

文章编号: 1672-7940(2006)04-0288-07

水淹层测井解释方法综述

李 桢, 骆 淼, 杨 曦, 林振洲

(中国地质大学地球物理与空间信息学院, 武汉 430074)

摘 要: 水淹层测井解释利用测井资料对水驱油藏水淹所发生的变化进行评价, 弄清水淹部位和水淹程度, 为进行二次乃至三次采油提高采收率提供依据。基于测井解释研究水淹层特性, 是油田开发调整工作的重要组成部分。油层水淹后, 其产层的油水饱和度分布、孔隙度与渗透率、岩石润湿性、地层水矿化度和阳离子交换能力等许多物理性质会发生较大变化。通常, 可利用自然电位与电阻率曲线相结合、自然电位测井和交会图版等方法识别水淹层。进而可根据油、水等定量参数来判断储层的水淹级别。此外, 动态电阻率下降法和模式识别法近来也被广泛应用于水淹等级的划分。我国在水淹层水淹机理和解释方面取得了很大的进展。但在实际中, 仅仅建立在单井测井资料的水淹层测井解释仍存在一定的局限性。若以测井为纽带, 将地质、地震资料有机结合起来, 将在一定程度上促进测井资料解释综合应用的发展

关键词: 水淹层; 测井解释; 识别; 评价

中图分类号: P631.8

文献标识码: A

收稿日期: 2006-06-30

REVIEW OF LOGGING INTERPRETATION METHODS FOR WATER-FLOODED LAYER

LI Zhen, LUO Miao, YANG Xi, LIN Zhen-zhou

(Institute of Geophysics and Geometrics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: The log interpretation of water-flooded layer gives an evaluation for the oil field flooded by the driving water on the basis of the log data, and then confirms the position of the water-flooded layer and how the oil field is flooded, and provides the evidence for improving oil recovery for the 2nd or 3rd time. Studying on the water-flooded layers by log interpretation methods, is important work for adjusting the exploitation of the oil-field. If the oil-field was flooded, the character would be changed. Usually the water-flooded layer could be identified by the log interpretation methods such as GR and SP, i.e. and then evaluate how the oil-field was flooded by the amount of oil and water, i.e. China has had made great progress in the interpretation for water-flooded layer. But it is not enough that the interpretation is only based on one well in industry. It can be considered that the log interpretation of the water-flooded layer should be combined with the geologic and seismic data besides log data in the future.

Key words: water-flooded layer; log interpretation; identify; evaluate

作者简介: 李桢, (1983—), 女, 中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院在读硕士研究生, 现从事地球物理测井及相关方面研究。E-mail: martyle_345@163.com

1 引言

我国多数油田,一般都采用早期注水开发方式。油田注水后,在水驱油过程中,产层的流体性质、孔隙结构,岩石的物理化学性质,以及油气水分布规律等,都会发生一定程度的变化。水淹层测井解释利用测井资料对水驱油藏水淹所发生的变化进行评价,以便弄清水淹部位和水淹程度,为进行二次乃至三次采油提高采收率提供依据^[1~3]。另外,水淹层测井解释还用于指导加密新井射孔试油,为近一步调整油田开发方案,加密井布井,注采关系调整,确定老井封堵措施等方面有重要的指导意义。基于测井解释研究水淹层特性,是油田开发调整工作的重要组成部分。

2 水淹层的类型

按照驱动水本身的性质,可将水淹层分为淡水水淹层、边水水淹层和污水水淹层三种类型。

1) 淡水水淹层:是指边内注水并由淡水驱油形成的水淹层。

2) 边水水淹层:是指靠边水或边外注水驱油形成的水淹层,多见于原始油水界面上移或原始油水关系被破坏。

3) 污水水淹层,是指污水回注或淡、污混合形成的水淹层,此种驱动水矿化度非常复杂,由于注入水的性质不同,决定了测井解释的难度。

3 油层水淹后产层物理性质的变化

在注水开发的油田中,当注入水进入产层后,会使产层的物理性质发生一系列的改变。

3.1 油水饱和度分布变化

地层含油饱和度的降低是注水开发的直接结果。注水采油,一方面是为了保持油层能量,另一方面则是利用注入水的推进来驱替孔隙空间中的油。但是,注入水的推进并非活塞式的均匀推进,而是沿着孔隙度大、渗透性好的部位推进的,这就必然导致一些油被留在微小孔隙或孔道之中成为剩余油,随着石油的不断采出,地层中的含油饱和度不断降低^[4]。

不同的物性条件会造成含油饱和度下降的程

度存在差异,这种现象导致了油层内部原始油水分布规律的新变化:油层内物性好的部位原始含油饱和度较高,经注水后,这类地层首先水淹,并经受较充分的水洗致使其含水饱和度升高而含油饱和度降低;相反,与注水井层不连通或连通差的油层则成为未动用油层或剩余油饱和度较高的油层上升为挖潜调整的主要对象。

3.2 孔隙度与渗透率的变化

在砂泥岩剖而中,水淹层岩石孔隙度的变化与水洗程度有关。在弱水洗区,粘土受注入水浸泡发生膨胀,孔喉变窄,孔径缩小,孔隙度和渗透率都会降低;而在强水洗区,粘土被水冲洗,泥质含量降低,孔喉增大,孔隙度和渗透率都将提高。

3.3 岩石润湿性的变化

从水淹层的岩心测试资料可以看出^[5],油层水淹后,由于岩石与水长期接触,岩石一般向着强亲水方向改变。

3.4 地层水矿化度的变化

在油层水淹过程中,由于注入水矿化度与原始地层水矿化度的差异(开发油田的地层水矿化度 $3 \sim 100 \text{ g/L}$;注入淡水矿化度 $0.4 \sim 1 \text{ g/L}$,注入污水矿化度 $10 \sim 50 \text{ g/L}$;有的只注淡水,有的先注淡水再注污水,也有的先注污水后注淡水),使地层水矿化度发生十分复杂的变化。在注入淡水的情况下,注入水推进过程中将发生两种物理作用:两种不同矿化度的溶液发生混合作用;高矿化度的原始地层水中的离子向低矿化度的注入水迁移,即发生离子扩散运动。因此,混合水溶液的矿化度将低于原始地层水矿化度。而且,随着注入水的增加,油层水洗程度增强,混合水溶液的矿化度也不断降低。污水回注时,变化情况更为复杂^[4]。

总的说来,产层见水后,地层剩余水矿化度也发生变化,驱替前缘高,远离前缘低。在驱替前缘附近,矿化水在水淹初期含有大量的溶解气并带有油膜,随着驱替前缘推进,水的矿化度降低,但含气饱和度仍较高。地层受到强水冲后,水的矿化度很低,含气量也很低。

3.5 阳离子交换能力的变化

大量的实验结果表明^[6]:在水淹早期,阳离子交换能力相对较高。随着水淹程度的加大,泥质含量不断减少,阳离子交换能力也相应减小。

此外,在油田注水开发过程中,产层的泥质含量、地层温度和压力及驱油效率等也将发生一定

的变化。

4 水淹层测井识别

4.1 自然电位与电阻率曲线结合识别水淹层

油层水淹后,其自然电位测井响应也应发生较明显的变化。若水淹部位的地层水矿化度或地层电阻率发生变化,就会引起自然电位幅度的变化和基线偏移。电阻率的降低量和自然电位的幅度增大量与水淹程度有关系。对于中、高矿化度的

边水水淹层,一般均具有电阻率曲线和自然电位曲线在形态上不对称的特征显示^[7](图 1)。

4.2 自然电位测井法

4.2.1 自然电位幅度增大

从自然电位的原理可知,当储层物性及层厚相似的情况下,储层的电阻率越低,自然电位异常的幅度越大(图 2)。

4.2.2 自然电位基线偏移

在水驱油过程中,由于地层内部的非均质性 & 重力作用的影响,水在层内各部的推进速度各

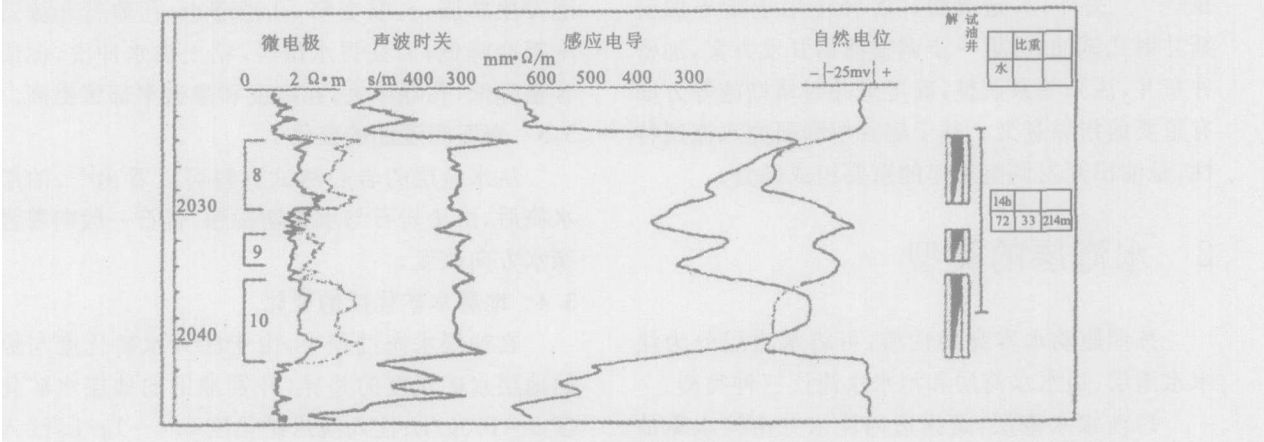


图 1 水淹层电性对应显示特征

Fig. 1 The electric characteristic of the water - flooded layer

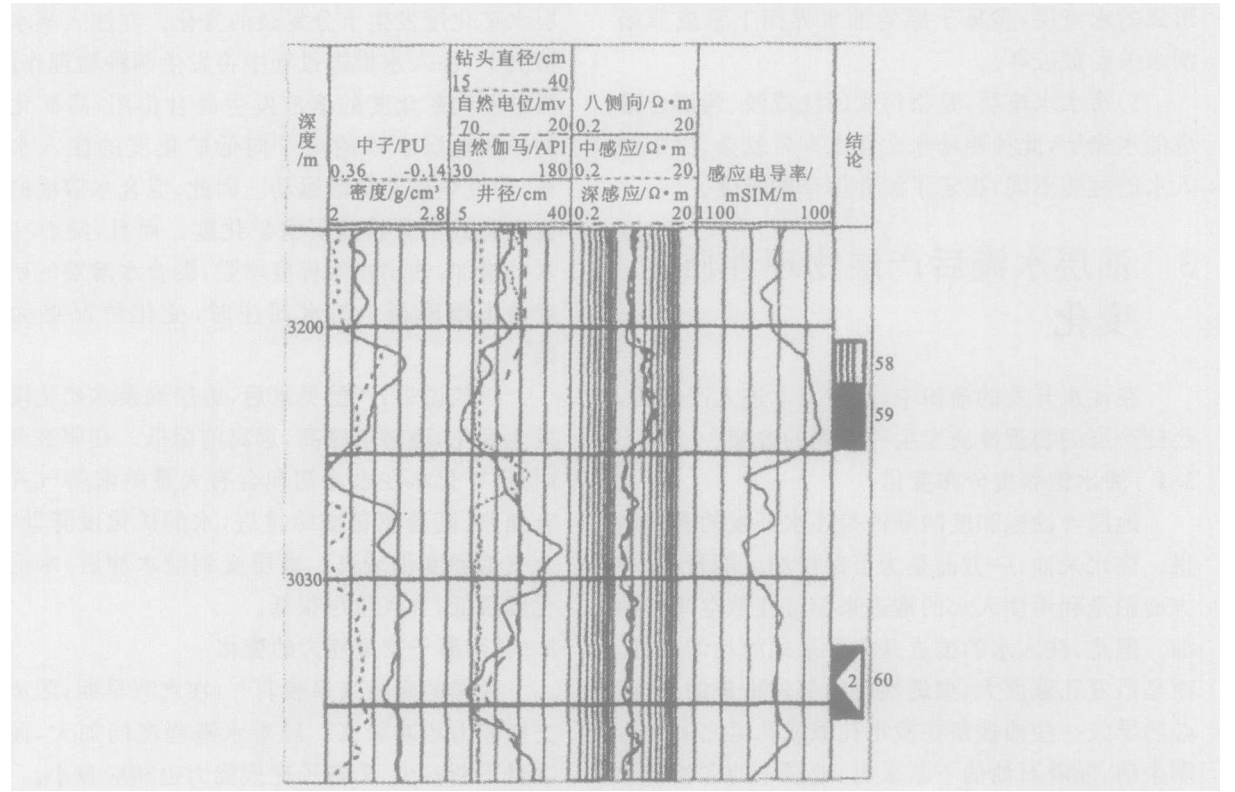


图 2 自然电位幅度增大的水淹层

Fig. 2 The water - flooded layer with the excursion of SP increasing

异,使油层部分水淹,引起自然电位基线偏移自然电位基线偏移的程度主要取决于水淹前后地层水矿化度的比值以及储层物性的差异程度(图 3)。

4.3 交会图版法

交会图版法是根据已开发油田的油层、水淹层和水层的测井资料,计算某些能反映油层水淹

情况的参数,绘制一系列定性识别水淹层的交会图版,用以快速判别新钻加密井的油层、水淹层和水层^[8]。

例如,我们可以利用电阻率与声阻抗交会图进行水淹层识别(图 4)。

利用声波时差测井和密度测井可以得到地层

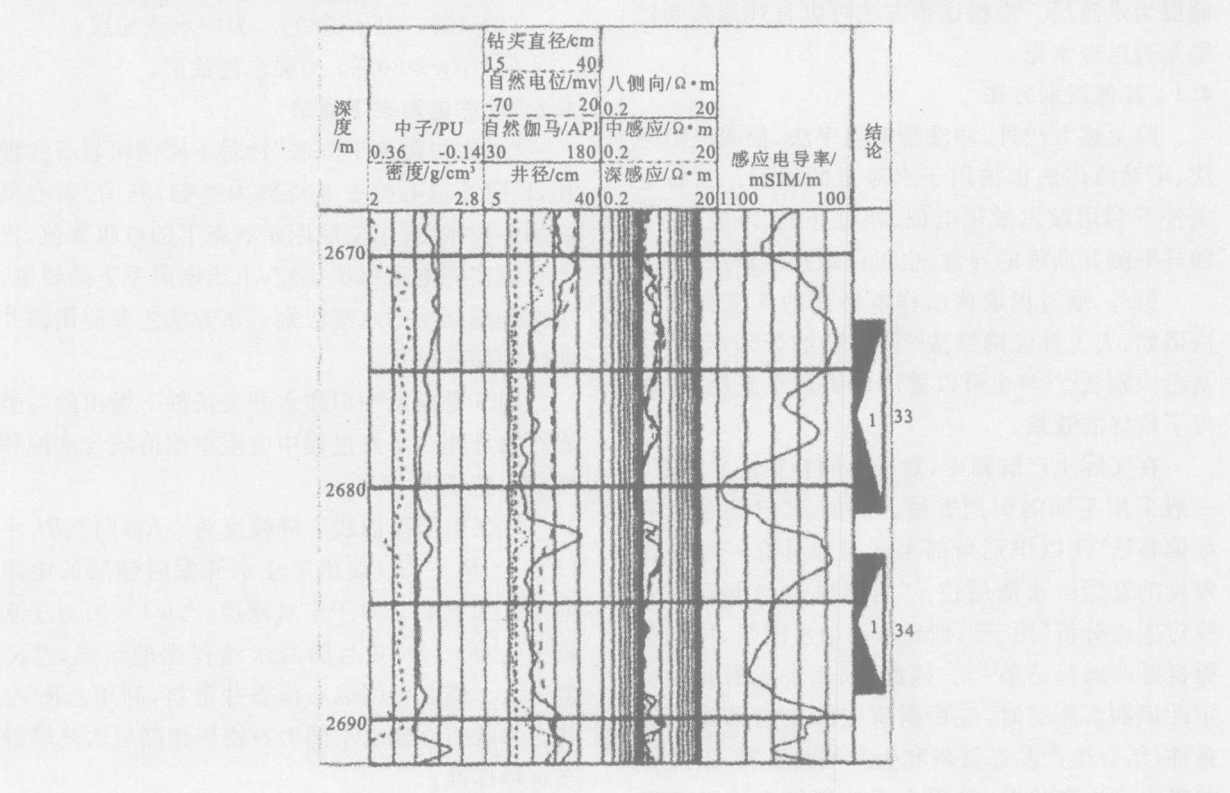


图 3 自然电位偏移的水淹层

Fig. 3 The water - flooded layer with SP migration

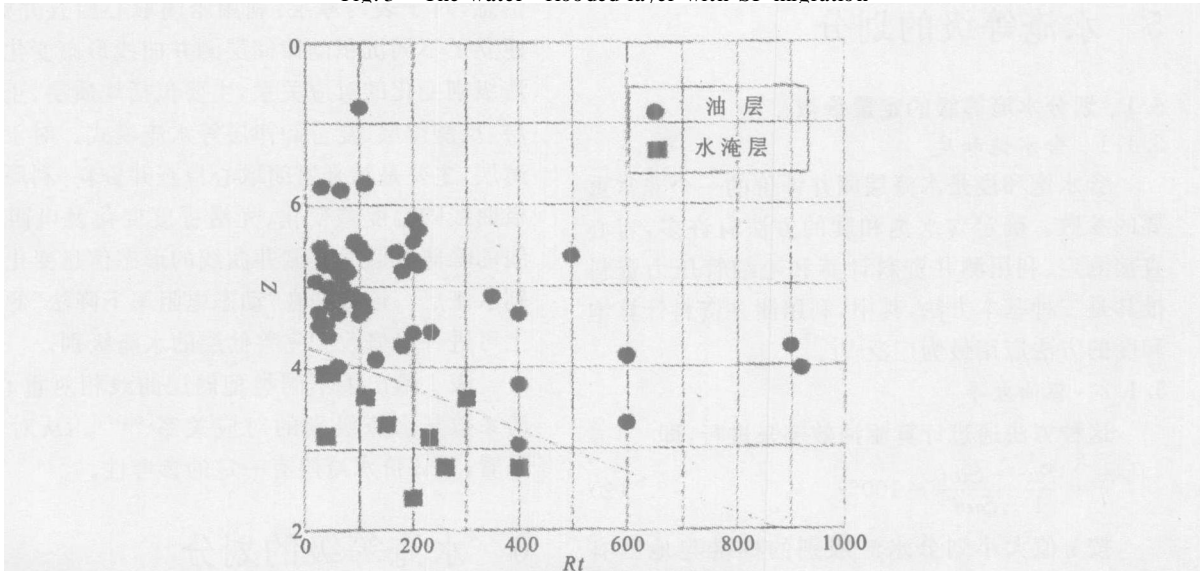


图 4 自然电位偏移的水淹层

Fig. 4 The identified method of combining / Rt and Z

的声阻抗:

$$Z = DEN \times \frac{1}{AC} \quad (1)$$

根据图中统计的数据点数可以确定水淹层和未水淹层的界限,根据数据拟合可以得到一个界限;大于这条线的储层为未水淹层,小于这条线的储层为水淹层。根据这个方法可以直观地判断储层是否已经水淹。

4.4 其他识别方法

除上述方法外,冲洗带电阻率法、径向电阻率法、可动流体法也被用于水淹层的识别。在特定条件下利用激发激化电位、相位介电、声波、中子伽马等测井曲线的异常,也可以识别水淹层^[2]。

另外,通过提取典型样本特征的人工智能方法诸如:人工神经网络法^[11]、模糊综合判定法^[9]、灰色识别法^[10]等也可以被用以识别水淹层,并取得了较好的效果。

在实际生产解释中,对于不同特征的水淹层,一般采用不同的识别方法。比如:“自然电位基线偏移法”用以识别局部水淹层和具有一定夹层厚度的互层组水淹层位;“自然电位与电阻率曲线对应性分析”用于识别底水型油水同层,均能获得良好的解释结果^[12]。因此,利用常规测井资料定性识别水淹层时,应根据研究区块的具体地质条件,结合生产动态资料和生产测井资料,以及邻井吸水或生产状况,采用合适的识别方法进行识别^[14]。

5 水淹等级的划分

5.1 划分水淹等级的定量参数

5.1.1 含水饱和度

含水饱和度是水淹层测井评价的一个非常重要的参数。确定含水饱和度的方法有许多,岩心直接测定、利用测井资料计算和毛细管压力资料推算是三种基本方法,其中,利用测井资料计算饱和度的方法应用最为广泛^[13]。

5.1.2 驱油效率

这种方法通过计算驱油效率来进行,即

$$= \frac{S_w - S_{wi}}{1 - S_{wi}} \times 100\% \quad (2)$$

按值大小划分水淹级别的标准与地区有关。由于 S_w 和 S_{wi} 一般是通过电阻率、自然电位、岩性、孔隙度测井信息计算的,因而综合了这些测井信息对水淹层的反映,是定量评价水淹

层较可靠的参数之一^[15]。

5.1.3 含水率

含水率是反映水淹程度的最直接参数^[14],按 F_w 值划分水淹级别的标准一般如下:

- (1) $F_w < 10\%$, 为未水淹油层;
- (2) $10\% < F_w < 40\%$, 为弱水淹油层;
- (3) $40\% < F_w < 80\%$, 为中水淹油层;
- (4) $F_w > 80\%$, 为强水淹油层。

5.2 动态电阻率下降法

“动态电阻率下降法”针对不同储层岩石物理相,以密闭取心检查井资料为基础,利用“岩心刻度测井技术”反求储层原始状态下的电阻率值,再与目前实测电阻率值比较,求出电阻率下降幅度,进而判断储层的水淹级别。该方法主要应用测井曲线的幅度信息。

图5是模拟油田注水开发条件下做出的各类岩石物理相在水淹过程中电阻率比值随含水饱和度变化特征图^[16]。

定义电阻率曲线下降幅度为 R_t ,则 $R_t = (R_{ti} - R_t) / R_{ti}$ (油田未注水开发时储层的电阻率定义为 R_{ti})。对于未水淹层, $R_t = 0$;对于水淹层, $R_t > 0$,并且随着水淹程度的增强, R_t 值变大。结合密闭取心检查井资料,利用 R_t 与其它参数组合建立不同岩石物理相储层水淹层静态解释标准。

5.3 水淹模式识别法

“水淹模式识别法”主要利用测井曲线的形态信息,对于表内厚层,利用密闭取心检查井资料,建立了不同沉积韵律储层测井曲线形态变化与水淹级别变化的对应关系,主要包括均质层、正韵律层、反韵律层、复合韵律层等水淹模式。对于表内薄层,主要是结合密闭取心检查井资料,利用微电极曲线的幅度差变化、光滑程度变化及电阻率曲线的峰值变圆滑等测井曲线的形态信息变化来识别水淹层。该方法在“动态电阻率下降法”的基础上可进一步修改和完善储层的水淹级别。

表1给出了不同类型储层曲线相对重心、光滑系数与水淹级别的对应关系^[16,17]。从对比结果看,对评价水淹层有一定的参考性。

6 水淹等级的划分

我国在水淹层水淹机理和解释方面取得了很大的进展。但是,在实际中,仅仅建立在单井测井

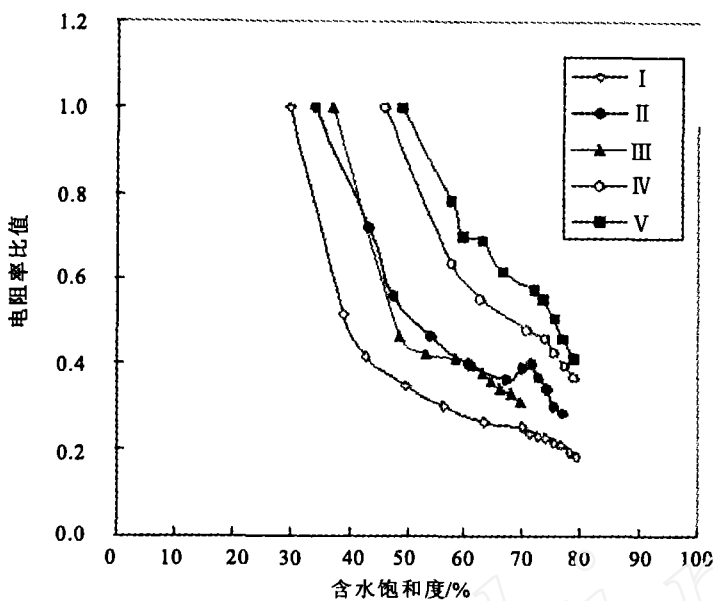


图 5 各类岩石物理相水淹层电阻率变化规律

Fig. 5 The law of resistance for different water - flooded rock physical face

表 1 不同类型储层水淹模式参数提取对比表

Table 1 The parameter of different types of water - flooded layer

序号	层 位	起始深度 / m	终止深度 / m	厚度 / m	深侧向曲线相对重心	声波曲线相对重心	密度曲线相对重心	微球曲线光滑系数	微电位曲线光滑系数	微梯度曲线光滑系数	水淹级别	储层类型
1	S 1	814. 9	816. 1	1. 2	0. 48	0. 52	0. 51	13. 37	2. 27	1. 92	中	均质韵律
2	S 3	823. 5	824. 8	1. 3	0. 51	0. 52	0. 52	25. 86	2. 9	2. 25	弱	均质韵律
3	S 10- 11	871. 3	874	2. 7	0. 41	0. 5	0. 51	36. 43	2. 04	1. 72	弱-中	均质韵律
4	P 1- 2	932. 5	940	7. 3	0. 42	0. 51	0. 5	56. 19	2. 63	1. 84	弱-中-强	正韵律
5	P 6	953. 6	955. 7	2. 1	0. 57	0. 51	0. 51	22. 99	1. 94	1. 63	弱	正韵律
6	P 13	968. 2	969. 4	1. 1	0. 49	0. 52	0. 52	12. 76	2. 12	1. 71	中	正韵律

资料的水淹层测井解释存在一定的局限性。主要体现在：

1) 水淹机理的基础理论实验研究还比较薄弱,有些解释模型和方法还不适应油田特点和水淹层评价的要求;

2) 解释过程中,过多地依赖经验公式,而没有考虑注水开发过程中油层岩性、物性以及电性变化造成的对原有模型的影响。

3) 大部分油田还不能进行薄层、超薄层和细分水淹级别的解释^[18~24]。

针对以上各种情况,笔者认为应该着重发展以下几个方面:

1) 使用新的试验研究方法,如 CT、核磁共

振、网络分析求准剩余油饱和度和其他参数。用岩石物理实验研究结论为建立新的测井方法和解释模型提供依据。

2) 发展新的测井解释理论和方法。

3) 为了掌握水驱过程中油藏剩余油饱和度的变化,应发展 C/O 能谱、过套管电阻率、电磁感应、电磁波和核测井方法的时间推移测井。

4) 在深度和广度上进一步深化和拓宽测井解释与分析的研究内容,主要包括加强测井在油气田地质、工程、开发等方面的应用。

5) 从单井向多井综合解释和油层描述发展,向工作站图像解释和集成化测井解释方向发展,以测井为纽带,与地质、地震资料有机结合起来,

将测井资料解释的综合应用推向一个新的水平。

参考文献:

- [1] 慈建发,何世明,李振英,等. 水淹层测井发展现状与未来[J]. 天然气工业, 2005, 25(7): 44—46.
- [2] 张审琴. 水淹层测井解释技术状况与发展趋势[J]. 青海石油, 2000, 18(2): 29—33.
- [3] 潘兴国. 中国水驱油田开发测井[C]. 水驱油田开发测井 96 国际学术讨论会论文集[M]. 北京:石油工业出版社, 1996. 153—163.
- [4] 慈建发,何世明,李振英. 水淹层变化特征分析研究[J]. 断块油气田, 2005, 12(2): 31—34.
- [5] 雍世和,张超谟. 测井数据处理与综合解释[M]. 东营:石油大学出版社, 1996. 350—366.
- [6] 高楚桥. 复杂储层测井评价方法[M]. 北京:石油工业出版社, 2003. 118—140.
- [7] 韩志明,王宪成,李胜军. 高含水期水淹层解释方法研究[J]. 测井技术, 2000, 24(5): 333—336.
- [8] 黄宏才. 高矿化度地层水地区水淹层识别的几种实用方法[J]. 断块油气田, 2002, 9(3): 54—56.
- [9] 王向公,周艳敏,黄文新,等. 模糊综合判别定性划分水淹层[J]. 测井技术, 1999, 23(1): 46—49.
- [10] 宋子奇. 灰色系统与神经网络技术在水淹层测井评价中的应用[J]. 石油勘探与开发, 1999, 26(3): 90—92.
- [11] 梅红. 神经网络技术在测井相分析及水淹层判别中的应用[J]. 石油大学学报, 1997, 21(3): 26—31.
- [12] 李振英. 水淹层测井解释方法研究[D]. 西南石油学院, 2004. 19—41.
- [13] 侯连华,王京红,刘泽容. 水淹层测井评价方法[J]. 石油学报, 1999(5): 49—55.
- [14] 李安琪. 水淹层测井解释及剩余油分布研究[D]. 西南石油学院, 2004. 31—48.
- [15] 罗安银,刘西婵,齐宝艳,等. 淡水侵入油藏饱和度解释模型和水淹级别的识别[J]. 测井技术, 2002, 26(2): 142—147.
- [16] 闫伟林. 大庆油田萨中地区薄差层水淹层测井解释方法研究[D]. 吉林大学, 2004. 55—66.
- [17] 胡杰. 水淹层解释模型研究[C]. 水驱油田开发测井 96 国际学术讨论会论文集[M]. 北京:石油工业出版社, 1996. 110—115.
- [18] 高印军,李才雄,王大兴,等. 水淹层测井解释技术研究与应用[J]. 石油勘探与开发, 28(5): 42—35.
- [19] 陈华,曹鹏飞,刘华,等. 水淹层解释方法在马厂油田的应用[J]. 断块油气田[J]. 2001, 8(3): 39—43.
- [20] 王庚阳,刘明新. 利用测井资料确定油水相渗透率的方法[J]. 石油学报, 1992(12): 36—39.
- [21] 范锡彦,周元岐,王桂成. 胡状集油田水淹层测井综合解释及应用[J]. 内蒙古石油化工, 2001, 27(5): 165—169.
- [22] 骆森,潘和平,黄东山. 地球物理测井在水文地质勘察中的应用综述[J]. 工程地球物理学报, 2004(2).
- [23] 范月荣,刘正峰,高彩红,等. 一种新型薄层电阻率测井(TBRt)的评价方法及应用[J]. 工程地球物理学报, 2004(2).
- [24] 黄坚,张红杰,赵卫平,等. 测井资料质量控制与评价[J]. 工程地球物理学报, 2005(2).