

李新,肖立志,黄科等. 随钻核磁共振测井的地层界面响应特征. 地球物理学报, 2013, 56(8): 2862-2869, doi: 10. 6038/cjg20130834.

Li X, Xiao L Z, Huang K, et al. Nuclear Magnetic Resonance Logging-While-Drilling response at formation boundary. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2013, 56(8): 2862-2869, doi: 10. 6038/cjg20130834.

随钻核磁共振测井的地层界面响应特征

李 新^{1,2}, 肖立志^{1*}, 黄 科³, 刘化冰¹, 宗芳荣¹

1 油气资源与探测国家重点实验室, 中国石油大学, 北京 102249

2 中国石油化工股份有限公司石油工程技术研究院 测录井研究所, 北京 100101

3 中国石油集团测井有限公司油气评价中心, 西安 710021

摘 要 随钻核磁共振测井的地层界面响应特征对地质导向和原地地层评价具有重要意义, 但钻井轨迹的复杂性决定其响应特征是多重因素综合作用的结果, 且较难直接给出统一显式表达式. 本文根据仪器在地层内的运动特征, 建立了基于敏感区域体元随钻核磁共振测井响应方程和离散化计算方法; 通过正演、反演结合的数值模拟, 研究了单、双界面水平层状地层中, 不同井斜角度、天线长度和目标地层厚度等条件下的随钻核磁共振测井响应特征, 对关键结果给出了成立条件和定量关系. 随钻核磁共振测井在斜井段中的 T_2 分布和孔隙度响应与直井中差异明显; 井斜角越大, 视地层厚度越大, 地层界面在 T_2 分布和孔隙度曲线上的过渡段越长, T_2 分布过渡起始位置已不能确定界面深度; 仪器的最高纵向分辨率与天线长度、井眼条件和仪器参数有关; 受围岩作用影响, 较薄目的层的测井响应特征上可能出现异常“夹层”. 基于分析结果, 对随钻核磁共振测井资料解释提出了建议.

关键词 随钻核磁共振测井, 地层界面, 响应特征, 大斜度与水平井

doi: 10. 6038/cjg20130834

中图分类号 P631

收稿日期 2012-09-26, 2013-03-21 收修定稿

Nuclear Magnetic Resonance Logging-While-Drilling response at formation boundary

LI Xin^{1,2}, XIAO Li-Zhi^{1*}, HUANG Ke³, LIU Hua-Bing¹, ZONG Fang-Rong¹

1 State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

2 SINOPEC Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China

3 Reservoir Evaluation Center, CNPC Logging Ltd., Xi'an 710021, China

Abstract It is of significance to identify properties and boundaries of formation for NMR geosteering and in-situ reservoir evaluation. In this paper, a discretization method and NMR LWD response function are proposed based on drilling trajectory and sensitive-volume-unit contribution concept. Forward numerical modeling and inversion are employed to simulate NMR LWD logging response in different formation cases and factors, such as well deviation angles, formation boundary types, antenna apertures and target formation thicknesses. Quantitative relationships of these factors in certain condition are given here. Significant differences of T_2 distributions and porosities can be found in comparison of NMR logging response between vertical wells and deviated wells. It shows that the bigger the deviated angle, the longer the apparent formation thickness and the longer the transitional interval in NMR response of formation

基金项目 国家自然科学基金项目(41130417, 41074102)资助.

作者简介 李新, 男, 1981 年生, 博士, 2012 年毕业于中国石油大学(北京), 主要从事核磁共振测井研究. E-mail: lixin229@hotmail.com

* 通讯作者 肖立志, E-mail: xiaolizhi@cup.edu.cn

boundary. Therefore, the depth of formation boundary cannot be extracted from initial point of transitional part of T_2 distribution anymore. Vertical resolution is related to the length of antenna, borehole and tool's parameters. Besides that, an abnormal 'sandwich' may be reflected in thin target formation of logging response because of the existence of surroundings effects. These results provide suggestion to NMR LWD applications to improve real time formation identification.

Keywords NMR LWD, Formation boundary, Response, Horizontal and high-deviated well

1 引言

复杂油气藏和非常规油气藏的勘探开发越来越依赖以随钻测井(Logging While Drilling, LWD)为核心的地质导向技术^[1]. 近年来,以 Halliburton 公司的 MRIL-WD, Schlumberger 公司的 proVISION (Plus)和 Baker Hughes 公司的 MagTrak 为代表的随钻核磁共振(Nuclear Magnetic Resonance, NMR)测井技术正逐步应用于油田服务^[2-4]. 相比于电缆 NMR 测井,随钻 NMR 测井能够实时提供原状地层流体信息,作业范围更广^[5-8].

随钻 NMR 测井的地层界面响应特征对于利用随钻 NMR 测井有限的测量参数定性确定目的井段和定量获取地层以及流体性质具有重要意义. 目前,国内外已有多位学者对 NMR 测井地层界面响应特征进行了研究,但主要集中在水平地层中的垂直井领域. Akkurt 研究了水平层状地层中的仪器垂直运动对电缆 NMR 测井响应的影响^[9]; Edwards 在总结 Akkurt 工作的基础上研究了天线运动对视 T_2 谱的影响^[10]; 2008 年,刘双惠等利用分层地层贡献的思想研究了电缆 NMR 测井的地层界面响应特征和影响因素^[11],受到广泛关注^[12-13].

随钻 NMR 测井更多地应用在大斜度井和近水平井中,其地层界面响应特征是多重因素综合作用

的结果,不同井斜角度和地层组合条件下的界面响应特征目前仍不十分明确,而现有的垂直井中的研究方法又并不适用. 本文提出一种随钻 NMR 测井地层界面响应一般性的研究方法,通过数值模拟研究不同井斜角度、仪器探测特性和地层组合条件下的地层界面响应特征.

2 仪器运动轨迹与响应方程

随钻 NMR 测井传感器是井底钻具组合(BHA)的一部分. 随钻测井作业过程中,传感器的运行轨迹与钻井井眼轨迹相同. 假设仪器的运动速度为 V , 方向与井眼方向线重合, 则 t 时刻仪器所处的测量深度为 $Z_{MD} = Vt$. V 与重力线的夹角称为井斜角 A ^[14], 通常根据井底井斜角的大小将井斜程度划分为^[15]: 垂直或近似垂直井 ($A < 30^\circ$)、中等斜度井 ($30^\circ < A < 60^\circ$)、大斜度井 ($60^\circ < A < 80^\circ$) 和水平井 ($A > 80^\circ$). 从钻井开始至钻井结束, 根据井眼轨迹类型的不同, 随钻 NMR 测井传感器敏感区与地层界面成多种不同的角度关系(图 1a).

随钻 NMR 测井仪中的传感器在旋转运动的状态下测量, 这限制了其敏感探测区域为关于井轴旋转轴对称的圆柱壳^[16]. 以仪器中心为原点 O 、井眼轨迹上过仪器中心的切线为 Z 轴, 建立圆柱坐标系来考虑仪器响应问题将更加简便(图 1b).

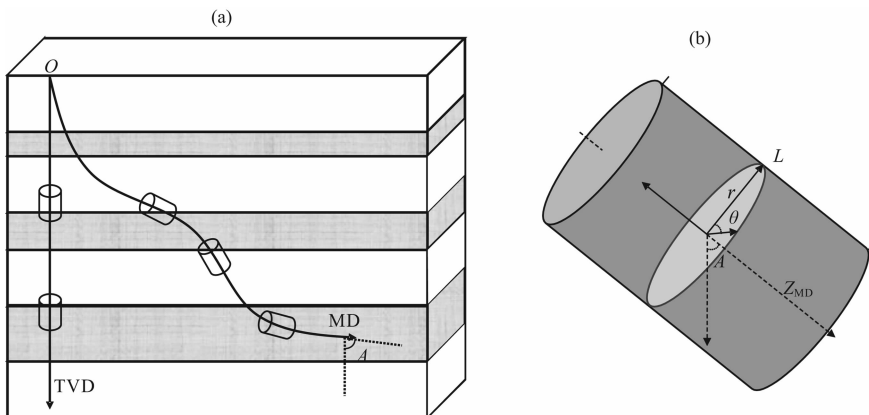


图 1 随钻 NMR 测井仪(a)轨迹与(b)敏感区示意图

Fig. 1 NMR LWD sensor trajectory (a) and sensitive volume (b)

随钻 NMR 传感器与地层呈一定角度进入并穿过目的地层界面的过程中,所探测到的地层流体的 NMR 响应信号利用每个均匀地层内的由 T_2 分布所表征的地层性质(孔隙度)和流体性质(横向弛豫时间)进行求取(如 3.1 节). 仪器传感器在某一测量深度 Z_{MD} 处所测得的信号来自敏感区探测区域内所有地层相应部分的综合贡献:

$$M(Z_{MD}) = \int_{Z_{MD-L/2}}^{Z_{MD+L/2}} \int_{r_1}^{r_0} \int_0^{2\pi} M(l, r, \theta) r d\theta dr dl, \quad (1)$$

式中, r_1 和 r_0 分别为圆柱壳的内、外半径; L 为敏感区高度; $r d\theta dr dl$ 为敏感区单位体积元; $M(l, r, \theta)$ 为敏感区中地层单位体积元的 NMR 信号贡献, 经刻度后为孔隙度.

在实际的数值模拟过程中, 将圆柱壳敏感区规则剖分为足够小的体积单元, 并将式(1)中的连续函数问题转化为离散函数求和进行逼近. 网格剖分规则设定为: 周向 θ 方向剖分 K 份, 敏感区高度 L 方向剖分 M 份, 厚度 $(r_0 - r_1)$ 剖分为 N 份, 剖分越细精度越高. 计算时, 沿钻井轨迹测量深度采样点遍历所有 $K \times M \times N$ 个体积单元, 根据每个体积元中心坐标计算其在地层模型中的位置(TVD)和对应性质, 那么整个敏感区的总信号贡献可用所有体积元贡献的代数和来近似逼近. 对于单个体积元来说, 根据地层性质通过多指数响应方程正演得到其 CPMG 自旋回波串衰减信号^[17-18], 以模拟 NMR 测井采集过程:

$$\text{Echo}_{k,m,n}(i) = \sum_{j=1}^P p(T_{2,j})_{k,m,n} e^{-\frac{i \cdot TE}{T_{2,j}}} + \epsilon$$

$$(k = 1, 2, \dots, K; m = 1, 2, \dots, M; n = 1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

式中, $p(T_{2,j})_{k,m,n}$ 为该体积元所属地层 T_2 分布中 P 个组分中的第 j 个组分($T_{2,j}$)对应的区间孔隙度; i 为回波串信号中第 i 个回波; TE 为回波间隔; ϵ 为随机噪声.

将式(1)离散化得到钻井轨迹上某一测量深度 (Z_{MD}) 处仪器的回波信号响应为:

$$\text{Echo}(Z_{MD}, i) = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \text{Echo}_{k,m,n}(i)}{SV}, \quad (3)$$

SV 为敏感区体积, 用于不同仪器信号幅度归一化对比.

本文重点研究的地层界面响应特征对象指利用多指数反演方法对上述测井所采集的 CPMG 回波串信号进行反演^[19]处理得到的视 T_2 分布 $p_a(T_{2,j})$ 和视地层孔隙度 ϕ_a (式(4)):

$$\phi_a = \sum_{j=1}^P p_a(T_{2,j}). \quad (4)$$

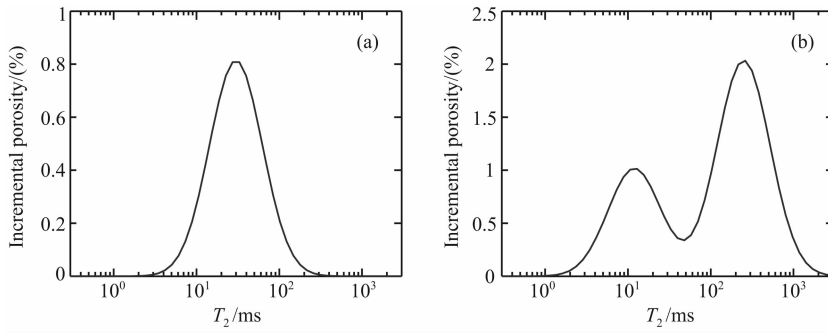
随钻 NMR 测井地层界面响应有多种影响因素: (1) 仪器相关因素: 仪器运动方向和速度、敏感区探测特性(天线长度和探测深度)等; (2) 地层组合因素: 目标地层厚度、地层均匀性(界面数与对称性); (3) 地层性质因素: 孔隙度和 T_2 分布等. 为突出随钻 NMR 测井的特殊问题, 重点研究不同地层性质的单、双地层界面条件下, 仪器运动方向 A 、探测深度 r 、天线长度 L 和目的层厚度 H 对测井的响应特征的影响.

3 地层界面响应特征模拟与分析

基于正演和反演相结合的数值模拟流程为: (1) 建立地层组合数字模型和设定地层属性参数, 包括: 界面个数、地层厚度、 T_2 分布和孔隙度; (2) 建立仪器探测特性模型, 选定传感器特征参数, 包括: 仪器运动速度和方向、天线长度、探测深度; (3) 模拟 NMR 传感器穿过目的层时 CPMG 自旋回波串信号采集过程; (4) 沿测量深度反演回波串测井数据得到视 T_2 谱和视孔隙度响应曲线. 具体为: 首先根据单个地层厚度和属性建立地层组合模型, 通过设定仪器运动方向(A)计算传感器运动路径; 根据仪器采集间隔得到每次采样时的测量 Z_{MD} 和总采样次数; 遍历所有测量位置 Z_{MD} , 依照仪器探测特性计算敏感区域包含的所有地层体积元, 按照式(1)的思想和式(3)的离散化方式计算对回波信号的贡献, 依次得到整个地层每个采样位置的正演 CPMG 回波信号; 再将所有回波串通过多指数非线性反演得到每个测量位置 Z_{MD} 的视 T_2 分布, 根据式(4)计算视孔隙度 ϕ_a , 并将视 T_2 分布和 ϕ_a 沿测量深度显示.

3.1 地层模型与仪器探测特性

假定地层为水平层状无限延伸, 层内性质均匀、层间性质突变. 地层组合模型表征参数为: 界面个数、地层厚度(精度 1 mm)、地层 T_2 分布和孔隙度. 其中, 围岩地层为单峰分布, 孔隙度相对较小, 将 50 个 T_2 弛豫组分按对数平均分布于 0.3~3000 ms, 主谱峰位于 28 ms; 目的地层为双峰分布, 地层孔隙度相对较大, 同样将 50 个 T_2 弛豫组分按对数平均分布于 0.3~3000 ms, 主谱峰位置分别为 10 ms 和 260 ms, 如图 2 所示, 其中纵坐标(Incremental porosity)为对应的 T_2 分布区间孔隙度, 单位%. 假设整个地层组合边界向上下方向无限延伸, 地层边

图 2 围岩和目的层的 T_2 分布模型

(a) 围岩, 孔隙度 8% 为例; (b) 目的层, 孔隙度 30% 为例.

Fig. 2 T_2 distribution of surrounding (a) and target formations (b)

界条件对地层界面响应无影响。

根据随钻 NMR 测井的关键问题和探测特性^[20], 随钻 NMR 测井仪具有单一工作频率和圆柱壳敏感区。采集时, 以探头中心为仪器的深度记录点, 测井方向沿钻井轨迹向下。由于钻井速度较慢, 单位深度内允许多次信号叠加, 一定程度上解决了信噪比的问题。因此, 假设仪器每次采样时, 地层被完全极化, 以测量深度固定采样间隔进行 CPMG 自旋回波数据采集, 回波串信号包含一定标准偏差的随机高斯噪声。

3.2 仪器运动方向与探测深度的影响

地层模型由无限延伸的均匀下围岩和目的层形成单界面组合, 设目的层厚度 $H=0.30$ m, 孔隙度 30%; 围岩厚度 0.30 m, 孔隙度 8%。天线长度 $L=15.24$ cm (以 proVISION 为例), 探测深度 $r=17.78$ cm (proVISION), $TE=0.6$ ms, 采集间隔 2 cm, 回波个数 $NE=1000$, 信噪比为 100。为考察不同仪器运动方向(井斜角度)的影响, 模拟了不同角度下的地层界面响应特征。限于篇幅, 文中只给出了 0° 、 30° 和 60° 三种典型情况下的结果, 视 T_2 分布结果如图 3 所示, 视孔隙度结果如图 4 所示。

从图 3 和图 4 结果可以看出, 井斜角度对地层界面的测井响应影响较大。固定探测深度条件下, 仪器穿过地层界面过程中, CPMG 采样数量随井斜角度的增大而增加, 视 T_2 分布上的地层界面响应过渡带明显变长, 地层界面分界不清晰。仪器沿直线轨迹穿过地层界面时, 测量深度 = 真垂直深度 / $\cos A$ 。 $A=0^\circ$ (垂直井) 时的采样点为 30 个, 仪器探测到下围岩影响时的测量深度为 0.22 m; $A=30^\circ$ 时的采样点为 34 个, 仪器探测到下围岩影响时的测量深度为 0.18 m; $A=60^\circ$ 时采样点为 59 个, 仪器探测到下围岩影响时的测量深度为 0.22 m。

地层界面的孔隙度响应结果与井斜角有关。

$A=0^\circ$ (垂直井) 时, 孔隙度曲线在仪器探测到下围岩的深度位置上开始变化, 形态为折线, 变化相对明显; 井斜角 $A=30^\circ$ 时, 孔隙度曲线变化相对光滑, 过渡带变长; 井斜角为 $A=60^\circ$ 时, 孔隙度曲线光滑、过渡带更长, 同时呈阶梯变化的趋势, 而不是单纯的线性变化关系。

直井中 ($A=0^\circ$) 界面深度是响应曲线开始过渡的深度, 结果与文献^[11]一致。斜井中地层界面位置不再是过渡带开始深度, 应综合仪器参数和地层组合确定。图 3 和图 4 结果均显示仪器探测到下围岩的测量深度(过渡带起始点)与井斜角度并不成正比关系, 而是先减小后增大。本例中, 井斜角为 36.33° 时获得仪器探测到界面的测量深度最小为 0.1654 m。

由于探测深度与井斜和天线长度间复杂的几何关系共同作用, 仪器探测到界面时的测量深度为:

$$\frac{H_{\text{up}}}{\cos A} - r \tan A - \frac{L}{2}, \text{ 式中, } H_{\text{up}} \text{ 为上部地层厚度(本例中为目的层厚度 } H\text{)。}$$

具体的响应关系如图 5 所示。

3.3 天线长度的影响

地层模型由无限延伸的均匀上、下围岩和目的层形成对称双界面组合, 设目的层厚度 $H=0.40$ m, 孔隙度 30%; 上下围岩厚度 0.30 m, 孔隙度 10%。仪器探测深度 $r=17.78$ cm (proVISION 和 MRIL-WD), 运动方向 $A=45^\circ$, CPMG 采集间隔 2 cm, $TE=0.6$ ms, 回波个数 $NE=1000$, 信噪比 = 100。为考察不同天线长度的影响, 模拟了天线长度分别为 $L_1=60.96$ cm (MRIL-WD)、 $L_2=15.24$ cm (proVISION) 和 $L_3=7.62$ cm (MagTrak) 时的界面响应特征, 视 T_2 分布结果如图 6 所示, 视孔隙度结果如图 7 所示。

天线长度主要影响仪器的纵向分辨能力和探测到目的层的仪器位置。这种地层组合条件下, 仪器能分辨的最小地层真垂直厚度为: $2r \sin A + L \cos A$ 。

$L_1=60.96$ cm 时, 由于天线较长, 纵向分辨率

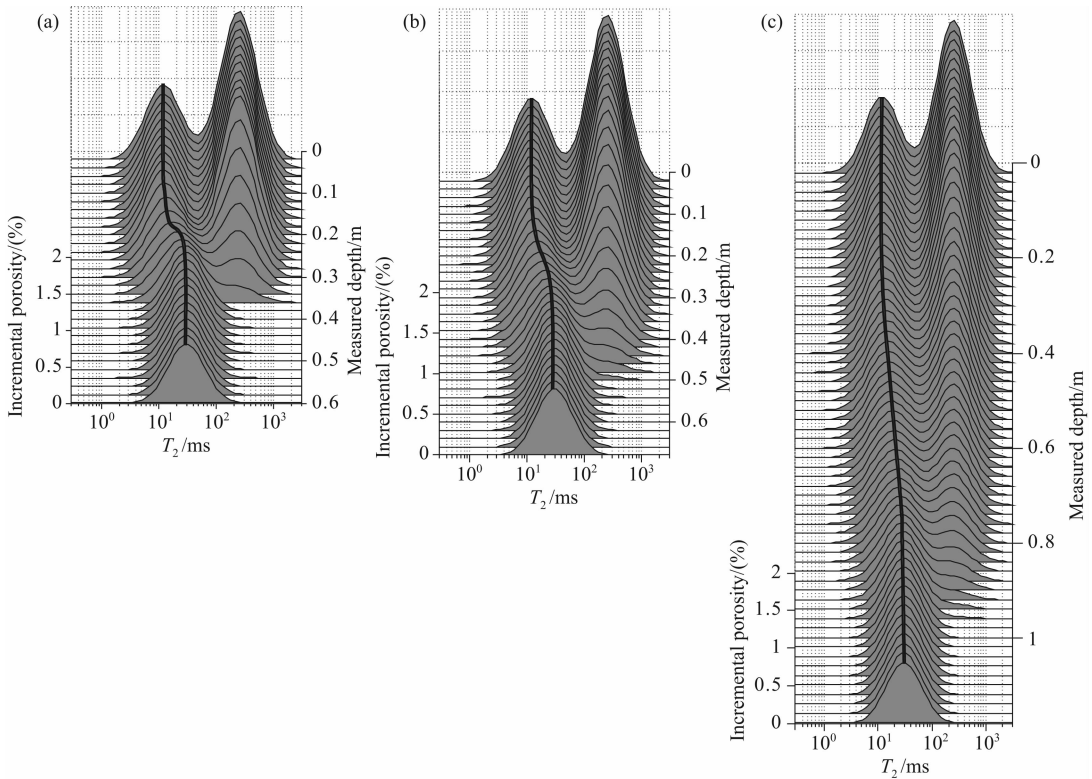


图 3 单界面不同井斜角度的地层界面 T_2 分布响应

Fig. 3 T_2 distribution response of different deviated angles in single boundary formation

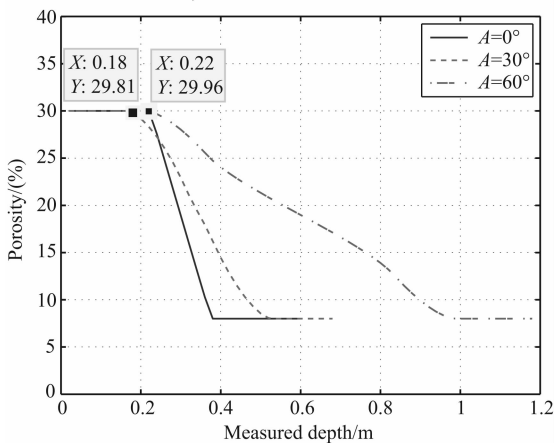


图 4 单界面不同井斜角度的地层界面孔隙度响应

Fig. 4 Porosity response of different deviated angles in single boundary formation

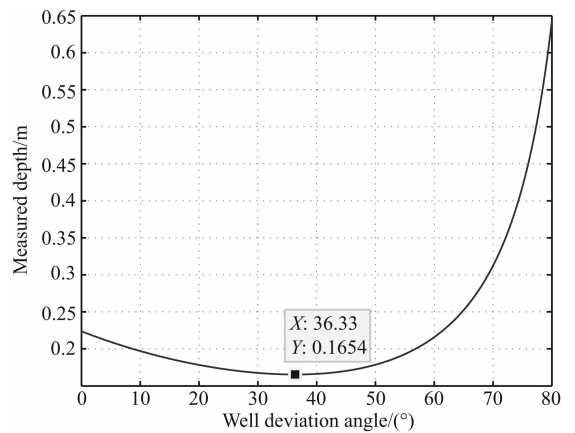


图 5 探测到下围岩时的仪器位置与井斜角的关系 ($H=0.3\text{ m}, L=15.24\text{ cm}, r=17.78\text{ cm}$)

Fig. 5 Tool's position in measured depth as a function of deviated angle when detects surrounding formation

相对较低,受围岩影响严重,过渡带最长(图 6a 方框). 目的层视 T_2 分布和孔隙度响应曲线上均未能探测到围岩和目标地层的真实信息,目标地层中心最大孔隙度为 25.5%,与地层模型真实值相差 4.5%; $L_2=15.24\text{ cm}$ 的纵向分辨率有所改善,探测到了围岩和少部分目的层的真实 T_2 分布和孔隙度; $L_3=7.62\text{ cm}$ 的分辨率最高,受围岩影响最小,视 T_2 分布和孔隙度曲线上有 0.14 m(测量深度)层

段反映了目的层真实信息.

3.4 目标地层厚度的影响

地层模型同样由无限延伸的均匀上、下围岩和目的层形成对称双界面组合,设目的层孔隙度 25%;围岩孔隙度 5%. 仪器运动方向 $A=70^\circ$,探测深度 $r=16.00\text{ cm}$ (MagTrak),天线长度 $L_3=7.62\text{ cm}$ (MagTrak), $TE=0.6\text{ ms}$,回波个数 $NE=1000$,信噪比=100,CPMG 采集间隔 2 cm. 为考察相同围岩

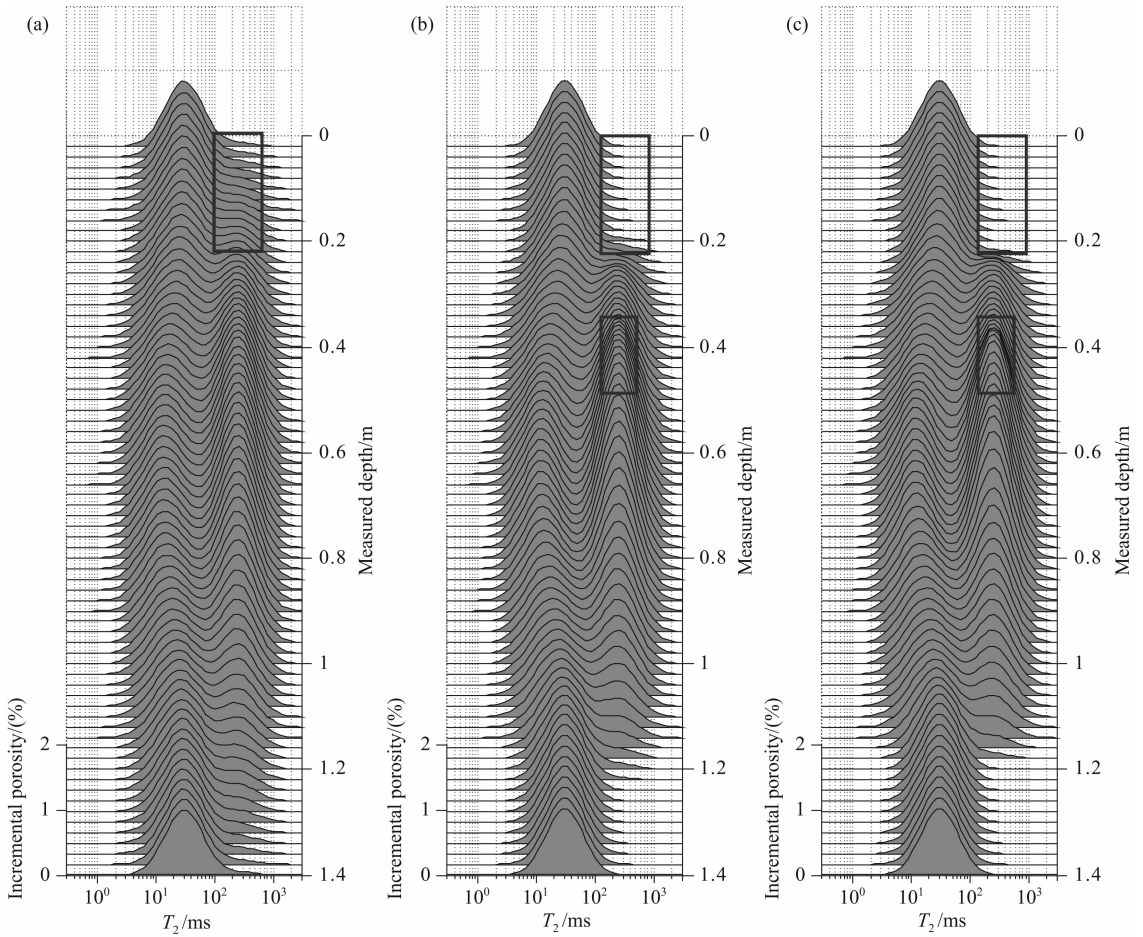


图 6 双界面不同天线长度时的地层界面 T_2 分布响应

(a)60.96 cm;(b)15.24 cm;(c)7.62 cm.

Fig. 6 T_2 distribution response of different antenna lengths in double-boundary formation

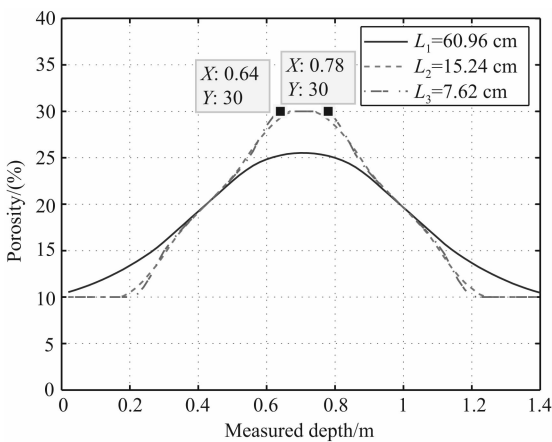


图 7 双界面不同天线长度的地层界面孔隙度响应

Fig. 7 Porosity response of different antenna lengths in double-boundary formation

条件下不同目标地层厚度的影响,保持围岩厚度 0.30 m 不变,分别模拟目的层厚度 $H_1=0.20$ m、 $H_2=0.40$ m 和 $H_3=0.60$ m 时的界面响应特征,视 T_2 分布结果如图 8 所示,视孔隙度结果如图 9 所示。

模拟结果显示,相同围岩条件下,目标地层对 T_2 分布响应和孔隙度计算结果均有较大影响. 由于上围岩厚度相同,仪器探测到三种层厚地层时的位置也相同,均为 0.40 m.

$H_1=0.20$ m 时,虽然使用了纵向分辨能力较高的天线长度 L_3 ,但仍未能获得目地层真实信息. 仪器于测量深度 1.34 m 处探测到地层最大孔隙度响应值为 16.56%,与目的层模型真实孔隙度相差较大. 整个测量深度中部,视 T_2 分布幅度(图 8a)和孔隙度(图 9)均有明显异常降低,视 T_2 分布左侧短弛豫位置向右明显移动(图 8a 纵实线中部),其特征类似此处存在 0.34 m(测量深度峰值距离)薄夹层. 这种假象为围岩影响所致,通常在井斜角大、目的层厚薄且目的层孔隙度小于围岩孔隙度时出现,在实际资料解释时应特别注意. 这种情况的出现需要满足如下关系:

$$H < |L - 2r \tan A| \cos A, \quad (5)$$

$H_2=0.40$ m 和 $H_3=0.60$ m 时,地层响应特征有所

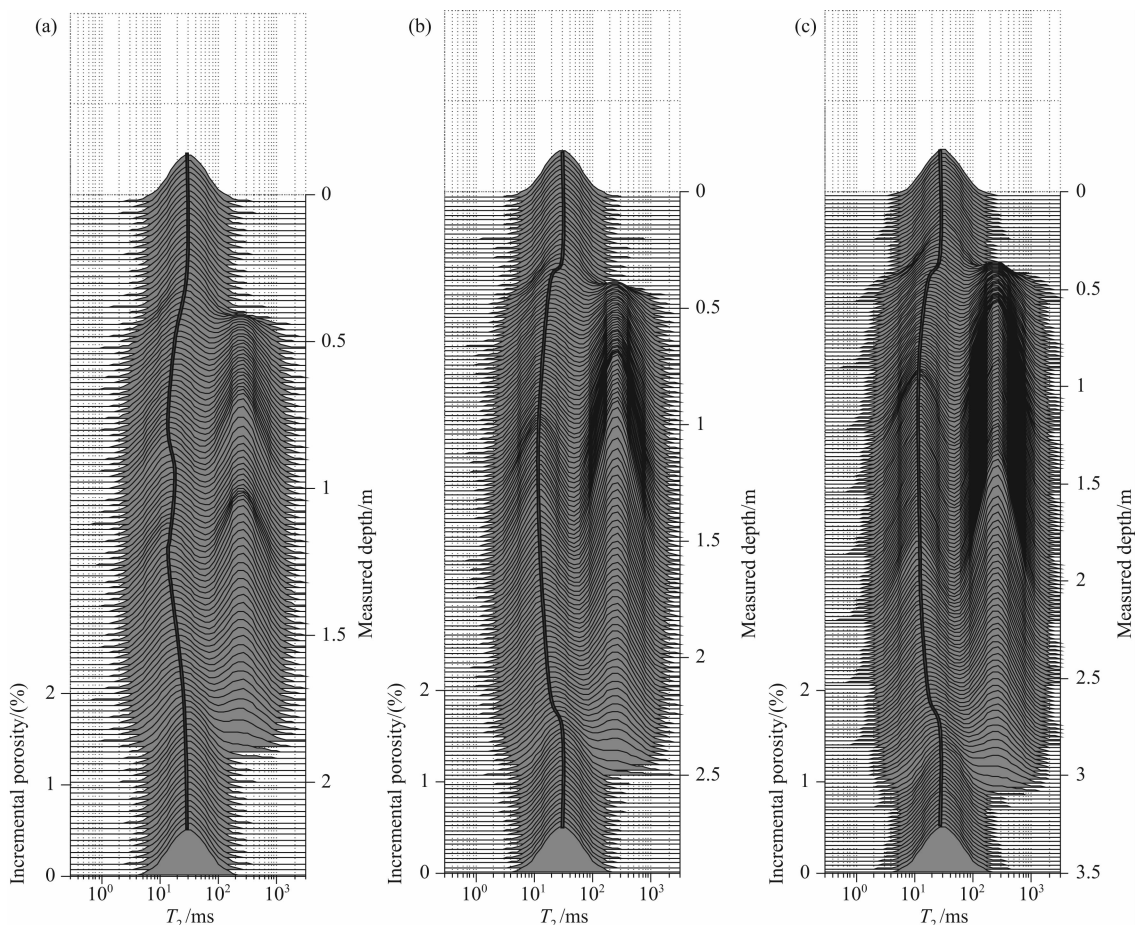


图 8 双界面不同目的层厚度的地层界面 T_2 分布响应

(a)0.2 m;(b)0.4 m;(c)0.6 m.

Fig. 8 T_2 distribution response of different target formation thicknesses in double-boundary formation

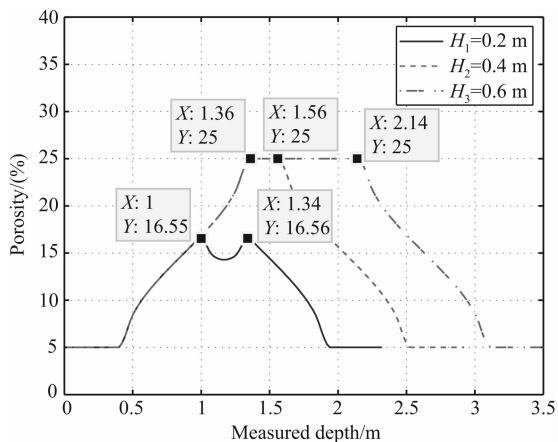


图 9 双界面不同目的层厚度的地层界面孔隙度响应

Fig. 9 Porosity response of different target formation thicknesses in double-boundary formation

改善,视 T_2 分布和孔隙度响应过渡段平缓,测量深度中部未出现低值现象. $H_2=0.40$ m 时部分层段(0.2 m 测量深度)曲线反映了目的层真实 T_2 分布与孔隙度值, $H_2=0.60$ m 较长范围(0.78 m)内得

到目的层真实信息响应.

4 结论与建议

随钻 NMR 测井轨迹的复杂性决定其地层和界面的响应特征与垂直井中明显不同,其响应特征是仪器特性和地层组合因素综合作用的结果,各因素之间又相互影响,较难直接给出统一显式表达式. 本文提出的基于敏感区剖分的方法,适用于求取任意井斜角度、不同仪器探测模型和地层组合条件的界面响应特性. 利用该数值模拟方法,针对仪器参数与地层组合的特例,重点研究分析了不同仪器运动方向、探测深度、天线长度和目标地层厚度条件下的地层响应特征,验证了方法的正确性的同时取得如下几点认识:

(1)随钻 NMR 测井轨迹影响地层界面响应特征. 非垂直井段地层界面在视 T_2 分布上的过渡段明显加长. 垂直井段中可根据围岩与目的层视 T_2

谱过渡的位置确定界面深度,斜井段中则需根据天线长度、探测深度和井斜角度综合确定。地层界面过渡段的孔隙度曲线在直井段为规则的过渡折线,而在斜井段中为较光滑的过渡曲线;

(2)斜井段中,仪器最高纵向分辨率不再等于天线长度,给出了仪器能分辨的最小地层真垂直厚度定量关系。随钻 NMR 测井测速低,可在保证信噪比的前提下适当缩短天线长度以提高薄层探测能力;

(3)大斜度井段,薄层的视 T_2 分布和视孔隙度响应出现明显异常薄夹层假象,该段视 T_2 分布幅度和孔隙度均有明显异常,为特定条件下围岩作用所致(式(5)),实际资料解释中应特别注意;

(4)发展随钻 NMR 测井的井斜校正和联合反演方法,利用斜井的资料还原目的地层的真实信息是下一步工作的方向。

参考文献 (References)

- [1] Han S Y, Kok J C L, Tollefsen E M, et al. Shale gas reservoir characterization using LWD in real time. Canadian Unconventional Resources & International Petroleum Conference held in Calgary, Alberta, 19-24 October, 2010 (CSUG/SPE 137607).
- [2] Prammer M G, Akkurt R, Cherry R, et al. A new direction in wireline and LWD NMR. SPWLA 43rd Annual Logging Symposium held in Oiso, Japan, 2-5 June, 2002 (SPWLA 2002_DDD).
- [3] Horkowitz J, Crary S, Ganesan K, et al. Applications of a new magnetic resonance logging-while-drilling tool in a Gulf of Mexico deepwater development project. SPWLA 43rd Annual Logging Symposium held in Oiso, Japan, 2-5 June, 2002 (SPWLA 2002_EEE).
- [4] Borghi M, Porrera F, Lyne A, et al. Magnetic resonance while drilling streamlines reservoir evaluation. SPWLA 46th Annual Logging Symposium held in New Orleans, Louisiana, 26-29 June, 2005 (SPWLA 2005_HHH).
- [5] Akkurt R, Seifert D, Al-Harbi A, et al. Real-time detection of tar in carbonates using LWD triple combo, NMR and formation tester in highly-deviated wells. SPWLA 49th Annual Logging Symposium held in Edinburgh, Scotland, 25-28 May, 2008 (SPWLA 2008_XXX).
- [6] Fletcher J, Eaton G, Greig R. The use of LWD magnetic resonance and image logs for reservoir characterisation and geosteering in deepwater west of Shetland. SPWLA 49th Annual Logging Symposium held in Edinburgh, Scotland, 25-28 May, 2008 (SPWLA 2008_Z).
- [7] Thorson A K, Eiane T, Thern H, et al. Magnetic resonance in chalk horizontal well logged with LWD. SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Denver, Colorado, 21-24 September, 2008 (SPE 115699).
- [8] Turco K, Brenneke J, Jebutu S, et al. Permeability and saturation evaluation in a deepwater turbidite utilizing logging-while-drilling low-gradient magnetic resonance. SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Anaheim, California, 11-14 November, 2007 (SPE 109646).
- [9] Akkurt R. Effects of motion in pulsed NMR logging [Ph. D. thesis]. Colorado: Colorado School of Mines, 1990.
- [10] Edwards C M. Effects of tool design and logging speed on T_2 NMR log data. SPWLA 38th Annual Logging Symposium held in Houston, Texas, 15-18 June, 1997 (SPWLA 1997_RR).
- [11] 刘双惠, 肖立志, 胡法龙等. 核磁共振测井地层界面响应特征研究. 地球物理学报, 2008; 51(4): 1262-1269.
Liu S H, Xiao L Z, Hu F L, et al. Studies on NMR logging responses at formation boundary. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(4): 1262-1269.
- [12] 楚泽涵, 高杰, 黄隆基等. 地球物理测井方法与原理(下册). 北京: 石油工业出版社, 2008: 238-240.
Chu Z H, Gao J, Huang L J, et al. *Geophysical Well Logging Method and Principle* (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 238-240.
- [13] 肖立志, 谢然红, 廖广志. 中国复杂油气藏核磁共振测井理论与方法. 北京: 科学出版社, 2012.
Xiao L Z, Xie R H, Liao G Z. *Theory and Method of NMR Logging in China's Complex Reservoirs* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2012.
- [14] 刘修善. 井眼轨道几何学. 北京: 石油工业出版社, 2006: 68-69.
Liu X S. *Geometry of Wellbore Trajectory* (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press, 2006: 68-69.
- [15] Passey Q R, Yin H, Rendeiro C M, et al. Overview of high-angle and horizontal well formation evaluation: issues, learnings, and future directions. SPWLA 46th Annual Logging Symposium held in Orleans, Louisiana, 26-29 June, 2005 (SPWLA 2005_A).
- [16] 李新, 肖立志, 胡海涛. 随钻核磁共振测井仪探测特性研究. 波谱学杂志, 2011, 28(1): 84-92.
Li X, Xiao L Z, Hu H T. Characteristics of NMR logging while drilling tools. *Chinese Journal of Magnetic Resonance* (in Chinese), 2011, 28(1): 84-92.
- [17] Carr H Y, Purcell E M. Effects of diffusion on free precession in nuclear magnetic resonance experiments. *Physical Review*, 1954, 94(3): 630-638.
- [18] Meiboom S, Gill D. Modified spin-echo method for measuring nuclear relaxation times. *The Review of Scientific Instruments*, 1958, 29(8): 688-691.
- [19] Butler J P, Reeds J A, Dawson S V. Estimating solutions of first kind integral equations with nonnegative constraints and optimal smoothing. *Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM) Journal on Numerical Analysis*, 1981, 18(3): 381-397.
- [20] 李新, 肖立志, 刘化冰. 随钻核磁共振测井的特殊问题与应用实例. 测井技术, 2011, 35(3): 200-205.
Li X, Xiao L Z, Liu H B. Key issues and application cases of NMR logging while drilling. *Well Logging Technology* (in Chinese), 2011, 35(3): 200-205.