

PNNPlus 饱和度测井技术及其应用

周超^{1,*}, 李兵², 陈春宇³, 黄英剑¹, 易晟昊⁴

- (1. 中国石油集团测井有限公司长庆分公司, 西安 710200;
2. 中国石油集团测井有限公司测井技术研究院, 西安 710077;
3. 中国石油长庆油田分公司油气工艺研究院, 西安 710018;
4. 中国石油西南油气田分公司川中北部采气管理处, 遂宁 629000)

摘要:随着油田注水开采进入中后期,含油饱和度动态监测,对于掌握剩余油分布、提高原油采收率具有重要作用。PNNPlus 是一种饱和度测井新技术,在利用中子探头进行热中子寿命测井的基础上,增加两个活化伽马探头,用以辅助判断地层的含水情况,但该技术在低孔低渗储层剩余油饱和度监测方面的适应性尚不明确。为此,本文以鄂尔多斯盆地陇东油田为对象,开展 PNNPlus 饱和度测井技术的研究和适应性分析。结果表明:PNNPlus 测井结果与完井含油饱和度一致,其解释结论可准确评价剩余油饱和度,能够适应陇东油田中-低孔隙储层剩余油饱和度评价;利用 PNNPlus 探测地层中氧含量与宏观俘获截面 Sigma 计算地层含水饱和度,结合含油饱和度、完井测井资料和地质资料可准确识别和划分水淹层;PNNPlus 测井获取的地层孔隙度与完井测井结果偏差为 0.5%,与完井测井解释的油层、水层含油饱和度匹配较好。

关键词:PNNPlus; 饱和度测井; 解释原理; 剩余油分布; 水淹层评价

DOI:10.48014/cpngr.20220821001

引用格式:周超,李兵,陈春宇,等. PNNPlus 饱和度测井技术及其应用[J]. 中国石油天然气研究, 2022, 1(3):32-42.

0 引言

注水开发是向油藏中注水以部分或全部保持油藏能量的一种开发方式^[1],其主要作用是弥补油气开采导致的压力亏空,向地层补偿能量,从而达到稳产高产的目的。但是,在油田注水生产中后期,油井产量会随着含油饱和度的降低而逐渐变化,一般情况下,油、气产量逐渐下降,而含水量逐渐上升。因此,在生产井开展含油饱和度周期性动态监测,分析储层中剩余油含量及其分布特征,对于指导后续开发方案优化、开采措施制定具有十分重要的作用和意义。

通常,油井投产前会下套管固井,并采用射孔

完井方式投产。由于套管的封隔作用,常规裸眼测井方法无法适用于套管井地层参数的测量与评价。为了测量和分析井周剩余油含量,通常采用剩余油饱和度监测方法,从而为油气井生产措施制定提供科学依据。目前,常用的剩余油饱和度监测方法包括过套管地层电阻率测井(FRLTC)、中子寿命测井(NLL)、脉冲中子全谱饱和度测井(PSSL)、碳氧比测井(COR)、脉冲中子-中子测井(PNN)、脉冲中子衰减-能谱测井(PND-S)、宽能域-氯能谱测井(SNGK-SH-SNGK-Cl)、中子成像测井(TNIS)等等^[2-5],除了 FRLTC 测井,其余测井方法均为核测井方式,主要是使用中子发生器发射 14MeV 的高能中子,中子将与地层中各种物质的原子核发生一

* 通讯作者 Corresponding author: 周超, zhouchaosccj@cnpc.com.cn

收稿日期:2022-08-21; 录用日期:2022-09-15; 发表日期:2022-12-28

系列俘获反应,通过不同类型的测井仪器探测中子被俘获后释放的射线或能量,即可实现地层含油饱和度的测量^[6,7]。PNNPlus 饱和度测井是 PNN 测井的升级版,与常用剩余油饱和度测井方法相比,其最大区别是不采用中子俘获伽马射线进行饱和度分析,通过采集地层中尚未被捕捉的热中子并进行分析,得到饱和度的解释结果^[8,9]。PNNPlus 采用热中子检测方法,消除了用于检测伽马存在的本底值偏差,并在低孔隙度和低矿化度地层中有较高的计数率,减少了统计起伏的干扰。同时,PNNPlus 饱和度测井在原有 PNN 测井的功能上,增加了两个活化伽马探头,且有一套特有的资料处理方法,最大限度地消除井眼影响,确保地层俘获截面数据的准确性,在精准评价地层物性和含油性方面具有独到优势^[10-12]。本文旨在介绍 PNNPlus 饱和度测井仪器工作原理、典型工作模式及其主要特点,并将其应用于长庆油田监测剩余油饱和度、判断水淹层和补全完井资料,详细论述了 PNNPlus 饱和度测井的应用案例。

1 PNNPlus 饱和度测井原理

1.1 仪器组成

PNNPlus 饱和度测井仪主要由四部分组成,如图 1 所示,从上到下依次为:通讯+自然伽马短节、中子发生器短节、中子探测器短节、活化伽马探测器短节。(1)通讯短节起到数据传输作用,自然伽马短节用于采集地层的伽马值,可进一步计算地层泥质含量和校正井深;(2)中子发生器短节用于发射快中子;(3)中子探测器短节由 SSN 短源距中子探测器和 LSN 长源距中子探测器组成,主要用于接收快中子与地层碰撞后形成的热中子,用于计算地层孔隙度和含油饱和度;(4)活化伽马探测器短节由近源距伽马探头和远源距伽马探头组成,分别接收能量低于 2MeV 的低能活化伽马射线(地层铝、硅元素的活化伽马射线)和能量高于 2MeV 的高能活化伽马射线(地层氧元素的活化伽马射线),与地层宏观俘获截面 Sigma 结合计算地层含水饱和度。

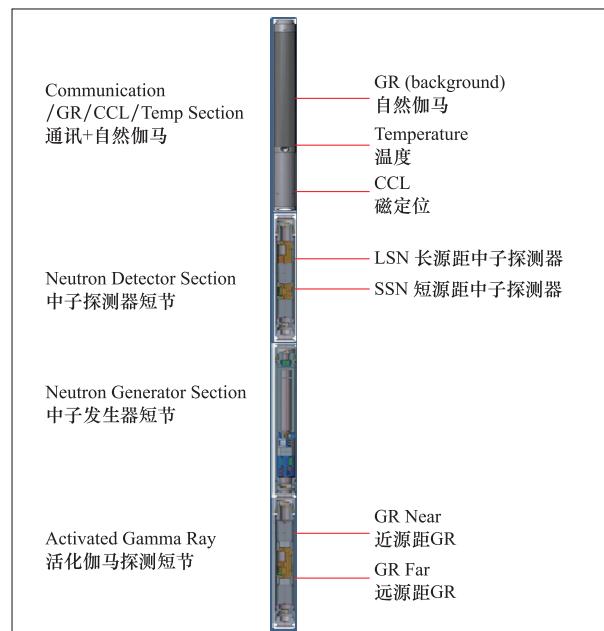


图 1 PNNPlus 仪器结构图

Fig. 1 PNNPlus instrument structure diagram

1.2 仪器技术指标

PNNPlus 饱和度测井仪是 PNN 仪器的升级,在利用中子探头进行热中子寿命测井的基础上,增加两个活化伽马探头,用以辅助判断地层的含水情况,主要解决地层复杂水淹和多套水系的油水识别难题,PNNPlus 仪器性能指标如表 1 所示。

表 1 PNNPlus 仪器性能指标

Table 1 PNNPlus instrument performance indicators

序号	指标名称	指标数值
1	外径	43mm
2	长度	5.465m
3	耐温	175°C
4	耐压	103MPa
5	中子产额	2×10^8 n/s
6	中子脉冲间隔	75ms
7	中子脉冲持续时间	1~3μs
8	中子能量	14.1MeV
9	测速	3~5m/min
10	纵向分辨率	0.2~0.6m
11	径向探测深度	0.4~0.7m(与矿化度和含氢指数有关)

1.3 仪器工作原理

PNNPlus 饱和度测井利用中子发生器发射 14MeV 的高能中子, 中子与地层中各种物质的原子核发生一系列俘获反应, 通过采集地层中尚未被捕捉的热中子并进行分析, 得到饱和度的解释结果。PNNPlus 饱和度测井仪器的工作模式主要包括中子寿命模式、活化模式, 可以测量和评价地层的物性和含油性, 也是 PNNPlus 饱和度测井评价岩性、物性以及含油气性的基础。

1.3.1 中子寿命模式

PNNPlus 饱和度测井仪采用脉冲中子发生器,

向地层发射平均能量为 14.10Mev 的快中子, 快中子与地层中的元素发生碰撞, 能量逐渐减弱, 衰减为能量 0.025ev 的热中子, 直到被地层元素所俘获, 如图 2 所示。PNNPlus 饱和度测井仪器有近、远源距两个热中子探测器, 该测量模式记录短、长源距热中子计数率曲线 SSN、LSN, SSN/LSN 用以辅助判断气层和致密层。调节短、长源距热中子计数率刻度, 使其在泥岩层重合, 气层或致密层中子计数率高值, LSN 与 SSN 会出现包络。快中子减速到热中子的快慢主要与地层的含氢量有关, 热中子矩阵文件记录时间道的前期主要为快中子的热化阶段, 用来反映地层的含氢指数(即孔隙度)。

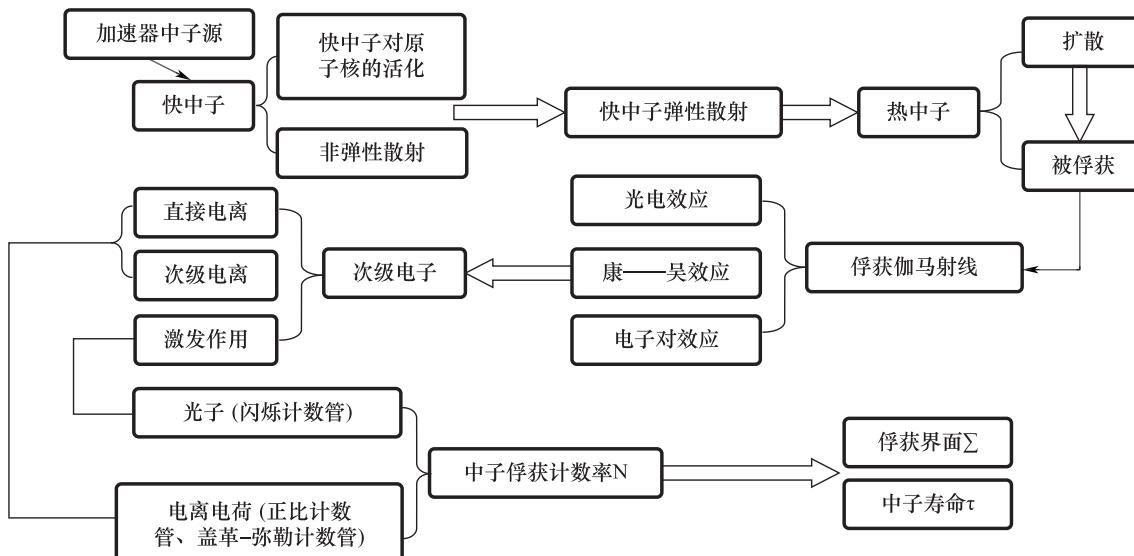


图 2 中子寿命模式工作原理图

Fig. 2 Schematic diagram of neutron lifetime mode

1.3.2 活化模式

快中子与地层中铝元素和硅元素发生活化反应, 发出伽马射线能量低于 2Mev, 氧元素活化伽马射线能量为 6.13Mev, 可被高能活化伽马探测。PNNPlus 饱和度测井仪器有近、远源距两个活化伽马探测器, 每个探测器分别探测低能(能量低于 2Mev)、高能(能量高于 2Mev)活化伽马射线。低能区主要探测地层铝、硅元素的活化伽马射线, 铝元素为地层中泥质代表元素, 硅元素主要为地层中砂岩的代表元素。高能活化伽马主要反映地层的含氧量。

RATGN: 近源距低能伽马与高能伽马的比值;

RATGF: 远源距低能伽马与高能伽马的比值。如地层中含氧(水)量越高, 高能伽马射线的计数率越高, 则 RATGN(F) 值越小; 如地层含油越好, 则 RATGN(F) 值越高。利用低能与高能计数率比主要用于补偿地层中砂岩和泥质中的氧元素, 在均质性较好的储层中比值的大小变化能够直观反映孔隙含水情况, 与宏观俘获截面 SIGMA 结合计算地层含水饱和度。

1.4 与常用饱和度测井的对比

目前, 长庆油田套管井剩余油饱和度测井常用方法包括中子寿命测井(NLL)、脉冲中子全谱饱和度测井(PSSL)、宽能域-氯能谱测井(SNGK-SH-

SNGK-Cl)、脉冲中子-中子测井(PNN)和过套管地层电阻率测井(FRLTC),对比了这些常用方法的测井工作模式、优点和缺点,结果如表 2 所示。与长庆油田常用套管井剩余油饱和度测井方法相比,PNNPlus 饱和度测井具有以下优点:PNNPlus 通过采集地层中尚未被捕捉的热中子并进行分析,消除了用于检测伽马存在的本底值偏差;在低孔

隙度和低矿化度地层中有较高的计数率,减少了统计起伏的干扰;在原有 PNN 测井的功能上,增加了两个活化伽马探头,且有一套独特的处理方法,可以最大限度地消除井眼影响,确保地层俘获截面数据的准确性;而且,该方法施工简单,无须特殊作业准备,可过油管进行测量,仪器操作和维修简单。

表 2 剩余油测井方法对比

Table 2 Comparison of remaining oil logging methods

测试方法	测井模式	优点	缺点	代表性仪器
中子寿命测井 (NLL)	SIGMA	1. 测井费用较低 2. 不受岩性、温度等因素的影响	1. 受地层水矿化度影响较大,需 大于 30000ppm 才有较好的测量 效果 2. 受地层孔隙度影响较大,需要 孔隙度 $> 10\%$	SMJ
脉冲中子全谱 饱和度测井 (PSSL)	SIGMA 与 C/O 双模式	1. 可对地层元素进行测量 2. 是碳氧比和中子寿命测井的综 合应用	1. 测量精度受地层孔隙度影响 较大 2. C/O 模式探测深度较浅	PSSL、PNST、RAS、 RST、RMT、RND
宽能域-氯能谱测井 (SNGK-SH-SNGK-Cl)	SIGMA	1. 可对地层元素进行测量 2. 仪器稳定性好 3. 含油饱和度评价准确 4. 可对地层视密度和孔隙度进行 评价	1. 受地层水矿化度影响较大,矿 化度 20000 ~ 30000mg/L 时油水 性质区分度较低 2. 仪器耐温不足仅 120°C 3. 需要使用中子源	俄罗斯 宽能域-氯 能谱
脉冲中子-中子测井 (PNN)	SIGMA	1. 对孔隙度要求较低 2. 可根据地区图版求解 3. 低矿化度测量效果较好	1. 受地层水矿化度影响较大,需 大于 30000ppm 才有较好的测量 效果 2. 地层水矿化度不宜过高,50000 ~ 100000ppm 为宜	PNNPlus、TNIS
过套管地层电阻率测井 (FRLTC)	电阻率	1. 可定性识别水淹层、定量评价 剩余油饱和度 2. 可采用时间推移法测井,在不 同的时间进行过套管电阻率测井, 来监测储层饱和度的变化	1. 测量要求套管后有水泥,测量 精度固井质量影响较大 2. 需要仪器测量时与套管接触良 好,测量精度受井况影响较大	俄罗斯 ECOS、斯伦 贝谢 CHFR

2 PNNPlus 饱和度测井的应用

2.1 确定剩余油分布

午 * 井位于甘肃省华池县,产层为延 7 组,射孔

井段为 1321.50 ~ 1324.00m,2017 年 6 月 12 日投产,目前产液量为 9.52m³/d,产油量为 0.54t/d,含水量为 93.2%。为评价地层剩余油饱和度分布状况,并为下一步挖潜措施提供指导,对午 * 井进行了 PNNPlus 饱和度测井,结果如图 3 和表 3 所示。

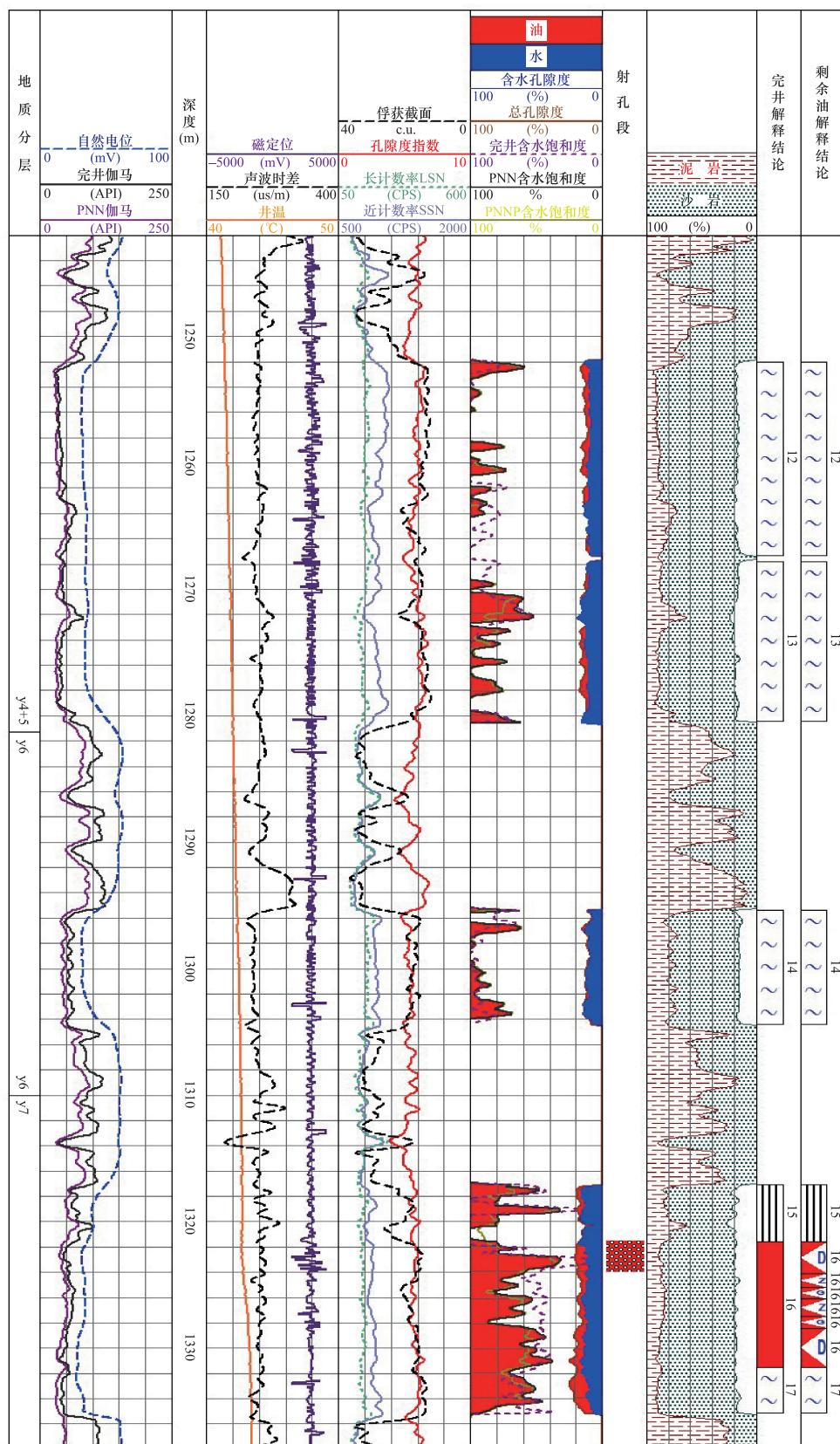


图 3 午 * 井 PNNPlus 测井解释成果图

Fig. 3 PNNPlus logging interpretation results graph of Wu * well

不难发现:(1)第 16₁ 层,该段位于 y7 砂体上部,射孔段位于此层,该层物性好,声波时差值为 255.38μs/m,测井资料显示渗透性较好,录井显示为油斑,俘获截面值为 15.81c. u.,泥质含量较低,完井油饱为 48.52%,PNN 饱和度为 43.13%,PNNPlus 含油饱和度为 40.76%,综合解释该层为低含水。(2)第 16₂ 层,该段位于 y7 砂体中部,该层声波时差值为 248.05μs/m,录井显示为油斑,俘获截面值为 17.48c. u.,完井油饱为 47.86%,PNN 饱和度为 31.34%,PNNPlus 含油饱和度为 30.33%,综合解释该层为中含水。(3)第 16₃ 层,该段位于 y7 砂体中部,该层声波时差值为 254.91μs/m,测井资料显示渗透性较好,录井显示为油斑,俘获截面值为 20.45c. u.,完井油饱为 51.60%,PNN 饱和度为 28.26%,PNNPlus 含油饱和度为 21.91%,综合解释该层为高含水。(4)第 16₄ 层,该段位于 y7 砂体中部,该层声波时差值为 255.47μs/m,测井资料显示渗透性较好,录井显示为油斑,俘获截面值为

18.29c. u.,完井油饱为 53.64%,PNN 饱和度为 39.19%,PNNPlus 含油饱和度为 36.57%,综合解释该层为中含水。(5)第 16₅ 层,该段位于 y7 砂体中部,该层声波时差值为 254.56μs/m,测井资料显示渗透性较好,录井显示为油斑,俘获截面值为 17.71c. u.,完井油饱为 54.40%,PNN 饱和度为 24.99%,PNNPlus 含油饱和度为 25.16%,综合解释该层为高含水。(6)第 16₆ 层,该段位于 y7 砂体下部,该层声波时差值为 252.02μs/m,测井资料显示渗透性较好,录井显示为油斑,俘获截面值为 15.96c. u.,泥质含量较低,完井油饱为 54.20%,PNN 饱和度为 50.10%,PNNPlus 含油饱和度为 42.68%,综合解释该层为低含水。(7)根据午 * 井 PNNPlus 测井结果显示(图 3 和表 3),该井在非目的层段(非射孔段)附近的 PNNPlus 含油饱和度与完井含油饱和度基本一致,符合度较高。在目的层段(射孔段)附近 PNNPlus 含油饱和度与完井饱和度相比均呈现了一定程度的下降,符合油田开发规律。

表 3 午 * 井 PNNPlus 测井解释成果表

Table 3 PNNPlus logging interpretation results of Wu * well

层号	起始深度 /m	结束深度 /m	厚度 /m	俘获截面 /c. u.	孔隙度 /%	完井含油 饱和度/%	PNN 含油 饱和度/%	PNNPlus 含油 饱和度/%	完井 结论	PNNPlus 结论
12	1252.00	1267.30	15.30	14.62	12.52	5.05	3.19	2.90	水层	水层
13	1267.80	1280.40	12.60	15.12	13.79	11.02	13.37	10.38	水层	水层
14	1295.40	1304.40	9.00	17.48	11.52	8.42	6.61	7.27	水层	水层
15	1317.10	1321.60	4.50	21.20	16.02	21.79	24.72	22.96	干层	干层
16 ₁	1321.60	1324.10	2.50	15.81	19.16	48.52	43.13	40.76	油层	低含水
16 ₂	1324.10	1325.20	1.10	17.48	16.56	47.86	31.34	30.33	油层	中含水
16 ₃	1325.20	1326.10	0.90	20.45	16.32	51.60	28.26	21.91	油层	高含水
16 ₄	1326.10	1327.50	1.40	18.29	17.33	53.64	39.19	36.57	油层	中含水
16 ₅	1327.50	1328.40	0.90	17.71	15.57	54.40	24.99	25.16	油层	高含水
16 ₆	1328.40	1331.50	3.10	15.96	20.33	54.20	50.10	42.68	油层	低含水
17	1331.50	1335.10	3.60	14.45	20.61	37.57	37.87	34.25	水层	水层

2.2 判断水淹层

白 * 井位于华庆油田白 168 区块,目前产层为延 10 组厚砂岩层的油顶,自 2017 年 1 月 1 日投产以来,产油量由最初的 4.79t/d 降至 2.97t/d 左右,含水量由最初的 11.30% 上升至 47.30%,动液面由最初的 936m 下降至 1139m

左右,该井目前处于高产中低含水阶段,需要通过 PNNPlus 饱和度测井对剩余油饱和度和水淹级别进行分析。

PNNPlus 解释重点是通过地层俘获截面 Sigma、计数率曲线比值 RAT、自然伽马 GRPNN、远近源距活化伽马低能高能比值 RATGN(F)确定地层的岩性、物性和含油气性,该井重点层段分析结

果如图 4 和表 4 所示。根据 PNNPlus 饱和度测井结果分析, 不难发现:(1) 15 号层(1542.3~1544.1m): 自然伽马值相对较高, GRPNN 平均为 62API, 计算泥质含量 32%, Sigma 平均为 21c. u., 总体表现为干层特征。(2) 16 号层(1544.1~1551.6m): 原始解释结果为油层, 随着多年开发生产, 目前在深度 1547.5m 处存在油水过渡界面, 该深度下部的含水饱和度明显高于上部;(3) 16-1 号层(1544.1~1547.5m), 自然伽马值相对较低, GRPNN 平均 37API, 计算泥质含量 8%; Sigma 平均为 12c. u.; RATGN 平均 1.99, RATGF 平均 1.90, 计算饱和度 SWPNN 平均 45%, SWPNP 平均 41%, 总体呈现油层特征;(4) 16-2 号层(1547.5~1551.6m), 自然伽马值相对较低, 计算饱和度 SWPNN 平均为 91%, SWPNP 平均为 76%, 总体表现为水层特征。(5) 17 号层(1552.4~1563.6m): 自然伽马值相对较低, 计算饱和度 SWPNN 平均为 91%, SWPNP 平均为 76%, 总体表现为水层特征。(6) 根据白 * 井 PNNPlus 测井结果显示(图 4 和表 4), 该井射孔层段内出现了不同程度的水淹, 其中 16-1 号层含水饱和度为 41.6%, 属于低水淹层; 16-2 号层含水饱和度为 59.8%, 属于中水淹层, 17 号层含水饱和度为 76.1%, 属于高水淹层。

~1551.6m), 自然伽马值相对较低, GRPNN 平均 27API, 计算泥质含量 4%; Sigma 平均为 13c. u.; RATGN 平均 1.90, RATGF 平均 1.93, 计算饱和度 SWPNN 平均 76%, SWPNP 平均 60%, 总体呈现油水同层特征。(5) 17 号层(1552.4~1563.6m): 自然伽马值相对较低, 计算饱和度 SWPNN 平均为 91%, SWPNP 平均为 76%, 总体表现为水层特征。(6) 根据白 * 井 PNNPlus 测井结果显示(图 4 和表 4), 该井射孔层段内出现了不同程度的水淹, 其中 16-1 号层含水饱和度为 41.6%, 属于低水淹层; 16-2 号层含水饱和度为 59.8%, 属于中水淹层, 17 号层含水饱和度为 76.1%, 属于高水淹层。

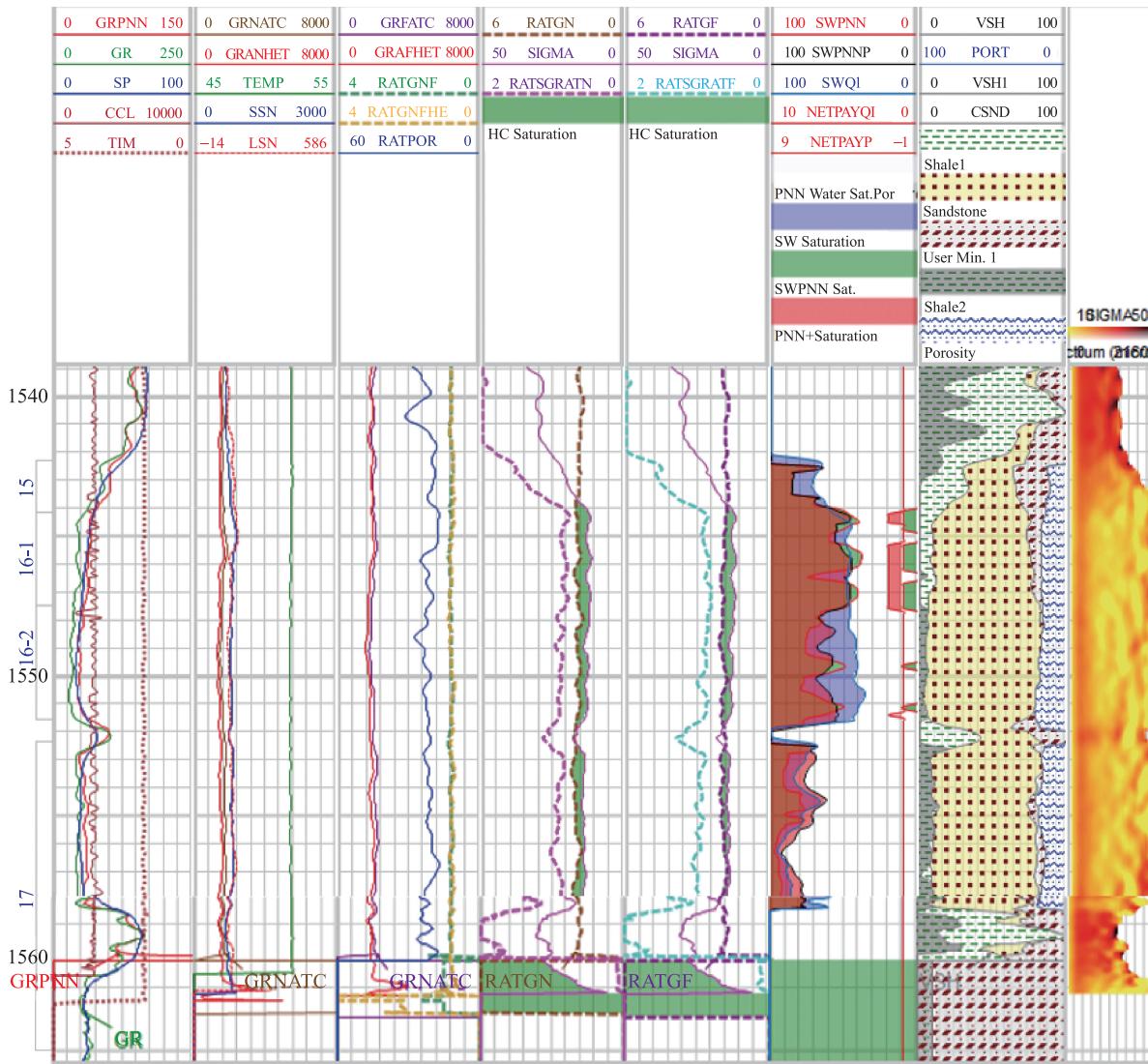


图 4 白 * 井 PNNPlus 测井解释成果图

Fig. 4 PNNPlus logging interpretation results graph of Bai * well

表 4 白 * 井 PNNPlus 测井解释成果表
Table 4 PNNPlus logging interpretation results of Bai * well

层号	顶深 /m	底深 /m	层厚 /m	自然伽马 /API	俘获截面 /c. u.	短源距伽马低能与高能比值	远源距伽马低能与高能比值	泥质含量/%	孔隙度/%	含水饱和度/%	解释结论
15	1542.3	1544.1	1.8	61.7	21.9	1.92	1.93	32.4	11.1	85.2	干层
16-1	1544.1	1551.6	7.5	37.4	11.6	1.99	1.90	8.4	17.3	41.6	油层
16-2	1544.1	1551.6	7.5	27.6	13.4	1.90	1.93	3.8	17.6	59.8	油水同层
17	1552.4	1563.6	11.2	34.6	14.5	1.94	1.81	9.5	17.5	76.1	水层

2.3 补全完井资料

由于井况不好导致裸眼井测井时遇阻等一些特殊原因,一些井未能测全所需的完井资料,在下套管后可进行 PNNPlus 测井,以获得完井所需的资

料,即补全完井资料。郝 * 井位于甘肃省环县,2021 年 9 月 7 日进行完井测井,目的层为延 10 组。2021 年 10 月 10 日对该井进行 PNNPlus 饱和度测井,目的是评价延 10 组低阻油层的含油状况,测井解释结果如表 5、表 6、图 5 所示。

表 5 郝 * 井完井测井解释成果表

Table 5 Completion logging interpretation results of Hao * well

层号 层位	顶深 /m	底深 /m	层厚 /m	电阻率 /Ω · m	声波时差 /(μs/m)	自然电位 /mV	自然伽马 /API	泥质含量 /%	孔隙度 /%	渗透率 /md	含油饱和度 /%	解释结论
44 y10	2028.00	2031.80	3.80	6.25	233.81	-37.37	67.88	21.91	12.73	3.98	49.76	干层
45 y10	2031.80	2036.00	4.20	7.85	222.24	-65.21	34.16	7.46	10.53	2.39	46.20	油层
46 y10	2036.00	2038.00	2.00	7.03	221.37	-66.86	32.53	7.15	10.28	2.33	41.24	油水同层
47 y10	2038.00	2045.80	7.80	5.36	228.83	-61.79	39.09	9.73	11.65	3.40	40.42	水层

表 6 郝 * 井 PNNPLus 饱和度测井解释成果表

Table 6 PNNPlus saturation logging interpretation results of Hao * well

层号 层位	顶深 /m	底深 /m	层厚 /m	短源距计数率/CPS	长源距计数率/CPS	俘获截面 /c. u.	PNNPlus 孔隙度/%	完井含油饱和度/%	PNN 含油饱和度/%	PNNPlus 含油饱和度/%	结论
40 y10	2001.40	2002.40	1.00	881.57	172.49	20.27	1.80	19.12	4.27	3.74	水层
41 y10	2005.30	2009.60	4.30	1010.86	187.59	12.96	12.05	5.79	50.29	49.14	水层
42 y10	2015.10	2017.00	1.90	881.11	174.69	19.15	8.59	18.90	26.77	22.88	水层
43 y10	2018.10	2018.90	0.80	838.20	159.96	21.00	5.30	33.59	12.03	10.98	干层
44 y10	2028.00	2031.80	3.80	925.75	184.35	17.73	6.77	49.84	24.87	23.75	干层
45 y10	2031.80	2036.00	4.20	1170.47	222.54	11.83	11.42	46.68	50.40	50.21	油层
46 y10	2036.00	2038.00	2.00	1182.07	221.46	11.94	10.96	41.29	47.55	47.01	油水同层
47 y10	2038.00	2045.80	7.80	1078.09	194.29	12.96	12.54	40.22	53.16	52.19	水层

该井重点地段 PNNPlus 分析结果如下:(1)第 45 层,位于砂体顶部,自然电位负异常明显,声波时差值 $222.24 \mu\text{s}/\text{m}$, 储层物性较差;伽马相对低值岩性较纯,录井显示为油斑,俘获截面值为 11.83c. u. , 短源距计数率为 1170.47CPS , 长源距计数率为 222.54CPS , PNN 饱和度为 50.40% , PNNP 饱和度为 50.21% , 综合解释该层为油层。(2)第 46 层,本层自

然电位负异常明显,声波时差值 $221.37 \mu\text{s}/\text{m}$, 物性与第 45 层相当;岩性较纯,俘获截面值为 11.94c. u. , 短源距计数率为 1182.07CPS , 长源距计数率为 221.46CPS , PNN 饱和度为 47.55% , PNNP 饱和度为 47.01% , 含油饱和度低于第 45 层,综合解释该层为油水同层。(3)通过表 5 和表 6 对比可知,本井在延 10 目的层(45 和 46 层),PNNPLUS 孔隙度

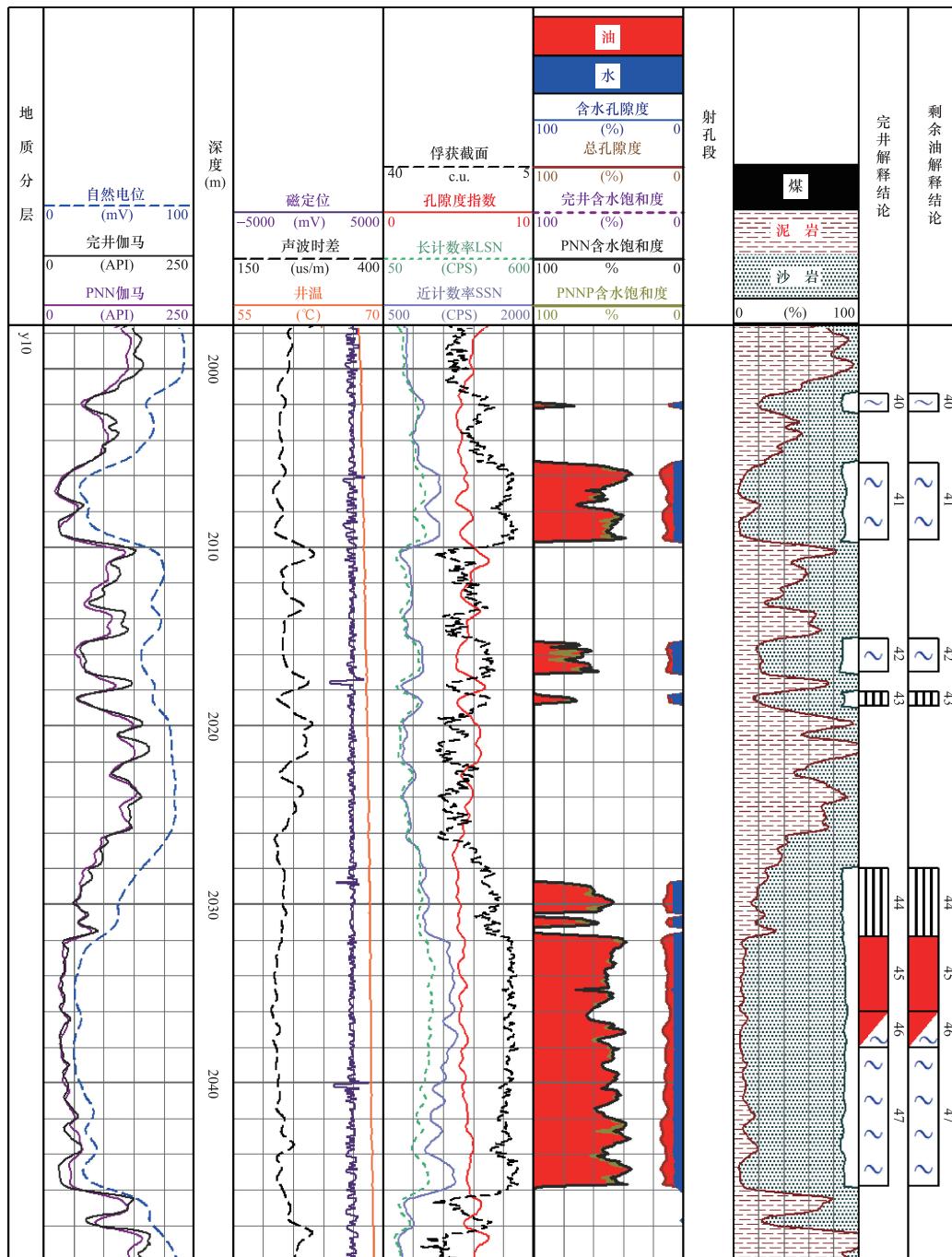


图 5 郝 * 井 PNNPlus 测井解释成果图

Fig. 5 PNNPlus logging interpretation results graph of Hao * well

(45 层孔隙度 11.42%, 46 层孔隙度 10.96%) 与完井孔隙度 (45 层孔隙度 10.53%, 46 层孔隙度 10.28%) 基本一致, 值略高 0.5% (可能由于仪器误差或解释方法差异导致)。(4) PNNPlus 饱和度测井资料求取的含油饱和度 (PNN 含油饱和度、PN-Plus 含油饱和度) 在纵向油水层分异性较好, 与完井求得的油层、水层含油饱和度匹配较好, 依据含

油饱和度可分为水层和油层。

3 结论

(1) PNNPlus 饱和度测井仪是 PNN 仪器的升级, 在利用探测热中子衰减进行热中子寿命测井的基础上, 增加两个活化伽马探头, 用以辅助判断地层的含水情况, 主要解决地层复杂水淹和多套水系

的油水识别难题。PNNPlus 饱和度测井与其他剩余油测井方法相比具有施工简单、无须特殊作业准备、可过油管进行测量、仪器操作和维修简单、消除井眼影响、采集原始数据便于重复计算等多方面优点。

(2) PNNPlus 测井技术适用于长庆油田陇东区域中-低孔隙储层剩余油饱和度评价测井, 可准确识别含油饱和度, 可与现有的剩余油饱和度测井技术形成互补, 完善了长庆油田区块剩余油饱和度测井系列。

(3) 在水淹层评价方面, PNNPlus 测井仪利用活化伽马探测短节对地层中氧含量的探测与地层宏观俘获截面 Sigma 结合计算地层含水饱和度, 并结合 PNNPlus 含油饱和度、完井测井资料、地质资料可对水淹层进行准确识别和水淹级别划分。

(4) 下套管后进行 PNNPlus 测井, 获取的地层孔隙度、含油饱和度等资料, 经与完井资料对比分析证明, PNNPlus 测井所获取的地层孔隙度结果与完井资料差值为 0.5%, 与完井求得的油层、水层含油饱和度匹配较好。在某些特殊原因导致完井资料缺失的情况下, PNNPlus 测井资料可对储层进行综合评价, 为油田勘探开发提供技术支撑。

利益冲突:作者声明无利益冲突。

参考文献(References)

- [1] 王香增, 高涛, 梁全胜, 等. 低渗致密油藏适度温和注水技术研究与矿场实践[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2022, 44(4):62-70.
<https://doi.org/10.11885/j.issn.1674-5086.2022.03.07.02>
- [2] 柴德民, 安振芳, 刘显太, 等. 剩余油饱和度测井方法适应性分析与应用实践——以胜利油区为例[J]. 油气地质与采收率. 2022, 29(3):20-28.
- https://doi.org/10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.202107040
- [3] 王成荣, 刘春辉, 史阳, 等. 脉冲中子全能谱测井技术在吐哈油田应用研究[C]//2021 油气田勘探与开发国际会议论文集(中册), 2021:758-765.
<https://doi.org/10.26914/c.cnkihy.2021.050033>
- [4] 高衍武, 毛晨飞, 赵延静, 等. 基于产水率的水淹层剩余油分布研究[J]. 测井技术, 2021, 45(2):162-167.
<https://doi.org/10.16489/j.issn.1004-1338.2021.02.009>
- [5] 边松伟. 脉冲中子元素谱分析剩余油测试技术研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
<https://doi.org/10.27493/d.cnki.gzdzy.2020.001906>
- [6] 李新民, 宋海滨, 张政. PNT 井内流体时间谱评价方法: CN102536221A[P]. 2012.
- [7] 周涛. PNN 剩余油饱和度测井技术应用研究[J]. 石化技术, 2020, 27(1):125-126.
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-0235.2020.01.074>
- [8] 李扬, 司马立强, 谭学群, 等. 基于地质因素约束的水淹层测井评价方法——以中亚地区孔隙型碳酸盐岩油藏 M 为例[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(1):251-259.
<https://doi.org/10.6038/pg20160128>
- [9] 黄志洁, 李疾翎, 马焕英, 等. PNN 测井解释方法改进及应用[J]. 中国海上油气, 2009, 21(2):95-98.
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-1506.2009.02.005>
- [10] 刘军涛, 张锋, 张泉滢, 等. 低孔隙度储层碳氧比测井灵敏度提高方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(6):57-62.
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5005.2016.06.007>
- [11] 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): 1924-1930.
<https://doi.org/10.3321/j.issn:0001-5733.2007.06.037>
- [12] 惠钢, 王友净, 闫林辉, 等. AS 油田 WY 区特低渗透油藏水淹层评价方法[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2016, 38(6):138-146.
<https://doi.org/10.11885/j.issn.16745086.2014.08.07.02>

PNNPlus Saturation Logging Technology And Its Application

ZHOU Chao^{1,*}, LI Bing², CHEN Chunyu³,
HUANG Yingjian¹, YI Shenghao⁴

(1. Changqing Branch, China National Logging Co., Ltd., Xi'an 710200, China;
2. Logging Technology Research Institute, China National Logging Co., Ltd., Xi'an 710077, China;
3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development,
PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China;
4. Central-North Sichuan Gas Production Management Office,
PetroChina Southwest Oil and Gas Field Company, Suining 629000, China)

Abstract: As oilfield enters middle and late stages of exploitation, the dynamic monitoring of oil saturation has become an essential part for grasping the distribution of remaining oil and improving the crude oil recovery. PNNPlus is a new saturation logging technology that adds two activated gamma probes on the basis of thermal neutron lifetime logging using neutron probes to assist in determining the water content of the reservoir, but its adaptability for residual oil saturation monitoring in low-porosity and low-permeability formation is unclear. Therefore, this paper researches and analyzes the adaptability of PNNPlus saturation logging technology by taking the Longdong Oilfield in the Ordos Basin as the research object. It is shown that: the PNNPlus logging technology is suitable for evaluating the remaining oil saturation of the medium-low porosity reservoir in the Longdong Oilfield as the PNNPlus logging results are consistent with the oil saturation of completed wells and the interpretation conclusions can accurately evaluate the remaining oil saturation; The water saturation of the formation calculated by the oxygen content in the formation as detected by PNNPlus logging tool and the macro-capture cross-section Sigma, combined with the oil saturation, completion logging data, and geological data, can accurately identify and divide water-flooded layers; The formation porosity obtained from PNNPlus logging deviates from that obtained from completion logging by 0.5%, but matches well with the oil saturation of the oil layer and water layer obtained from completion logging.

Keywords: PNNPlus; saturation logging; interpretation principle; remaining oil distribution; water-flooded layer evaluation

DOI: 10.48014/cpngr.20220821001

Citation: ZHOU Chao, LI Bing, CHEN Chunyu, et al. PNNPlus saturation logging technology and its application [J]. Chinese Petroleum and Natural Gas Research, 2022, 1(3):32-42.

Copyright © 2022 by author(s) and Science Footprint Press Co., Limited. This article is open accessed under the CC-BY License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

