

文章编号: 1000-0747(2012)05-0552-07

基于弛豫-扩散的二维核磁共振流体识别方法

胡法龙^{1,2}, 周灿灿^{1,2}, 李潮流^{1,2}, 徐红军^{1,2}, 周凤鸣³, 司兆伟³

(1. 中国石油勘探开发研究院; 2. 中国石油天然气股份有限公司测井重点实验室; 3. 中国石油冀东油田公司)

基金项目: 中国石油勘探开发研究院院级项目“二维核磁共振测井流体识别新技术研究”(115201C90001)

摘要: 基于 MRIL-Prime 核磁共振测井仪器现有采集模式, 将不同采集模式测井信息进行组合后获得二维核磁共振信号, 利用多回波串联合反演技术获得孔隙流体弛豫-扩散的二维核磁共振信息分布, 用以识别复杂储集层流体性质。相对一维核磁共振测井, 该流体性质识别方法增加了扩散域流体信息, 可以在二维空间内将油、气、水信号分离, 提高核磁共振测井流体性质识别能力。利用 MRIL-Prime 仪器对南堡凹陷 A 井油层和 B 井水层进行多回波间隔的二维核磁共振测井试验, 解释结果与试油结果相吻合, 说明二维核磁共振测井在轻质油识别和大孔隙储集层流体识别方面相对一维核磁共振测井技术有明显优势。图 6 参 20

关键词: 二维核磁共振测井; 采集模式; 多回波串联合反演; 扩散系数

中图分类号: P631.811

文献标识码: A

Fluid identification method based on 2D diffusion-relaxation nuclear magnetic resonance (NMR)

Hu Falong^{1,2}, Zhou Cancan^{1,2}, Li Chaoliu^{1,2}, Xu Hongjun^{1,2}, Zhou Fengming³, Si Zhaowei³

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China; 2. PetroChina Research Laboratory of Well Logging, Beijing 100083, China; 3. PetroChina Jidong Oilfield Company, Tangshan 063004, China)

Abstract: Based on current acquisition modes of MRIL-Prime NMR logging tool, 2D NMR signals could be obtained by the combination of logging data from different modes, then the fluid properties in complicated reservoirs could be distinguished by 2D diffusion-relaxation NMR logging data distribution of pore fluids, generated by multi-echo train joint inversion. In comparison with 1D NMR logging, this method could increase fluid information in diffusion regime, separate oil, gas and water signals in 2D space and enhance the identification capacity of fluid properties from NMR logging. The 2D NMR logging in the multi-echo wave interval was applied in the oil pays in Well A and the water layers in Well B in the Nanpu Sag by MRIL-Prime tool, and the interpretation matches the well testing result. It indicates that 2D NMR logging has advantages on the identification of light oil, and fluids in macropore reservoirs than 1D NMR logging.

Key words: 2D NMR logging; acquisition mode; joint multi-echo train inversion; diffusion coefficient

0 引言

随着核磁共振技术的不断发展, 核磁共振测井已成为重要的地球物理测井方法, 其在流体性质识别、孔隙结构评价及束缚水含量计算等方面发挥了重要作用^[1]。由于储集层孔隙中油、气、水的核磁共振 T_2 (弛豫时间) 信号存在一定程度重叠, 早期提出的差谱法 (DSM)、移谱法 (SSM)、时域法 (TDA)、扩散法 (DIFAN) 及扩散增强法 (EDM) 等流体性质识别方法都存在前提条件, 在实际应用中具有一定局限性^[2-5]。Sun 和 Hürilimann 等把波谱学中的二维核磁共振技术成功应用于测井领域, 拓宽了核磁共振测井的应用范围^[6-7], 并在孔隙流体性质识别方面获得了较好的效果。斯伦

贝谢公司和贝克休斯公司据此原理分别设计制造了先进的核磁共振仪器, 并针对各自仪器特征设计了相应的二维核磁共振测井采集模式和资料处理方法, 在油水层识别方面解决了一维核磁共振测井存在的信号重叠问题, 这种方法已在海外油田大规模应用。国内的相关研究才刚刚开始, 谢然红和肖立志等在二维核磁共振数值模拟和实验方面开展了研究, 验证了该方法的有效性^[8-9]。

目前中国使用的核磁测井仪器绝大部分都是哈里伯顿公司的 MRIL-Prime 型仪器, 其采集、处理和评价方法完全基于一维核磁共振技术, 而国际上仅有的两家二维核磁共振仪器生产商仅提供服务, 并不出售仪器。能否利用现有的一维核磁共振仪器通过改变测量

模式和处理方式，实现二维核磁共振的测量效果？本文以 MRIL-Prime 型仪器现有采集模式为基础，利用多次不同模式下测井获得二维核磁共振信息，并利用多回波串联反演处理技术获得孔隙介质内流体弛豫-扩散 (T_2, D) 的二维核磁共振分布。该方法充分利用不同流体之间扩散系数 (D) 和横向弛豫时间的差异，使二维空间流体性质识别能力比一维 T_2 信号有了较大提高，对利用核磁共振测井准确识别复杂储集层流体性质具有重要意义^[10]。

1 方法原理

孔隙流体的核磁共振横向弛豫时间 T_2 主要受自由弛豫、表面弛豫和扩散弛豫的影响，可以表示为：

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_{2B}} + \frac{1}{T_{2S}} + \frac{1}{T_{2D}} \quad (1)$$

其中
$$\frac{1}{T_{2D}} = 10^{-9} \frac{D(\gamma G TE)^2}{12}$$

在均匀场范围内，由于磁场梯度 (G) 为零，扩散弛豫对横向弛豫时间没有贡献，即 $1/T_{2D} \approx 0$ ，此时孔隙中流体核磁共振信号的弛豫时间主要受自由弛豫和表面弛豫的影响，称为本征弛豫时间，可表示为：

$$\frac{1}{T_{2int}} = \frac{1}{T_{2B}} + \frac{1}{T_{2S}} \quad (2)$$

对于梯度场，则有：

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_{2int}} + \frac{1}{T_{2D}} = \frac{1}{T_{2int}} + 10^{-9} \frac{D(\gamma G TE)^2}{12} \quad (3)$$

对于孔隙介质中的流体，核磁共振信息反映了横向弛豫的贡献，当孔隙介质中存在两相或者多相流体时，各相流体的弛豫信息会有重叠现象，此时难以区分流体组成；如果能将本征弛豫时间和扩散系数从核磁共振横向弛豫时间中“分离”出来，在空间上形成二维信息，由于不同流体扩散系数和弛豫时间存在差异，这样就可以识别出孔隙介质内的流体性质。如图 1 所示，对于油、气、水 3 种流体，由于其横向弛豫时间 T_2 有一定重合（见图 1a），利用一维核磁共振信息难以进行流体性质识别，但是 3 种流体扩散系数存在一定差异（见图 1b），因而利用基于弛豫-扩散 (T_2, D) 的二维核磁共振信息便可以清楚分辨不同流体（见图 1c，其中水线位置与温度、矿化度有关，水的扩散系数随温度增加而变大，随矿化度增加而减小；油线位置与油的黏度有关，随黏度增加扩散系数变小）。

弛豫-扩散 (T_2, D) 二维核磁共振资料比一维资料需要采集更多信号，如果不改变仪器的脉冲序列就

需要在更多模式下测量^[11-12]。MRIL-Prime 测井仪有上百种采集模式，具有非常丰富的采集参数，可以灵活选择不同的等待时间 (TW) 和回波间隔 (TE)，但是现有采集模式和处理方法仅能得到一维 T_2 分布。如果将不同采集模式下的测井信息进行合理组合，通过特殊的反演处理技术即可将包含在横向弛豫时间内的扩散系数信号分离，从而实现在二维空间内进行流体性质识别。

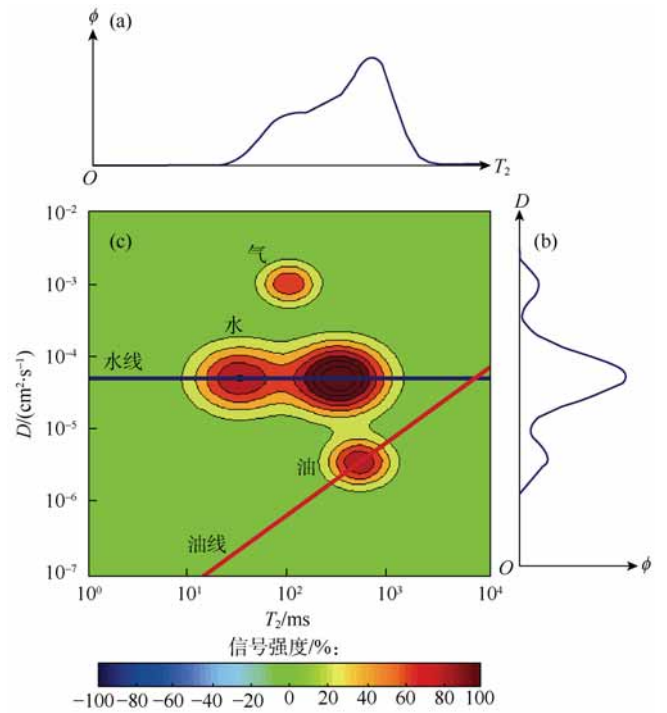


图 1 孔隙介质中不同流体组分的二维核磁共振信息分布图

在梯度场下，如果采用相同的等待时间和不同的回波间隔进行数据采集（测量模式如图 2 所示），此时测量的横向弛豫时间内就包括流体扩散系数信息，由

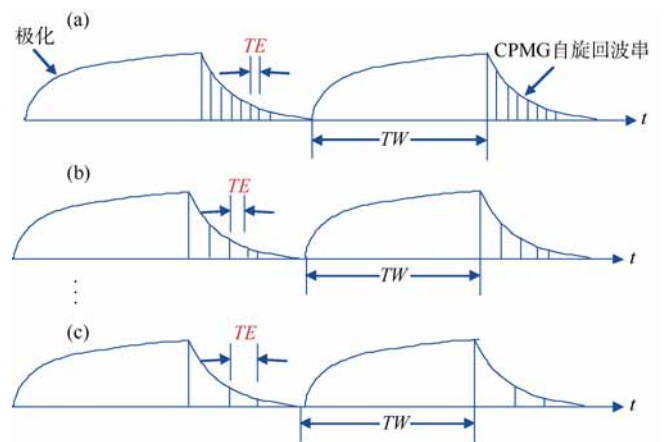


图 2 (T_2, D) 二维核磁共振测井不同回波间隔采集模式示意图

于每次采集信息均采用 CPMG 脉冲序列,故孔隙流体的核磁共振回波信号满足多指数衰减规律,即:

$$g_i = \sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^p (1 - e^{-TW/T_{1,j}}) f_{jl} e^{-t_l(1/T_{2im,j} + 1/T_{2D,j})} + \varepsilon_i \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (4)$$

2 多回波串联合反演算法

采用自旋回波测量的孔隙流体信号以回波串形式出现,满足(4)式的多指数衰减规律。 TW 大小会影响氢核的极化程度,其值可从测井采集参数卡中获得,故可以确定极化因子的大小。根据图 2 所示的采集模式,将多次 CPMG 获得的多个回波串信号进行组合,即 $\mathbf{g} = (g_1, g_2, \dots, g_n)^T$, 此时可以利用正则化将多个回波串联合反演求取 (T_2, D) 采集模式的信号幅度 f_{jl} , 步骤如下:

$$\min \phi(f) = \min \left\{ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^p f_{jl} e^{-t_l(1/T_{2im,j} + 1/T_{2D,j})} - g_i \right]^2 + \frac{\alpha}{2} \sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^p f_{jl}^2 \right\} \quad (5)$$

上式可转化为:

$$\sum_{i=1}^n e^{-t_l(1/T_{2im,j} + 1/T_{2D,j})} \left[\sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^p f_{jl} e^{-t_l(1/T_{2im,j} + 1/T_{2D,j})} - g_i \right] + \alpha_i f_{jl} = 0 \quad (i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m; l=1,2,\dots,p) \quad (6)$$

其中, f_{jl} 为 (T_2, D) 二维核磁共振分布的信号幅度,因此为非负值,故满足:

$$f_{jl}^\alpha = \max \left[0, \sum_{i=1}^n c_i e^{-t_l(1/T_{2im,j} + 1/T_{2D,j})} \right] \quad (j=1,2,\dots,m; l=1,2,\dots,p) \quad (7)$$

将(6)式和(7)式联立可得:

$$\sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^p e^{-t_l(1/T_{2im,j} + 1/T_{2D,j})} e^{-t_l(1/T_{2im,j} + 1/T_{2D,j})} c_i + \alpha c_i = g_i \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (8)$$

(8)式中 c_i 可用下式求取:

$$\psi = \frac{1}{2} \mathbf{c}^T (\mathbf{M} + \alpha \mathbf{I}) \mathbf{c} - \mathbf{c} \cdot \mathbf{g} \quad (9)$$

(9)式可利用搜索凸函数最小值的方法求解,获得二维核磁共振 (T_2, D) 模式的幅度大小 f_{jl} , 即获得二维核磁共振流体信号分布。对于多次测量所获得的不同信噪比信号,可以将 n 个回波串考虑信噪比后进行组合,即 $\mathbf{g} = (g_1, g_2, \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}, \dots, g_n, \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_n})^T$, 再按照上述多回

波串联合反演法进行求取^[13-15]。

3 应用效果分析

南堡凹陷发育河流、三角洲和水下扇等多种沉积相,各沉积相带互相叠置,储集层岩性、物性变化快,利用常规测井资料进行流体性质识别难度很大^[16-20]。笔者在理论研究和数值模拟基础上,利用 MRIL-Prime 仪器对该凹陷 A 井进行多回波间隔的二维核磁共振测井试验,探索利用 MRIL-Prime 仪器进行二维核磁共振流体性质识别的可行性。

参考 MRIL-Prime 仪器现有采集模式并考虑到南堡油田原油黏度,利用数值模拟方法选择采集模式组合:回波间隔设计为 0.9、1.2、3.6 和 6.0 ms,等待时间选择 12.998 s,在该参数组合条件下采集能实现孔隙介质内油、气、水信号的分离。常规测井曲线和多回波间隔测井获得的一维核磁共振 T_2 信息如图 3 所示。图中回波间隔为 1.2 ms 和 6.0 ms 对应 MRIL-Prime 仪器的 DTE412 模式;回波间隔为 0.9 ms 和 3.6 ms 对应 MRIL-Prime 仪器的 D9TWE3 模式,这种模式同时还可以提供差谱和移谱结果,以增强核磁共振测井的流体识别能力。在 2 955~2 970 m 井段, T_2 谱的形态以单峰分布为主,流体成分主要为自由流体,随着回波间隔 TE 增加, T_2 谱向弛豫快的方向移动,移动后的 T_2 谱仍然以单峰分布为主。由于本地区原油黏度较低(平均为 4 mPa·s),利用移谱法难以在 T_2 域内将油水信号分离,因而考虑利用二维核磁进行油水层识别。将 4 种不同回波间隔条件下采集到的原始核磁信号进行数据累加、正交分解、相位角平滑以及滤波等处理后,获得相同深度点不同回波间隔的 4 组回波串。由于经过数据累加的信号具有较高的信噪比,将上述 4 组回波串进行联合反演,就可以获得弛豫-扩散二维核磁共振测井信息(见图 4),其中水的扩散系数线在 $2.5 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ 附近。增加扩散系数信息后,油水信号可以准确分离,可见在轻质油识别方面二维核磁共振法相比一维移谱法具有一定优势。对相应深度点进行含油饱和度计算,约为 62%,二维核磁共振测井识别结论为油层。针对本试验层段进行试油验证,结论为油层,初期日产油 99 t,证明二维核磁共振测井流体识别结果是正确的。

南堡凹陷东营组大孔隙储集层较为发育,一维核磁共振测井利用差谱法进行油水层识别时,常常出现水层存在差谱信号的情况,导致测井解释符合率降低。经过分析认为,水层有差谱的原因可能是常用采集模

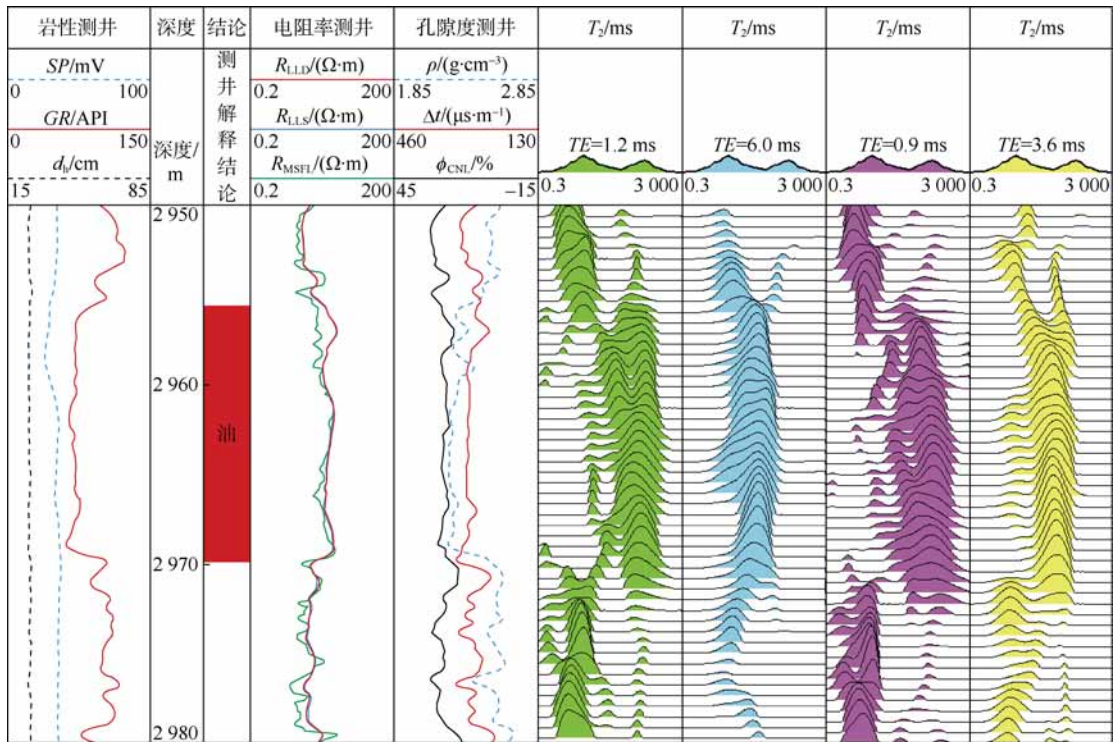


图 3 MRIL-Prime 仪器在 A 井采集的不同回波间隔核磁共振 T_2 分布

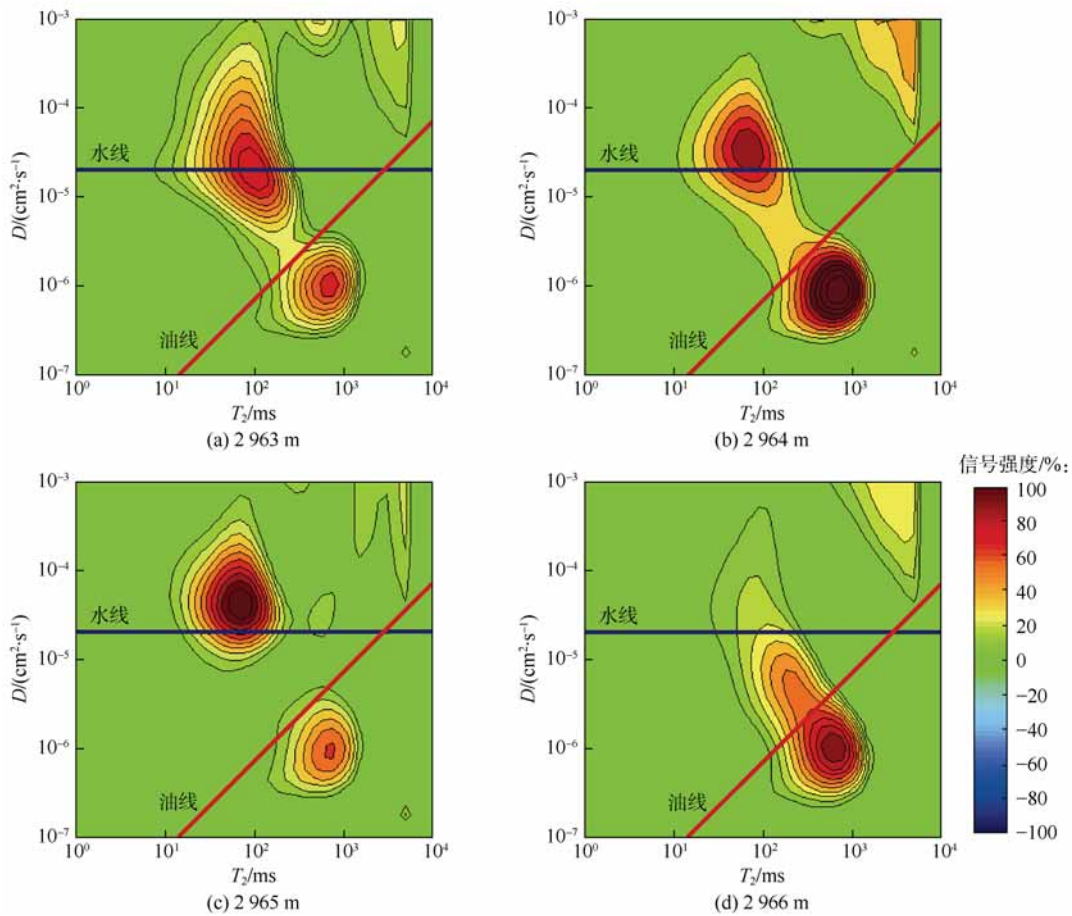


图 4 A 井不同深度点的 (T_2, D) 二维核磁共振信息分布图

式在短等待时间下无法完全将孔隙中水磁化引起的。为了解决这一问题,采用 MRIL-Prime 仪器进行二维核磁共振测井流体识别,采用的采集参数和模式与上述 A 井相同。图 5 为 B 井在不同采集模式下获得的 T_2 分布,由于采集模式中选择了 D9TWE3 模式,也可以直接获

得差谱信号(见图 5 中第 10 道)。如采用一维核磁流体分析方法,此时会误认为该层可能含油。

对图 5 资料处理后可以获得每个深度点的二维核磁信息(见图 6,第 4~8 道)。图 6 中第 9 道是投影得到的扩散系数谱信息,利用油线和水线位置即可识别

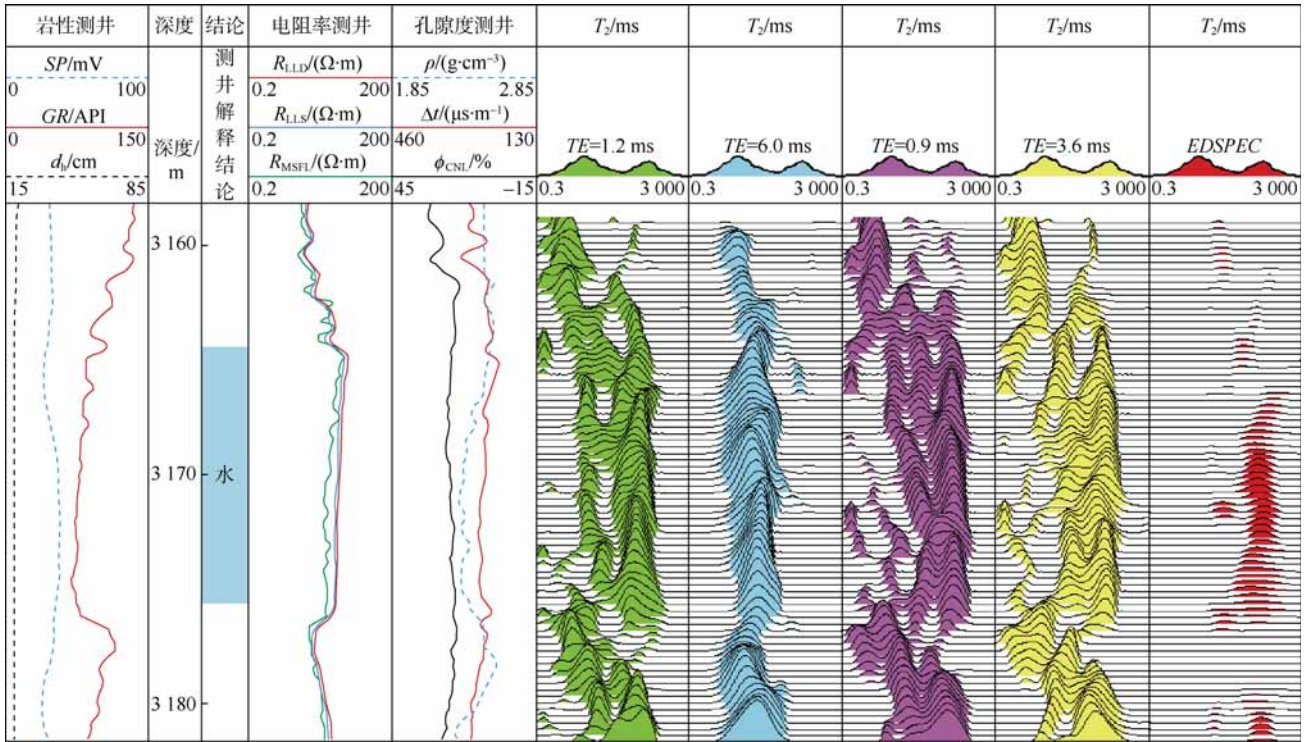


图 5 MRIL-Prime 仪器在 B 井采集的不同回波间隔核磁共振 T_2 分布

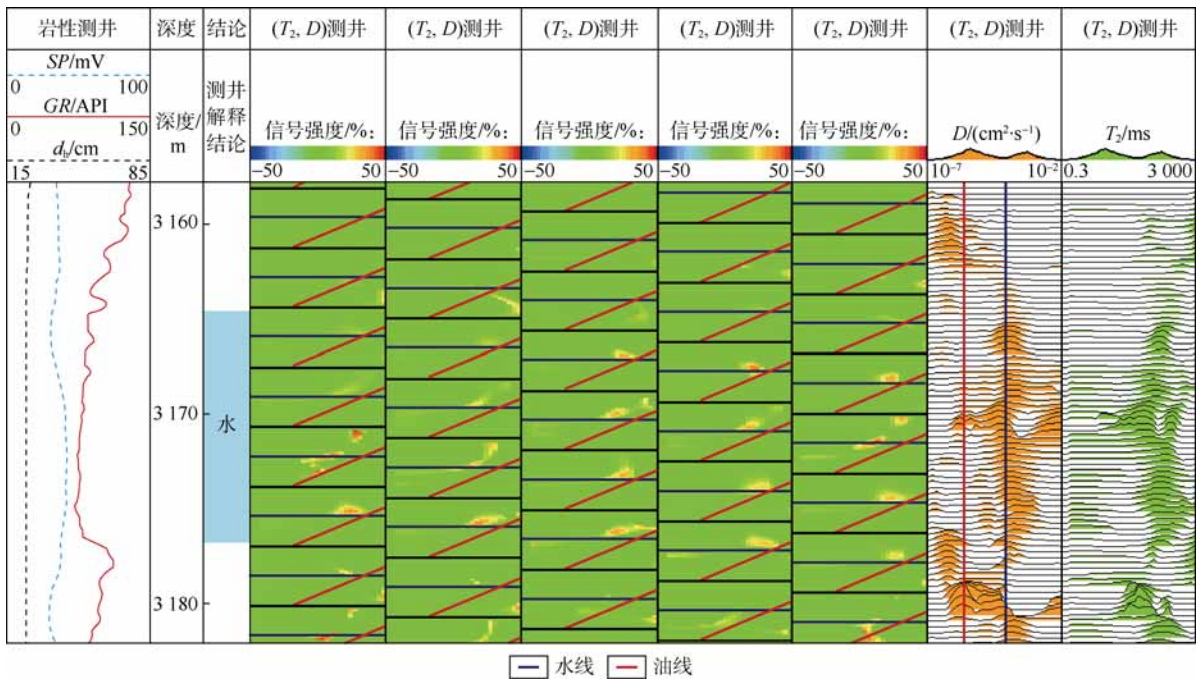


图 6 B 井 (T_2, D) 二维核磁共振信息分布

流体性质,第10道是投影得到的本征弛豫时间谱,可以反映孔隙结构信息。由图6可见,无论是在 (T_2, D) 二维分布图上还是在扩散系数谱上都没有发现油信号,扩散系数谱主要分布在水线附近,可见一维核磁差谱得到的信号为水信号,所解释层段(3 164.0~3 175.6 m)也应水层。另外,图6中3 170 m附近出现了大于水扩散系数的流体信号,经分析认为这是两次采集过程测量目标不一致造成的,可以从一维核磁 T_2 或者质量曲线上进行验证。试油结果证实该层段日产水 74 m^3 。由此可见,二维核磁共振在储集层的流体性质识别方面相比一维核磁差谱技术有明显优势。

4 结论

在不改变 MRIL-Prime 核磁共振测井仪硬件结构的情况下,利用其现有的采集模式进行多回波测量,结合研发的二维核磁共振多回波串联合反演数据处理技术,可以获得 (T_2, D) 二维核磁共振信息; (T_2, D) 二维核磁共振信息能够比一维核磁共振 T_2 信息更清楚准确地进行油水信号分离,但是也需要更多的回波信息;对于 (T_2, D) 二维核磁共振流体识别方法,水的扩散系数线在 $2.5 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ 附近,其位置相对固定,温度和矿化度对其位置影响较小。由于井下原油的组分和测量条件与实验室不同,油峰可能会偏离依据实验室数据计算的油线,因此需要进行大量的二维核磁共振测井仪器试验后才能准确确定出油线位置。

符号注释:

T_2 ——横向弛豫时间, ms; T_{2B} ——自由弛豫时间, ms; T_{2S} ——表面弛豫时间, ms; T_{2D} ——扩散弛豫时间, ms; D ——流体的扩散系数, cm^2/s ; γ ——旋磁比, Hz/G; G ——磁场梯度, G/cm; TE ——回波间隔, ms; T_{2int} ——本征弛豫时间, ms; ϕ ——孔隙度, %; TW ——回波等待时间, ms; g_i ——第 i 个回波串信号强度, %; n ——回波个数; m —— T_2 组分个数; p —— D 组分个数; T_{1j} ——第 j 个组分的纵向弛豫时间, ms; f_{jl} ——第 j 个 T_2 、第 l 个 D 组分的二维核磁共振 (T_2, D) 的信号幅度, %; t_i ——第 i 个回波串测量时间, ms; $T_{2int,j}$ ——第 j 个 T_2 组分的本征弛豫时间, ms; $T_{2D,l}$ ——第 l 个组分的扩散弛豫时间, ms; ε_i ——第 i 个回波串噪音信号, %; g ——信号强度向量; α ——平滑因子, 无量纲; α_i ——第 i 个平滑因子, 无量纲; c_i ——第 i 个待定系数, 无量纲; c ——待定系数向量, 无量纲; M ——扩散弛豫时间布点和本征弛豫时间联合布点所组成的矩阵; I ——单位矩阵, 无量纲; SP ——自然电位, mV; GR ——自然伽马, API; d_h ——井径, cm; R_{LLD} ——深侧向电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$; R_{LLS} ——浅侧向电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$; R_{MSFL} ——微球电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$; ϕ_{CNL} ——中子孔隙度,

%; ρ ——密度, g/cm^3 ; Δt ——声波时差, us/m; $EDSPEC$ ——差谱, ms。

参考文献:

- [1] Coates G R, Xiao L Z, Prammer M G. NMR logging principles and applications[M]. Texas: Gulf Publishing Company, 1999.
- [2] Akkurt R, Prammer M G, Moore M A. Selection of optimal acquisition parameters for MRIL logs[C]//SPWLA 37th Annual Logging Symposium. New Orleans: SPWLA, 1996.
- [3] Akkurt R. Determination of residual oil saturation using enhanced diffusion[R]. SPE 49014, 1998.
- [4] 王忠东, 汪浩, 向天德. 综合利用核磁谱差分与谱位移测井提高油层解释精度[J]. 测井技术, 2001, 25(5): 365-368.
Wang Zhongdong, Wang Hao, Xiang Tiande. Integration of NMR DTW logs and DTE logs to improve the oilbed interpretation accuracy[J]. Well Logging Technology, 2001, 25(5): 365-368.
- [5] 刘忠华, 李霞, 赵文智, 等. 核磁共振增强扩散方法在复杂储集层流体识别中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(6): 703-708.
Liu Zhonghua, Li Xia, Zhao Wenzhi, et al. Enhanced diffusion theory of nuclear magnetic resonance (NMR) and its application to fluid identification of complex reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(6): 703-708.
- [6] Sun B, Dunn K J. Core analysis with two dimensional NMR[C]//International Symposium of the Society of Core Analysts. Monterey: SCA, 2002.
- [7] Hürlimann M D, Venkataramanan L. Quantitative measurement of two-dimensional distribution functions of diffusion and relaxation in grossly inhomogeneous fields[J]. Journal of Magnetic Resonance, 2002, 157: 31-42.
- [8] 谢然红, 肖立志, 邓克俊, 等. 二维核磁共振测井[J]. 测井技术, 2005, 29(5): 430-434.
Xie Ranhong, Xiao Lizhi, Deng Kejun, et al. Two-dimensional NMR logging[J]. Well Logging Technology, 2005, 29(5): 430-434.
- [9] 谢然红, 肖立志. (T_2, D) 二维核磁共振测井识别储层流体的方法[J]. 地球物理学报, 2009, 52(9): 2410-2418.
Xie Ranhong, Xiao Lizhi. The (T_2, D) NMR logging method for fluids characterization[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(9): 2410-2418.
- [10] 肖立志. 我国核磁共振测井应用中的若干重要问题[J]. 测井技术, 2007, 31(5): 401-407.
Xiao Lizhi. Some important issues for NMR logging applications in China[J]. Well Logging Technology, 2007, 31(5): 401-407.
- [11] 胡法龙, 肖立志. 一种核磁共振测井信号强度的确定方法[J]. 核电子学与探测技术, 2006, 26(5): 557-560.
Hu Falong, Xiao Lizhi. A method for determining NMR log signal intensity[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2006, 26(5): 557-560.
- [12] 胡法龙, 肖立志. 核磁共振测井静磁场分布的数值模拟[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(1): 173-177.
Hu Falong, Xiao Lizhi. Numerical simulation of static magnetic field distribution of NMR logging tools[J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(1): 173-177.
- [13] Dunn K J, Latorraca G A. The inversion of NMR log data sets with different measurement errors [J]. Journal of Magnetic Resonance,

- 1999, 140: 153-161.
- [14] 谢然红, 肖立志, 刘家军, 等. 核磁共振多回波串联合反演方法[J]. 地球物理学报, 2009, 52(11): 2913-2919.
Xie Ranhong, Xiao Lizhi, Liu Jiajun, et al. A method for multiple echo trains jointing inversion of NMR relaxation measurements[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(11): 2913-2919.
- [15] 谭茂金, 邹友龙, 刘兵开, 等. 气水模型(T_2 , D)二维核磁共振测井数值模拟及参数影响分析[J]. 测井技术, 2011, 35(2): 130-136.
Tan Maojin, Zou Youlong, Liu Bingkai, et al. Inversion simulation of (T_2 , D) 2D NMR logging and analysis of observation parameters effects in gas-water model[J]. Well Logging Technology, 2011, 35(2): 130-136.
- [16] 周凤鸣, 司兆伟, 马越蛟, 等. 南堡凹陷低电阻率油气层综合识别方法[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(6): 680-684.
Zhou Fengming, Si Zhaowei, Ma Yuejiao, et al. Integrated identification method for low-resistivity hydrocarbon layers in Nanpu Sag[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(6): 680-684.
- [17] 李长喜, 石玉江, 周灿灿, 等. 淡水钻井液侵入低幅度-低电阻率油层评价方法[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(6): 696-702.
Li Changxi, Shi Yujiang, Zhou Cancan, et al. Evaluation of low amplitude and low resistivity pay zones under the fresh drilling mud invasion condition[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(6): 696-702.
- [18] 罗红梅, 朱毅秀, 穆星, 等. 渤海湾渤南洼陷深层湖相滩坝储集层沉积微相预测[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(2): 182-190.
Luo Hongmei, Zhu Yixiu, Mu Xing, et al. Seismic facies prediction of lacustrine beach and bar reservoirs in the deep zone of the Bonan Subbasin, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(2): 182-190.
- [19] 孙和风, 周心怀, 彭文绪, 等. 渤海南部黄河口凹陷晚期成藏特征及富集模式[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(3): 307-313.
Sun Hefeng, Zhou Xinhuai, Peng Wenxu, et al. Late-stage hydrocarbon accumulation and enrichment in the Huanghekou Sag, southern Bohai Sea[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(3): 307-313.
- [20] 王玉满, 黄旭楠, 程坤芳, 等. 断陷盆地岩性勘探目标评价方法: 以渤海湾盆地为例[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(1): 122-128.
Wang Yuman, Huang Xu'nan, Cheng Kunfang, et al. Evaluation methodology of lithologic exploration areas in rift basins: A case from the Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(1): 122-128.
- 第一作者简介: 胡法龙(1977-), 男, 山东沂南人, 现为中国石油勘探开发研究院在读博士研究生, 主要从事地球物理测井方法与应用方面研究。
地址: 北京市海淀区学院路20号, 中国石油勘探开发研究院测井与遥感技术研究所, 邮政编码: 100083。E-mail: hufalong@petrochina.com.cn
收稿日期: 2011-09-02 修回日期: 2012-07-18
- (编辑 黄昌武 绘图 刘方方)

中国砾岩油藏开发获突破——

新疆油田七东1区克下组油藏聚合物驱工业化试验取得成功

截至2012年7月30日, 中国石油天然气股份有限公司(以下简称中国石油)重大开发试验项目——新疆油田七东1区克下组油藏聚合物驱成效显著, 中心井区阶段提高采收率10.3%, 预计提高采收率12.1%。这预示着中国石油首个砾岩油藏聚合物驱工业化试验取得成功。

七东1区克下组油藏是中国石油首个砾岩油藏聚合物驱工业化试验区, 2005年启动。试验区有油水井25口, 2006年9月开始注聚。2009年10月, 试验区含水率开始上升, 见效高峰期已过。针对试验区出现注采不平衡和水油比高等问题, 技术人员对区块油井实施多次调剖作业, 在前缘水驱后通过整体调剖堵住高渗通道, 为措施迅速见效打下基础; 在聚合物驱过程中, 开展单井调剖, 遏制试验区含水率回升趋势, 以达到增油效果。

2011年11月, 七东1区调剖施工正式启动。技术人员完成不同段塞和不同注入量调剖, 使聚合物驱的7口井深部调驱顺利完成4个段塞注入工作。通过开展聚合物驱工业化试验, 七东1区形成砾岩油藏微观驱油机理研究技术、聚合物筛选优化技术、聚合物配制、注入工艺技术、含聚采出液处理技术、采出液监测技术和聚合物驱跟踪调整技术等9大配套技术, 申请专利4项, 为聚合物驱工业化推广应用奠定了基础。

准噶尔盆地砾岩油藏分布很广, 但砾岩油藏孔隙度低、储集层物性差, 开发和稳产难度很大, 此次在砾岩油藏开展聚合物驱工业试验在中国尚属首次。

(黄昌武 摘自中国石油新闻中心, 2012-07-31)