

doi: 10.11720/wtyht.2018.1168

朱学娟,葛新民,孔雪,等.砂泥岩水淹层的常规测井曲线定性识别方法[J].物探与化探,2018,42(6):1215-1220.<http://doi.org/10.11720/wtyht.2018.1168>

Zhu X J, Ge X M, Kong X, et al. Qualitative identification of sandstone water flooded layer by conventional logging curves[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(6): 1215-1220. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2018.1168>

砂泥岩水淹层的常规测井曲线定性识别方法

朱学娟¹, 葛新民², 孔雪¹, 张瑞香¹

(1. 中国石油大学胜利学院 油气工程学院, 山东 东营 257000; 2. 中国石油大学(华东) 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580)

摘 要: 水淹层的典型特征是含油气饱和度下降和混合地层水电导能力的变化, 反应到测井曲线上, 对于地层水水淹和污水水淹的储层, 水淹程度越高, 电阻率越低; 而淡水水淹的储层, 电阻率会先降低再升高, 呈现“U”形甚至“S”形的变化; 同时混合地层水矿化度的变化必然导致自然电位的变化, 造成自然电位异常幅度的变化、自然电位正负异常翻转和自然电位基线偏移。根据已知水淹层在常规测井曲线上的典型特征, 直接对测井曲线进行综合分析就可对未知水淹层进行识别, 或将测井数据制作成交会图, 得出水淹层的判断标准。

关键词: 水淹层; 常规测井; 定性识别; 电阻率; 自然电位

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2018)06-1215-06

0 引言

对注水开发的老油田确定剩余油分布、挖潜剩余油潜力来说, 定性识别水淹层是最基本的工作, 同时也是水淹层精细评价的基础和重点。由于地质构造的复杂性和注水开发对测井响应的影响, 利用测井曲线进行水淹层识别并不简单。但是可以从水淹层的水淹机理出发, 研究油层水淹后在各种地质和地球物理特征上的变化, 分析总结这些变化引起的测井响应特征, 并以此来综合判断水淹层^[1]。油层水淹后最直接的变化是混合地层水电导能力和地层含油气饱和度的变化。所以, 常规测井曲线定性判断水淹层的主要手段, 就是根据对混合地层水电导能力和含油气饱和度反应灵敏的电阻率测井曲线和自然电位曲线, 总结这些曲线在已知水淹层的响应特征, 对这些响应特征进行综合分析来判别出同一区块的其他水淹层^[2]。

1 水淹层常规测井曲线特征

要对未知水淹层进行识别, 必须先对本区块已知的水淹层进行分析, 从已知样本中统计、分析、总结, 得出目的区块水淹层的判别标准。所以对水淹层测井响应特征的提取, 是水淹层测井识别的关键。

1.1 电阻率曲线特征

电阻率测井响应主要取决于地层的岩性、孔隙性、含油性和地层水的导电性。根据注入水性质的不同, 水淹层分为淡水水淹、地层水水淹和污水水淹, 而水淹后混合地层水电阻率和含水饱和度的改变直接影响水淹层的电阻率, 所以, 不同水淹级别和水淹类型的水淹层电阻率曲线变化特征也不同^[3-5]。

1.1.1 电阻率数值降低

地层水水淹和污水水淹的地层, 随着水淹程度的加深, 含油气饱和度不断降低, 混合地层水电阻率基本不变或降低, 二者总的作用效果是使储层电阻率呈现单调递减的特征, 反映到电阻率曲线上, 即水

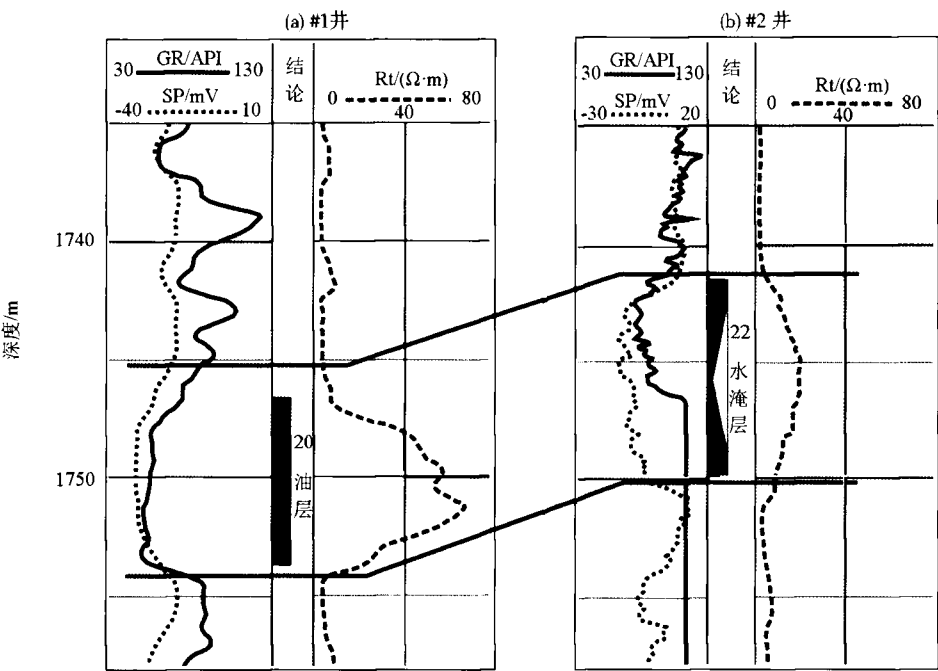
收稿日期: 2018-04-24; 修回日期: 2018-07-02

基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX05039)、山东省高等学校科技计划项目(J17KA197)、中国石油大学胜利学院科技计划项目(KY2017024)

作者简介: 朱学娟(1987-), 女, 硕士, 讲师, 主要从事测井方法技术及测井数据处理与解释方面的研究。Email: 04012126@163.com

淹级别越高,电阻率越低。

图 1 为某油藏连井剖面, #2 井的 22 号层和 #1 井的 20 号层属于同一油层, #2 井 (2016 年 4 月完钻) 构造位置较高, 含油饱和度应不小于 20 号层, 但其 22 号层电阻率仅为 $20\ \Omega\cdot\text{m}$, 比低部位老井 #1 井 (2009 年 5 月完钻) 20 号油层电阻率下降了 $40\ \Omega\cdot\text{m}$ 。2016 年 8 月投产证实, #2 井 22 号层日产油 $47.1\ \text{t}$, 水 $32.4\ \text{m}^3$, 含水 41%, 生产 15 天后含水逐渐上升到 80%, 45 天后上升到 95%, 为典型的边底水水淹层。边底水水淹是指在油藏开发过程中边水和底水推进导致油层被水淹, 由于边水和底水都是地层水, 所以边底水水淹后含水饱和度增加, 但地层水性质却不变, 必然导致地层电阻率降低。



GR—自然伽马曲线;SP—自然电位曲线;Rt—地层电阻率曲线

图 1 油层水淹后电阻率降低

1.1.2 电阻率数值升高

淡水水淹层电阻率的变化可以分为 4 个阶段: ① 注水初期, 含油饱和度降低导致地层电阻率降低; ② 注水中期, 淡水注入水的增加和含油饱和度的降低同时对电阻率产生不同影响, 使地层电阻率变化缓慢; ③ 注水中后期, 含油饱和度变化不大, 地层水被淡水驱替导电性变差, 总的效果使地层电阻率升高; ④ 注水末期, 混合地层水已完全被注入水淡化, 同时含油饱和度缓慢降低, 导致地层电阻率也缓慢降低^[6]。不同水淹程度的淡水水淹层经历不同的阶段, 地层电阻率随饱和度的变化曲线对应着可呈现“L”形、“U”形和“S”形^[7-9]。

图 2 为某井测井解释成果图, 其中 168~170 层为油层, 172~177 层为水淹层。可以看出与油层相比, 水淹层电阻率值明显增大, 这是由于随着注入水的增大, 含水饱和度达到一定值之后, 电阻率随注入水的增加而逐渐增大, 此时位于“U”型曲线的右侧, 即处于水淹的第三个阶段—注水中后期, 此时, 水淹

程度越大电阻率越高。可以看出 175~177 号层电阻率明显比 172~174 号层电阻率高, 说明下部的水淹层水淹级别更高。

1.2 自然电位曲线特征

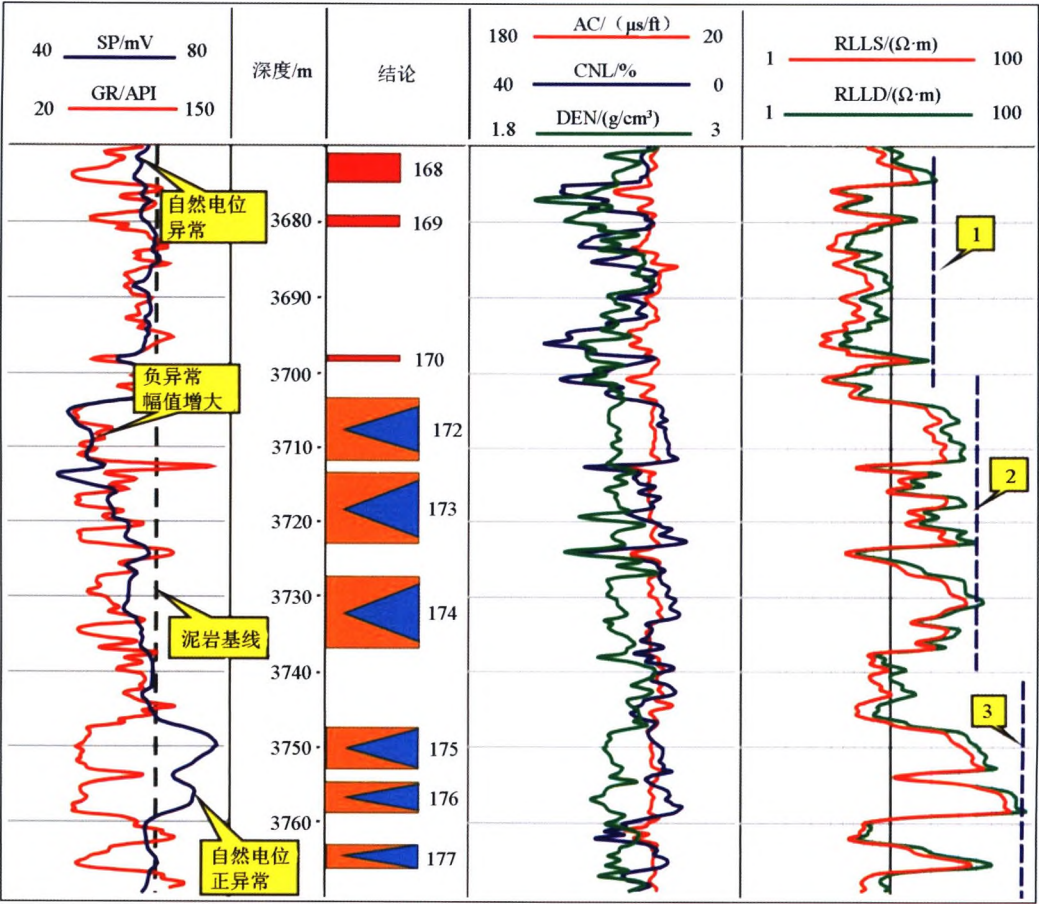
自然电位曲线反应的是泥岩背景上的储集层的性质, 其大小主要取决于地层水矿化度与泥浆滤液矿化度的相对大小, 储层水淹后, 混合地层水导电性的变化必然导致自然电位的变化, 其变化特征主要包括异常幅度的变化、自然电位基线偏移和自然电位正负异常翻转^[10-11]。

1.2.1 自然电位异常幅度变化

砂泥岩储层中自然电位的计算公式为

$$SP = -K \lg \frac{R_{mf}}{R_w}, \tag{1}$$

其中: R_{mf} 为泥浆滤液电阻率, R_w 为地层水电阻率, K 为自然电位系数, $K > 0$ 。对于淡水水泥浆 ($R_{mf} > R_w$) 井眼, 自然电位为负异常。对于污水水淹的储层, 随着水淹程度的增加, R_w 越来越小, 导致负异常幅度越



GR—自然伽马;SP—自然电位;AC—声波时差;CNL—中子孔隙度;DEN—密度测井;RLLD—深侧向电阻率;RLLS—浅侧向电阻率;■ 油层;▴ 水淹层;1—水淹第一阶段;2—水淹第二阶段;3—水淹第三阶段

图 2 水淹层自然电位和电阻率变化特征

来越大。而淡水水淹的储层 R_w 随水淹程度的增加而增加,如果混合后的地层水电阻率仍小于泥浆滤液的电阻率,则自然电位仍为负异常,且异常幅度减小;同时,水淹导致的储层含水饱和度升高也会引起自然电位异常幅度的增大。图 2 中可以看出 168~170 油层的自然电位为负异常,而 172~174 号水淹层自然电位仍为负异常,但异常幅度比油层明显增大。

1.2.2 自然电位幅度正负偏转

从 1.2.1 节的分析可知,储层被淡水水淹后混合地层水电阻率增大,若增大后仍小于泥浆滤液的电阻率,则自然电位仍为负异常,且异常幅度减小。而当混合地层水电阻率随水淹程度的增加而继续增加,直至大于泥浆滤液的电阻率后,从式(1)可以看出,SP 将从负异常变为正异常,即发生自然电位幅度的正负偏转。图 2 中可以看出,水淹层 172~174 号层自然电位异常方向与上部的油层相同,而 175~177 号水淹层自然电位变为正异常,说明 175~177 号储层的水淹程度比 172~174 层更大,这一结果与

1.1.2 节中根据电阻率判断的水淹级别相同。

1.2.3 自然电位基线偏移

注水开发过程中,同一层内不同部位吸水能力的差异及重力作用,会导致出现同一层内水淹程度不同或部分水淹的现象,即同一层内混合地层水电阻率不同。如图 3 所示,上下地层为泥岩层,中间为砂岩储层,被淡水水淹,且储层下部水淹程度高于上部,水淹程度越高混合地层水电阻率越大,但仍然小于泥浆滤液电阻率,即 $R_{mf} > R_{w3} > R_{w2} > R_{w1}$,根据式(1)可算出储层上部的异常幅度为 SP_{1-2} ,下部的异常幅度为 SP_{3-1} ,则基线偏移幅度

$$\Delta SP = SP_{1-2} - SP_{3-1} = -Klg \frac{R_{w3}}{R_{w2}}。$$

可以看出,水淹后混合地层水电阻率差异越大则基线偏移的幅度越大。

1.3 其他常规测井曲线特征

除了引起电阻率曲线和自然电位的明显变化,储层水淹后还经常引起自然伽马曲线的变化。因为在注水开发过程中,注入水会冲散并溶解地层中的

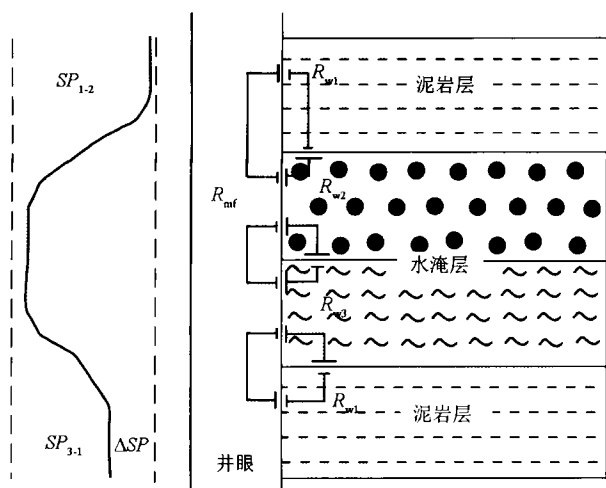


图 3 水淹层自然电位基线偏移

部分黏土矿物,而砂泥岩储层中的自然放射性主要是由黏土矿物吸附的放射性物质造成的,所以水淹会造成放射系物质流失,导致 GR 值降低;而另一方面,被注入水冲刷的放射性物质会在流动过程中在某些特定的构造部位或低渗透区域沉积下来,或被某些地层吸附,造成特定部位的放射性离子富集,从而引起 GR 值升高^[12]。

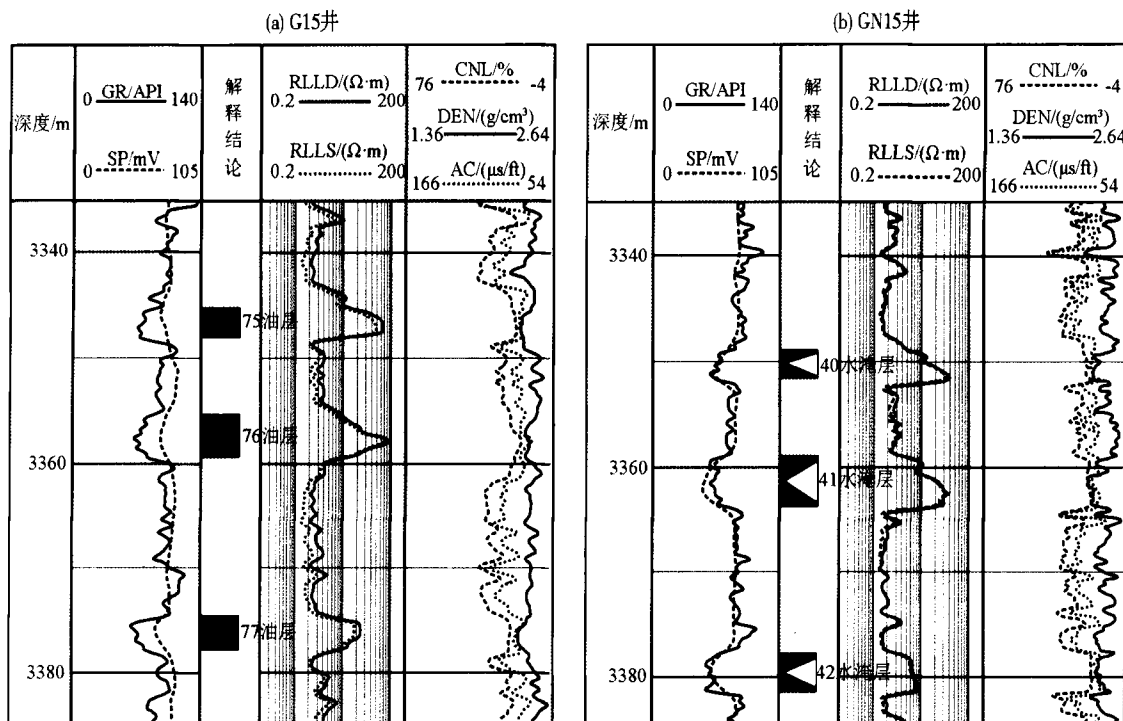
水淹后储层孔隙度基本不发生或只发生很小的变化,所以密度和中子孔隙度响应变化不明显,而声波时差曲线还受储层孔隙结构的影响,所以在物性较好的储层,由于泥质和黏土矿物被水冲刷,会有声波时差略有增大的现象^[13]。

2 常规测井定性识别水淹层

进行水淹层识别需要综合应用多种资料,在理论研究和岩石物理实验分析确定水淹机理,岩性、物性、地层水性质等确定水淹后的地质特征的基础上,确定本区块典型水淹层在常规测井曲线上的响应特征。首先,对新钻井的测井曲线进行分析处理,找出符合典型水淹层特征的层位作为可能被水淹层的储层。然后,研究整体构造和沉积特征,将这些可能水淹的储层与老井中已经投产或试油试采的层位进行邻井对比或连井剖面分析,排除在构造或沉积特征上不可能被水淹的储层;最后,利用注水开发资料,分析可能的的水淹层与注水层在沉积砂体展布和构造位置上的关系,分析新井的储层被注水井波及的范围大小,确定水淹层的注入水性质,计算水淹后的混合地层水电阻率^[14-15]。笔者只讨论根据常规测井曲线进行水淹层的定性识别,即已经确定典型水淹层的测井响应特征后,根据这些特征来分析新钻井的测井曲线,确定出可能是水淹层的层位。

2.1 曲线综合分析识别水淹层

图 4 中 G15 井于 2000 年 11 月投产 75、76、77 号层,日产油 8 t,日产水 1.1 m³,证实为油层。GN15 井(2005 年 5 月完钻)是 G15 的更新井,两口井井距为 30 m 左右。图中可以看出两口井具有很好的对应关系,通过连井剖面对比可知,GN15 井中的 40、



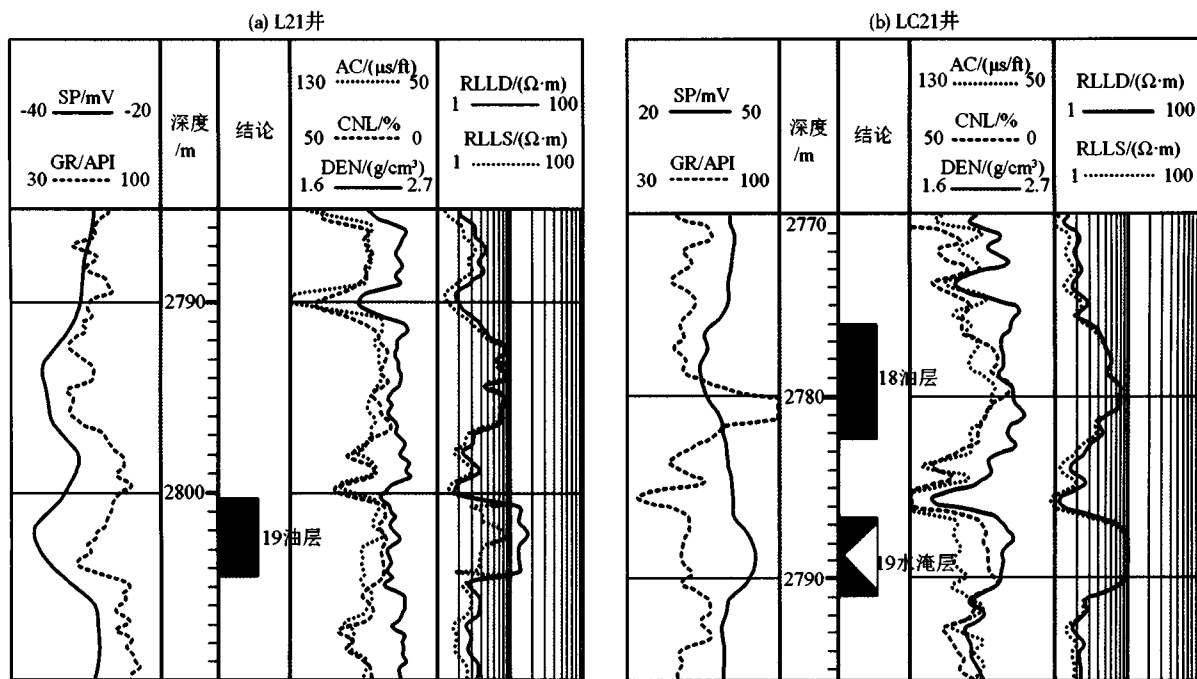
GR—自然伽马;SP—自然电位;AC—声波时差;CNL—中子孔隙度;DEN—密度测井;RLLD—深侧向电阻率;RLLS—浅侧向电阻率

图 4 曲线综合分析识别水淹层实例 1

41、42 号层分别与 G15 井中的 75、76、77 号油层为同一储层,通过测井曲线综合分析,SP 异常幅度增大、GR 值略有降低、AC 略有增大,电阻率值明显减小,所以可以判断出,40、41 和 42 层为水淹层。

图 5 中 L21 井于 1990 年 8 月完钻,1993 年转注水井,LC21 井为 L21 井的更新井,构造位置略高,于 2000 年 9 月完钻,截至 LC21 井钻井前,L21 井已经

累计注水 $8.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。通过二者测井曲线对比图可以看出,两口井的 19 号层属于同一层,易受邻井注入水波及,从测井曲线可以看出,LC21 井的 19 号层电阻率电阻率降低,自然电位呈正异常,三孔隙度曲线显示储层孔渗性变好,同时自然伽马值降低,证明流水的冲刷作用使储层中黏土矿物减少,可以确定 LC21 井的 19 号层为水淹层。



GR—自然伽马;SP—自然电位;AC—声波时差;CNL—中子孔隙度;DEN—密度测井;RLLD—深侧向电阻率;RLLS—浅侧向电阻率

图 5 曲线综合分析识别水淹层实例 2

2.2 交会图识别水淹层

交会图是用于表示地层的测井参数或其他参数之间关系的图形,其优点是能将同一井段或同一区块的邻井内所有已知水淹层的参数集中在一张图中,比较清楚地划分油层和水淹层的界线,从而得到水淹层的判别标准,尤其对于岩性、物性相近的地层更为有效^[11]。图 6 为某区块生产资料已确定的油层和水淹层的自然电位—电阻率交会图,从图中可以看出油层电阻率在 $20 \Omega \cdot \text{m}$ 以上,自然电位小于 -5 mV ,从交会图中可以找出水淹层和油层的明显界线,此界线可以作为本区块水淹层的一项定性判断依据。将未知水淹层的自然电位和地层电阻率投影在此图中,依据此界线就可以判别储层是否属于水淹层。

3 结论

1) 油层水淹后最直接的变化是混合地层水导

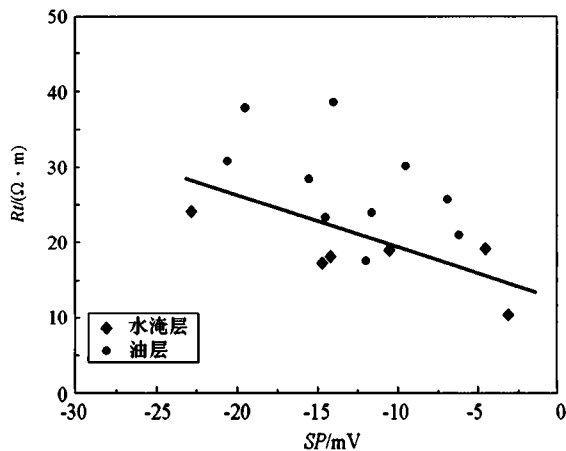


图 6 交会图法判别水淹层

电能力和地层含油气饱和度的变化,所以其识别的关键是要找到常规测井曲线上反映油层是否水淹的标志。一般来说,只要测井质量可靠,油层水淹时在视电阻率和 SP 曲线上均会有程度不同的反映,这是识别水淹层的主要依据。当地层岩性和注入水矿化度变化比较大,水淹层在视电阻率和 SP 曲线上

的特征不明显时,则应综合本井和邻井其他资料对比分析与综合判断。

2) 油层是否水淹,关键是注入水能否波及到本井的油层。所以,要综合本井与邻近开发井和注水井的注采资料,研究其在构造位置上的相互关系、本井油层与邻近主力吸水层是否连通,将这些资料与测井资料综合判断则判别的准确率会大大提高。

3) 每个油田或地区有不同的地质特征和注采开发模式及开采历史,所以没有完全统一的水淹层识别方法或模式。只能在研究理论方法和借鉴已有经验的基础上,根据自身的地质特点和水淹特征,研究适合本地区水淹层识别的有利方法。

参考文献:

- [1] 韩晓梅. 南堡油田高柳地区水淹层测井评价方法[D].青岛:中国石油大学(华东),2011.
- [2] 雍世和,张超谟.测井数据处理与综合解释[M].东营:中国石油大学出版社,2007:357-380.
- [3] 王敏.大庆L地区水淹层测井评价方法研究[D].荆州:长江大学,2011.
- [4] 田彦玲.特高含水期厚油层水淹层电阻率模型研究[D].大庆:大庆石油学院,2009.
- [5] 杨景强,卢艳,马宏宇,等.水淹层地层水电阻率变化规律研究[J].测井技术,2006,30(3):195-197.
- [6] 朱学娟,单沙沙.不同注水开发阶段水淹层混合地层水电阻率计算方法[J].地质与资源,2017,26(6):620-624.
- [7] 朱学娟,刘凤,张瑞香.水淹层岩石物理特征变化规律研究[J].中国石油大学胜利学院学报,2015,29(4):15-18.
- [8] 袁伟,张占松,吕洪志,等.水淹层混合液地层水电阻率的计算方法[J].石油天然气学报,2014,36(9):78-83.
- [9] 李桢,骆森,杨曦,等.水淹层测井解释方法综述[J].工程地球物理学报,2006,3(4):288-294.
- [10] 黄玉珍,寇小攀,金韦华.基于常规测井的水淹层识别方法研究[J].石化技术,2016,39(6):170-171.
- [11] 魏晓娥.低渗透油藏水淹层识别及水驱规律研究[D].西安:西北大学,2017.
- [12] 严燕飞,尹有华,黄馨谊.基于常规测井资料的水淹层定性识别研究[J].西部探矿工程,2016,29(4):54-57.
- [13] 谭锋奇,李洪奇,武鑫,等.砾岩油藏水淹层定量识别方法—以新疆克拉玛依油田六中区克下组为例[J].石油与天然气地质,2010,31(2):232-239.
- [14] 张斌成,石晓燕,刘瑛,等.水淹层测井综合解释及水淹特性研究[J].测井技术,2005,29(6):545-547.
- [15] 李坤.新老测井技术在老油田水淹层评价中的综合应用[D].荆州:长江大学,2017.

Qualitative identification of sandstone water flooded layer by conventional logging curves

ZHU Xue-Juan¹, GE Xin-Min², KONG Xue¹, ZHANG Rui-Xiang¹

(1. Department of Oil & Gas Engineering, Shengli Institute of China University of Petroleum, Dongying 257000, China; 2. School of Geosciences, Ching University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: The typical characteristics of the waterflooded layer are the reduction of oil-gas saturation and the change of conductivity of the mixed formation water. The higher the degree of flooding, the lower the resistivity of the formation water flooded and sewage flooded reservoirs; the resistivity will first decrease and then increase, presenting a "U" or even "S" shape change of freshwater flooded reservoirs. And the changes in the conductivity of mixed formation water will inevitably lead to changes in spontaneous potential, resulting in the abnormal amplitude changes, the abnormal positive and negative inversion, and the baseline shift. On the basis of the typical characteristics of the known flooded layer on the conventional logging curves, a comprehensive analysis of the logging curves can be used to identify the unknown flooded layer, or the logging data can be used to construct a transaction map to determine the flooded layer.

Key words: water flooded layer; conventional logging; qualitative identification; formation resistivity; spontaneous potential

(本文编辑:王萌)