

随钻中子孔隙度测井响应特性数值模拟

袁超¹, 李潮流¹, 周灿灿¹, 张锋²

1. 中国石油勘探开发研究院测井与遥感技术研究所, 北京 100083
2. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266555

摘要: 随钻中子孔隙度测井在随钻地层评价中发挥重要作用, 对其响应特性研究具有重要意义. 利用蒙特卡罗方法建立随钻条件下地层模型, 模拟研究随钻中子孔隙度测井响应特性. 模拟结果表明: 随钻和电缆测井相同条件下中子孔隙度响应变化趋势相同, 随钻中子孔隙度曲线反映孔隙度灵敏程度高于电缆测井, 但其测井响应受钻铤影响较大; 探测深度与地层孔隙度有关, 文中条件下探测深度和纵向分辨率分别为 28 cm 和 19 cm; 在水平井和大斜度井中, 测量方位对中子孔隙度曲线影响较大; 相对倾角 α 越小, 中子孔隙度曲线过渡区域中点越接近地层界面; α 小于 60° 时, 中子孔隙度曲线受围岩影响可忽略.

关键词: 随钻测井; 中子孔隙度; 响应特性; 数值模拟.

中图分类号: TE132 **文章编号:** 1000-2383(2014)12-1896-07 **收稿日期:** 2014-03-04

Numerical Simulation of Response Characteristic of Neutron Porosity Logging While Drilling

Yuan Chao¹, Li Chaoliu¹, Zhou Cancan¹, Zhang Feng²

1. Research Department of Well-Logging and Remote Sensing Technology, RIPED, PetroChina, Beijing 100083, China
2. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

Abstract: Neutron porosity logging while drilling (LWD) plays an important role in formation evaluation under LWD environment, so it has a great significance to study the logging response characteristic. Monte Carlo method is employed to build formation modeling under LWD conditions, and the response characteristic is simulated. The results reveal that the changing trend of porosity response of neutron logging while drilling is similar to that of wireline under the same conditions, the sensitivity of porosity curve in LWD to porosity is higher than wireline, but the neutron porosity logging response of LWD is affected severely by the drilling collar. The depth of investigation is related to formation porosity, and the depth of investigation and vertical resolution under the conditions in this paper is 28 cm and 19 cm, respectively. In high angle and horizontal wells, the effect of measurement azimuth on neutron porosity curve is slight. When the relative dip α is low, the midpoint of transition area of neutron porosity curve is close to the boundary surface. If α is less than 60° , the effect of the adjacent formation on porosity curve can be ignored.

Key words: logging while drilling; neutron porosity; response characteristic; numerical simulation.

近年来,大斜度井和水平井不断增加,随钻测井技术发展迅速(秦旭英等,2003;邹德江等,2005;张辛耘等,2006),中子孔隙度测井是随钻过程中的必测项目,在地层评价中发挥至关重要的作用(洪有密,2007).Tittman *et al.*(1966)在 19 世纪 60 年代提出利用基于贴井壁测量的超热中子测井仪确定地层孔隙度;由于利用单个探测器记录超热中子确定地层孔隙度受井眼条件影响很大,Davis *et al.*(1981)利用 2 个热中子探测器,通过不同位置处热中子计数比值获取地层孔隙度;Wraight *et al.*(1989)利用斯伦贝谢的 CDN 测井仪器实现联合中子孔隙度和地层密度进行地层评价;随后,Holenka *et al.*(1995)将中子孔隙度测井应用到随钻环境中,安装在钻铤上的测井仪器在转动过程中实现中子孔

隙度的方位测量.但是,传统的中子孔隙度测井仪器都是采用化学中子源,对工作人员和环境都存在潜在危害(Reichel *et al.*, 1995),近年来国内外专家开展了脉冲中子发生器的中子孔隙度测井方法及应用的研究(Fricke *et al.*, 2008; 彭琥, 2008; 张锋等, 2010a; Anton *et al.*, 2011).随着技术的发展,脉冲中子孔隙度测井实现了随钻测量(Weller *et al.*, 2005; Roberts and Kopal, 2010),在随钻地层评价中发挥重要作用.

国内外学者曾利用蒙特卡罗方法开展对随钻中子孔隙度测井的模拟研究,Xu *et al.* (2007)研究了在层状介质中密度测井和中子孔隙度测井响应特性;Xu *et al.* (2009)研究了利用 Am-Be、Cf-252 及 D-T 三种不同中子源进行随钻中子孔隙度测井响应的差异;Mendoza *et al.* (2005)研究了泥浆滤液侵入对随钻补偿中子孔隙度测量的影响;Afonso de Andre *et al.* (2004)研究了在泥岩中随钻和电缆中子孔隙度测井值差异的原因,并用巴西 6 口井实际资料验证.国内随钻中子孔隙度测井模拟研究与国外尚有一定差距,张锋等(2010a)、张锋和袁超(2010)分别研究了利用 D-D 和 D-T 中子发生器进行补偿中子孔隙度测井响应,并与利用 Am-Be 中子源响应对比;王新光和张锋(2009)、张锋等(2010b)研究了在空气钻井和欠平衡钻井条件下中子孔隙度测井响应;于华伟等(2008)研究了水平井中岩屑对补偿中子孔隙度测井的影响,并针对 CN241 型仪器初步给出校正图版.但是在前人模拟研究中未全面考虑随钻、实际水平或大斜度地层模型、脉冲中子发生器等条件,本文将建立随钻条件下的地层模型,模拟研究利用脉冲中子源的随钻中子孔隙度测井响应及探测特性,并研究在大斜度井中不同相对倾角条件下的测井响应特性,为随钻脉冲中子孔隙度测井解释提供理论基础.

1 测井原理及计算模型

1.1 测井原理

设中子孔隙度测井中近、远探测器源距分别为 r_1 和 r_2 , 由中子在空间分布规律可得近、远探测器处热中子的通量 $\Phi_t(r_1)$ 和 $\Phi_t(r_2)$ 分别为(黄隆基, 1985):

$$\Phi_t(r_1) = \frac{L_t^2}{4\pi D_t(L_e^2 - L_t^2)} \frac{e^{-r_1/L_e} - e^{-r_1/L_t}}{r_1},$$

$$\Phi_t(r_2) = \frac{L_t^2}{4\pi D_t(L_e^2 - L_t^2)} \frac{e^{-r_2/L_e} - e^{-r_2/L_t}}{r_2}, \quad (1)$$

式中: D_1 为热中子扩散系数; L_0 和 L_1 分别为快中子和热中子的减速长度.

则近、远探测器热中子计数比值为:

$$R_t = \frac{\Phi_t(r_1)}{\Phi_t(r_2)} = \frac{r_2}{r_1} \frac{e^{-r_1/L_e} - e^{-r_1/L_t}}{e^{-r_2/L_e} - e^{-r_2/L_t}}. \quad (2)$$

一般情况下, $L_e > L_t$ (常见地层, $L_e = 2L_t$), $e^{-r/L_e} > e^{-r/L_t}$, 又因为在测井中采用正源距, 当 r 很大时, $e^{-r/L_e} \gg e^{-r/L_t}$, 因此可忽略 e^{-r/L_t} , 则:

$$R_t \approx \frac{r_2}{r_1} \frac{e^{-r_1/L_e}}{e^{-r_2/L_e}} = \frac{r_2}{r_1} e^{-(r_1-r_2)/L_e} . \quad (3)$$

从上式可看出,热中子计数比值与中子减速长度有关,而中子减速长度取决于中子所经过路径的物质;在随钻测井过程中,由于其地层模型不同,中子减速经过路径不同,与直井条件下的电缆测井响应存在很大差异.

1.2 蒙特卡罗数值模拟方法

本文蒙特卡罗数值模拟是基于通用的、模拟三维空间中连续能量的中子、光子和电子联合输运的程序 MCNP (Briesmeister, 2000). 该模拟方法建立一个概率模型或随机过程, 根据粒子已知的分布函数, 对粒子与原子核发生碰撞时的位置、能量、运动方向、反应类型、源分布等方面进行抽样. MCNP 通过模拟追踪大量粒子与原子核微观作用的平均结果, 来反映粒子在物质中的输送过程.

以一个中子射入物质后与元素原子核的随机作用过程来说明蒙特卡罗模拟的过程,如图 1 所示。中子在 1 号点发生碰撞,根据中子与物质的作用分布函数,抽取随机数确定反应类型,在本例中抽取非弹性散射反应,放出非弹性散射伽马及中子;在 2 号点与原子核发生 $(n, 2n)$ 反应,其中一个出射中子射出

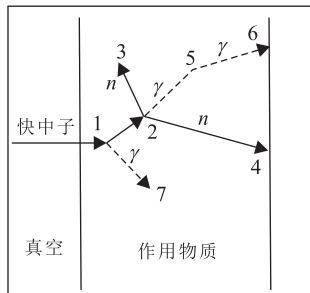


图 1 单个中子与物质的随机作用过程

Fig.1 Random action process of one neutron with materials
作用过程:1.非弹性散射;2.裂变;3.种子俘获;4.中子逃逸;5.光子
散射;6.光子逃逸;7.光子俘获

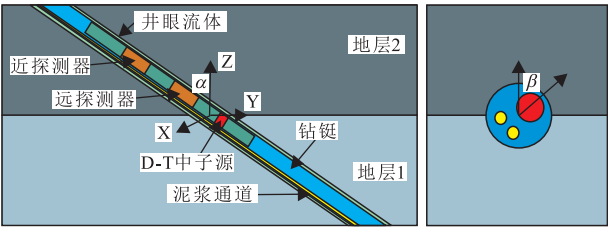


图 2 蒙特卡罗计算模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of Monte Carlo simulation model

物质,另一个中子在 3 号点被吸收,并产生一个光子在 5 号点与物质发生散射作用离开物质,单粒子作用历史结束.MCNP 通过跟踪大量粒子的作用历程,最终确定测井过程中发射中子与仪器、井眼、地层等物质元素原子核发生作用的宏观效果.

1.3 计算模型

利用蒙特卡罗方法建立三维地层模型,模拟不同条件下利用脉冲中子源发射的快中子经过地层减速到达近、远热中子探测器的计数,研究随钻中子孔隙度测井响应特性.

数值计算建模条件为:地层为层状模型,尺寸为 $150\text{ cm} \times 150\text{ cm} \times 150\text{ cm}$,地层中心在坐标原点处,地层由地层 1 和地层 2 两部分组成,地层界面在 $Z=0$ 处;井眼直径为 20 cm ,井眼内充满淡水,井眼轴线经过原点;测井仪器直径为 5.2 cm ,中子源采用 D-T 脉冲中子发生器,发射脉冲为 $40\text{ }\mu\text{s}$;近、远热中子探测器都利用长度为 10 cm 的 He-3 管,源距分别为 30 cm 和 60 cm ;测井仪器偏心置于钻铤中,钻铤直径为 17.145 cm ;钻铤上偏心开两个泥浆通道,直径都为 3.536 cm ,且泥浆通道内充满淡水;井眼与 Z 轴的夹角为相对倾角 α ,仪器相对 Z 轴转动的角度为测量方位角 β ,计算模型横截面和纵截面示意图如图 2 所示.

2 随钻与电缆测井响应差异

利用图 2 所示的计算模型,地层 1 和地层 2 都采用同样的饱和水砂岩地层,即地层为各项同性介质,改变地层孔隙度为 0% 、 5% 、 10% 、 15% 、 20% 、 25% 、 30% 、 35% 和 40% ;模拟计算随钻和电缆测井条件下近、远探测器热中子计数(模拟电缆测井条件下测井响应时计算模型中不存在钻铤),得到热中子计数比值随孔隙度变化关系如图 3 所示.

从图 3 中可以看出,随钻和电缆测井相同条件下,中子孔隙度响应变化趋势相同,热中子计数比值

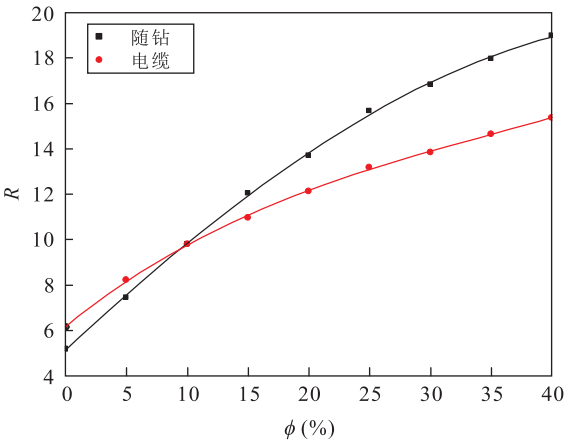


图 3 随钻与电缆测井中子孔隙度响应关系对比

Fig.3 Comparison of neutron porosity response between LWD and wireline

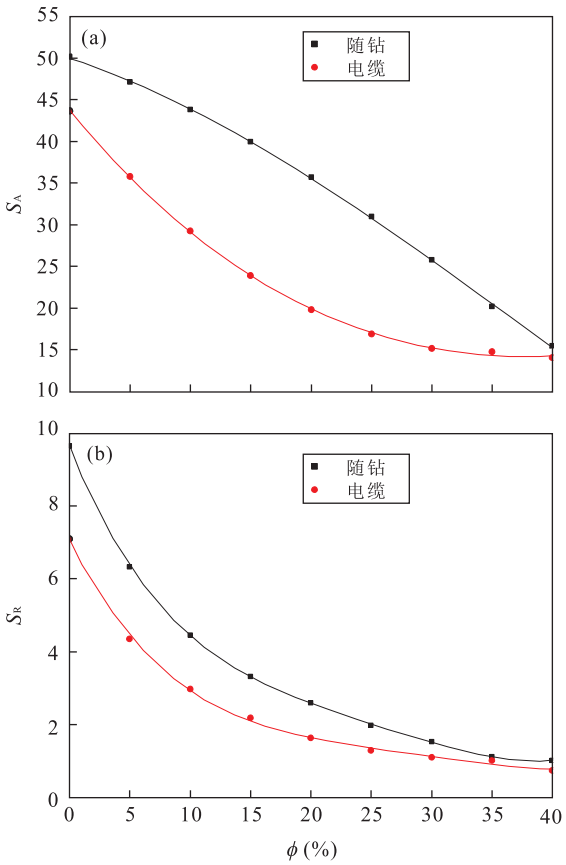


图 4 随钻和电缆测井中子孔隙度绝对灵敏度(a)和相对灵敏度(b)随孔隙度变化曲线

Fig.4 Relationship of absolute and relative sensitivity to neutron porosity in LWD and WL logging

都随孔隙度增加而增加;但地层孔隙度小于 10% 时,电缆测井计数比值大于随钻测井,地层孔隙度大于 10% 时,随钻测井计数比值大于电缆测井.

中子孔隙度绝对灵敏度反映利用热中子计数比值确定地层孔隙度的敏感程度,灵敏度越高,对孔隙度越敏感;相对灵敏度取决于仪器结构参数,相对灵敏度越大,孔隙度测量受本因素的影响越大.中子孔隙度绝对灵敏度 S_A 和相对灵敏度 S_R 分别定义为:

$$S_A = \frac{\partial R}{\partial \varphi}, S_R = \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial \varphi}.$$

(4)

式中: R 为热中子计数比值; φ 为中子孔隙度值.

根据式(4)及图 3 中的响应关系数据,可计算得出随钻测井和电缆测井中子孔隙度的绝对灵敏度和相对灵敏度随孔隙度的变化曲线,如图 4 所示.

从图 4 可以看出,随钻测井和电缆测井中子孔隙度绝对灵敏都随着孔隙度增加而减小,说明随着中子孔隙度的增加热中子计数比值反映中子孔隙度的灵敏度下降;随钻测井中子孔隙度的绝对灵敏度大于电缆测井,表明随钻测井确定孔隙度敏感程度大于电缆测井;随钻测井中子孔隙度的相对灵敏度大于电缆测井,这是由于随钻测井中存在钻铤,测井响应受其影响较大.

3 探测特性研究

3.1 探测深度

随钻中子孔隙度测井响应曲线受目的层、围岩层、相对倾角及测量方位等因素的综合影响,为反映单因素影响变化及研究简便起见,研究探测深度时相对倾角 α 取 0,即井眼与地层界面垂直.

利用同样的计算模型,地层 1 中子孔隙度为 10% 的饱含淡水砂岩的目的层,地层 2 等效中子孔隙度为 40% 的泥质围岩层,模型中泥质围岩层是由骨架、泥质和孔隙 3 部分组成,体积百分比分别为 15%、80% 和 5%,孔隙内饱含淡水,泥质组分包括高岭石、伊利石、蒙脱石、绿泥石和石英,且每种组分的体积百分比为 20%;定义仪器测量参考点为近、远热中子探测器中点处,测量参考点从 $Z=-50$ cm 移动到 50 cm,移动间隔为 3 cm;模拟钻井过程中从泥质围岩层钻向砂岩目的层的过程,在每个测量参考点处记录近、远热中子探测器计数,将模拟计算的热中子计数比值利用图 2 中的响应关系转换为视中子孔隙度,得到视中子孔隙度模拟计算值随测量参考点位置变化曲线,如图 5 所示.

从图 5 中可以看出:(1)当前 3 个与后 3 个点仪器测量点均值的差值相对变化量小于 5% 时,认为仪器全部响应于该地层,因此仪器在 $Z=-20.2$ cm

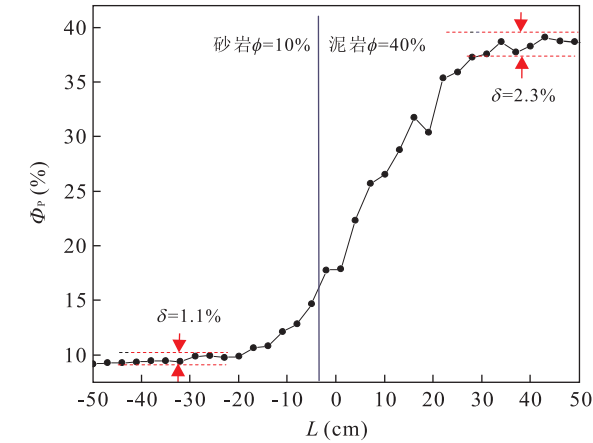


图 5 $\alpha=0$ 时视中子孔隙度模拟计算值与测量参考点关系曲线

Fig.5 Relation of simulated value of apparent porosity and reference point for measurement when $\alpha=0$

处全部响应于砂岩目的层,在 $Z=27.9$ cm 处全部响应于泥质围岩层;探测深度与地层孔隙度有关,地层孔隙度越大,探测深度越浅;(2)仪器在全部响应于砂岩目的层或泥质围岩层时,其测量中子孔隙度的浮动值分别为 1.1% 和 2.3%,这是由于在泥质围岩层对 neutron 减速能力强,到达探测器热中子计数减少,计数统计性下降;(3)根据中子孔隙度响应曲线由砂岩目的层变化到泥质围岩层的过渡区域,并扣除井眼尺寸,得出在文中条件下探测深度约为 28 cm.

3.2 纵向分辨率

利用与图 2 相似的计算模型,模型中有两个垂直于 Z 轴且沿 Z 轴方向厚度为 10 cm 的中子孔隙度为 10% 的砂岩目的层,其余地层等效中子孔隙度为 40% 的泥质围岩层;相对倾角 $\alpha=0$,移动测量参考点从 $Z=-40$ cm 到 $Z=60$ cm,移动间隔为 2 cm;固定下部砂岩目的层中心位置在 $Z=0$ 处,移动上部砂岩目的层,改变其间隔为 13、16、19、22 和 25 cm,在每个测量参考点处记录近、远热中子探测器计数,将模拟计算的热中子计数比值利用图 2 中的响应关系转换为视中子孔隙度,得到不同砂岩目的层间隔条件下视中子孔隙度模拟计算值随测量参考点位置变化的关系曲线,如图 6 所示.

仪器纵向分辨率即最小可分辨厚度,指仪器能识别出夹在两个厚地层之间夹层的最小厚度,或能在测井曲线上划分开的两个地层最小距离(黄隆基等,1996).图 6 中黑线为模拟计算的中子孔隙度曲线,红线为模型中设定的砂岩目的层模型.从图中可以看出,当两个砂岩目的层间距小于 19 cm 时,仪器

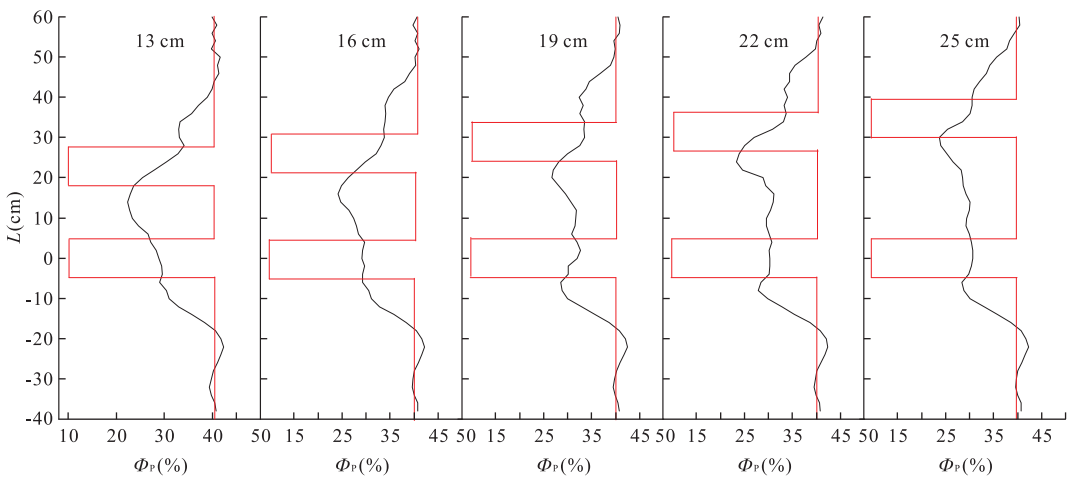


图 6 仪器穿过不同距离砂岩目的层时中子孔隙度响应曲线

Fig.6 Porosity response curve when tool travels through target sand formation with different intervals

穿过两个薄层时在模拟计算的中子孔隙度曲线仅显示为一个层,不能区分两个砂岩目的薄层;当两个砂岩目的层的间距大于 19 cm 时,模拟计算的中子孔隙度曲线可明显地显示出两个层,因此本文研究条件下随钻脉冲中子孔隙度测井的纵向分辨率为 19 cm.

4 不同地层相对倾角条件下测井响应

利用图 2 中的计算模型,地层 1 和地层 2 分别为中子孔隙度为 10% 的砂岩目的层和等效中子孔隙度为 40% 的泥质围岩层,改变相对倾角 α 为 0、10°、20°、30°、40°、50°、60°、70°、80°、85°,在不同相对倾角条件下使测井仪器由砂岩目的层穿过地层界面到泥质围岩层,在每个测量参考点上记录不同测量方位 $\beta=0^\circ、45^\circ、90^\circ、135^\circ$ 和 180° 方位上的近、远探测器热中子计数,将模拟计算的热中子计数比值利用图 2 中的响应关系转换为视中子孔隙度,得到相对倾角为 10° 和 85° 时中子孔隙度模拟计算值随测量参考点在井轴上不同位置的变化曲线,如图 7 所示,并得到测量方位 $\beta=0^\circ$ 时不同相对倾角条件下中子孔隙度模拟计算值随测量参考点在井轴上不同位置的变化曲线,如图 8 所示.

从图 7 和图 8 中可以看出,当相对倾角 α 较小时测量方位对中子孔隙度曲线影响较小,当 α 较大时不同测量方位中子孔隙度曲线差别很大; α 越小,中子孔隙度曲线从泥质围岩层向砂岩目的层的过渡区域中点越接近地层界面,如: $\alpha=0^\circ$ 时,过渡区域为 30 cm,响应曲线中点基本上能反映界面位置; $\alpha=$

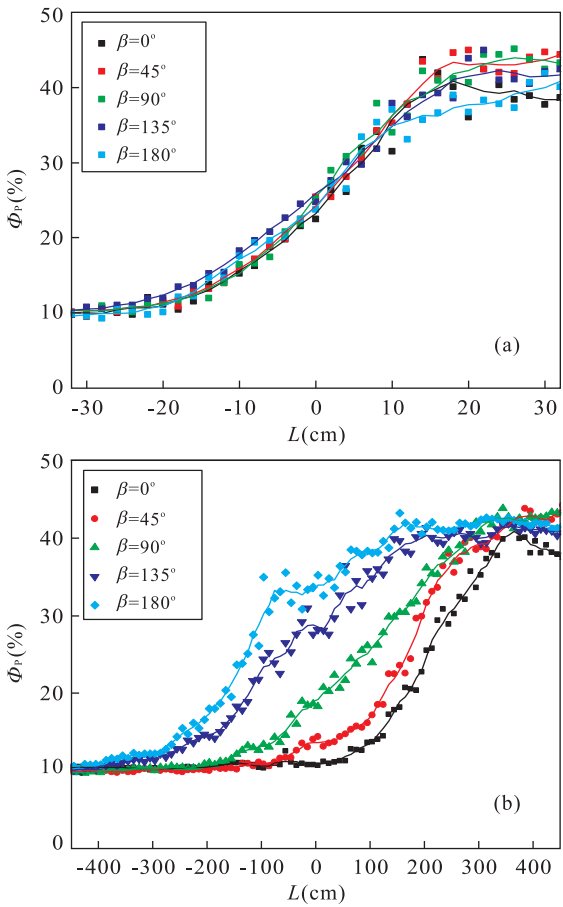


图 7 相对倾角为 10°(a)和 85°(b)时仪器穿过地层界面不同测量方位中子孔隙度响应曲线

Fig.7 Porosity response curve of different measurement azimuth when tool travels through boundary surface with relative angle of 10° and 85°

85° 时,过渡区域为 370 cm,响应曲线中点偏离地层界面 170 cm;相对倾角 α 大于 60° 时,对中子孔隙度

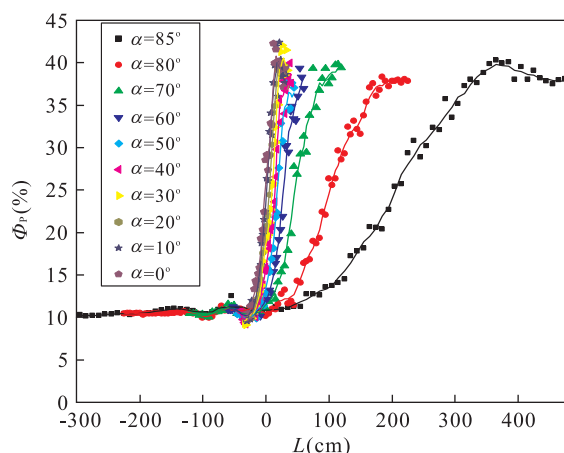


图 8 不同相对倾角条件下仪器穿过地层界面时中子孔隙度响应曲线

Fig.8 Porosity response curve when tool travels through boundary surfaces with different relative dips

响应曲线影响很大; α 小于 60° 时可以忽略影响。

5 结论与讨论

(1)随钻和电缆测井相同条件下中子孔隙度响应变化趋势相同,但随钻中子孔隙度测井响应受钻铤影响较大;通过中子孔隙度灵敏研究表明,随钻中子孔隙度测井曲线反映孔隙度灵敏程度高于电缆测井,这主要是由于随钻过程中存在钻铤,使中子源发生出的中子经过钻铤后能量降低的缘故。

(2)随钻中子孔隙度测井探测深度与孔隙度有关,孔隙度越大,地层含氢指数越大,中子穿过地层的距离越小,探测深度越浅;文中条件下,探测器深度为 28 cm,纵向分辨率为 19 cm。

(3)在大斜度井和水平井中,测量方位对中子孔隙度曲线影响较大;相对倾角 α 越小,中子孔隙度曲线过渡区域中点越接近地层界面; α 大于 60° 时,中子孔隙度测井曲线受围岩影响较大; α 小于 60° 时影响可忽略。

(4)随钻中子孔隙度测井环境比较复杂,钻铤和钻井速度会影响计数统计性,钻铤对热中子的减速及吸收作用会使探测器计数大大降低,钻井速度会影响探测器计数的累加;而且中子孔隙度测井响应还受井眼和地层环境的影响,后续研究中注重钻铤、钻井速度及井眼和地层环境等因素的影响。

References

Afonso de Andre, C., Mainieri Vieira da Cunha, A., Boonen, P., et al., 2004. A Comparison of Logging-While-Drilling

and Wireline Nuclear Porosity Logs in Shales from Wells in Brazil. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, Netherlands.

Anton, N., Roberts, L. P., Inanc, F., et al., 2011. Neutron Porosity Measurements Using a Pulsed Neutron Generator and Li-6 Glass Neutron Detectors. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, Colorado.

Briesmeister, J. F., 2000. MCNPTM-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, Los Alamos.

Davis, R. R., Hall, J. E., Boutemy, Y. L., et al., 1981. A Dual Porosity CNL Logging System. Society of Petroleum Engineers, San Antonio, Texas.

Fricke, S., Madio, D. P., Adolph, B., et al., 2008. Thermal Neutron Porosity Using Pulsed Neutron Measurements. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, Edinburgh, Scotland.

Holenka, J., David, B., Evans, M., et al., 1995. Azimuthal Porosity While Drilling. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, Paris, France.

Hong, Y. M., 2007. Logging Principles and Comprehensive Interpretation. China University of Petroleum Press, Dongying, 249 (in Chinese).

Huang, L. J., 1985. Theory of Radioactive Well Logging. Petroleum Industry Press, Beijing, 150—151 (in Chinese).

Huang, L. J., Hu, Q. D., Yang, R. L., et al., 1996. Thin Bed Response of NGS Logs. *Well Logging Technology*, 20(5): 313—319 (in Chinese with English abstract).

Mendoza, A., Preeg, W. E., Torres-Verdin, C., et al., 2005. Monte Carlo Modeling of Nuclear Measurements in Vertical and Horizontal Wells in the Presence of Mud-Filtrate Invasion and Salt Mixing. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, New Orleans, Louisiana.

Peng, H., 2009. Review on Progress of Radioactive Well Logging Technology in 2000—2008. *Well Logging Technology*, 33(1): 1—8 (in Chinese with English abstract).

Qin, X. Y., Xiao, L. Z., Suo, B. F., 2003. The Developments of Logging-While-Drilling and Its Application. *Progress in Exploration Geophysics*, 26(4): 313—322 (in Chinese with English abstract).

Reichel, N., Evans, M., Allioli, F., et al., 1995. Neutron-Gamma Density (NGD): Principles, Field Test Results and Log Quality Control of a Radioisotope-Free Bulk Density Measurement. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, Colombia.

Roberts, L. P., Kopal, M. M., 2010. Formation Absorption Effects on LWD Pulsed Thermal-Neutron Porosity Measurements. Society of Petrophysicists and Well-Log

- Analysts, Perth, Australia.
- Tittman, J., Sherman, H., Nagel, W. A., 1966. The Sidewall Epithermal Neutron Porosity Log. *Journal of Petroleum Technology*, 18(10): 1351—1362. doi: 10.2118/1180—PA
- Wang, X. G., Zhang, F., 2009. Effect of Drilling Fluid Density on Neutron Porosity in Underbalanced Drilling. *Well Logging Technology*, 33(3): 293—298 (in Chinese with English abstract).
- Weller, G., Galvin, S. D., El-Halawani, T., 2005. A New Integrated LWD Platform Delivers Improved Drilling Efficiency, Well Placement, and Formation Evaluation Services. Society of Petroleum Engineers, Aberdeen, United Kingdom.
- Wraight, P. D., Evans, M., Marienbach, E., et al., 1989. Combination Formation Density and Neutron Porosity Measurements While Drilling. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, Denver, Colorado.
- Xu, L. B., Gardner, R. P., Yin, H. Z., 2007. Responses of Nuclear Tools in Layered Media. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, Austin, Texas.
- Xu, L. B., Huiszoon, C., Schultz, W., 2009. A Comprehensive Investigation of Source Effects on Neutron Porosity Response for Logging-While-Drilling Measurements. *Petrophysics*, 51(3): 185—198.
- Yu, H. W., Sun, J. M., Yang, J. Z., et al., 2008. The Effect of Cuttings Bed on Compensated Neutron Log in the Horizontal Wells. *Well Logging Technology*, 32(4): 300—303 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, F., Guo, J. F., Wang, X. G., 2010a. Monte Carlo Simulation of Neutron Porosity Response under the Condition of Air Drilling. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 40(1): 209—214 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, F., Jin, X. Y., Hou, S., 2010b. Monte Carlo Simulation on Compensated Neutron Porosity Logging in LWD with D-T Pulsed Neutron Generator. *Journal of Isotopes*, 23(1): 15—21 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, F., Yuan, C., 2010. Monte Carlo Simulation on Compensated Neutron Porosity Logging with D-D Neutron Generator. *Well Logging Technology*, 34(3): 227—232 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. Y., Wang, J. N., Guo, Y. J., 2006. Advances and Trends in Logging While Drilling Technology. *Well Logging Technology*, 30(1): 10—15 (in Chinese with English abstract).
- Zou, D. J., Fan, Y. R., Deng, S. G., 2005. The Latest Development of Logging While Drilling Technology. *Petroleum Instruments*, 19(5): 1—4 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 洪有密, 2007. 测井原理与综合解释. 东营: 中国石油大学出版社, 249.
- 黄隆基, 1985. 放射性测井原理. 北京: 石油工业出版社, 150—151.
- 黄隆基, 胡庆东, 杨荣利, 等, 1996. 自然伽马能谱测井薄层研究. 测井技术, 20(5): 313—319.
- 彭琥, 2009. 2000—2008 年放射性测井技术进展评述. 测井技术, 33(1): 1—8.
- 秦绪英, 肖立志, 索佰峰, 2003. 随钻测井技术最新进展及其应用. 勘探地球物理进展, 26(4): 313—322.
- 王新光, 张锋, 2009. 欠平衡钻井条件下钻井液的密度对中子孔隙度测井的影响. 测井技术, 33(3): 293—298.
- 于华伟, 孙建孟, 杨锦舟, 等, 2008. 水平井内岩屑层对补偿中子测井的影响. 测井技术, 32(4): 300—303.
- 张锋, 郭建芳, 王新光, 2010a. 空气钻井条件下中子孔隙度测井响应的蒙特卡罗模拟. 吉林大学学报(地球科学版), 40(1): 209—214.
- 张锋, 靳秀云, 侯爽, 2010b. D-T 脉冲中子发生器随钻中子孔隙度测井的蒙特卡罗模拟. 同位素, 23(1): 15—21.
- 张锋, 袁超, 2010. 利用 D-D 中子发生器进行补偿中子孔隙度测井的模拟研究. 测井技术, 34(3): 227—232.
- 张辛耘, 王敬农, 郭彦军, 2006. 随钻测井技术进展和发展趋势. 测井技术, 30(1): 10—15.
- 邹德江, 范宜仁, 邓少贵, 2005. 随钻测井技术最新进展. 石油仪器, 19(5): 1—4.