- [20] 王丽, 谭伟, 何胜林, 等. 基于并联导电模型的水淹层剩余油饱和度评价方法 [J]. 大庆石油地质与开发, 2016, 35(2): 134-139. WANG Li, TAN Wei, HE Shenglin, et al. Evaluating method of the remained oil saturation for the water red-out reservoir based on parallel conduction model [J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2016, 35(2): 134-139.

编辑 邵振鹏

第一作者简介:曾磊,男,1985 年出生,本科,工程师,2008 年毕业于重庆工学院测控技术与仪器专业,现主要从事地层测试、测井以及试采等工作。电话:15733661295;Email:zenglei@cnpc.com.cn。通信地址:河北廊坊中国石油集团渤海钻探工程有限公司油气井测试分公司,邮政编码:065000。