

过套管测井技术在南海西部油田油气藏综合评价中的应用

孙殿强¹, 陈 鸣¹, 秦 瑞², 谢献辉², 王 锋², 陈铭泉²

(1. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东 湛江 524057;

2. 中海油能源发展股份有限公司工程技术湛江分公司, 广东 湛江 524057)

摘要: 过套管测井是指在探井或开发井已经下入套管固井后的井段进行套管内测井作业,并在此基础上进行油气层识别、储层物性评价、水淹层评价等研究。早期,过套管测井主要应用在开发测井中进行油藏动态监测、剩余油分布监测、井区水驱效果、水淹层分析等方面,其方便实用的特点使其在油田生产中得到广泛应用。近些年,由于大斜度井、水平井、高温高压等高风险复杂结构井逐渐增多,裸眼测井面临无法录取资料的风险。为了降低测井作业事故发生概率,取全测井资料,缩短作业周期,可以利用过套管测井代替原有的裸眼测井。但对于过套管测井,由于套管的隔离作用以及井眼和地层等影响因素,相较于裸眼测井其探测范围更小,油气藏评价结果存在疑问。通过对过套管电阻率、中子、密度测井原理进行分析,厘清过套管测井响应的影响因素并进行相应的校正处理,结合同井眼裸眼随钻测井以及邻井同层位测井资料对比,验证了过套管测井资料的可靠性。在此基础上再进行油气藏综合解释,有效解决了过套管测井评价技术的难点。

关键词: 过套管测井; 测井响应; 影响因素校正; 油气藏综合评价

中图分类号: TE19 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)03-0241-08

过套管测井技术自 20 世纪三四十年代被提出以来,在油气勘探与开发中有着重要的意义。由于金属套管对感应类电测井的屏蔽作用以及其对电极类电测井电流的导电影响,金属套管井中难以进行常规电阻率测井工作^[1]。1939 年,苏联科学家 Alpin 最早提出过套管测井的概念。后来经过 50 多年的发展,美国地球物理学家 Kaufman^[2]在研究过套管测量地层电阻率时通过分析套管井中直流电产生的电场,并对电场进行分区和研究,提出了传输线方程近似理论。目前过套管电阻率测井技术发展日益成熟,尤其在评价油藏流体饱和度、识别油水层以及水淹层评价等方面成为应用最有效的测井方法^[3]。国外自 20 世纪 90 年代开始陆续开展了套管井中密度测井响应研究,相继克服了套管壁厚以及水泥环等对测量的影响。近年,蔡山清^[4]对过套管高分辨力密度测井开展数值模拟,在薄层识别上取得一定成果。套管井脉冲中子测井仪通过测量中子与地层中核反应释放的伽马射线

或剩余中子,目前斯伦贝谢公司最新研制的脉冲中子测井仪 Pulsar 除用于套管井剩余油气评价外还可用于裸眼井元素分析及孔隙度测量^[5]。此外过套管四中子测井技术利用中子-中子、中子-伽马双物理过程获得 4 条计数率曲线,通过叠加算法可对地层的泥质含量和含油气性等参数进行计算^[6]。

早期,过套管测井主要是应用在开发测井中进行油藏动态监测、剩余油分布监测、井区水驱效果和水淹层分析等方面^[7-8]。近些年,由于大斜度井、水平井、高温高压等高风险复杂结构探井逐渐增多,很多井无法在裸眼环境下取得满意的测井评价资料。为了降低测井作业事故发生概率,缩短测井作业时间,复杂情况下过套管测井代替裸眼测井的次数逐渐增多。过套管测井也从单一的过套管电阻率测井逐渐拓展到过套管的 中子、密度等测井技术,丰富了过套管测井资料,通过在南海西部油田应用过套管测井技术,并对相关资料进行校正处理,验证了过套管测井资料的可靠性,解决了复杂

收稿日期: 2023-08-17

作者简介: 孙殿强(1989—),男,安徽滁州人,工程师,硕士,研究方向为石油勘探测井作业及测井综合评价;陈鸣(1982—),男,四川成都人,高级工程师,硕士,研究方向为测井作业管理及技术;秦瑞(1990—),男,湖北十堰人,中级工程师,研究方向为现场测井监督;谢献辉(1995—),男,广东茂名,工程师,研究方向为现场测井监督;王锋(1991—),男,甘肃平凉人,中级工程师,研究方向为现场测井监督;陈铭泉(1998—),男,河南信阳人,工程师,研究方向为测井现场作业及综合评价。

井况条件下测井资料无法获取的难题,同时节省了作业周期,为海上油气藏的综合评价提供了新的思路。

1 过套管测井原理

裸眼测井发生在固井作业之前,井下仪器可直接与地层接触,而过套管测井作业发生在固井作业之后,仪器与地层被套管隔离开^[9]。其中过套管电阻率测井是过套管测井的重难点,过套管中子、密度、声波等为有力补充,通过过套管电阻率测井可以评价储层的含油气性及含油饱和度等信息,过套管中子、密度、声波等可以用来评价储层的孔渗物性参数,结合二者可以对储层进行油气层综合评价^[10]。以下对过套管电阻率、中子、密度测井原理进行阐述。

1.1 过套管电阻率测井(SFRT)

过套管测井的原理与传统裸眼测井中侧向测井的原理类似,以斯伦贝谢测井公司的过套管电阻率测井(SFRT)仪器为例,仪器结构示意图如图 1 所示。相较于裸眼测井,过套管电阻率测井的难点主要在于套管是导电的,因此在测井过程中大部分电流并不能进入到地层带回有用的地层电性信息,只有很小一部分电流能够通过地层返回到回路电极^[11-13]。利用欧姆定律,通过分析这部分携带相关地层信息电流的电压和电流强度得出地层电阻率:

$$R = K \left(\frac{\Delta U}{I} \right) \quad (1)$$

式中: R 为地层电阻率, $\Omega \cdot m$; ΔU 为漏失地层中的电压, V ; I 为漏失地层中的电流强度, A ; K 为仪器常数,取决于仪器的几何因素、套管的几何形状、电流回路位置、地层倾向及参考电极的位置,由于测量的局限性,可以利用裸眼井深探测电阻率来确定 K 。

SFRT 采用点测测量方式而非连续深度的测量,测井时需要完成两个步骤:即测量阶段和刻度阶段,如图 2 所示。第 1 步,通过推靠臂使仪器的测量电极紧贴套管壁,此时发射电极发出低频交流电

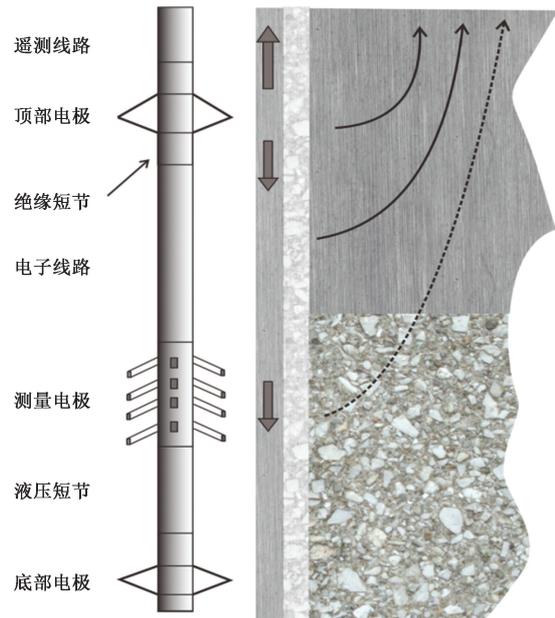
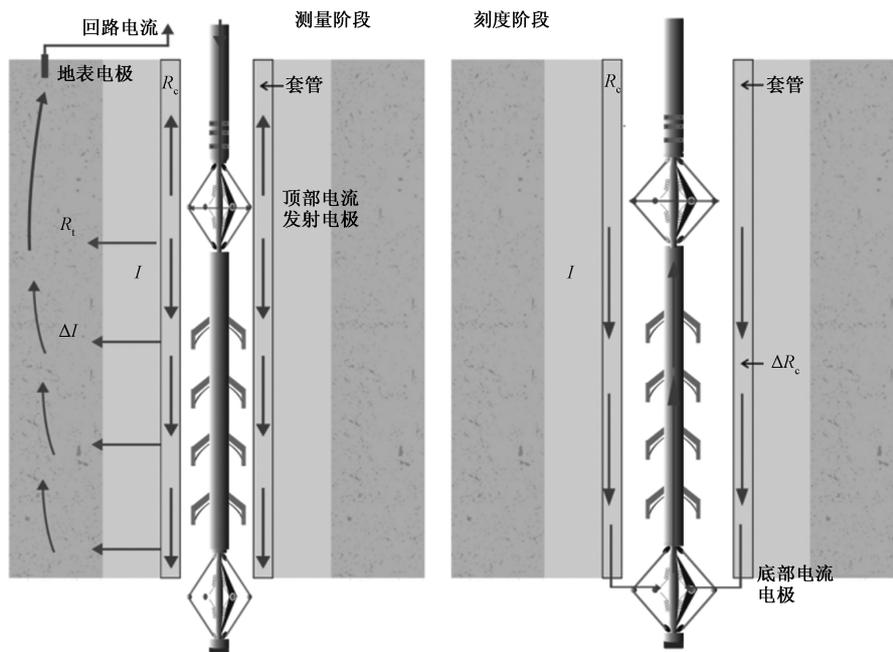


图 1 过套管电阻率测井(SFRT)仪器结构示意图



R_c 、 ΔR_c 、 R_t 、 ΔI 分别为套管电阻率、套管电阻率差值、地层电阻率以及电流差值

图 2 过套管电阻率测井(SFRT)仪器测量原理示意图

流,少部分电流会通过地层后携带地层相关电性信息再返回地面接收电极^[14]。第2步为校准阶段,这一阶段主要记录和接收沿着套管流动至仪器底部的电流^[15]。

1.2 过套管中子测井(APS)

新一代 APS 中子孔隙度测井仪相比于常规补偿中子测井仪提高了中子产额,增加了探测器数量,采用背屏蔽设计和阵列中子探头,能适用于裸眼井和套管井。仪器结构示意图如图3所示。对于常规的中子和岩性密度测井而言,为了减小泥浆等因素对测量结果的影响,在测井过程中仪器需要紧贴井壁,因此当井眼不规则时资料质量将受到很大的影响,严重时甚至无法获取到相应资料^[16-17]。而新一代 APS 中子孔隙度测井仪设计有一个电子脉冲中子源和5个中子探测器,其子脉冲中子源在一个周期里分为快和慢两部分工作方式:快工作方式用于进行测量超热中子时间谱,慢工作方式用来测量热中子时间谱。5个中子探测器分别为近超热中子探测器、远超热中子探测器以及阵列中子探测器(其中包含2个近超热中子探测器和1个远超热中子探测器)。由于中子发生器会影响探测结果,在仪器探测时远超热中子探测器以及阵列中子探测器通过屏蔽的方式降低不良影响因素对探测结果的影响。此外为了降低井眼泥浆等井眼环境因素对资料质量的影响,仪器设计有不同源距的探测器,各个探测器的计数率之比也可用于对气水层的定性识别^[18-19]。

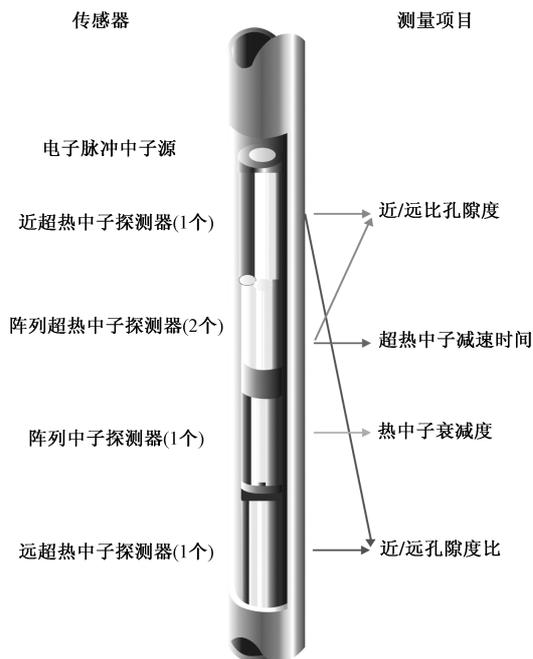


图3 过套管中子测井 APS 仪器结构示意图

1.3 过套管密度测井(CHFD)

密度测井是基于康普顿散射原理,利用仪器的伽马源发射伽马射线,这些伽马射线进入地层后,通过仪器上的伽马探测器接收散射回来的伽马射线,一般介质密度越大,发生康普顿散射的概率就越高,然后通过谱分析的方法对伽马探测器中产生的光电效应和康普顿效应进行计数,最终确定岩石光电吸收指数 PE 和岩石体积密度^[20]。

相较于裸眼井的密度测井,套管井中套管和水泥对仪器密度测量的影响与裸眼井中泥饼的作用类似,通过大量的试验数据分析和套管井测试可以消除对测量资料质量产生的不良影响,进而计算得到相对可靠的地层密度^[21]。实验表明,套管和水泥主要吸收低能量的光子,其厚度同时影响不同源距低能窗口的光子计数率,使得低能窗口计数率大大减小。若井眼存在扩径导致水泥环厚度增大,套管和水泥厚度大于 1.75 in(1 in=2.54 cm),则 CHFD 探头很可能测量不到地层信号。除此之外,由于探测深度的局限性,套管井中岩石光电吸收截面指数 PE 的测量基本无效。为解决以上测量问题,CHFD 测量仪使用快测平台组合电缆测井 PEX 中的三探测器岩性密度工具(TLD),如图4所示,只使用高能窗口的计数率,同时根据实际井眼、套管及水泥环情况调整测量速度,使伽马射线与地层有足够的响应时间,提高计数统计精度,保证测量结果的准确性。

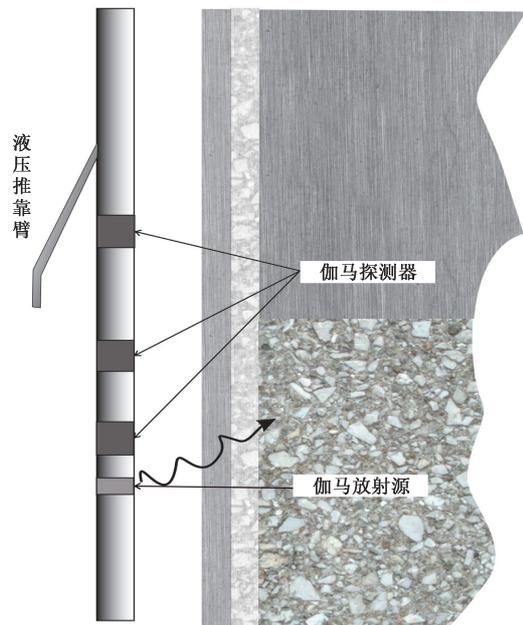


图4 过套管密度测井 CHFD 仪器结构示意图

2 过套管测井资料校正方法

理论分析表明,过套管测井受诸多环境因素的影响,主要源于3个方面:①套管因素,主要包括结蜡、污垢、套管变形、套管腐蚀、套管接箍等因素的影响;②固井质量因素,主要包括水泥环、胶结质量、窜槽等因素影响;③仪器刻度系数^[9-12]。当这些环境因素的影响较大时需要对其测井资料进行相应的校正。过套管测井环境影响校正主要是结合裸眼井资料来进行质控。过套管电阻率测井可以通过校准阶段测量套管和水泥环的电阻率贡献,利用改进的传输线方程法对不同条件地层模型进行数值模拟,对套管、水泥环等环境影响因素加以校正。APS测井对中子发生器、探测器数量、探测器源距以及屏蔽设计等方面的改进和调整,使资料质量得到了提升,也保证了识别气层的可靠性。CHFD测井通过对不同源距探测器的计数率以及地层密度的脊-肋线关系进行分析验证,从而可在套管井中利用TLD测量得到的计数率处理得到地层密度,使资料质量可靠性得到提升。

3 过套管测井资料综合解释与评价

3.1 过套管测井作业背景

WZ12油田位于南海北部北部湾海域,构造上处于南海北部湾盆地涠西南凹陷东南斜坡上,为始新世末期形成的断块构造,主要含油层系为流沙港组一段、流沙港组二段。本次过套管测井技术研究即以该油田其中一口定向采油井A井作为研究对象,利用过套管电阻率、中子、密度资料对本井目的层段的含油气性及物性进行定量评价,为后期开发方案的制定提供依据。

A井为一口开发评价井,设计在目的层段进行LWD(随钻测井),但钻井过程中多次发生井漏等复杂情况,215.9 mm井段钻水泥塞时即发生井漏,后续钻进过程中一直有不同程度的漏失,后通过添加堵漏材料、降低排量等措施勉强维持安全钻进,但随钻测井工具在低排量下无法正常启动,考虑作业风险更换常规钻具钻进至完钻井深,未能取得目的层的常规随钻测井资料。完钻后尝试进行裸眼电缆测井取资料,但由于井况较差(井斜较大,仪器频繁阻卡),未能成功实施裸眼电缆测井;考虑钻杆传输测井作业占井口、耗时长且风险大,未进行尝试。若继续进行裸眼测井作业存在仪器遇卡打捞的风险。为了节省工期、降低作业成本、减少井眼暴露时间、避免井况进一步恶化,通过论证决定先进行下套管固井作业,然后进行

套内固井质量评价,在此基础上再进行套管内电阻率、中子、密度资料的采集,通过对采集的资料进行分析获得地层含油性、物性等各项评价参数,进而对储层进行评价,为后续的完井射孔作业和储量评估提供依据。

3.2 过套管测井资料油气层评价

A井在井漏发生之前在裸眼段采集到一部分随钻测井资料,后因井况复杂直接下入套管井进行了固井质量测井,固井质量评价结果表明目的层段固井质量优良,如图5所示,这为后续过套管测井提供了良好的环境基础。

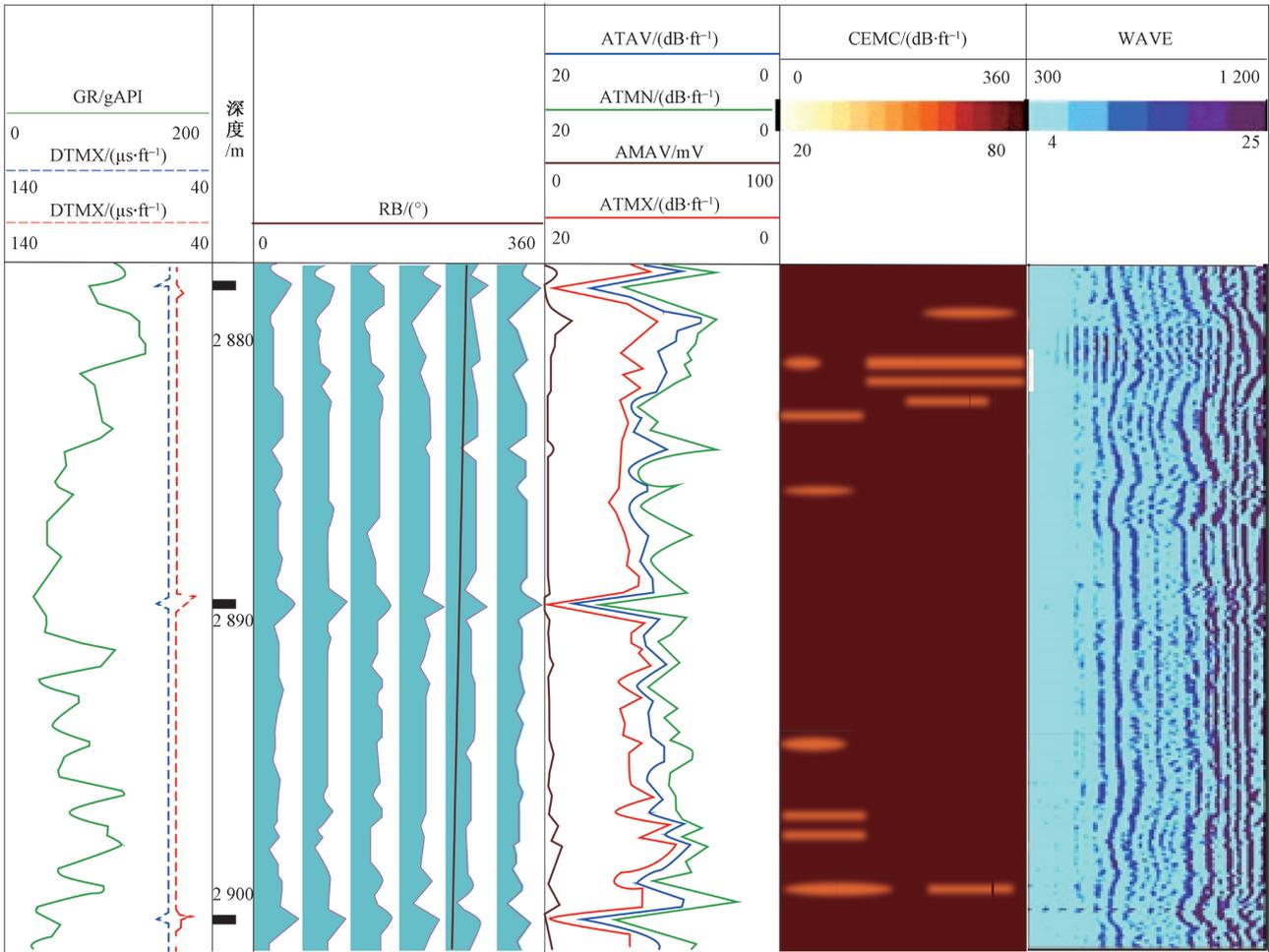
在此基础上,首先对同一井段进行过套管重复测量和时间推移测量,并将其与井漏前该裸眼段采集的随钻电阻率曲线进行对比发现二者电阻率曲线特征一致,地层电阻率测量值基本重合,相应各条曲线一致性较好,如图6所示。与此同时,将过套管测井资料与邻井B井资料进行了统计对比,如图7所示,通过直方图可以看出与邻井相比,曲线值域基本一致,由此可见过套管测井资料的可信度较高,同样能够反映储层的物性和含油性。

在上述质控基础上,利用过套管测井资料对本井显示层段进行了解释评价,为后续完井优化和剩余油挖潜提供了依据,如图8所示。其中,层段2 890~2 900 m,从套管井中子密度测量上可以清晰地识别出低阻薄储层,层段2 788~2 790 m过套管测井资料证实了此段是泥质含量较高、渗透率较低的低渗油层,在油田进入高含水阶段时,这些低渗储层的剩余油将是油田挖潜的主要对象之一。层段2 793~2 794 m,伽玛相对较低,电阻率较高,从过套管密度和中子响应看出该井段致密夹层的存在,在油藏开发生产上将形成一定的隔挡,完井作业和剩余油评价研究时应予以注意。

4 结论

(1)过套管测井技术的成功应用,表明在固井质量合格的情况下,过套管测井资料可以用来进行油气层评价,满足油藏开发评价的相关需求;但由于探测深度的局限性,井眼条件和固井质量结果的好坏对其影响较大,当井眼环境或固井质量较差时难以测得地层有效密度。

(2)相较于传统裸眼测井,过套管测井的优势在于面对复杂井况时减少了井况的处理时间,避免了长时间浸泡后井眼条件的进一步恶化,大大降低了作业风险。



GR为自然伽马曲线;DTMX为最大声波时差;DTMN为最小声波时差;RB为旋转角度;ATAV为平均衰减率;ATMN为最小衰减率;ATMX为最大衰减率;AMAV为平均衰减幅度;CEMC为声波变密度图;WAVE为声波波形图

图5 A井固井质量测井图

(3)海上测井作业成本高,过套管测井不占用井口,测井作业和其他作业可以同时进行,大大降低了作业成本,除此之外在今后的测井作业中,面对特殊情况时过套管测井也是一个新的可行方案。

参考文献

- [1] 王国庆, 郭文广, 陈文武. 过套管电阻率测井数据处理及其在油气层评价中的应用[J]. 测井技术, 2007, 31(4): 335-341.
- [2] KAUFMAN A A. The electrical field in a borehole with a casing[J]. Geophysics, 1990, 55(1): 29-38.
- [3] 张凤歧. 过套管电阻率测井在大庆油田剩余油监测上的应用分析[J]. 国外测井技术, 2013(6): 47-49.
- [4] 蔡山清. 高分辨率密度测井响应特征与套管井多参数评价方法研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2022.
- [5] 王振, 周清. 套管井脉冲中子测井仪发展综述[J]. 测井技术, 2020, 44(5): 432-437.
- [6] 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.
- [7] 牟立伟. 过套管地层电阻率测井在油气勘探开发中的应用[C]//2020 油气田勘探与开发国际会议论文集. 成都: 西安石油大学, 成都理工大学, 陕西省石油学会, 2020: 7.
- [8] 程希, 何三字, 党海龙, 等. 过套管电阻率测井响应分析[J]. 石油仪器, 2007(5): 60-62.
- [9] 孙铭璐. 过套管电阻率测井技术的开发与应用[J]. 通信电源技术, 2013, 30(2): 61-62.
- [10] 吴银川, 张家田, 严正国. 过套管地层电阻率测井技术综述[J]. 石油仪器, 2006, 20(5): 1-5.
- [11] 岳喜洲. 过套管电阻率测井解释方法研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2009.
- [12] 王贺林. 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(3): 357-362.
- [13] 张凤歧. 过套管电阻率测井在中低渗透储层评价中的应用[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(26): 6267-6270.

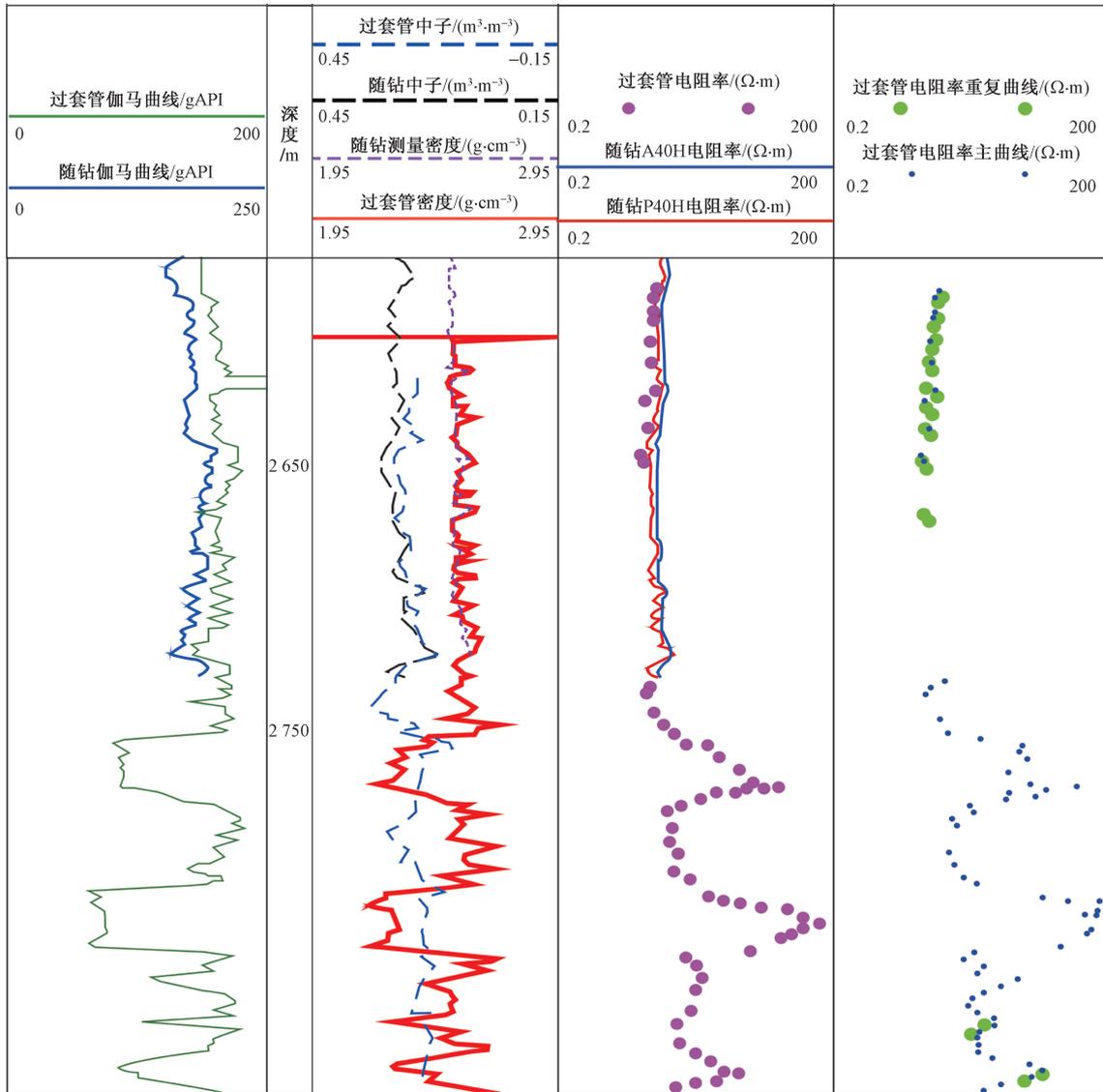


图 6 过套管测井资料质控图

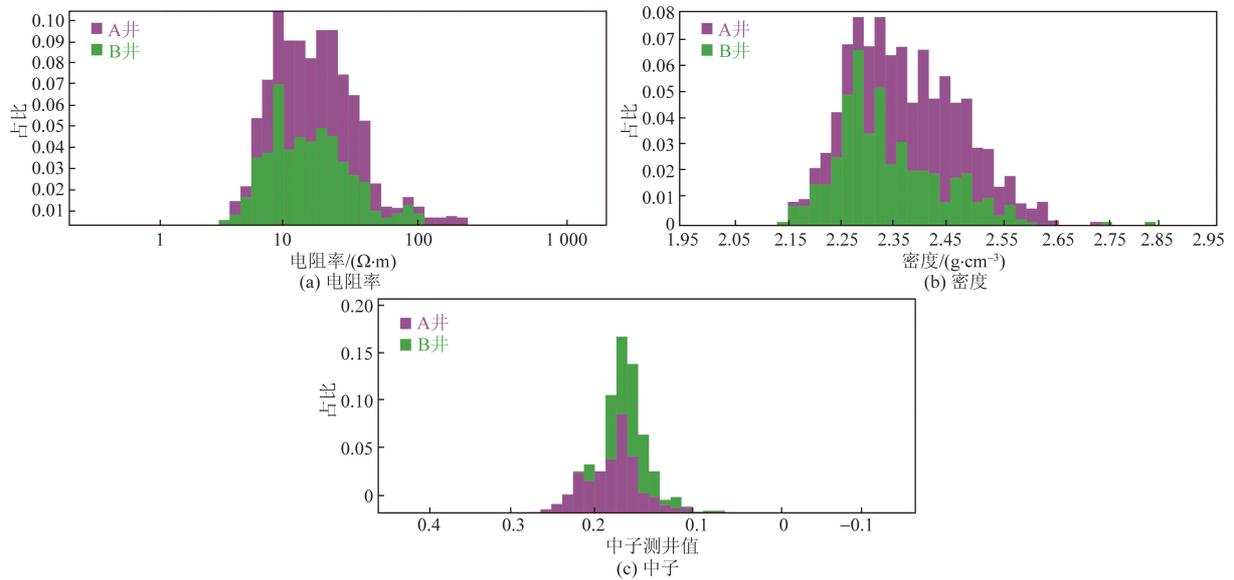


图 7 A 井过套管测井资料与邻井 B 井裸眼段资料对比

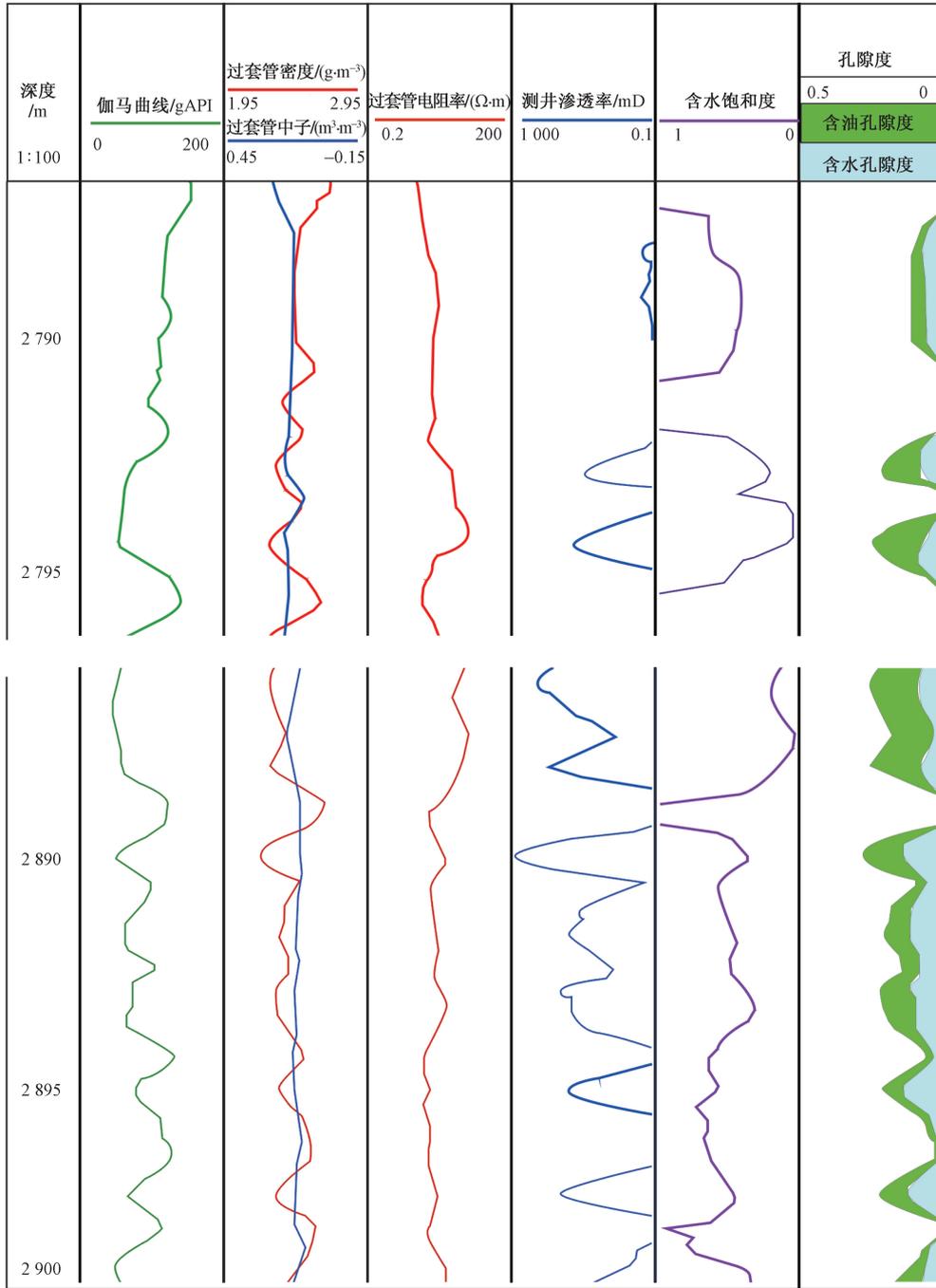


图8 A井过套管测井解释评价

- [14] 耿敏, 梁华庆, 曹旭东, 等. 过套管电阻率测井仪信号调理电路的设计[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(6): 1171-1175.
- [15] 曹军. 套管内测井资料录取技术在渤海油田的应用[J]. 海洋石油, 2018, 38(4): 72-75.
- [16] 王贵清. 过套管补偿中子测井在判断气层中的应用[J]. 测井技术, 2007, 31(5): 452-454.
- [17] 梁乃成. 套后中子测井技术在浅层气识别中的应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2013, 32(3): 131-135.
- [18] 罗利, 孟英峰, 刘向君, 等. 套管井中子测井校正方法研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2008(3): 58-61.
- [19] 祁峰. 高精度脉冲中子剩余油饱和度测井解释方法及应用研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2020.
- [20] 梁云祥. 过套管散射伽马测井的响应机理和数据处理方法研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018.
- [21] 李晓龙, 肖承文, 黄若坤, 等. 三探测器密度测井仪测量套管厚度和水泥环密度[J]. 测井技术, 2017, 41(3): 305-309.

The Application of the Through Casing Logging Technology in Comprehensive Evaluation of Oil and Gas Reservoir in Western South China Sea

SUN Dianqiang¹, CHEN Ming¹, QIN Rui², XIE Xianhui², WANG Feng², CHEN Mingquan²

(1. CNOOC Ltd. -Zhanjiang, Zhanjiang 524057, Guangdong, China;

2. CNOOC Ener Tech-Drilling & Production Co. , Zhanjiang 524057, Guangdong, China)

Abstract: Through casing logging refers to the research on reservoir identification, reservoir physical property evaluation and water-flooded zone evaluation on the basis of the casing well survey in the exploration well or development well after casing cementing. In the early stage, casing-through logging is mainly used in reservoir dynamic monitoring, remaining oil distribution monitoring, well area water flooding effect, water-flooded zone analysis and other aspects in the development logging. Because of its convenient and practical characteristics, it is widely used in oilfield production. In recent years, due to the increasing number of highly deviated wells, horizontal wells, high temperature and high pressure and other high-risk complex structure exploration wells, in order to reduce the probability of logging operations and shorten the logging period, casing-through logging can be used to replace the original open hole logging. It is worth noting that for cased hole logging, due to the isolation of casing and the influence of borehole and formation, the detection range is smaller than that of open hole logging, and the evaluation results of oil and gas reservoirs are in doubt. Through the analysis of the logging principles of casing through resistivity, neutron and density, the influencing factors of casing through logging response are clarified and the corresponding correction processing is carried out. On this basis, the comprehensive interpretation of the reservoir is carried out, which effectively solves the difficulty of casing through logging evaluation technology.

Keywords: through casing logging; logging response; influence factors correction; comprehensive reservoir evaluation