

羊三木油田低阻油层测井评价方法

宋 璠¹, 侯加根¹, 刘钰铭¹, 苏妮娜¹, 薛建军², 李淑静², 徐 芳²

1. 中国石油大学资源与信息学院, 北京 102249

2. 中国石油天然气股份有限公司大港油田分公司, 天津 300280

摘要 针对羊三木油田低阻油层, 综合地质、钻井特征, 对低阻油层成因进行了分析, 认为该区低阻油层主要是由于薄层、高束缚水饱和度储层引起。针对羊三木油田的实际情况, 提出了区域构造对比法、自然电位减少系数法等低阻油层定性评价方法和针对高束缚水饱和度的双水法、针对薄层处理的高分辨率处理技术等定量评价方法。

关键词 羊三木油田; 低阻油层; 束缚水; 测井评价; 双水法

中图分类号 P631.81

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)15-0052-04

Evaluation of Low Resistivity Oil Zone in YSM Oilfield

SONG Fan¹, HOU Jiagen¹, LIU Yuming¹, SU Nina¹,
XUE Jianjun², LI Shujing², XU Fang²

1. School of Geo-Resource and Information, China University
of Petroleum, Beijing 102249, China

2. Dagang Oilfield Branch Company, PetroChina Company
Limited, Tianjin 300280, China

Abstract Based on a geological analysis and the drilling features, the genesis of low resistivity reservoir in YSM oil field is studied. It is concluded that the low resistivity reservoir oil comes mainly from five causes, that is, high irreducible water saturation, high clay content, thin layer of low resistivity reservoir, effect of high salinity and high-density slurry. Especially, the thin layer and high bound water saturation are the main causes of low resistivity reservoir in this area. This paper considers mainly these two aspects. According to the actual conditions of YSM oil field, a qualitative evaluating method for low resistivity reservoir is proposed, which includes the regional structure contrast method and the spontaneous potential decrease coefficient method. With the actual testing situation, the low resistivity reservoir can be interpreted well by the regional structure contrast method. The spontaneous potential decrease

coefficient method is first applied to the area, with good results. At the same time, the quantitative evaluation method is used with a dual water model that considers the high bound water saturation. The dual water model is effective for the low resistivity reservoir due to the lithology and the additional electrical conductivity from clay minerals. Meanwhile, a high-resolution logging data processing technology is put forward, mainly for reservoirs with complex lithology.

Keywords YSM oil field; low resistivity reservoir; bound water; log evaluation; dual water model

低阻油层成因复杂, 识别手段有限, 加上测井方面的缺陷和解释方法的不完善, 在油田勘探开发初期往往被遗漏^[1]。羊三木油田自 1964 年开始勘探, 1971 年投入开发, 至今已开采 30 余年, 根据河流相储层横向变化大、砂体分布复杂的特点, 决定开展低阻层潜力调查, 寻求产量接替, 因此近年来低阻油层作为该油田挖潜和新增储量的目标之一倍受关注。国内外许多岩石物理学家对低阻油层的成因进行了研究^[2-3], 本研究在总结国内外低阻油层成因研究成果的基础上, 对羊三木油田低阻油层开展了定性及定量评价的研究。

1 低阻油层的含义

广义的低电阻率油层, 分为绝对低电阻率油层、相对低电阻率油层 2 种^[4]。绝对低电阻率油层的特点是深探测电阻率绝对值很低, 常在 $1\sim 2\ \Omega\cdot\text{m}$, 但电阻率指数一般大于 4, 这类油气层具有中等以上的含油饱和度 ($S_o>50\%$), 油层电阻率明

收稿日期: 2009-02-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50374048)

作者简介: 宋璠, 博士研究生, 研究方向为储层建模、油藏描述, 电子信箱: songfan0026@163.com

显大于周围典型水层的电阻率,符合油层的定义特征,因此识别这类绝对低电阻率油气层并不太难。相对低电阻率油气层是指油气层的电阻率与邻近水层电阻率十分接近,有时甚至出现相互交叉的现象,电阻率指数小于3,含油饱和度低($S_o < 50\%$),造成从电性曲线上很难区分油水层。这类低电阻率油层的识别和评价已成为当前测井解释领域关注的难题。

2 低阻油层成因分析

低阻油气藏的形成与其地质背景相关。主要受控于储层性质(亲油、亲水、孔、渗、饱、孔隙结构等)、地层水性质(矿化度、离子活化度、密度等)、油藏构造的幅度、油柱高度及驱动方式等^[5]。通过总结国内外低阻油气藏成因的研究结果,认为羊三木油田低阻油层的成因主要有以下5个方面。

1) 储层束缚水饱和度较高。对研究区60余口井压汞资料进行分析,结果表明对于该区储层孔隙度虽然属于中—较高,但岩石颗粒较细,孔隙喉道半径小于 $0.1\ \mu\text{m}$ 的微孔隙很发育,孔喉狭窄,孔隙结构较差,岩石普遍亲水性较强,因而束缚水饱和度较高,电阻率较低,油水层差别小。这类油层,如果油质很好,可以形成相当好的产层^[6]。

2) 储层中的黏土含量较高。砂岩含分散状黏土是形成低电阻率油气层的一个重要因素。扫描电镜实验及X衍射分析表明,羊三木油田储层中的黏土成分是以伊蒙混层为主,占58.5%,伊利石和蒙脱石次之,分别占21.8%和19.7%。由于这些黏土矿物晶格间隔比较大,分子间引力相对较弱,因而有较强的吸水性,促使产层的束缚水含量明显增大。

3) 薄互层形成低阻油层。这类油气层本身不是低阻,而是由于电阻率测量过程,受围岩影响造成低阻。

4) 高矿化度、高密度泥浆的影响。部分地区使用高矿化度、高密度泥浆钻井,在低矿化度地层水背景下,这种高矿化度、高密度的泥浆将侵入原状地层,特别是地层中裂缝发育时,将致使油气层的电阻率大大降低,与邻近水层的电阻率相差甚小,有时甚至低于水层。

5) 复合成因的低阻油层(岩性、薄互层、泥浆侵入等)。

在某一具体油藏中可能同时遇到数种因素交织在一起,其中有油气层内因的作用,也有外因的作用,这样形成的低阻油气层被认为是复合成因的。羊三木油田低阻油层同时受控于上述5种因素,以前3种最为突出。

3 低阻油层定性评价方法

3.1 区域构造对比法

通过对羊三木油田低阻油层测井资料和试油资料统计分析发现,该区低阻油层主要分布于馆II组地层,而且大多位于沉积旋回(本区多为正旋回)的顶部。造成低阻油层的原因主要是岩性因素影响,其次受层厚、围岩因素影响。由于本区构造较为简单,油水界面主要受构造控制,可以根据构造位置的高低、通过邻井对比对本区低阻油层进行解释,解释结果与试油情况基本一致。

3.2 自然电位减少系数法

由岩性因素影响的低阻油层是由于储层岩性细,泥质含量增加而引起束缚水饱和度增高,导致自然电位幅度减小,电阻率值降低。本课题组在研究区首次采用自然电位减少系数法对低阻油层进行研究,取得了较好的效果。

同一层段内,设PSP为含黏土地层的静自然电位,SSP为与含黏土质地层地层水矿化度相同的纯地层(水层)的静自然电位,则自然电位减小系数定义为PSP与SSP的比值。根据定义,标准水层自然电位减小系数接近于1,泥岩段为0。根据上述低阻油层的自然电位曲线的变化规律,分别做了低阻油层电阻率与自然电位减小系数交会图(图1)。可以看出,油层、油水同层、水层分布于3个区域,水层SP幅度异常大,具有渗透性好、边底水活跃的特性,低阻油层SP幅度异常小。当自然电位减小系数 < 0.35 , $5\ \Omega\cdot\text{m} < R_t < 7\ \Omega\cdot\text{m}$ 为低阻油层带,介于 $0.35\sim 0.5$ 为油水同层带,大于0.5为水层带。

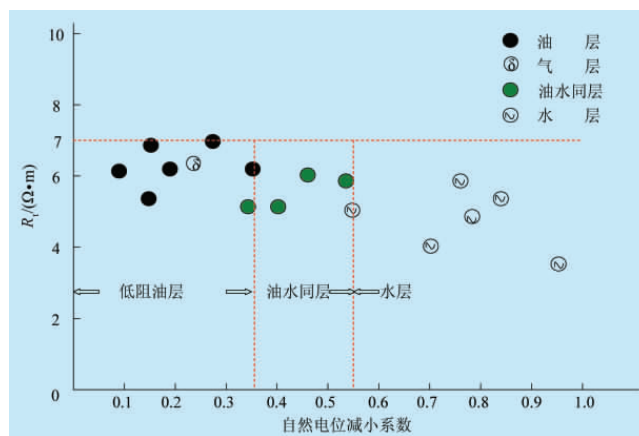


图1 电阻率与自然电位减小系数交会图

Fig. 1 Resistivity and spontaneous potential decrease coefficient

4 低阻油层定量评价方法

针对羊三木油田低阻油层的成因及特点,在总结前人研究成果的基础上,提出针对高束缚水饱和度低阻油层的双水法及针对薄层处理的高分辨率处理技术,实践证明这些定量评价方法在评价该区由于岩性、层厚等因素引起的低阻油层方面效果很好。

4.1 双水法

双水法基本原理是根据含水饱和度 S_w 与束缚水饱和度 S_{wi} 、可动水饱和度 S_{wm} 的关系,判别低阻油层。双水法针对由于岩性及黏土矿物附加导电性造成油层低阻的储层效果较好。当油层岩石颗粒细或泥质含量较高,计算的储层含油饱和度降低,虽未达到典型油层定量解释标准,但储层的可动水饱和度也很低,结合构造特点,仍解释为油层。

图2是羊5-11井测井处理成果图。可以看出,第9号层(1300.5~1304.0 m)感应电阻率为 $5\sim 6\ \Omega\cdot\text{m}$,从GR曲线上看该层泥质含量较高,计算的束缚水饱和度达50%以上,可

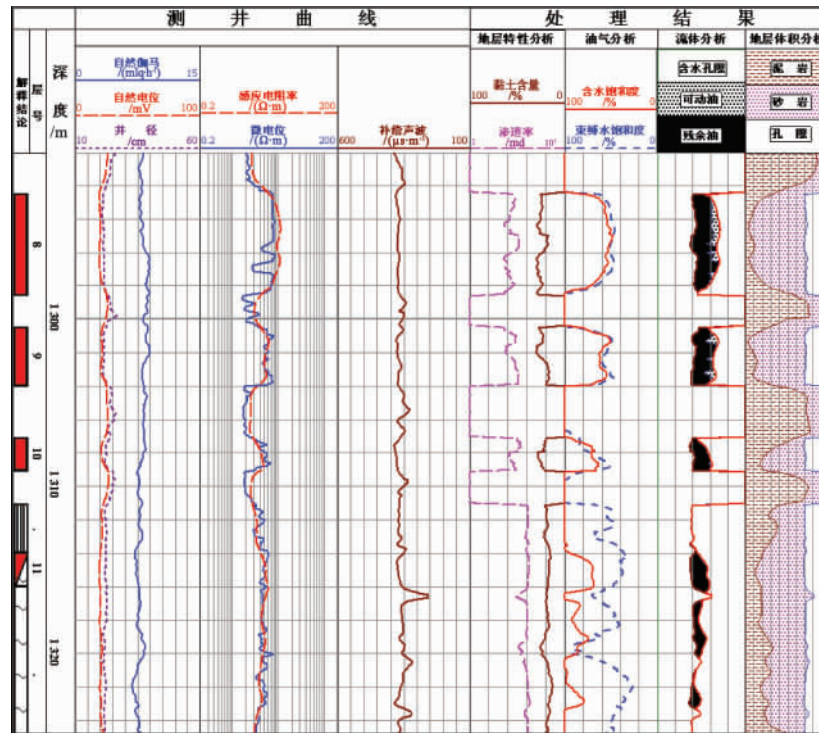


图2 双水法综合处理成果

Fig. 2 Dual water method to deal with the results of a comprehensive treatment

动水饱和度小于 20%，故解释为油层，1974 年 4 月该层与 8 号层合试，日产油 3.54 t，无水，证实了该解释的可靠性。

4.2 薄层测井资料高分辨率处理

针对复杂岩性储层，老井测井资料纵向分辨率不足的问题，利用测井资料高分辨率处理技术对双侧向电阻率测井资料、双感应电阻率测井资料、单感应、自然伽马测井资料、补偿声波测井资料、补偿密度测井资料、补偿中子测井资料等进行高分辨率处理，使其纵向分辨率最高能达到 0.5 m，采用的技术主要如下。

1) 利用短源距探测器计数率计算地层密度。补偿密度测井是通过远、近探测器计数率的对比，利用近探测器对远探测器进行补偿，从而达到消除井眼影响的目的。然而其最终的密度值主要取决于远探测器的计数率，从而使得补偿密度的纵向分辨率主要取决于远探测器的分辨率。为提高补偿密度测井资料的纵向分辨率，本研究是利用短源距探测器具有高纵向分辨率的特点，以短源距探测器的计数率为主计算地层密度，用标准补偿密度信息对近探测器密度进行井眼补偿，从而达到消除井眼影响的目的。

该方法以下面 2 个前提为条件：① 近探测器密度的灵敏度和统计误差必须满足最终结果所需的精度；② 与实际密度变化相比，近探测器响应所受到的系统干扰随深度变化缓慢，以保证由近探测器观察到的变化反映实际密度的变化，而不是由于系统偏差（环境影响）所造成的。

对于常规测井来说，第一个前提条件是满足的，而对第 2 个条件来说，当井眼形状良好时是有效的，但在井眼不规则、

受冲蚀及局部有重晶石泥饼堆积的情况下，这种假设前提是无效的。其计算公式为

$$\rho_{\text{enh}} = \rho_b + c(\rho_{\text{near}} - \rho_{\text{near}})$$

式中， ρ_{enh} 为经过补偿后的真实地层密度， ρ_{near} 为近探测器密度值； ρ_{near} 为经滤波后分辨率降到与 ρ_b 相同时的近探测器密度值； ρ_b 为常规实测的补偿密度； c 为综合控制参数，选用适合的所测参数已知的标准层来确定 c 值。

2) 利用正则化反褶积 α 处理技术提高非电法测井曲线纵向分辨率。对于常规非电法测井，均提供了适合各自特点的正则化反褶积 α 处理技术，分别确定了适合常规 GR、AC、DEN、CNL 等曲线的正则化反褶积因子。

对于任一含有噪声的测井记录 $u(z)$ ，其与原状地层参数的关系式可表示为

$$u(z) = g(z) * m(z) + n(z)$$

式中， $g(z)$ 为响应函数， $n(z)$ 为噪声信号， $m(z)$ 为地层原状物性参数。

设信噪比为 S/N ，有

$$m(z) = g_a(z) * (u(z) - n(z)) = \frac{S/N}{1 + S/N} g_a(z) * u(z)$$

高分辨率的地层物性参数由下式计算：

$$m'(z) = g_a(z) * u(z)$$

$$m_{\text{enh}}(z) = u(z) + C * (m'(z) - u(z))$$

式中， C 为正则化反褶积因子，是由信噪比 S/N 确定的综合控制参数。

3) 最大熵反演技术。对于感应测井，由于仪器本身特性，

储层必须大于 2 m，原始测井曲线才能较好地反映其真实电导率信息，在储层小于 2 m 时利用最大熵反演技术，通过构造熵函数，利用最优化方法求其最大值，确定地层真电导率信息。

4) 分辨率匹配技术。尽管侧向电阻率的纵向分辨率比感应电阻率分辨率高，但对薄地层，其纵向分辨率仍不能满足地层真实电阻率的需要。分辨率匹配技术的基本思想是保留

低分辨率测井曲线对井眼等环境具有良好补偿特性，同时又通过纵向分辨率高的测井曲线提高低分辨率曲线的纵向分辨率，得到具有良好纵向与横向探测特性的同分辨率曲线。

对薄层测井资料高分辨率处理后，明显提高了测井资料的纵向分辨率，较好地避免了测井解释遗漏，对于厚度大于 0.5 m 油层能较好的解释出来(图 3)，解释层 1 上的 2 个小层即为本次新解释出的油层，经生产验证符合率较高。

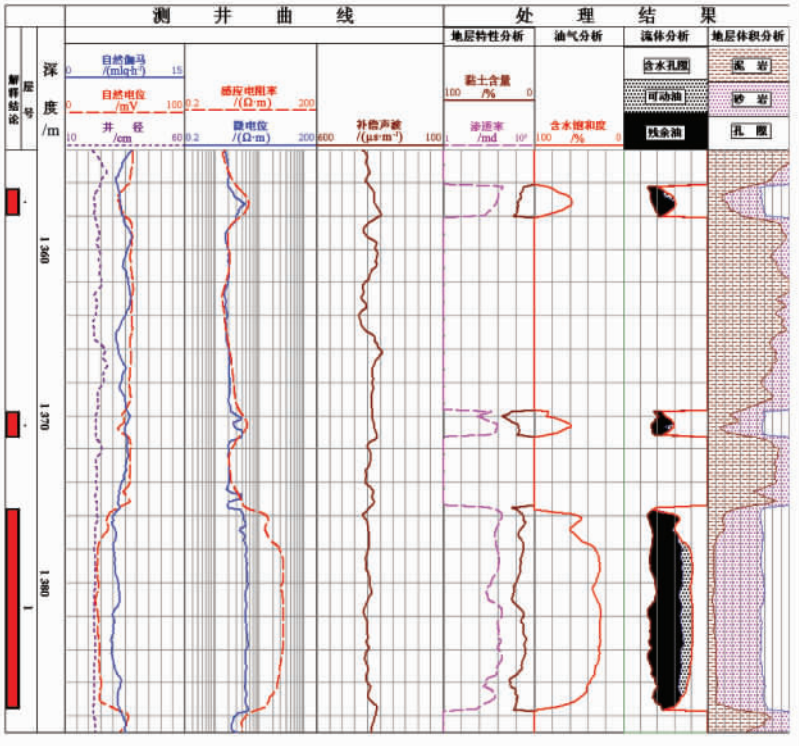


图 3 双水法综合处理成果

Fig. 3 Dual water method to deal with the results of a comprehensive treatment

5 结论

羊三木油田低阻油层成因复杂，主要有束缚水饱和度较高、黏土含量较高、薄互层影响、高矿化度及高密度泥浆影响、复合成因 5 方面的影响因素。基于对成因的深入研究，提出了区域构造对比法、自然电位减少系数法等定性评价方法及双水法、薄层测井资料高分辨率处理等定性评价方法，实践证明上述评价方法应用于羊三木油田低阻油层评价效果较好。

参考文献 (References)

[1] 石油测井情报协作组. 测井新技术应用 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1998.
Collaborative Group of Logging Information. The application of new logging technologies[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998.

[2] 曾文冲. 低电阻率油气层的类型成因及评价方法的分析[J]. 地球物理测井, 1991, 15(1): 6-12.
Zeng Wenchong. Geophysical Logging, 1991, 15(1): 6-12.

[3] Worthington P F. Recognition and development of low-resistivity pay[R]. SPE38035, doi: 10.2118/38035-MS, 1997.

[4] Zemanek J. Low resistivity hydrocarbon bearing sand reservoirs [J]. SPE Formation Evaluation, 1989, 4(6): 515-521.

[5] 曾文冲. 油气层储集层测井评价技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991.
Zeng Wenchong. Oil and gas reservoir logging evaluation techniques[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991.

[6] 左银卿, 郝以岭, 安霞, 等. 高束缚水饱和度低阻油层测井解释技术[J]. 西南石油学报, 2000, 22(2): 27-31.
Zuo Yinqin, Hao Yiling, An Xia, et al. Journal of Southwest Petroleum, 2000, 22(2): 27-31.

[7] 孙建孟, 陈钢花, 杨玉征, 等. 低阻油气层评价方法 [J]. 石油学报, 1998, 19(3): 83-88.
Sun Jianmeng, Chen Ganghua, Yang Yuzheng, et al. Acta Petrolei Sinica, 1998, 19(3): 83-88.

[8] 马德录, 麻平社, 路云峰, 等. 测井和地质相结合识别低阻油层 [J]. 国外测井技术, 2006, 21(2): 8-11.
Ma Delu, Ma Pingshe, Lu Yunfeng, et al. Foreign Logging, 2006, 21(2): 8-11.

(责任编辑 陈广仁)