

过套管电阻率测井技术应用与效益分析

吕国英 (胜利油田分公司油藏动态监测中心, 山东 东营 257000)

摘要: 油田开发中后期, 剩余油呈现油水运动规律复杂, 分布零散、控水稳油条件差的特点, 为准确进行剩余油饱和度场评价、制定油田调整开发方案、增产挖潜需要利用剩余油饱和度测井方法, 提供可靠的基础数据及地质依据。剩余油评价测井主要包括过套管电阻率、脉冲中子全谱 PSSL、脉冲中子 PNN、硼中子寿命测井等。但由于核测井技术探测深度浅、对地层水矿化度具有特定要求。过套管电阻率测井实现在钢套管内对套管外电阻率的测量, 探测深度比较大, 井眼、套管、地层非均质性等对测量结果影响较小, 低孔隙度或低矿化度的地层条件下具有明显的测井优势, 对于油气藏动态监测、剩余油饱和度评价和水淹层级别识别具有明显优势, 是剩余油饱和度评价有效广泛的应用方法, 可以对油田开发进行优化、提高采收率、延长油田开采寿命提供强有力的技术支持。该技术已在胜利油田东部油区成功实施 32 井次, 经济效益 2255 万元, 取得了显著的经济效益。

关键词: 过套管电阻率测井; 水淹; 剩余油饱和度评价; 效益分析

0 引言

进入“十四五”以来, 胜利油田共规划低渗透油藏钻井 1253 口, 新增产能 247 万吨, 期末产量达到 403 万吨。围绕评价和指导油藏高质量开发, 需重点拓展攻关应用饱和度测井技术, 构建地层参数全链条评价体系, 让油藏“看得见、摸得着”。胜利油田实施饱和度测井 350 井次/年, 经营收入 2625 万元, 指导措施年增油 2 万吨以上, 为油藏效益开发提供了强有力的支撑。胜利监测目前开展的饱和度测井项目有全谱饱和度测井、PNN 测井、硼中子、过套管电阻率等, 其中过套管电阻率测井因探测深度深、适应范围广、匹配性好等特性获得了开发单位的一致认可。

1 国内外相关产业和技术现状、发展趋势

目前, 国外过套管电阻率仪器主要有两种。一种是斯伦贝谢公司的 CHRF, 在国内开展测井技术服务, 电极采取液压推靠方式, 推靠效率高。另一种是俄罗斯 ECOS31, 在国内有销售, 电极采取皮囊推靠式, 推靠和回收效率均较低。CHRF 和 ECOS31 两种仪器采用不同的数学模型, 经过应用对比, CHRF 测井效率高, ECOS31 测井数据质量优于 CHRF。

国内过套管电阻率仪器的厂家主要有中国石油测井公司、西安思坦公司、北京环鼎公司。中石油测井公司仿制 CHRF, 产品内部自用; 西安思坦公司仿制 ECOS31, 仪器基本达到进口性能; 目前, 油藏动态监测中心使用的为北京环鼎公司开发 XGDC, 其融合 ECOS31 和 CHRF 优点, 采取液压推靠技术和 ECOS31 数学模型, 并在电子线路上加入自然伽马和套管接箍

磁定位信号处理功能。

为了更加高效的进行测井作业、减少占井时间、提高仪器信噪比, 国内外过套管电阻率仪器朝着高效化、高精度化、水平井方向发展。

2 过套管电阻率测井技术的基本原理及仪器结构

2.1 基本原理

当电极系紧贴在套管壁上时, 上下供电电极 A1、A2 交替向套管发射电流时, 绝大部分套管电流沿套管流到地面的回流电极。将钢套管周边地层介质可以视为导电介质, 会有极小部分电流渗漏进入到地层, 再流回到地面回路电极。通过电极 M1、N、M2、U 检测渗漏到地层中的这小部分电流, 计算出地层电阻率。测量的过程中, 保证测量电极同套管接触可靠。

$$\rho_s = K \times \left(\frac{\Delta U(I_{A1}) - \Delta U_{M1}(I_{A1})}{I_{A1}} + \frac{\Delta U(I_{A2}) - \Delta U_{M2}(I_{A2})}{I_{A2}} \right) \times \left(\frac{U_N(I_{A1}) \cdot \Delta U_{M1}(I_{A2}) - U_N(I_{A2}) \cdot \Delta U_{M1}(I_{A1})}{-\Delta U_{M1}(I_{A1}) \cdot \Delta U_{M2}(I_{A2}) + \Delta U_{M2}(I_{A1}) \cdot \Delta U_{M1}(I_{A2})} \right)$$

$U_N(I_{A1})$, $U_N(I_{A2})$ —对应为向电极系的上、下电流电极供电时在中间测量电极同套管接触点套管电场的电位, V;

$\Delta U_{M2M1}(I_{A1})$, $\Delta U_{M2M1}(I_{A2})$ —相应为向电极系的上、下电流电极供电时, 在电极系的两个边部测量电极同套管接触点之间套管部分电场电位的一阶差分, V;

$\Delta^2 U(I_{A1})$, $\Delta^2 U(I_{A2})$ —相应为向电极系的上、下电流电极供电时, 在电极系的所有三个测量电极同套管接触点之间套管部分电场电位的二阶差分, V;

I_{A1} , I_{A2} —在电极系的上、下电流电极同套管接触点供给套管的电流, A;

K—电极系的系数, 为仪器常数, 由仪器本身电极系的几何。

2.2 仪器结构

①探头主要结构包括：上下发射电极、两个测量电极 M1 和 M2、U 电极、N 电极、测量电极处理电路；②线路功能：井下与井上的遥传通讯，发射电极电流发射，测量电极推靠等；③动力单元，用于提供推靠液压动力及压力平衡。

3 过套管电阻率测井资料的解释探究

胜利油田部署加快西部深层建产，实现常规油气快速增储，规划动用储量 648 ~ 660 万吨，年度部署新井 106 ~ 107 口，“十四五”阶段末达到产能 19 万吨/年。为满足油田复杂井储层改造需求，推进超深层油藏评价建产，胜利监测于 2022 年引进过套管测井技术。目前共完成 32 井次，已能定性解释水淹级别，但是对于定性分析还有待进一步探究和学习。定性解释的解释步骤如下：

3.1 打开 WIS、DBF 文件

读入裸眼井 WIS 文件，出现井信息管理窗体后，对于 WIS 内部的数据，可以查看各自不同的数据。支持多个文件同时读入，装入 DBF 文件，出现打开 DBF 文件的对话框，找到需要的 DBF 文件后读入。

3.2 绘图设置

软件读入 WIS 和 DBF 文件后，找到“绘图设置”，在曲线特性选项页里，专门对 WIS 文件的曲线显示设置，包括刻度、线型、曲线的数据源等。在结论特性选项页里，专门对 DBF 文件的曲线显示设置，包括刻度、点显示方式、曲线的数据源等。设置好后，点击确定按钮，软件作图区绘制了需求的曲线。对于同一深度的物性点，从图看出在同一个深度，软件初始选中了一个点进行了连线。

3.3 深度校正

测井曲线的深度校正是过套管电阻率测井数据处理的重要环节。以裸眼井测井资料伽马曲线为基准，把过套管电阻率测井曲线与裸眼井资料深度进行匹配校正。若原始数据和完井电阻率曲线存在深度误差，则通过深度上移、下移、微调上移、微调下移进行深度校正。

3.4 数据选点

进行过套管电阻率测井时，为提高测井数据的准确性，经常在同一深度多次测量以验证仪器工作的准确性，所以在同一深度会有多个测量数据点。胜利监测针对软件不能读入解释软件的缺陷，独立开发数据格式转换软件，将原始数据转换为可以利用的 txt 文件。

利用解释软件“数据选点”模块可以进行实时动态选点，实时改变数据点的显示状态。

3.5 数据插值

过套管电阻率测井采用点测方式测量，为便于后期计算机对测量数据进行处理，需对测量点数据进行插值处理形成连续曲线。在软件中有多种插值方法可以选择，从而得到最优插值结果。

3.6 异常点处理

过套管测井有时受套管接箍的影响较大，特别是在老井中，套管腐蚀严重会影响仪器推靠，从而影响测量数据的准确性，此时可用滤波方法消除。如果测量数据点质量有问题，必须去除这样的数据点，以免给解释工作带来误解。

3.7 水淹程度评价

将处理后的曲线数据导入 watch 平台，使用电阻率曲线及裸眼井测井曲线评价地层水淹程度。

4 过套管电阻率测井资料的应用

过套管电阻率测井资料主要有以下几个方面的应用：

4.1 确定未动用层的含油情况

孤东 7-斜 7013 井为待投新井（未射孔）测试井段 1260-1380 米，共 120 米，与裸眼电阻率资料比对，数据一致性较好。

4.2 验证生产井层段水淹程度、监测储层中剩余油饱和度的变化情况

过套管电阻率测井检查射孔层段含油情况及水淹程度，为采取针对性的措施提供依据，监测储层中剩余油饱和度的变化情况，研究和分析油藏剩余油潜力及其分布形式，为区域整体调整提供依据。

例 1：BNB2X8 井

该井 2013 年 3 月 26 日投产，原生产层位为 S2 的 4#、5#、7#，措施前日液 18.3m³/d，日油 0.2t，含水 98.9%。计划措施补孔后下智能分层采油管柱。射孔前通过监测过套管电阻率，落实各层的水淹情况及剩余油开采状况，优化措施方案。

过套管电阻率测井点测 2587-2637 米（4#、5-1#、5-2#、6-1#、6-2#、7#、8#）。监测结论：6-1、9-1 为油层；5-1、7-1 为低水淹层；4 为中水淹层；5-2、7-2、8 为高水淹层。

采取的措施及效果：补孔 6-1#，下智能分采管柱

效果：8 月 16 日开井生产 S24 上（4#、5#、6# 三层合采），初期日液 18m³/d，日油 9t，含水 50%，日

增油 8.8t。稳定生产 4 个月后液量下降, 决定关闭上层打开 S24 下生产 7#, 开井后日液 19.7m³/d, 日油 0.4t, 含水 98%。发现 7# 水淹严重, 与监测结论一致。

例 2: GD1-17X905 井

GD1-17X905 井停产前产量日液 38.4m³/d、日油 0.9t, 含水 97.7%, 因高含水关停。停产前生产 9、10 号层 (1266.6-1303.9m) 31.6 米 /2 层。为完善注采井网对该井测饱和度和恢复生产。

监测过程及结论: 对该井进行过套管电阻率测井, 测量井段: 1140-1340m, 资料显示: 7-2、8-1 号层为中水淹层; 5、7-1、7-3、8-2、9、10、12 号层为高水淹层。

措施及效果: 12 号层顶 (Ng53) 单采, 射孔井段: 1322.3-1325m/2.7m, 开井后日液 52m³/d, 日油 4.6t, 含水 91.2%, 日增油 3.7t。

例 3: BNB661-X20 井

该井开井后高含水, 经研究决定过套管电阻率测井, 落实小层潜力。测井结果显示: 38-1 号层 (2930-2934 米)、39 号层 (2942-2949.5 米) 为高水淹层; 38-2 号层 (2934-2938 米) 为中水淹层。

措施及效果: 测井前生产沙四层, 日液 6.28m³/d, 日油 2.3t/d, 含水 63.64%, 根据测井结果补孔改层, 生产 38-2 号, 开井后日液 20.5m³/d, 日油 8.2t/d, 含水 60%, 日增油 5.9t。

5 过套管电阻率测井技术目前存在的问题及下步探究

5.1 现场测试方面

①过套管电阻率测井采用点测方式, 占井时间长; ②仪器尺寸较大, 对套管整体状况要求较高, 套破、结垢严重、套管变形均不能施工; ③受井斜因素影响较大, 建议井斜不超过 30°。

5.2 资料解释方面

目前已能完成定性分析, 因软件功能受限, 目前还不能进行定量计算。资料解释方面下步重点需要在以下几个方面深入学习研究: ①定量分析: 确定目的层剩余油饱和度。目前由于软件局限性, 只能定性分析目的层水淹级别。定量评价剩余油饱和度对开发有着至关重要的意义。如何确定地层泥质含量、孔隙度等地层参数是下步工作重点; 针对不同储层的地质特性, 选择合适的解释模型, 通过定量评价来研究目的层的水淹级别, 对于水淹级别低或动用程度差的潜力层进行挖潜利用, 从而为油藏的整体开发进行调整,

获得更大的经济效益; ②水泥环校正: 过套管电阻率测井时, 水泥环会对电阻率产生影响, 角色等同于裸眼井的侵入带, 下一步我们将重点研究水泥环与电阻率的影响关系, 研究建立每种规格的套管对应水泥环的校正图版, 对水泥环的影响进行校正, 消除影响; ③围岩校正: 以下是围岩的影响规律: 当层厚大于 1.2 米时, 围岩不会影响目的层。当目的层在 0.5-1.0 米之间时需要做围岩校正。当目的层厚度小于 0.5 米, 远小于仪器的分辨率无法分辨出来。下一步我们将针对围岩对过套管电阻率的影响, 针对仪器电极距围岩校正图版, 消除围岩影响; ④K 因子校正: K 因子是套管的单位纵向电导、外径和地层的电阻率的函数。由于测井仪器没有自身固定的 K 因子, 因此要根据每口井的实际情况, 确定正确的 K 因子。在一稳定的泥岩段或水层, 使过套管电阻率和裸眼井电阻率重合, 从而得到该井段的 K 因子, 通过对图版 K 因子的刻度, 将由图版得到的任一点电阻率值对应的 K 因子, 转换为适合该井段的 K 因子, 从而实现 K 因子校正。

6 效益分析

经济效益: 过套管电阻率测井自 2022 年引进以来, 已在胜利油田东部油区成功实施 32 井次, 按照 15 万元 / 井次计算, 经营收入 32*15=480 万元; 按照资料解释结论进行措施作业 29 井次, 措施见效 26 井次, 测井资料符合率达 89.7%, 单井平均日增油 0.9 吨, 年增油 8541 吨, 按 2500 元 / 吨计算, 创造效益 8541*2500=2135 万元。引进仪器设备成本 360 万元 / 套, 计算经济效益 480+2135-360=2255 万元, 取得了较好的经济效益。过套管电阻率测井在指导高含水、特高含水油田开发具有探测深度深、不受矿化度影响等特点, 结合对比裸眼电阻率资料分析剩余油分布状态, 能够找出潜力层位, 为提高采收率提供动态监测依据, 为支撑油田效益开发提供强有力的保障。

参考文献:

- [1] 李莉. 过套管电阻率测井技术在江苏油田的应用 [J]. 中国石化油气开采技术, 2010, 23(09): 36-39.
- [2] 谢树棋, 储昭坦, 李克沛, 王可成. 套管井电阻率测井方法研究 [J]. 测井技术, 1999(05): 338-343+399.
- [3] 贾国伟. PNN 测井技术和过套管电阻率测井技术在 X 油田 Y 井中的剩余油分布应用研究 [J]. 中国化工贸易, 2017, 9(31): 89-91.
- [4] 栗建军, 孟凡顺. 套管井井间电阻率测井的原理及数值计算 [J]. 化工管理, 2003.