

文章编号:1673-5005(2014)03-0045-005

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2014.03.007

# 随钻 D-T 中子孔隙度测井低灵敏度和岩性影响校正方法研究

于华伟<sup>1</sup>, 杨锦州<sup>2,3</sup>, 张 锋<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 2. 胜利油田钻井工艺研究院, 山东东营 257000;  
3. 中石化随钻测控重点实验室, 山东东营 257000)

**摘要:** 为了提高随钻氘-氚(D-T)中子孔隙度测井的测量精度,通过研究其在多种岩性、孔隙度地层中的响应,对比与化学源的响应差异,分析所测孔隙度灵敏度及精度偏低的原因,并提出对应的校正方法。结果表明:由于D-T源能量较化学源高,地层密度对含氢指数测量影响增强,使得随钻D-T中子孔隙度测井地层孔隙度灵敏度偏低,且受到泥页岩效应的影响较大;密度校正后,地层孔隙度灵敏度显著提高,且受到岩性的影响降低,尤其是泥页岩效应几乎被完全消除。因此,通过对随钻D-T中子孔隙度测井结果的校正,测量灵敏度和精度都得到大幅提高,可以较好地替代化学源测量地层中子孔隙度。

**关键词:** 随钻中子孔隙度测井; 氘-氚中子发生器; 孔隙灵敏度; 泥页岩效应; 密度校正; 蒙特卡罗模拟

**中图分类号:** P 631.817 **文献标志码:** A

## Correction method of low sensitivity and lithology effect of D-T neutron porosity logging-while-drilling

YU Hua-wei<sup>1</sup>, YANG Jin-zhou<sup>2,3</sup>, ZHANG Feng<sup>1</sup>

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;  
2. Drilling Technology Research Institute, Shengli Oilfield Company, Dongying 257000, China;  
3. CPCC Key Laboratory of Measuring and Controlling While Drilling, China Petroleum Chemical Corporation, Dongying 257000, China)

**Abstract:** In order to improve the measurement accuracy of Deuterium-Tritium (D-T) neutron porosity logging-while-drilling, different responses in several types of formations were measured using the Deuterium-Tritium (D-T) accelerator and the Am-Be source, and the differences in the measured responses were compared. In addition, the causes of the lower porosity sensitivity and accuracy were analyzed, and a correction method was proposed. The results show that the energy of neutron emitted by D-T neutron generator is higher than that by the chemical source, and the influence of formation density on hydrogen index is higher than the chemical source. So the porosity sensitivity of the D-T neutron logging-while-drilling is much lower than the chemical neutron source, and the effect of shale on the measurement is high. On the other hand, after applying density correction, the porosity sensitivity is significantly improved, and the lithology effects are reduced as well especially in the shale formation. It is concluded that the chemical sources can be replaced by more accurate and sensitive density-corrected D-T neutron porosity logging-while-drilling technique.

**Key words:** neutron porosity logging-while-drilling; Deuterium-Tritium neutron generator; porosity sensitivity; shale effect; density correction; Monte Carlo simulation

中子孔隙度测井是石油勘探过程中使用的最常规的测井方法之一,用来确定地层的孔隙度、计算地

层的产油能力以及识别气层等。中子孔隙度测井仪器最初使用 Am-Be 化学中子源,但这对工作人员和

收稿日期:2013-10-15

基金项目:国家自然科学基金(41304095);中央高校基本科研业务费专项(11CX04003A);中国石油大学教学改革项目(SY-A201204);山东省自然科学基金(ZR2012DM002);中国石油科技创新基金(2012D50060302)

作者简介:于华伟(1981-),男,高级实验师,博士,主要研究方向为核测井蒙特卡罗模拟、测井解释及实验方法。E-mail:yhwlog@163.com。

周围环境都存在着潜在的危害<sup>[1]</sup>。2005年 Schlumberger 公司开始在随钻过程利用氘-氚(D-T)中子发生器进行补偿热中子孔隙度测井,虽然可以消除化学源的危害,但仪器在高孔隙度地层中响应动态范围较 Am-Be 化学源小<sup>[2]</sup>。Ellis 等<sup>[3]</sup>(2007)研究了高能 D-T 源对随钻中子孔隙度测量的影响,认为虽然使用 D-T 源受环境影响较小,但其对地层的孔隙度灵敏度稍低,且泥页岩效应比化学源大。于华伟(2009)<sup>[4]</sup>、张锋(2010)<sup>[5]</sup>研究认为 D-T 孔隙度灵敏度较低,不易于识别高孔隙度地层。Xu 等<sup>[6]</sup>(2009)认为 D-T 随钻测量中子孔隙度灵敏度偏低问题是受到了地层密度的影响,尤其是在泥页岩地层测量精度会下降。目前,国内学者也正在积极研制使用中子发生器的随钻中子孔隙度测井仪器,但若完全替代测井仪器中的 Am-Be 化学源,则需要对其影响因素进行分析,从而提高地层孔隙度灵敏度和测量精度。笔者针对使用 D-T 中子发生器的随钻中子孔隙度测井,采用蒙特卡罗数值模拟方法研究其在不同孔隙度的砂岩、灰岩、白云岩及多种类型泥页岩地层中的响应;通过分析地层密度对高能中子输运以及随钻 D-T 中子孔隙度测量的影响,提出中子孔隙度的密度校正方法。

## 1 中子源及中子孔隙度测井

传统的补偿中子孔隙度测井使用 Am-Be 中子源和两个<sup>3</sup>He 管热中子探测器(分别为近探测器和远探测器)测量经过地层慢化并散射回井眼的热中子;由于氢是最强的中子减速剂,因此用近、远探测器计数率的比值测定地层含氢指数。由于氢通常含于地层孔隙内的流体中,所以含氢量与地层孔隙度有关,由此可测量地层孔隙度<sup>[7]</sup>。

目前常用于替代 Am-Be 化学源进行孔隙度测量的可控源为 D-T 中子发生器,它们的主要特征参数见表 1。由于 D-T 源所释放的为单能的 14 MeV 快中子,中子能量比 Am-Be 源更高,进入地层的减速长度大,热中子在地层中的分布范围更宽;另外 D-T 发生器的中子产额比 Am-Be 源高一个数量级,可以有效提高随钻中子孔隙度测井的热中子计数率和统计精度。

表 1 D-T 和 Am-Be 中子源特征

Table 1 Properties of D-T and Am-Be neutron sources

中子源类型	平均能量/MeV	中子产额/( $10^7 \text{ s}^{-1}$ )	半衰期/a	工作寿命
Am-Be	4.5	2	433.0	15 a
D-T	14.0	30	12.3	1000 h

## 2 计算模型

本文中使用的在核探测领域广泛使用的蒙特卡罗模拟程序(MCNP),构建了仪器、井眼和地层的三维模型<sup>[8]</sup>。随钻 D-T 中子孔隙度测井仪器主要包括一个中子发生器、两个<sup>3</sup>He 中子计数管以及相应的电路和机械部件。近、远两个探测器的源距分别为 26、64 cm,中子发生器与近探测器之间及近、远探测器之间都放置屏蔽体。近、远探测器选用两个大小和内部气压都不相同的<sup>3</sup>He 中子计数管,其气压分别为  $4.04 \times 10^5$  和  $10.10 \times 10^5$  Pa。井眼直径为 21.59 cm,仪器直径为 17.145 cm、居中放置,井眼和地层孔隙中都充填淡水。图 1 为 MCNP 构建的数值计算模型,仪器各部件都偏心放置于钻铤内,钻铤中间的通道为钻井液通道。

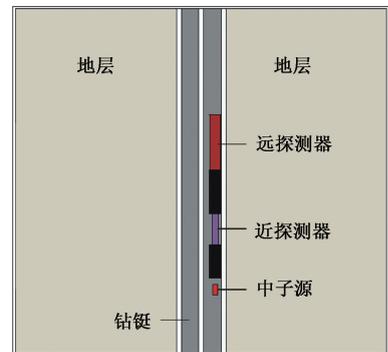


图 1 仪器的计算模型

Fig. 1 Numerical computation model of logging tool

模拟时使用 MCNP 中的通用源(SDEF),D-T 中子发生器的能量为 14 MeV 的单能快中子,Am-Be 中子源能量选用国际标准化组织 ISO-8529 推荐的能谱分布。选择使用体通量探测器分别记录两个探测器栅元的热中子通量,每次模拟时抽样  $2 \times 10^8$  个源中子,使每次模拟结果的统计误差小于 2%。

## 3 D-T 中子孔隙度响应

### 3.1 D-T 和 Am-Be 源中子孔隙度响应对比

为了对比两种源的随钻中子孔隙度测井仪器的响应差别,本文中分别研究仪器基于 D-T 发生器和 Am-Be 两种中子源在饱含淡水石灰岩(孔隙度 0%~100%)和铝土(泥页岩的一种主要成分,骨架密度  $3.8 \text{ g/cm}^3$ ,取孔隙度为 45% 饱含淡水的情况)地层中的响应。为了便于比较,将使用 Am-Be 源的响应与 D-T 源响应在孔隙度为 10% 时做归一化处理,其近远计数比值与地层孔隙度的关系如图 2 所示。本文中仅考虑使用两种源的响应特性,没有考虑探

测器的放大倍数及其他特性。

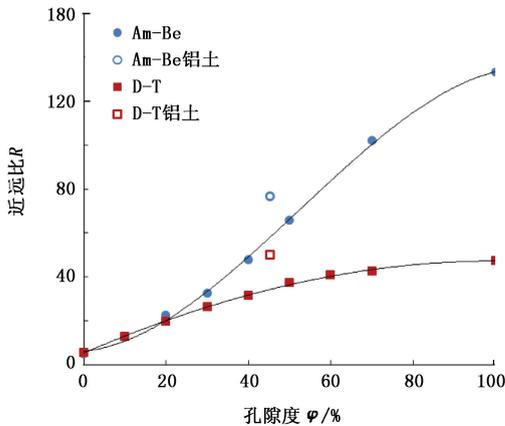


图 2 两种源中子孔隙度测井响应

Fig. 2 Responses of neutron porosity logging using two type sources

如图 2 所示,两种源对应的近远比值都随着孔隙度的增加而增加,但在高孔隙处,使用 D-T 中子发生器得到的近远比要明显低于 Am-Be 化学源,且动态变化趋势较小,即对地层孔隙度的灵敏度较小。

另外,图 2 中两种源响应曲线中代表铝土地层的数据点都偏离含水灰岩的关系曲线。将铝土地层得到的近远探测器比值转换为视石灰岩孔隙度后,得到的 Am-Be 和 D-T 源的视中子孔隙度分别为 57% 和大于 100%。由于地层实际的孔隙度为 45%,因此使用 Am-Be 源时受到的影响相对较小,而使用 D-T 源时测量得到的孔隙度结果超过了 100%,结果已经完全失真。

### 3.2 D-T 源岩性影响

使用 Am-Be 源的随钻中子孔隙度测井要受到地层岩性的影响,测量后须进行相应的岩性校正,但是在泥页岩地层的影响仍然难以消除<sup>[7]</sup>。为了详细考察使用 D-T 中发生器的随钻中子孔隙度仪器在各种地层的响应,分别选择富含淡水的砂岩、石灰岩和白云岩地层,以及富含淡水的各类泥页岩(主要成分为铝土、黑云母和伊利石、海绿石、绿泥石等黏土矿物,性质见表 2),模拟研究仪器在这些地层的孔隙度响应,近远探测器计数率比值与地层含氢指数( $I_H$ ,即地层相对于纯水的含氢浓度)之间的关系如图 3 所示。

由图 3 看出,仪器在砂岩、白云岩和石灰岩地层的响应曲线并不重合,这是由于地层岩性的差异造成的,此规律与传统的 Am-Be 源响应是一致的。但是 5 个泥页岩数据点都与这三条曲线偏离较远,且并无较好规律,特别是在地层含氢指数较大的时候。

这进一步说明泥页岩或泥质的存在对使用 D-T 发生器的随钻中子孔隙度测井影响非常大,不能忽视,必须进行适当的校正。

表 2 各种泥页岩类型

Table 2 Various types of shale

泥页岩主要矿物类型	骨架密度 $\rho_{ma}/(g \cdot cm^{-3})$	含氢指数 $I_H/\%$	体积密度 $\rho_v/(g \cdot cm^{-3})$
铝土	3.81	45.0	2.54
黑云母	3.28	11.3	3.02
伊利石	3.04	21.4	2.60
海绿石	3.22	25.8	2.65
绿泥石	3.72	33.8	2.80

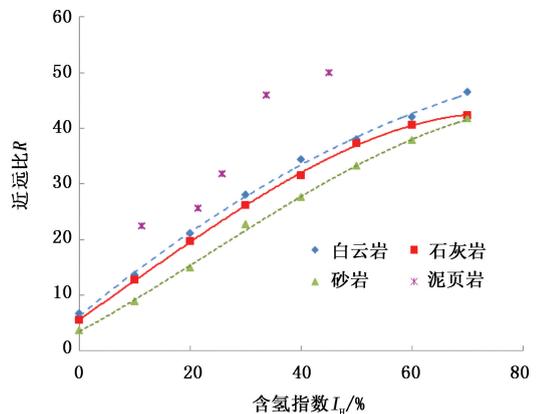


图 3 各种岩性地层的 D-T 随钻中子孔隙度测井响应

Fig. 3 Responses of D-T neutron porosity LWD in various rocks

## 4 影响因素分析及校正方法研究

### 4.1 影响因素分析

Gilchrist(2008)<sup>[9]</sup>研究认为:尽管氢在中子减速过程中起到极其重要的作用,但补偿中子孔隙度测井测量的并不仅是地层的含氢指数。Am-Be 源释放的平均能量为 4.5 MeV 的中子,以与地层原子核发生弹性散射为主,由于地层中发生弹性散射能力最强的是氢元素,因此其响应主要反映地层的含氢指数或孔隙度,受其他因素影响较小。D-T 发生器释放的 14 MeV 的高能中子,首先是发生非弹性散射使中子能量降低,然后才以弹性散射为主,而快中子的非弹性散射主要与地层的密度相关<sup>[10]</sup>,因此在不考虑地层热中子吸收影响的情况下,热中子探测器响应主要取决于地层的含氢指数和地层密度两个因素<sup>[3,6]</sup>。如要测量与地层孔隙度相关的含氢指数,则须消除密度对其影响。

### 4.2 校正方法

由于热中子探测器响应主要是地层含氢指数和密度的贡献,可以表示为

$$CR \approx e^{-\alpha I_H} f(\beta \rho_b). \quad (1)$$

式中,  $\rho_b$  为地层体积密度;  $\alpha$ 、 $\beta$  分别表示探测器对于含氢指数和密度的灵敏度指数。

中子孔隙度测量需要校正地层密度影响, 假设近、远探测器响应经密度校正之后为  $N_{CR_{cor}}$  和  $F_{CR_{cor}}$ , 则校正后的探测器响应只与地层的含氢指数相关, 几乎不再受地层密度的影响。  $N_{CR_{cor}}$  和  $F_{CR_{cor}}$  计算公式如下:

$$N_{CR_{cor}} = N_{CR} f(\beta_n \rho_b) \approx e^{-\alpha_n I_H}, \quad (2)$$

$$F_{CR_{cor}} = F_{CR} f(\beta_f \rho_b) \approx e^{-\alpha_f I_H}. \quad (3)$$

式中,  $N_{CR}$ 、 $F_{CR}$  为近、远探测器的计数率。本文中校正因子  $\alpha_n$ 、 $\beta_n$  和  $\alpha_f$ 、 $\beta_f$  用多组近远探测器的模拟数据拟合得到, 实际工程应用中利用测量数据获得。

用校正之后的近、远计数率可以得到新的近远比  $R'$ , 则  $R'$  只与地层的含氢指数相关, 而与地层密度无关:

$$R' = \frac{N_{CR_{cor}}}{F_{CR_{cor}}}. \quad (4)$$

### 4.3 校正结果

使用图3中得到的各种岩性饱和淡水地层的模拟数据, 利用公式(2)~(4)对其近、远计数率进行密度校正, 校正之后得到的近远比与地层含氢指数之间的关系如图4所示。

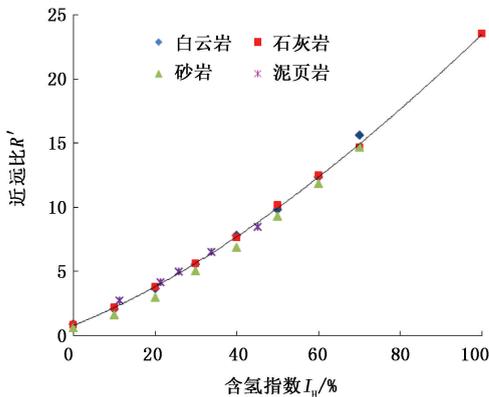


图4 密度校正之后的随钻中子孔隙度测井响应

Fig.4 Results of neutron porosity LWD after density correction

图4中, 对于砂岩、白云岩和石灰岩地层, 密度校正后近远比值与含氢指数的关系受岩性影响明显减小, 数据点基本落在同一条趋势线上, 其中白云岩和灰岩有相同的响应, 数据点重合在一起, 只是砂岩会稍有些偏离。因此, 校正之后响应结果受到岩性影响显著降低。

与图3相比, 受到D-T源影响而偏离非常大的泥页岩数据点也全部落在了趋势线上, 因此密度校

正之后的中子孔隙度的泥页岩效应也基本被消除, 可以测量比原来更加准确的含氢指数。所以, 密度校正可以基本消除D-T中子孔隙度测井的各类岩性影响, 此结果甚至优于使用化学源时的中子孔隙度测井。

另外, D-T中子孔隙度测井还存在孔隙度灵敏度低的问题。对比分别使用密度校正前、后的D-T源及Am-Be化学源时, 随钻中子孔隙度测井并对饱和淡水石灰岩地层孔隙度的灵敏度, 灵敏度计算过程见文献[11], 结果如图5所示。

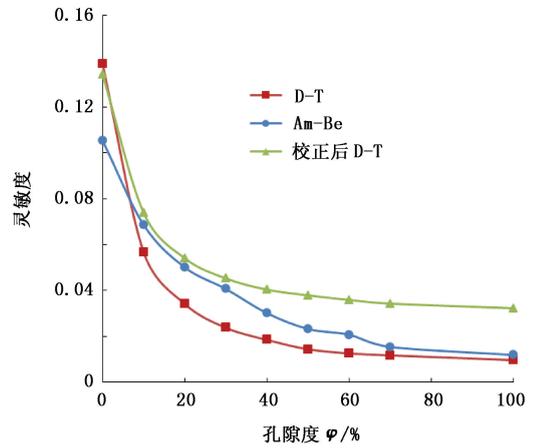


图5 密度校正前后的地层孔隙度灵敏度

Fig.5 Porosity sensitivities before and after density correction

由图5看出, 孔隙度灵敏度都是随着地层孔隙度的增加而降低, 且都在孔隙度小于20%时降低最快。经过密度校正之后的随钻D-T中子孔隙度测井的孔隙度灵敏度有了大幅提高, 尤其是在高孔隙地层, 其灵敏度甚至超过了传统Am-Be化学中子源的响应。这是由于校正之后的仪器响应基本不再受地层密度影响, 而只对地层孔隙中的氢元素灵敏, 所以密度校正方法可以有效解决对地层含氢指数灵敏度偏低的问题。

## 5 结论

(1) 随钻D-T中子孔隙度测井与使用Am-Be化学源相比, 存在地层孔隙度灵敏度偏低、泥页岩效应更大的问题, 这是由于其中子能量较大, 受到了地层密度影响较大引起的。

(2) 使用密度校正方法之后, 可以有效降低岩性变化对随钻D-T中子孔隙度测井响应的影响, 而且基本可以消除泥页岩效应, 这对随钻中子孔隙度测井在页岩油气储层的测井解释有着重要作用。

(3) 密度校正之后结果对地层孔隙度的灵敏度

大幅提高,并且要高于使用传统化学 Am-Be 源的结果。

(4)随钻 D-T 中子孔隙度测井可以达到甚至超过 Am-Be 源的测量精度。

#### 参考文献:

- [1] Committee on Radiation Source and Replacement. Radiation source use and replacement [M]. Abbreviated Version. Washington: National Academies Press, 2008.
- [2] WELLER G, GRIFFITHS R, STOLLER C, et al. A new integrated LWD platform brings next-generation formation evaluation services [C/CD]//Society of Petroleum Well Log Analysts. The SPWLA 46th Annual Logging Symposium, New Orleans, Louisiana, June 26-29, 2005.
- [3] ELLIS D V, SINGER J M. Well logging for earth scientists[M]. 2nd ed. New York: Springer-Verlag New York Inc, 2007:383-413.
- [4] 于华伟,孙建孟,杨锦舟. D-D 和 D-T 随钻中子孔隙度测井探测特性对比分析[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2009, 33(6):41-45.  
YU Hua-wei, SUN Jian-meng, YANG Jin-zhou. Comparison of D-T and D-D accelerator investigation characteristics in pulsed neutron porosity logging while drilling [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009, 33(6):41-45.
- [5] 张锋,靳秀云,侯爽. 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[J]. 同位素, 2010, 23(1): 15-21.  
ZHANG Feng, JIN Xiuyun, HOU Shuang. Monte Carlo simulation on compensated neutron porosity logging in LWD with D-T pulsed neutron generator [J]. Journal of Isotopes, 2010, 23(1):15-21.
- [6] XU L B, SCHULTZ W, HUISZON C. A comprehensive investigation of source effects on neutron porosity response for logging-while-drilling measurements [C/CD]//Society of Petroleum Well Log Analysts. The SPWLA 46th Annual Logging Symposium, Woodlands, Texas, June 21-24, 2009.
- [7] 黄隆基. 核测井原理[M]. 东营:石油大学出版社, 2000:102-119.
- [8] BRIESMEISTER J F. MCNP—a general Monte Carlo n-particle transport code [R]. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 2000.
- [9] GILCHRIST W A. Compensated neutron log responses issues—a tutorial [C/CD]//Society of Petroleum Well Log Analysts. The SPWLA 49th Annual Logging Symposium, Edinburgh, Scotland, May 25-28, 2008.
- [10] 于华伟. 随钻环境下脉冲中子测量地层密度的理论基础研究[D]. 东营:中国石油大学地球科学与技术学院, 2011.  
YU Hua-wei. The fundamental research of the pulsed-neutron density logging while drilling [D]. Dongying: School of Geosciences in China University of Petroleum, 2011.
- [11] 张建民,夏凌志,邱益香. 补偿中子石油测井仪的灵敏度研究[J]. 原子能科学技术, 2006, 40(1): 125-128.  
ZHANG Jian-min, XIA Ling-zhi, QIU Yi-xiang. Sensitivity of compensated neutron oil logging tool [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2006, 40(1): 125-128.

(编辑 修荣荣)