

文章编号: 1004-1338(2018)02-0193-07

胜利油田上古生界致密砂岩低对比度油藏 测井解释模式细分技术

张晋言, 刘伟, 李绍霞, 张文姣, 齐国华
(中石化胜利石油工程有限公司测井公司, 山东 东营 257096)

摘要: 胜利花沟地区上古生界致密砂岩油藏成岩作用强, 层内岩性、储集空间复杂多变, 油质轻, 属于典型的物性控制油藏。由于岩性及储集空间类型变化的影响, 测井电阻率反映流体性质能力弱化, 油水层对比度低; 孔隙度接近的储层有的自喷高产, 有的需要压裂改造, 产能差异大, 储层有效性界定困难。研究砂体层内岩石结构、储集空间类型、含油气性、地化特性等变化规律, 建立测井解释模式细分技术, 将储层储集空间划分为破碎型、裂缝-孔隙型、基质孔隙型 3 种类型。在宏尺度、微尺度、渗流 3 大类参数评价的基础上, 细分储层内流动单元并进行产能预测, 实现储层有效性精细评价和流体性质识别。在 HGX101 等 10 余口井中取得了显著的地质效果, 为优质储量的发现和开发提供了技术支持。

关键词: 测井解释; 低对比度油藏; 流动单元; 层内细分; 储层有效性; 流体性质识别; 产能预测

中图分类号: P631.84 **文献标识码:** A

Doi: 10.16489/j.issn.1004-1338.2018.02.012

Well Logging Interpretation Model Subdivision Technique for Low Contrast Reservoir of Tight Sand Reservoir of Neopaleozoic in Shengli Oilfield

ZHANG Jinyan, LIU Wei, LI Shaoxia, ZHANG Wenjiao, QI Guohua

(Logging Company, SINOPEC Shengli Petroleum Engineering CO. LTD., Dongying, Shandong 257096, China)

Abstract: Neopaleozoic tight sand reservoir in HuaGou area of Shengli oilfield is characterized by strong diagenesis, complex lithology, complex pore space and light oil. It is a typical physical property controlled reservoir. Due to the changes of lithology and the types of reservoir space the ability of resistivity to reflect the fluid properties is weakened, which leads to the low contrast of oil and water layer. In addition, reservoirs with close porosity may have different production, some have high production due to self-blowing, but others need fracturing. So, the huge difference in production capacity has made it difficult to evaluate the reservoir effectiveness. In order to improve the accuracy of logging interpretation, a logging interpretation model subdivision technique is established based on the rock structure of sand body, reservoir space types, oil-gas potential and geochemical properties which can divide the reservoir space into three types: fractured reservoir, fracture-pore reservoir and matrix pore reservoir. Meanwhile, based on the evaluation of three kinds of parameters: macro-scale, micro-scale, and seepage, the flow units in the reservoir are subdivided and productivity prediction are made to achieve a fine evaluation of reservoir effectiveness and identification of fluid properties. Significant geological effects have been achieved in more than 10 wells such as well HGX101 by using this technique,

基金项目: 国家重大科技专项地震与井筒精细勘探关键技术(2016ZX05006-002); 国家重大科技专项页岩气勘探地球物理技术研究(2017ZX05036-005)

第一作者: 张晋言, 男, 1965 年生, 教授级高级工程师, 从事测井评价技术研究和管理工作。E-mail: zhangjinyan209.slyt@sinopec.com

which provide technical support for the discovery and development of high-quality reserves.

Keywords: log interpretation; low contrast reservoir; flow unit; subdivision model; reservoir effectiveness; identification of fluid properties; productivity prediction

0 引言

胜利油田花沟地区 2015 年钻探了 HGX101 井,该井上古生界石盒子组奎山段 2 478~2 503 m 录井为石英砂岩,未见明显油气显示,录井综合解释为水层;该层视地层电阻率为 13~26 Ω·m,测井计算孔隙度为 7%~9%,测井解释油水同层;据此下套管后试油自喷日产油 43.3 t,不含水。随后钻探的 HGX101-X1、HGX102 井等井,储层视地层电阻率下限为 8 Ω·m,部分产层自喷获得商业产能,部分压裂改造获得商业产能,部分为干层。2016 年钻探了 HGX103 井,奎山段 1 895.6~1 917 m 电阻率 15~22 Ω·m,测井计算孔隙度为 5%~9%,录井荧光细砂岩,井壁取心油斑、油迹石英砂岩,测井综合解释均为油层,试油泵抽日产水 69.27 m³,累产水 430.41 m³。这 2 口井在物性、岩性、测井属性基本一致的情况下,储层流体性质差别巨大,对该区的测井评价带来极大的挑战。

为提高致密砂岩低对比度油藏测井解释精度,通过研究砂体层内岩石结构、储集空间类型等变化

规律,将储层储集空间划分为破碎型、裂缝-孔隙型、基质孔隙型 3 种类型。在宏尺度、微尺度、渗流 3 大类参数评价的基础上,细分储层内流动单元,进行产能预测,实现了储层有效性精细评价和流体性质识别。在 HGX101 等 12 口井中测井解释符合率达到 96%,取得了显著的效果,为优质储量的发现和开发提供了技术支持。

1 储层特征

花沟地区主力含油层段为上古生界二叠系上石盒子组奎山段、万山段。储层岩性多样,以石英砂岩、含砾石英砂岩、岩屑砂岩为主(见图 1)。储层沉积比较稳定,储层厚度大,横向连通性好。岩心观察石英砂岩颜色多为灰白色,岩性纯净,泥质含量小于 5%,碳酸盐含量小于 3%。岩屑砂岩颜色多为灰红色,由于长石矿物的不稳定,易高岭土化,故泥质含量相对较高。储层经历了复杂的成岩作用,特别是强烈的压实作用,大大降低储层沉积原生的孔隙度和渗透率,平均孔隙度为 7.1%,平均渗透率为 0.26 × 10⁻³ μm²。同时,由于石英砂岩发育,易形成裂

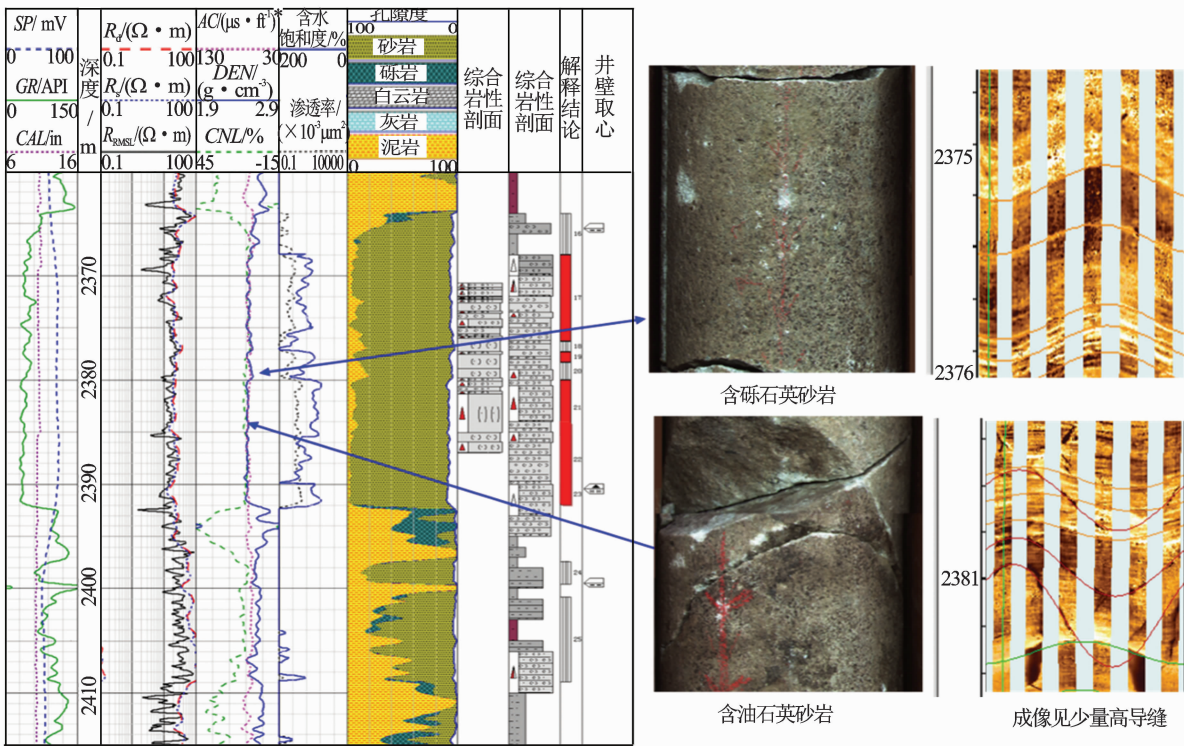


图 1 花古地区储层特征图

* 非法定计量单位,1 ft=12 in=0.304 8 m,下同

缝,由图 1 中可知岩心裂缝明显,成像测井图可以看到储层段 2 381 m 发育高导裂缝。铸体薄片资料显示矿物颗粒以凹凸—缝合接触为主,储层储集空间类型以残余粒间孔、溶孔、微孔隙和微裂缝为主。残留粒间孔少而小,连通性差,微裂缝主要以压裂缝和溶蚀缝等类型存在,呈弯曲状,多环绕碎屑颗粒分布或贯穿颗粒表面,起着主要渗滤通道的作用,对改善孔隙型储层的储集性能有重要作用,储集类型为孔隙和裂缝双重介质。储层压力系数为 1.02,地温梯度 $3.8^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,属于常温常压油藏,平均原油黏度 $5.7\text{ mPa}\cdot\text{s}(50^{\circ}\text{C})$,原油物性好,油质轻,钻开后油气散逸明显,钻井液侵入严重,岩屑录井油气显示不明显,取心以油迹、油斑为主。

2 低对比度油层的成因解析

2.1 岩性复杂导致油层与水层对比度低

储层内岩性的变化是造成油层与水层对比度低的主要因素。岩相控制着储层物性、测井响应特性以及含油性^[1]。石英矿物含量大于 85%,易形成裂缝,储层物性最好,在相似储集空间条件下,油层电阻率绝对值高,自然伽马数值一般小于 40 API。而岩屑砂岩由于塑性的黏土矿物含量高,一方面不易形成裂缝;另一方面黏土矿物易充填次生孔隙,使有效孔隙度减小,储层物性相对变差,油层电阻率下限值低,自然伽马一般大于 40 API。

2.2 储集空间非均质导致油层与水层对比度低

复杂的储集空间是造成油层与水层对比度低的另一重要原因。结合裂缝发育程度和测井曲线响应

特征可以将储层划分为破碎型、裂缝-孔隙型、基质孔隙型 3 种类型。3 种不同储集空间类型在花沟地区上古生界储层中普遍存在,其中破碎型石英砂岩储层与裂缝性油气层的特征相似(见图 2),存在低电阻率油层,油层的电阻率下限值为 $8\ \Omega\cdot\text{m}$,且含油饱和度高,多为射开后自喷的优质油层;裂缝-孔隙型石英砂岩储层双重孔隙发育,油层的电阻率下限值高,为 $35\ \Omega\cdot\text{m}$,需要压裂才能获得工业产能,基质孔隙型储层的渗流能力差,含油丰度低,试油和测井解释多为干层。

3 储层有效性精细评价方法

3.1 层内岩相细分

根据储层岩性、裂缝发育和测井曲线特征^[2-3],将储层划分为破碎石英砂岩、裂缝-孔隙石英砂岩、基质孔隙砂岩 3 种岩相类型。

破碎石英砂岩裂缝最发育,多发于奎山段 1 砂组。成像测井 2 334~2 338 m 段可以看到地层扭曲变形特征(见图 2),地层较为破碎,发育少量的小断层和不同角度的交错裂缝。常规测井曲线声波时差数值增大,出现跳跃,电阻率相对围岩数值略有降低,密度和中子孔隙度数值变化不大,自然电位存在异常,自然伽马低值。

裂缝-孔隙石英砂岩裂缝发育,裂缝沟通了储层的储集空间,多发于奎山段 1 砂组。成像测井 2 315~2 320 m 段可以看到角度近似的裂缝集中发育,地层没有发生错动和破碎(见图 2)。常规测井曲线上,声波时差数值略有增大,电阻率相对围岩数值略

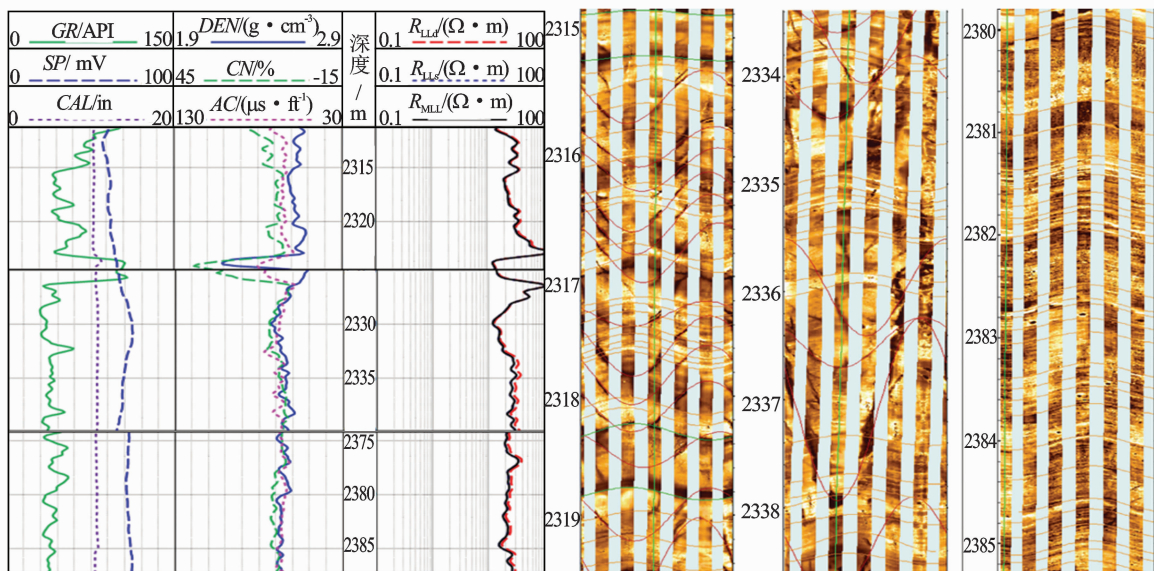


图 2 裂缝储层测井响应特征

有降低,密度和中子孔隙度数值变化不大,自然电位存在异常,自然伽马低值。

基质孔隙砂岩裂缝不发育,基质孔隙为主要的渗流通道,多发育于奎山段3砂组及万山段。成像测井2380~2385 m段没有裂缝特征(见图2)。常规测井曲线声波时差、密度和中子孔隙度曲线平直,电阻率相对围岩数值变化不大。

在现有资料基础上利用判别分析法划分岩相是提高岩相判识精度的很好选择。判别分析是根据描述事物特征的变量值和它的所属分类找出判别函数,以此为依据对所研究事物进行所属分类判别的方法。其目的是对已知分类的数据建立由数值指标构成的分类规则,然后把这样的分类规则应用到未知分类的样本中去。以自然伽马(GR)、声波时差(AC)、补偿密度(DEN)、中子(CNL)等对岩性较为敏感的测井曲线作为输入参数,采用判别分析法得到不同岩性的判别函数。 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 分别对应破碎石英砂岩、裂缝-孔隙石英砂岩、基质孔隙砂岩,其判别函数为

$$Y_1 = -1.289GR + 4.180DEN + 1.806CNL + 2.733AC - 2.050 \quad (1)$$

$$Y_2 = -1.218GR + 4.072DEN + 1.811CNL + 2.559AC - 1.937 \quad (2)$$

$$Y_3 = -1.238GR + 4.273DEN + 1.973CNL + 2.566AC - 2.119 \quad (3)$$

式中, AC 、 GR 、 DEN 、 CNL 均为归一化后数值。对未知样本分别计算判别函数, $Y_1 \sim Y_3$ 中最大值就对应着相应岩相,从而实现了岩相识别与划分。

3.2 三大类参数计算

在岩相划分基础上,依据测井信息,构建宏尺度、微尺度、渗流三大类参数^[4]对复杂储层物性及岩石孔隙结构特征进行全面反演表征。宏尺度参数包括岩石矿物、孔隙度、流体饱和度等。渗流参数包括渗透率、相对渗透率等。微尺度参数主要包括岩石孔隙类型、孔隙结构等参数。三大类参数是进行储层质量定量评价的重要参数。由于研究区未采集核磁共振测井资料,因此微观参数的评价主要由常规测井资料实现^[5]。构建储层品质指数(I_{rq})作为储层孔隙结构参数与测井信息之间的纽带,实现储层孔隙结构参数的测井评价。假设单位体积岩石样品的孔隙由半径为 r 的毛细管组成,则

$$I_{rq} = \sqrt{\frac{K}{\phi_e}} = \frac{r}{2\sqrt{F_s\tau}} \quad (4)$$

式中, F_s 为形状因子; τ 为毛细管弯曲度; K 为渗透

率; ϕ_e 为有效孔隙度。

建立 I_{rq} 与常规测井响应之间的关系

$$I_{rq} = 80.5 - 0.04GR - 31.9DEN + 29.538CNL + 0.024AC + 5.695 \frac{R_{ll,d}}{R_{ll,m}} \quad (5)$$

通过岩心约束得到,孔喉半径均值

$$r_m = 0.1094I_{rq} + 0.1059 \quad (6)$$

排驱压力

$$p_{cd} = 2.7084I_{rq}^{-1.232} \quad (7)$$

储层三大类参数综合评价结果见图3,第5~7道为宏观和渗流参数评价结果,第8道为微观参数评价结果,与岩心分析结果对比吻合较好。

3.3 流动单元划分及储层有效性评价

同一流动单元内部具有相似的渗流能力和岩石物理属性^[6-7]。在岩相划分的基础上,结合裂缝发育特征和储层三大类参数评价结果,将储层划分为破碎型储层单元、裂缝-孔隙型储层单元、基质大孔单元、基质中孔单元和基质小孔单元等5种流动单元(见图3)。具体划分标准见表1。破碎型储层单元裂缝最为发育,完全改变了原始的储层渗流特征,多口井试油测试证实,无需压裂就可获得商业油流。裂缝-孔隙型储层单元同时具备裂缝和基质孔隙,裂缝起到了沟通孔隙、改善渗流通道的作用,常规测试往往为干层,经大型压裂改造,可以获得工业产能。裂缝不发育储层则根据储层孔隙度大小和孔隙结构特征进一步划分为3种类型的流动单元,其中基质大孔单元孔隙度最大,孔隙结构最好,改造后可获得产能,基质小孔单元渗流能力最差。每个储层可划分为一或多个不同渗流能力的流动单元。

在划分储层流动单元类型的基础上,针对不同流动单元渗流特征,分别选用不同产能预测公式^[8-10]。破碎型储层单元选用等效裂缝渗流模型,裂缝-孔隙型储层单元选用叠加裂缝渗透率后的平面径向流模型,基质单元则选用平面径向流模型。同时分流动单元类型优化储层物性、含油饱和度、启动压力等参数,计算井底流入产能,从而实现储层有效性评价,产能预测公式为

$$Q = \sum_{i=1}^5 f_i(K_i, h_i, r_{ei}, S_i) \quad (8)$$

式中, $f_i(K_i, h_i, r_{ei}, S_i)$ 为不同流动单元产能预测公式, K_i 、 h_i 、 r_{ei} 、 S_i 分别为渗透率、厚度、供油半径、表皮系数等参数(见表2)。

产能评价成果如图3所示,第10道为流动单元划分结果,第11道为产能评价结果。从成果图可以

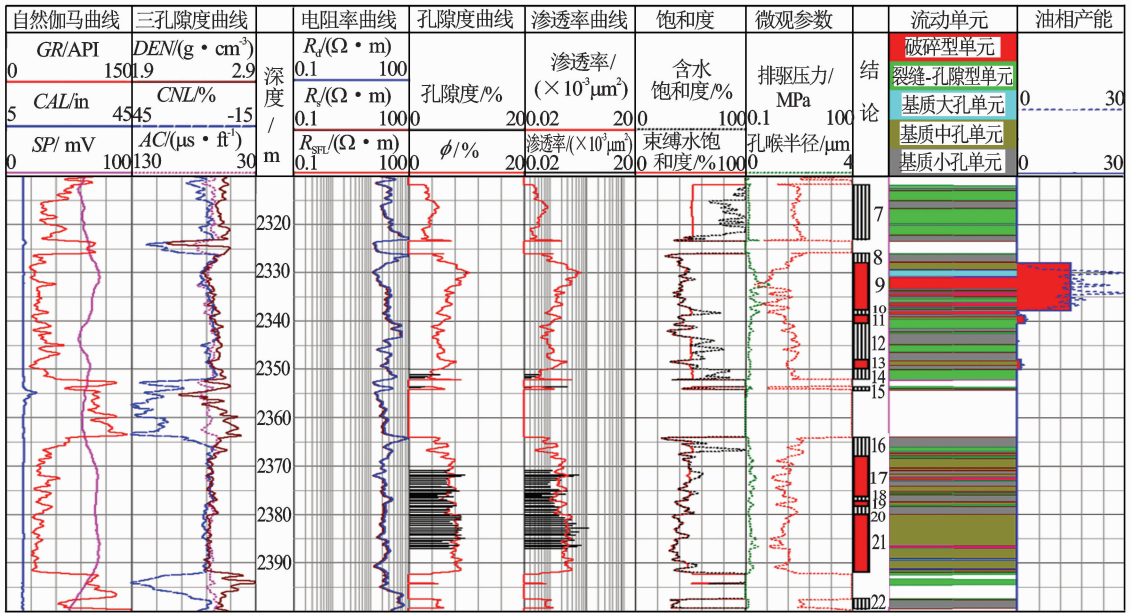


图 3 流动单元划分及产能评价成果图

表 1 流动单元划分标准

| 流动单元 | 电成像特征 | 孔隙度/% | 渗透率/ $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ | 平均孔喉半径/ μm | 自然伽马/API |
|------------|-------|--------------|-------------------------------------|-----------------------|----------|
| 破碎型储层单元 | 裂缝发育 | $\phi_i > 5$ | > 5 | > 0.4 | < 40 |
| 裂缝-孔隙型储层单元 | 裂缝发育 | $\phi_i > 2$ | > 1 | > 0.4 | < 40 |
| 基质大孔单元 | 不发育裂缝 | > 8.5 | > 1 | > 1.1 | 40~60 |
| 基质中孔单元 | 不发育裂缝 | 6~8.5 | 0.1~1 | 0.4~1.1 | 40~60 |
| 基质小孔单元 | 不发育裂缝 | < 6 | < 0.1 | < 0.4 | 40~60 |

表 2 产能预测方法

| 流动单元 | 产能预测公式 | 参数说明 |
|------------|---|--|
| 破碎型储层单元 | $\mu B \left(\frac{1}{K_o} \ln \frac{r_e}{r_i} + \frac{1}{K_o + \phi_i K_f \ln \frac{r_i}{R_w}} \ln \frac{r_i}{R_w} + S \right) \gamma_{PR}$ | h 单元厚度, m K_o, K_f 油相和裂缝有效渗透率, $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ r_e, r_i 基质和裂缝供油半径, m R_w 井筒半径, m |
| 裂缝-孔隙型储层单元 | $\frac{2\pi(K_o + K_f)h(p_e - p_w)}{\mu B \left(\ln \frac{r_e}{R_w} + S \right)} \gamma_{PR}$ | p_e, p_w 油层和井底压力, MPa ϕ_i 裂缝孔隙度, % γ_{PR} 射孔率比 |
| 基质大孔单元 | $\frac{2\pi K_o h(p_e - p_w)}{\mu B \left(\ln \frac{r_e}{R_w} + S \right)} \gamma_{PR}$ | S 表皮系数 |
| 基质中孔单元 | | B 体积系数 |
| 基质小孔单元 | | μ 流体黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$ |

看出 9 号层物性最好,发育基质大孔单元同时破碎型单元发育,预测油相产能 14.8 t/d,试油 14.6 t/d,与预测结果一致。

4 流体性质识别方法

研究区储层岩性、储集空间非均质极强,弱化了电阻率反映流体性质能力,导致油水层对比度低。通过岩性细分,尽可能降低储层岩性、储集空间类型

等复杂因素对电阻率测井值的影响,放大流体对电阻率值的贡献,综合地质录井信息,应用多层神经网络方法实现对储层流体性质的评价。

神经网络具有自学习、自联想特征,可以模仿人类思维^[11-12],进行模式综合评判。依据试油资料将储层类别分为油层、油水同层、水层和干层,并进行二进制编码作为输出。在划分石英砂岩和岩屑砂岩的基础上,应用气测、岩屑、取心、地化等单项资料对

储层进行分别解释,通过蛛网图筛选流体性质敏感曲线(见图4),最终确定选用自然伽马、电阻率、声波时差、孔隙度和全烃作为输入曲线。

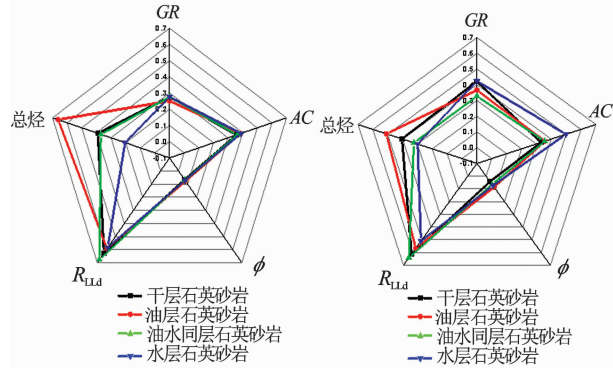


图4 流体性质识别敏感曲线筛选蛛网图

在输入和输出确定的同时,分别进行了1个隐含层和2个隐含层学习预测,对比流体性质识别效果发现,1个隐含层即3层网络结构预测结果较2个隐含层预测效果更好,更稳定,由此最终确定采用3层网络结构。隐含层神经元的个数应用网络结构优化的自构形算法在学习过程中自动确定,最终确定为4个神经元,选择S型传递函数,输出层采用线性传递函数。最终建立储层流体性质识别神经网络:输入层神经元5个,隐含层为1层,4个神经元,输出层神经元3个,并保存了连接权值及阈值以实现储层外推预测,神经网络程序以Matlab软件为开发平台,采用Levenberg-Marquardt反向传播算法,

从而实现流体性质综合判别。图5为HGX103井流体性质评价成果图。图5中第6道为测录井结合神经网络法识别流体显示,可以看出以水层为主,与试油结论吻合,解决了流体性质识别难题。

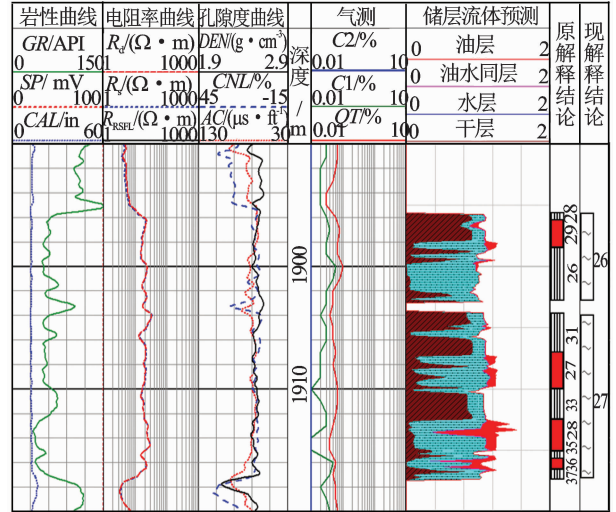


图5 HGX103井流体性质综合识别成果图

5 应用效果

通过评价宏观、微观和渗流三大类参数,对储层类型细分,划分流动单元,解决了储层产能特征评价和流体性质识别的问题。在HGX101等12口井中进行应用,测井解释符合率达到96%,取得了显著的效果,为优质储量的发现和开发提供了技术支持。图6为HGX101井综合评价成果图。该井相对于

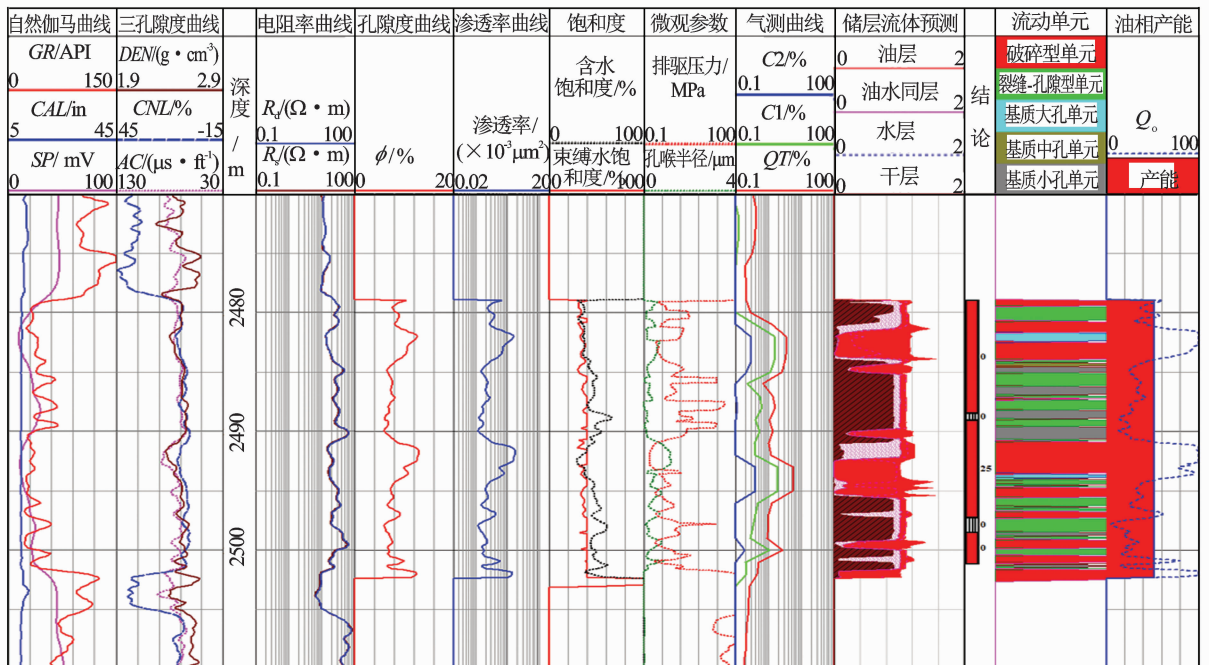


图6 HGX101井综合评价成果图

图3 裂缝更发育,以破碎型储层单元为主,评价该井生产能力更强,预测油相产能 56.7 t/d,试油 43.44 t/d,二者基本吻合。

6 结 论

(1) 胜利花古地区上古生界储层复杂岩性和复杂储集空间类型并存,是导致油水层电阻率对比度低和产能评价困难的主要因素。

(2) 针对复杂岩性和复杂孔隙结构储层评价难题,通过层内岩相细分,开展宏观、微观和渗流3大类参数评价,细分流动单元进行产能预测,并以此为基础开展储层有效性精细评价和流体性质识别,是胜利上古生界低对比度油藏正确评价的关键。

(3) 针对各类复杂储层,进行层间和层内测井解释模式细分,并建立针对性的测井解释模型,是解决复杂储层测井评价难题的必由之路,该思路具有重要的借鉴价值。

参考文献:

- [1] 张晋言,李绍霞. 孤北地区上古生界复杂储层测井评价方法[J]. 石化技术, 2016(10): 167-168.
- [2] 邓瑞,郭海敏,等. 裂缝性储层的常规测井识别方法[J]. 勘探地球物理进展, 2007, 30(2): 107-110.

- [3] 刘伟,朱留方,许东晖,等. 断裂带结构单元特征及其测井识别方法研究[J]. 测井技术, 2013, 37(5): 495-498.
- [4] 张晋言. 三大类储层参数测井评价技术及其应用[J]. 测井技术, 2013, 37(6): 587-593.
- [5] 张晋言,刘海河,刘伟. 核磁共振测井在深层砂砾岩孔隙结构及有效性评价中的应用[J]. 测井技术, 2012, 36(3): 256-260.
- [6] 吕明针,林承焰,张宪国,等. 储层流动单元划分方法评价及优选[J]. 岩性油气藏, 2015(1): 74-80, 88.
- [7] 陈欢庆,胡永乐,闫林,等. 储层流动单元研究进展[J]. 地球学报, 2010(6): 875-884.
- [8] 杨锋,朱春启,王新海,等. 库车前陆盆地低孔裂缝性砂岩产能预测模型[J]. 石油勘探与开发, 2013(3): 341-345.
- [9] 何军,胡永乐,何东博,等. 低渗致密气藏产能预测方法[J]. 断块油气田, 2013(3): 334-336, 358.
- [10] 孙建孟,运华云,冯春珍. 测井产能预测方法与实例[J]. 测井技术, 2012(6): 628-634.
- [11] KHAN A. 神经网络的优化与用于优化的神经网络[D]. 大连:大连理工大学, 2013.
- [12] 李雄炎,周金昱,李洪奇,等. 复杂岩性及多相流体智能识别方法[J]. 石油勘探与开发, 2012(2): 243-248.

(收稿日期:2017-09-07 本文编辑 肖圣)

2018年油气井射孔技术交流会征文通知

按照中国石油学会2018年工作计划,石油测井专业委员会决定于2018年第3季度召开油气井射孔技术交流会。现将会议征文及有关事项通知如下:

一、征文范围

①射孔基础理论研究、射孔技术模拟、实验、试验进展;②射孔器材开发,加工,新材料的应用;③射孔质量控制,检测方法、装置、标准等;④射孔新技术应用;⑤高可靠、高效能射孔技术工艺应用典型实例。

二、征文要求

1. 论文主要内容应是最新的研究成果,并未公开发表过。
2. 论文正文用5号宋体,文字简洁、图表清晰、用词准确、原理科学,全文篇幅不少于4个A4页面(包括文字和图表)。论文署名作者人数不超过4人。文后应附有公开发表的参考文献。杜绝造假,文责自负。
3. 论文经本单位技术负责人审阅同意发表后,于2018年6月30日以前,将同意意见盖章扫描连同论文全文的电子文档发送秘书处联系人邮箱。
4. 石油测井专业委员会将组织行业射孔专家对全部论文进行评审,入选论文上会交流并出版文集,优秀论文颁发证书并推荐到《测井技术》发表。
5. 请将论文作者的联络方式、联系人一并附在论文之后,以便学会及时与作者联系。

三、会议时间初步定在2018年8月中旬,具体时间和地点等征文工作结束后见学会会议通知。

中国石油学会石油测井专业委员会秘书处联系人:

陈军友

张辛耘

电话:18954658967,0546-8761151

电话:13571876262,029-88776570

E-mail: shekong88@sina.com

E-mail: zhangxinyun@cnpc.com.cn