

塔里木盆地低电阻率油层成因与评价

赵军, 宋帆

塔里木油田公司, 新疆库尔勒 841000

摘要: 随着塔里木盆地油气勘探工作的深入, 相继发现了一批低电阻油层, 油层电阻率最低达 $0.45 \Omega \cdot m$, 与水层的电阻率几乎相当. 通过对轮南侏罗系 J_{IV} 、吉拉克三叠系 T_{III} 和哈得逊石炭系 C_{III} 3套低电阻油层的地质与实验分析认为, 引起低电阻的主要原因是黄铁矿的局部富集、粘土矿物以及高矿化度束缚水等的附加导电, 提出利用毛管压力资料, 建立油藏物性、油层高度与含油饱和度的关系以及采用高温高压岩电参数等不同的评价方法, 从而使计算的饱和度提高 $8\% \sim 25\%$, 测井解释符合率上升 $5\% \sim 8\%$.

关键词: 低电阻; 粘土附加导电; 束缚水; 黄铁矿; 矿化度; 饱和度.

中图分类号: P618.130.2

文章编号: 1000-2383(2004)03-0317-06

收稿日期: 2003-11-20

Genesis and Evaluation of Low Resistivity Oil Formation in Tarim Basin

ZHAO Jun, SONG Fan

Tarim Oilfield Company, Korla 841000, China

Abstract: As petroleum exploration continues, a series of low-resistivity oil reservoirs have been found in the Tarim basin. The lowest resistivity of the oil reservoir is only $0.45 \Omega \cdot m$, almost identical to the resistivity of water layer. Geological observations and experimental analyses on the Jurassic (J_{IV}) low-resistivity oil reservoir in Lunnan, Triassic (T_{III}) low-resistivity oil reservoir in Jilake and Carboniferous (C_{III}) low-resistivity oil reservoir in Hadexun indicate that the main causes of the low resistivity of the oil reservoirs are the local enrichment of pyrite and the additional electricity conducting effect of clay minerals and the low salinity bound water. Several evaluation methods using different data such as capillary pressure, oil saturation and rock electrical parameters under high temperature and high pressure conditions are presented. Using these methods, the calculated oil saturation increases by 8% to 25% , and the accuracy of well logging explanation increases by 5% to 8% .

Key words: low resistivity; clay adhesive conduct; bound water; pyrite; salinity; saturation.

塔里木盆地台盆区由于受沉积、成岩及构造等多种因素的影响, 不同地区、不同层位的油层电阻率变化较大, 随着塔里木盆地油气勘探工作向深度和广度的不断进展, 相继发现了一批低电阻油层. 这些复杂油气层已不同程度地获得了工业油气流, 对低电阻油层的认识与评价对油气储量与产量的增长具有十分重要的意义.

目前, 在塔里木盆地已发现了3套明显的低电阻油层, 它们分别见于轮南侏罗系 J_{IV} 油藏、吉拉克三叠系 T_{III} 油藏和哈得逊石炭系 C_{III} 油藏. 对于低阻

油层的确认, 没有统一的电阻率界定标准, 根据国内外情况, 可以把同等物性下电阻增大率小于3的油层定义为低电阻油层(欧阳健等, 1994). 一般来讲, 可以从2个方面考虑: (1) 油层电阻率与邻近泥岩层相当, 甚至小于泥岩电阻率; (2) 油层电阻率与下部水层接近, 油水层难以区分. 以上3套油层的低电阻主要指第2种情况, 由于油水层电阻率十分接近, 这类油层含油饱和度的计算就成为研究的重点. 本文针对油田的不同地层、不同层位存在的低电阻率油层, 首先开展了低电阻率油层成因研究, 然后在不同

基金项目: 石油天然气总公司“九五”科技攻关项目(No. 2097060263).

作者简介: 赵军(1970-), 男, 高级工程师, 主要从事岩石物理研究、地球物理测井资料解释及储量参数研究. 电话: 0996-2171429(O); 0996-2172247(H); 13709951450(CP); E-mail: zhaojun70@sina.com

区块针对不同成因的低电阻率油层分析总结了低电阻率油层的评价方法,从而提高了低电阻率油层的测井解释水平和测井解释符合率。

1 低电阻油层成因分析

一般来讲,低电阻油层的成因可能有 6 个方面,即:存在薄层状砂岩/页岩层序;存在高矿化度地层水;存在细粒粉砂质砂岩;存在内部微孔隙;存在表面微孔隙;存在导电矿物。从测井认识角度来看,形成低电阻的主要原因为:(1)岩石颗粒细、束缚水含量高,含油饱和度不高;(2)存在粘土矿物附加导电,导致油层电阻率低;(3)具有微裂缝(隙)孔隙系统的油藏;(4)存在黄铁矿等导电矿物;(5)油层长时间受高矿化泥浆浸泡,造成泥浆滤液深侵入导致的油层电阻率下降。当各种成因综合作用时,问题就变得更加复杂(曾文冲,1991)。

1.1 轮南侏罗系 J_{IV} 油组

轮南侏罗系低电阻油层首先在 L1 井 4 565.5~4 570.5 m 被发现(图 1)。该层钻井取心 6.17 m,含油心长 0.55 m,而测井电阻率只有 $0.45 \Omega \cdot m$,与该井下部水层(4 617.5~4 623.0 m,完井测试日产水 $137 m^3$,图 1)的电阻率相当。后经反复测试,确认

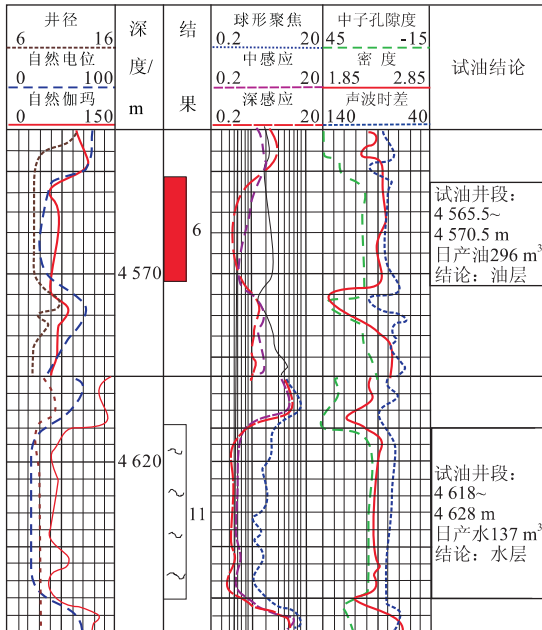


图 1 L1 井低电阻油层及水层电性特征

Fig. 1 Features of low resistivity oil and water formations in L1 well

日产纯油 $296 m^3$ 。该层经多井取心反复观察,岩心中含有大量的黄铁矿颗粒,黄铁矿的出现部位与低电阻的对应性较好。该岩性段以粗、细砂岩为主,粘土成分含量低、物性好,黄铁矿的影响成为低阻成因的首要考虑因素。

由于缺乏可靠的实验,我们只能参考国外经验性地考察黄铁矿对电阻率的影响。根据希尔契(1989)的研究成果:(1)对于高频感应测井,黄铁矿影响增大;(2)在含高矿化度地层水的地层中,黄铁矿影响增大;(3)层状黄铁矿比分散状黄铁矿对感应测井有更大影响。Clavier 等人做出了分散黄铁矿对电测井的影响图版,根据轮南 J_{IV} 油组实际地层水资料,我们外推了地层水电阻率 $R_w = 0.015 \Omega \cdot m$ 条件下的影响结果:当黄铁矿含量为 0.5% 时,感应电阻率下降 14%;当含量为 1% 时,下降 23%,若黄铁矿局部富集,影响将会更大。

岩心观察表明, J_{IV} 油组中确有黄铁矿局部富集,特别是在 L2 井 4 546.71~4 555.16 m 取心段,顶部 0.55 m 岩心浸染状、层状分布了多层黄铁矿,单层厚度 0.2~0.8 cm,实际地层对感应测井电阻率的影响甚至大于此处所计算的下降幅度。

对轮南 20 多口井 J_{IV} 油组低电阻曲线形态与数值分析后发现,低电阻油层的电阻率最低为 $0.45 \Omega \cdot m$,黄铁矿含量低的部分,电阻率趋于正常,最高达 $5.0 \Omega \cdot m$,绝大多数层段电阻率在 $1.0 \Omega \cdot m$ 左右。

J_{IV} 油组低电阻曲线形态可以归纳为以下 3 种:(1)全层段低阻型,地层普遍含有黄铁矿,深浅电阻率曲线呈现均匀低电阻;(2)山字型,上下出现低电阻,中部呈高阻,类似“山”字,高低部分电阻率最大可相差 5 倍;(3)台阶型,电测曲线的一端(上部或下部)低电阻,另一端高电阻,形似台阶,这种曲线形态的高低电阻一般相差 2~3 倍。

1.2 吉拉克三叠系 T_{II} 油组

由于塔里木盆地油气储层的地层水矿化度普遍较高,而人们普遍认为,在含高矿化度地层水的储层中粘土附加导电作用很微弱,可以不予考虑。“九五”研究结果表明,分布在吉拉克油田的 T_{II} 低电阻油层不约而同地存在着蒙脱石、伊蒙无序混层矿物含量明显增高的现象。这是一个重要的发现,因为粘土矿物中以蒙脱石、伊蒙无序混层矿物的附加导电作用最为显著(Hill and Milburn, 1950)。

实验结果表明, T_{II} 油组低电阻油层粘土附加导电作用的确存在,而且十分显著。图 2a 为 F1 井低阻

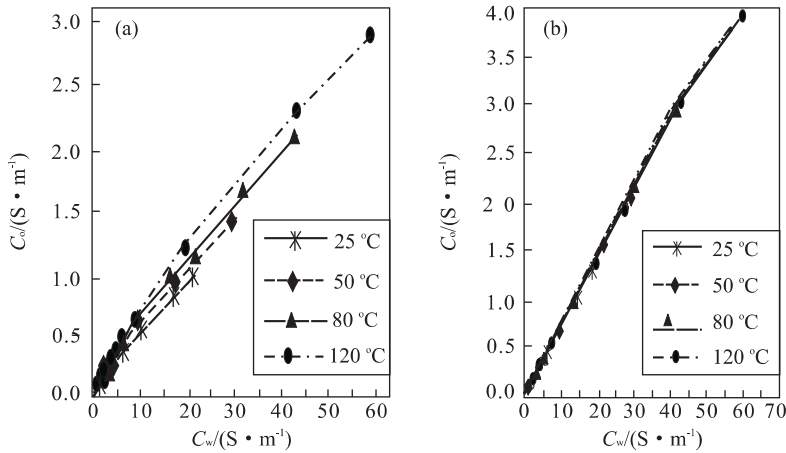


图 2 F1(a)和 F2(b)井岩样电导率(C_o)与溶液电导率(C_w)关系

Fig. 2 Relationship of C_o and C_w of the core samples in F1 well (a) and F2 well (b)

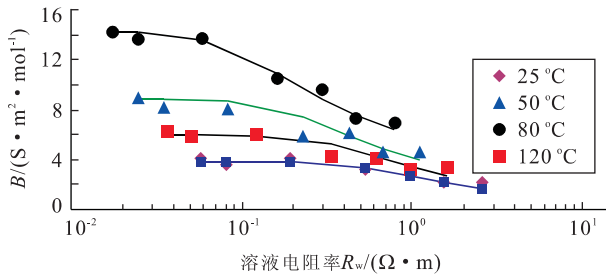


图 3 T_{II} 油层不同温度下 B 与 R_w 的变化关系

Fig. 3 Relationship of B and R_w under different temperatures in T_{II} oil formation

油层样品完全含水电导率(C_o)与溶液电导率(C_w)的实验关系。从图 2a 中可以看出,由于粘土附加导电的作用,不同温度下的岩样电导率和溶液电导率关系呈曲线关系,而且不同温度下的 C_o-C_w 曲线明显分开,说明在高温条件下含高矿化度地层水的岩样仍有明显的附加电导存在。曲线分开的程度及直线段在 C_o 轴上的截距取决于岩石的阳离子交换能力。对于具有正常电阻率的油层,如 F2 井(图 2b),其 C_o-C_w 实验关系不受温度的影响,所有实验数据点几乎落在同一条直线上。

不同温度 C_o-C_w 实验关系的差别,表明阳离子摩尔电导 B 值是温度的函数。同一温度 C_o-C_w 实验关系在低矿化度范围的非线性,说明阳离子摩尔电导 B 值又是溶液电阻率(矿化度)的函数。实验结果表明随着溶液矿化度增加, B 值以指数形式增加到 B_{max} 。图 3 为 T_{II} 低电阻油层阳离子摩尔电导 B 值的实验结果,在高温条件下,随着地层水矿化度的增加而显著地增加。尽管矿化度在大于 $15 \times$

10^4 mg/L 后趋于平稳,但与常温下比较, B 值要大得多。因此,在阳离子交换浓度 Q_v 中等或较高的情况下,粘土的附加导电性不容忽视。根据 T_{II} 油层 Q_v 阳离子交换浓度 Q_v 实验结果,低电阻油层的 Q_v 介于 0.4~1.3 之间。由 Waxman&Smits 模型(Waxman and Thomas, 1974):

$$C_t = (C_w + BQ_v/S_w)/FS_w^{-n}$$

当 $B=14, Q_v=1$ 时,对于 $R_w=0.02$ 的 T_{II} 储层,粘土附加导电性对储层含油饱和度计算结果的影响可达到 25% 以上。

1.3 哈得逊石炭系 C_{III} 油组

哈得逊石炭系 C_{III} 油组的低阻现象则是高矿化度地层水和储层岩性细、毛管束缚水含量高、地层因素的综合影响结果。根据 H3 井 5 083.4~5 097.0 m 的 2 个样品的水分析资料表明:哈得 4 油田石炭系东河砂岩段地层水为 $CaCl_2$ 型,地层水总矿化度高达 23×10^4 mg/L,属于极高矿化度型地层水。在其他地质条件相同的情况下,这样高的矿化度地层水往往会使含油储集层的电阻率降低。因为只要岩石孔隙内壁和喉道表面的吸附水存在连通的条件,含油储集层的电阻率就会变得很低,而岩石颗粒细、粉砂成分含量增加和泥质的存在能提供这一条件。因此,极高矿化度型地层水是引起含油储层电阻率降低的一个重要原因。

根据扫描电镜、薄片鉴定和粒度分析,哈得逊石炭系 C_{III} 油组含油储层的岩性主要是以石英为主的细砂岩、极细砂岩、粉砂岩和泥质粉砂岩,细砂及以下含量接近 90%,但粘土成分含量很少,低于 5%,且以伊利石为主,粘土的附加导电性可以忽略。

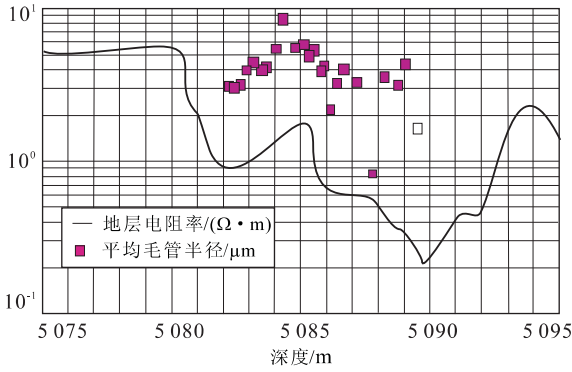


图 4 H2 井 C_{III} 段储层电阻率与平均毛管半径对比

Fig. 4 Contrast pattern of resistivity and mean value of capillary radius in H2 well

随着岩性变细,孔隙喉道明显变小,毛管排驱压力变大,油气不易进入微孔隙,从而导致含油储层的电阻率降低.图 4 是 H2 井 C_{III} 段地层电阻率与平均毛管半径对比图,在油层段(5081~5088 m)地层电阻率随平均毛管半径变化的趋势非常明显.当平均毛管半径小于 3.5 μm 时,油层电阻率降低到 1.0 Ω·m 以下.

对于细粒砂岩,由于岩性细,造成含油储层电阻率低主要有 2 个原因,首先粉砂可起到独立矿物的作用,即使它是由石英组成.孔隙喉道小,微孔隙发育,使孔隙表面积大大增加,从而产生了表面电导率,并导致出现高的过剩型导电率(Givens, 1987).其次,粉砂和泥质与高的束缚水有关,这种束缚水往往呈连续相,以自由水形式存在,与地层可动水有着相同的电导率.因此它能进一步增加储层的导电率,即降低了电阻率.

2 低电阻率油层的饱和度评价

对于导电矿物(如黄铁矿)引起的低电阻油层,虽然通过岩心观察可以估计黄铁矿的含量及分布,但很难通过测井手段准确计算含油饱和度,经典的阿尔奇公式不再适用.对于轮南 J_{IV} 低阻油层,通过对整个油藏的解剖,在初步判定油水界面的基础上,我们利用毛管压力资料,建立了油藏物性、油层高度与含油饱和度的关系,推算出油层内部的饱和度公式:

$$S_w = 1.08 - 1.59\phi - 0.0988\log K - 0.015H,$$

$$S_o = 1 - S_w.$$

同阿尔奇公式相比,在低阻层段饱和度提高了 8%~25%.图 5 为 L3 井的测井处理结果, S_{o1} 为用阿尔奇

公式计算的含油饱和度, S_{o2} 为用推算出油层内部的饱和度公式计算出的含油饱和度,很明显低阻层段 4 550~4 553 m 和 4 556~4 567 m 的含油饱和度提高了 8%~25%.

由于粘土的附加导电性引起的低电阻油层,如吉拉克 T_{II} 油组,则可选用 Waxman&Smits 模型.在岩心实验的基础上,取得地区经验 B 值和阳离子交换量 Q_v.图 6 为 F3 井的测井计算结果,低阻层段 4 406~4 417 m 的饱和度比初级解释提高了近 20 个饱和度单位.4 404~4 407 m 电阻率最低层段,含

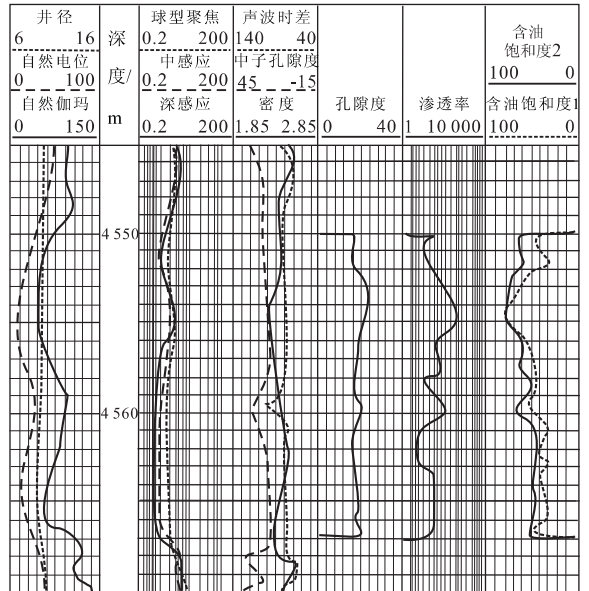


图 5 L3 井测井处理结果

Fig. 5 Well logging processing results in L3 well

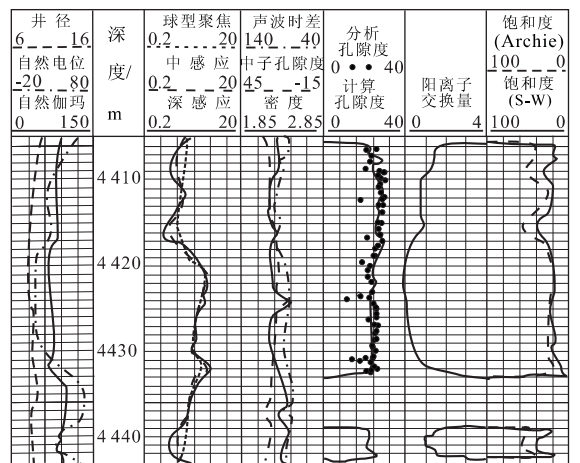


图 6 F3 井测井处理结果

Fig. 6 Well logging processing results in F3 well

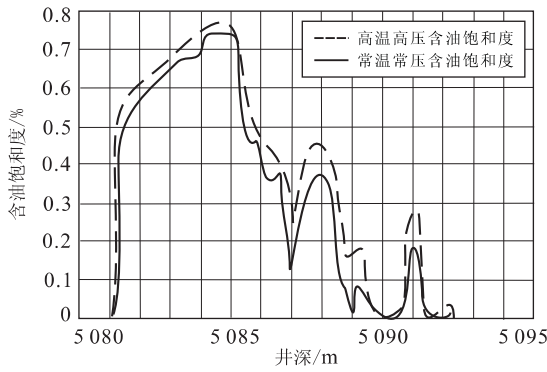


图 7 H2 井东河砂岩 2 种岩电参数计算的含油饱和度

Fig. 7 Oil saturation values calculated by two rock electrical parameters in Donghe sandstone of H2 well

油饱和度由原来的不到 50% 提高到 65% 左右。对于高矿化度束缚水引起的低电阻油层,如哈得逊石炭系 C_{III} 油组,由于毛细管水作为束缚水,它与地层可动水有着同样的导电特性,因此,可以用通常的阿尔奇公式来解释含油饱和度。为了尽可能地模拟油藏条件下的含油储层电性特征,应该进行一定量的高温高压岩电实验。这样得到的岩电参数更加符合实际地层环境的岩电特性,用来计算的含油饱和度就更符合实际(谢然红,2001)。图 7 比较了 H2 井 C_{III} 油组常温常压岩电实验和高温高压岩电实验计算的含油饱和度,用高温高压岩电实验结果计算的含油饱和度要高 3%~10%,低阻层段较相对高阻层段有更大的变化。

应当指出的是,含油饱和度的大小,并不是产层在生产测试过程能否出水的唯一与必然标准。对于高束缚水含量的产层,即使油气饱和度小于 50%,仍然可产无水油气。为此,应该从油藏物理学的基本概念入手,以油水在微观孔隙中的分布与渗流理论为依据,结合油田实际资料,研究油水相对渗透率的变化,并用其确定油藏产液性质,辅助识别低阻油气藏(毛志强,2003)。

3 应用效果

塔里木盆地低阻油层识别及饱和度评价是在生产实践中形成和不断完善的,这一成果的推广应用也取得了极大的成功。

D5 井是吉拉克油田外围的一口探井, J_{IV} 和 T_{II} 均为低电阻油层,油水电阻率十分接近,钻井未取心,油气显示不明显,气测全量小于 1%。根据我们

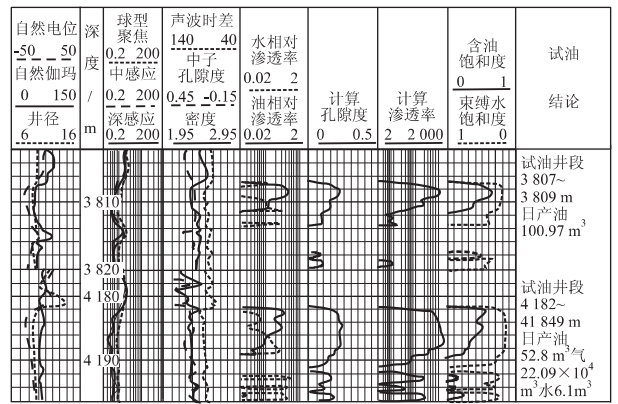


图 8 D5 井测井处理成果

Fig. 8 Well logging processing results in D5 well

油饱和度由原来的不到 50% 提高到 65% 左右。对于高矿化度束缚水引起的低电阻油层,如哈得逊石炭系 C_{III} 油组,由于毛细管水作为束缚水,它与地层可动水有着同样的导电特性,因此,可以用通常的阿尔奇公式来解释含油饱和度。为了尽可能地模拟油藏条件下的含油储层电性特征,应该进行一定量的高温高压岩电实验。这样得到的岩电参数更加符合实际地层环境的岩电特性,用来计算的含油饱和度就更符合实际(谢然红,2001)。图 7 比较了 H2 井 C_{III} 油组常温常压岩电实验和高温高压岩电实验计算的含油饱和度,用高温高压岩电实验结果计算的含油饱和度要高 3%~10%,低阻层段较相对高阻层段有更大的变化。

应当指出的是,含油饱和度的大小,并不是产层在生产测试过程能否出水的唯一与必然标准。对于高束缚水含量的产层,即使油气饱和度小于 50%,仍然可产无水油气。为此,应该从油藏物理学的基本概念入手,以油水在微观孔隙中的分布与渗流理论为依据,结合油田实际资料,研究油水相对渗透率的变化,并用其确定油藏产液性质,辅助识别低阻油气藏(毛志强,2003)。

3 应用效果

塔里木盆地低阻油层识别及饱和度评价是在生产实践中形成和不断完善的,这一成果的推广应用也取得了极大的成功。

D5 井是吉拉克油田外围的一口探井, J_{IV} 和 T_{II} 均为低电阻油层,油水电阻率十分接近,钻井未取心,油气显示不明显,气测全量小于 1%。根据我们

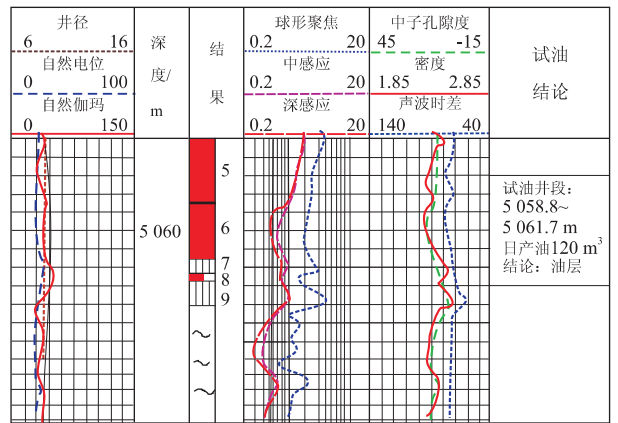


图 9 H9 井低阻油层解释成果

Fig. 9 Low resistivity oil formation processing results in H9 well

处理的结果(图 8),在 J_{IV} 解释油气层 1 层 4 m,在 T_{II} 解释含水油层 1 层 3 m,试油在解释层段分别获得了油 100.97 m³(J_{IV})和油 52.8 m³、气 22.09 × 10⁴ m³、水 6.1 m³(T_{II})的日产量。

H9 井是哈得逊油田的一口开发井,但在 C_{III} “东河砂岩”油藏获得重大突破。虽然没有取心,底部 5060 m 附近电阻率也只有 0.52 Ω · m,但根据我们对该区低电阻油层的认识,并结合处理成果把油水界面下推到了 5062 m(图 9)。后专门对测井解释低阻油层段 5058.8~5061.7 m 进行测试,获日产量 120 m³ 的高产量。

4 结论

(1)对于 3 套低阻油层的认识丰富了塔里木盆地的测井解释方法,用于储层参数计算的饱和度模

型可以应用于生产并在各次储量计算中得到了专家们的认可。(2)低电阻油层的形成往往是多种因素共同影响的结果,当各种成因综合作用时,问题会变得更加复杂,这就要求解释人员具备良好的综合分析能力。(3)低阻油层的识别与评价需要在充分认识低阻成因的基础上,根据具体的成因分析,采取针对性的解决方法,才能形成比较可靠的低阻油层的判别标准与评价方法。

References

- Givens, W. W., 1987. A conductive rock matrix model (CRMM) for the analysis of low-contrast resistivity formations. *The Log Analyst*, 17: 72—76.
- Hilich, D. W., 1989. Modern well log interpretation. Translated by Gong, W. H., Zhang, Z. W.. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Hill, H. J., Milburn, J. D., 1950. Effect of clay and water salinity on electrochemical behavior of reservoir rocks. *Petroleum Transactions*, 81(5): 233—238.
- Mao, Z. Q., 2003. Controlling effects of poor permeable layers upon accumulation and distribution of hydrocarbon in inhomogeneous sandstone reservoir. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 28(2): 196—200 (in Chinese with English abstract).
- Ouyang, J., Peng, L. C., Yan, J., et al., 1994. Well log interpretation and reservoir description. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Waxman, M. H., Thomas, F. C., 1974. Electrical conductivities in oil-bearing shaly sands—I. The relation between hydrocarbon saturation and resistivity index; II. The temperature coefficient of electrical conductivity. *SPE Journal*, 14: 374—379.
- Xie, R. H., 2001. Log interpretation method of oil & gas formation with low resistivity. *Well Logging Technology*, 25(3): 199—203 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, W. C., 1991. Reservoir well logging evaluation technology. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).

附中文参考文献

- 希尔契, D. W., 1989. 现代测井解释. 龚伟华, 张中伟, 译. 北京: 石油工业出版社.
- 毛志强, 2003. 非均质储层夹层控油作用初论——非均质储层油气分布规律及测井响应特征. 地球科学——中国地质大学学报, 28(2): 196—200.
- 欧阳健, 彭立纯, 燕军, 等, 1994. 石油测井解释与储层描述. 北京: 石油工业出版社.
- 谢然红, 2001. 低电阻率油气层测井解释方法. 测井技术, 25(3): 199—203.
- 曾文冲, 1991. 油气藏储集层测井评价技术. 北京: 石油工业出版社.