

文章编号: 1007-4627(2013)02-0151-05

## D-D中子发生器 n- $\gamma$ 密度测井的蒙特卡罗模拟研究

何雄英<sup>1</sup>, 徐大鹏<sup>1</sup>, 谢芹<sup>1</sup>, 卢小龙<sup>1</sup>, 郑世平<sup>2</sup>, 姚泽恩<sup>1,3</sup>, 兰长林<sup>1</sup>

(1. 兰州大学核科学与技术学院, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国石油集团测井有限公司随钻测井中心, 陕西 西安 710061;

3. 兰州大学教育部中子应用技术工程研究中心, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 根据D-D反应中子的能谱和角分布数据, 建立了中子源模型; 根据石灰岩地层标准刻度井群数据, 建立了井模型。采用MCNP程序模拟了井中中子和 $\gamma$ 射线的输运, 得到了不同地层密度和不同源距处NaI探测器中的混合 $\gamma$ 射线能谱和非弹 $\gamma$ 射线能谱。在混合 $\gamma$ 射线能谱2.5~5.0 MeV能区开窗, 研究了开窗区混合 $\gamma$ 射线相对计数随源距的变化关系, 确定源距应选择选择在30~80 cm范围, 给出了密度与混合 $\gamma$ 射线计数之间的非线性关系。研究表明, 可以利用D-D中子源的混合 $\gamma$ 射线能谱来实现n- $\gamma$ 密度测井。

**关键词:** 密度测井; D-D中子源; 蒙特卡罗模拟; 石灰岩

**中图分类号:** P631.8; TL816 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.30.02.151

### 1 引言

传统的密度测井通常使用同位素<sup>137</sup>Cs- $\gamma$ 源的反散射 $\gamma$ 射线计数与地层密度之间建立联系<sup>[1]</sup>, 这种方法的缺陷是<sup>137</sup>Cs源 $\gamma$ 射线能量低, 地层探测深度很受限, 且存在同位素源的辐射防护和辐射安全隐患等问题<sup>[2]</sup>。D-T和D-D中子管作为可控中子源, 具有安全性高、穿透深度大和易于操作等优点, 通常被用来开展中子孔隙度测井、C/O测井等研究<sup>[3-5]</sup>。另外, 中子管产生的快中子与地层相互作用后能产生能量较高的俘获或非弹 $\gamma$ 射线, 这些 $\gamma$ 射线中的一部分与地层相互作用后携带着地层密度信息穿出地层进入井眼, 被井眼中探测器记录, 也可实现密度测井。利用D-T和D-D中子管中子在地层中产生的 $\gamma$ 射线实现密度测井, 可省去同位素<sup>137</sup>Cs- $\gamma$ 源。相比较而言, D-T中子管具有中子产额和中子能量高的独特优势, 已广泛应用于石油测井<sup>[6-7]</sup>, 但其缺陷是使用寿命短, 且因使用放射性氚气, 故存在可能造成放射性污染的安全隐患; D-D中子管虽然中子产额和中子能量较

低, 但其不使用放射性物质, 更安全, 且存在D的自注入效应, 使用寿命长<sup>[8]</sup>, 如果能够通过提高束流强度发展更高产额的D-D中子管, 无疑将成为中子测井技术中最具竞争力的中子源之一。

近年来, 采用D-T中子源进行n- $\gamma$ 密度测井的研究已有报道<sup>[9-11]</sup>, 我们也对D-T中子源n- $\gamma$ 密度测井规律进行了蒙特卡罗模拟研究<sup>[12]</sup>, 有关利用D-D中子源进行n- $\gamma$ 密度测井的规律研究尚缺乏。本文将采用MCNP程序<sup>[13]</sup>模拟井中D-D中子与其产生的 $\gamma$ 射线的输运, 给出 $\gamma$ 射线在不同源距处NaI(Tl)探测器中的响应能谱, 通过对 $\gamma$ 射线能谱的分析, 研究D-D中子源n- $\gamma$ 密度测井的基本规律。

### 2 模型建立

#### 2.1 标准刻度井模型

根据中国石油集团测井有限公司标准刻度井群数据<sup>[14]</sup>, 建立了如图1所示的MCNP模拟井模型。井模型的基本数据如下: 高度315 cm, 直径220 cm, 井

收稿日期: 2012-09-08; 修改日期: 2012-10-09

基金项目: 中国石油集团公司十一五计划基础研究资助项目

作者简介: 何雄英(1987-), 女, 重庆合川人, 硕士研究生, 从事中子物理及中子应用研究; E-mail: he\_xiongying@126.com.

通信作者: 姚泽恩, E-mail: zeyao@lzu.edu.cn

<http://www.npr.ac.cn>

眼直径20 cm, 即地层厚度和高度足够大, 可近似视为无限大介质; 地层为饱含水的不同孔隙度的石灰岩, 孔隙度不同, 地层密度不同, 模拟时地层密度 $\rho$ 取值分别为2.70, 2.62, 2.48, 2.36, 2.30, 2.19, 2.07, 1.80, 1.60和1.00 g/cm<sup>3</sup>。D-D中子管和NaI(Tl) $\gamma$ 射线探测器安装在一不锈钢套管中, 钢管内径为7.9 cm, 壁厚0.5 cm, 钢管在井眼中偏心布置, 钢管外壁与井壁的最近距离为0.5 cm, 钢管外壁与井壁之间充满水。D-D中子管结构和材料按照文献[7]中MZ-30型中子管的数据进行了输入, 以中子管靶点为坐标原点, 从20 cm源距开始每隔10 cm沿钢管轴线依次布置了10个NaI $\gamma$ 射线探测器。NaI的尺寸为76 mm $\times$ 76 mm, 外壳为1 mm厚的铝。另外, 为减小来自于中子与中子管结构材料作用产生的 $\gamma$ 射线的影响, 在中子管和NaI探测器之间加有5 cm厚的铅屏蔽。

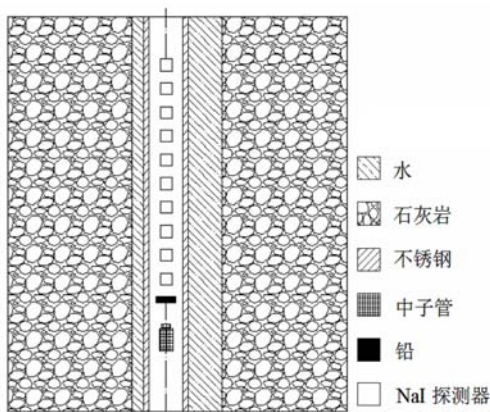


图1 MCNP模拟井模型

## 2.2 D-D中子管中子源模型

在早先的模拟研究中, 一般是将D-D中子管近似看作2.5 MeV单能各向同性的点源, 事实上D-D中子管中子源有其特定的中子能谱和角分布, 且不是严格的点源, 而是近似成面源。为了对中子源进行更为精确的描述, 并考虑用于测井的D-D中子管D束能量在100~150 keV范围, 使用文献[15]中得到的150 keV氘束流能量下氘钛厚靶D-D反应中子的能谱和角分布, 角分布可由方程(1)转换成角产额数据, 即

$$\frac{dY}{d\theta}(\theta) = 2\pi \sin\theta \frac{dY}{d\Omega}(\theta), \quad (1)$$

式中:  $dY/d\theta$ 为中子角产额;  $\theta$ 为中子出射角;  $dY/d\Omega$ 为中子角分布。模拟时, 将文献[15]中的能谱和转换的角产额数据输入到MCNP程序中, 分别控

制中子能量和出射角的抽样。另外, 根据中子管靶上的D束斑的大小, 将D-D中子源设置成 $\phi 20$  mm的面源。

## 3 结果及讨论

MCNP模拟时, 将NaI探测器的能量分辨设置为8.4% (对应于<sup>137</sup>Cs的0.662 MeV能量 $\gamma$ 射线)。通过模拟记录了不同源距处NaI(Tl)探测器中混合 $\gamma$ 射线响应能谱(包括俘获 $\gamma$ 射线和非弹 $\gamma$ 射线), 采用中子能量截断的方式获取探测器中的非弹 $\gamma$ 射线响应能谱, 中子能量截断值设置为0.1 MeV。记录的 $\gamma$ 射线能谱的能量范围为0.1~8.0 MeV, 能谱中 $\gamma$ 射线能量间隔设置为0.03 MeV, 每个能量间隔的 $\gamma$ 射线计数的统计误差小于2%。MCNP模拟得到的 $\gamma$ 射线能谱中的 $\gamma$ 射线计数均对应于单位源中子。

### 3.1 混合 $\gamma$ 射线能谱

通过MCNP模拟可以给出不同地层密度条件下不同源距探测器中的混合 $\gamma$ 射线能谱。作为典型的例子, 图2给出了地层密度分别为2.70, 2.19和1.00 g/cm<sup>3</sup>时源距 $L = 40$  cm处NaI探测器中的混合 $\gamma$ 射线能谱, 清晰地显现了H核素的2.22 MeV俘获 $\gamma$ 射线峰, Cu核素的7.17 MeV俘获 $\gamma$ 射线峰, Ca核素的6.42 MeV俘获 $\gamma$ 射线全能峰以及5.91 MeV的单逃逸峰, Ca核素的5.42 MeV俘获 $\gamma$ 射线峰。当地层密度为1.00 g/cm<sup>3</sup>时, 即地层全为水, 俘获能谱中没有出现Ca的俘获 $\gamma$ 射线峰, 说明Ca的俘获 $\gamma$ 射线只来源于地层, 其计数反映地层信息。

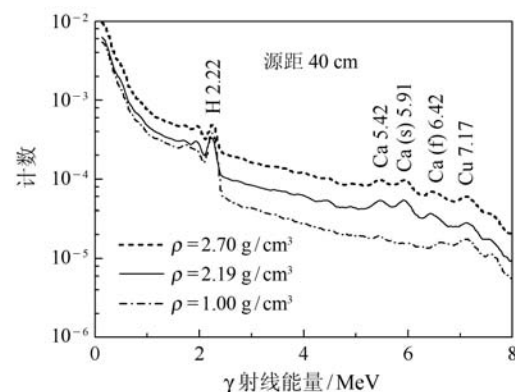


图2 源距为40 cm处NaI探测器中不同密度时混合 $\gamma$ 射线能谱

由图2可以看出, 在不同密度条件下的混合 $\gamma$ 射线能谱存在明显差异, 即混合 $\gamma$ 射线能谱的强弱能

反映地层密度信息。另外, 在 2.5~5.0 MeV 能区没有明显 γ 射线能峰, 为康普顿散射坪区, 康普顿散射 γ 射线更能敏感地反映地层密度的变化, 因此, 将选择 2.5~5.0 MeV 能区的混合 γ 射线计数来研究其与地层密度之间的关系。

### 3.2 非弹 γ 射线能谱

通过设置 0.1 MeV 中子能量截断的 MCNP 模拟, 可分别给出不同地层密度条件下不同源距探测器中的非弹 γ 射线能谱, 然后通过混合 γ 射线能谱数据与非弹 γ 射线能谱数据相减可以获得俘获 γ 射线能谱。图 3 给出了地层密度为 2.70 g/cm<sup>3</sup> 条件下, 源距 40 cm 处 NaI 探测器中的混合 γ 射线能谱、俘获 γ 射线能谱和非弹 γ 射线能谱。

由于 D-D 中子能量较低(约 2.5 MeV), 地层中主要核素 C, O 和 Ca 的非弹反应中子阈能普遍较高, 所以如图 3 所示, 仅在能谱的低能部分观察到了非弹性散射特征峰: NaI 晶体中 I 产生的 0.43 MeV 非弹 γ 射线峰和不锈钢套管中 Fe 产生的 0.86 MeV 非弹 γ 射线峰。这些非弹 γ 射线来源于井内仪器, 并不能反映地层密度信息, 无法实现 n-γ 密度测井。由图 3 可以看出, 非弹 γ 射线能谱很弱, 混合 γ 射线能谱与俘获 γ 射线能谱没有明显差异, 故可直接采用混合 γ 射线能谱进行 D-D 中子源 n-γ 密度测井的研究。

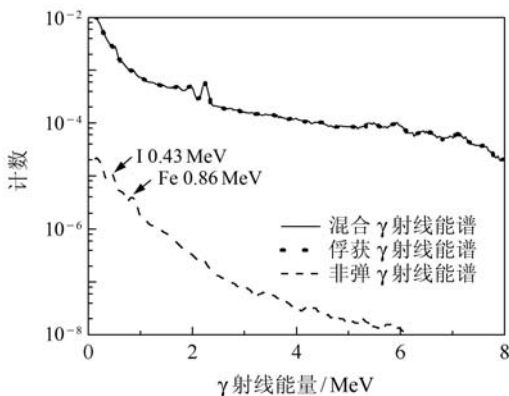


图 3 NaI 探测器中混合 γ 射线、俘获 γ 射线和非弹 γ 射线的能谱

### 3.3 混合 γ 射线密度测井规律

通过混合 γ 射线能谱数据的分析和处理, 可以得到不同密度条件下混合 γ 射线能谱 2.5~5.0 MeV 开窗

区域 γ 射线相对计数(相对于单位源中子的计数)随源距的变化关系。作为典型例子, 图 4 给出了 2.70, 2.19 和 1.00 g/cm<sup>3</sup> 3 种密度下能谱开窗区混合 γ 射线计数率随源距变化曲线。从图 4 可以看出, 同一密度条件下 γ 射线计数与源距  $L$  之间成近似线性关系, 不同密度曲线之间的间距反映了密度测量灵敏度, 源距越大, 灵敏度越高, 但太大的源距将导致计数过低, 给实验测量带来困难并将导致数据统计涨落变大。如图 4 中地层密度为 1.00 g/cm<sup>3</sup> (纯水介质) 的曲线在源距 90~120 cm 范围内呈现出明显起伏, 地层密度为 2.19 g/cm<sup>3</sup> 的曲线在源距 90~120 cm 范围内线性也变差, 主要原因是本模拟采用了在地层孔隙中填充水来改变地层密度。低密度时, 水含量较高, 水中的 H 对快中子慢化较充分, 同时水中的 H 对慢化的热中子有较大的俘获吸收截面, γ 射线能谱 2.5~5.0 MeV 开窗并没有包含 H 俘获 γ 射线的计数, 即在远源距处 γ 射线计数偏低, 统计涨落变大, 造成了远源距处线性变差。综合考虑, 30~80 cm 范围应该为安放 NaI 探测器的适宜源距。

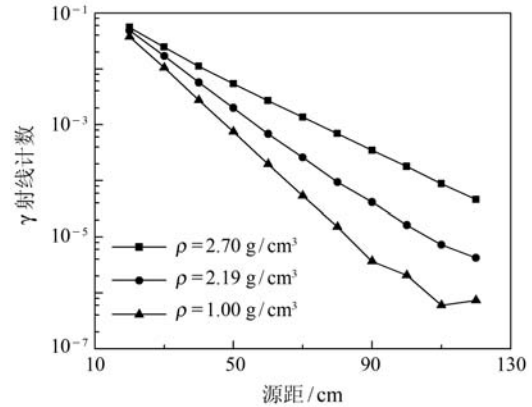


图 4 不同密度条件下混合 γ 射线计数随源距的变化

图 5 给出了源距分别为 30, 60 和 80 cm 条件下密度随开窗区混合 γ 射线计数的变化曲线。变化规律显示, 密度与混合 γ 射线计数之间成非线性关系, 经最小二乘法拟合, 密度与 γ 射线计数之间可用下列函数描述:

$$\rho(N) = Ae^{N/B} + Ce^{N/D} + E, \quad (2)$$

其中:  $\rho$  为密度;  $N$  为 γ 射线计数;  $A, B, C, D$  和  $E$  为拟合常数, 其值见表 1 中所示。

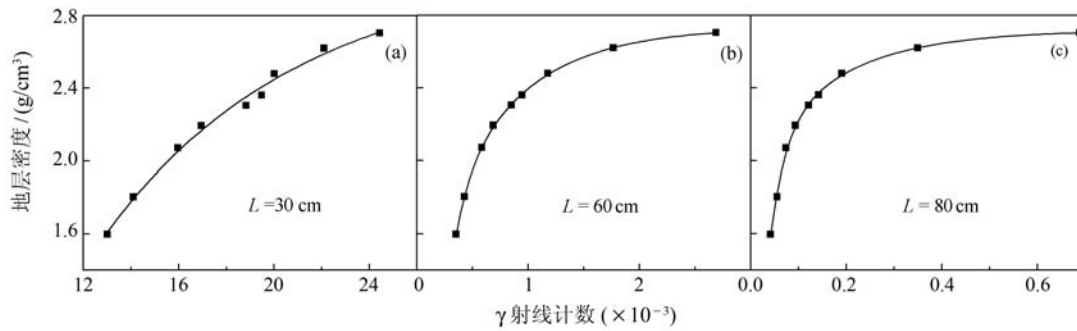


图 5 地层密度随混合  $\gamma$  射线计数的变化

表 1 密度与  $\gamma$  射线计数关系函数的拟合系数(见公式(2))

L/cm	A	B	C	D	E	相关系数 $R^2$
30	-3.54	$-8.27 \times 10^{-3}$	-3.54	$-8.27 \times 10^{-3}$	3.08	0.9927
60	-3.80	$-1.40 \times 10^{-4}$	-1.40	$-7.00 \times 10^{-4}$	2.73	0.9998
80	-0.73	$-1.70 \times 10^{-4}$	-2.09	$-3.00 \times 10^{-5}$	2.72	0.9979

### 4 结论

根据 D-D 中子管结构及 D-D 反应产生的快中子能谱和角分布数据, 建立了较精确的 D-D 中子管中子源模型, 通过在石灰岩井中中子及  $\gamma$  射线运输的 MCNP 模拟研究, 得到了不同密度和不同源距处 NaI 探测器中的混合  $\gamma$  射线能谱和非弹  $\gamma$  射线能谱。数据处理结果表明, D-D 中子的非弹  $\gamma$  射线不能反映地层密度信息, 俘获  $\gamma$  射线能谱与混合  $\gamma$  射线能谱基本重合, 故可直接选择 D-D 中子的混合  $\gamma$  射线能谱来研究 n- $\gamma$  密度测井规律。

对混合  $\gamma$  射线, 合适的探测器源距应该选在 30~80 cm 区域, 在 2.5~5.0 MeV 开窗能区的  $\gamma$  射线计数与地层密度之间呈现出有规律的非线性关系。

需要说明的是, 本模拟研究所建立的井模型为石灰岩标准井, 较为理想, 没有考虑井中泥饼及其他地质条件的变化带来的影响<sup>[16]</sup>, 而上述变化会对  $\gamma$  射线的能谱及计数产生影响, 需要进一步细致研究。

### 参考文献(References):

[1] HUANG Longji. Principles of Nuclear Logging[M]. Dongying: China University Of Petroleum Press, 2000: 82-99. (in Chinese)  
(黄隆基. 核测井原理[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2000: 82-99.)

[2] PENG Hu. Well Logging Technology, 2009, **33**(1): 1. (in Chinese)  
(彭琥. 测井技术, 2009, **33**(1): 1.)

[3] ZHANG Feng, SUN Jianmeng, SUN Yan. Well Logging Technolo-

gy, 2005, **29**(4): 317. (in Chinese)  
(张峰, 孙建孟, 孙燕. 测井技术, 2005, **29**(4): 317.)

[4] FRICKE S, MADIO D P, ADOLPH B, *et al.* Thermal Neutron Porosity Using Pulsed-neutron Measurements[C]. SPWLA 49th Annual Logging Symposium. USA: Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, 2008: Paper L.

[5] KIM I J, CHOI H. Nucl Instr and Meth B, 2005, **241**(1): 917.

[6] YU Huawei, SUN Jianmeng, ZHU Wenjuan, *et al.* Well Logging Technology, 2009, **33**(6): 521. (in Chinese)  
(于华伟, 孙建孟, 朱文娟, 等. 测井技术, 2009, **33**(6): 521.)

[7] ZHANG Feng, JIN Xiuyun, HOU Shuang. Journal of Isotopes, 2010, **23**(1): 15. (in Chinese)  
(张锋, 靳秀云, 侯爽. 同位素, 2010, **23**(1): 15.)

[8] ZHANG Feng, YUAN Chao. Well Logging Technology, 2010, **34**(3): 227. (in Chinese)  
(张锋, 袁超. 测井技术, 2010, **34**(3): 227.)

[9] JACOBSON L A. Pulsed-neutron Formation Density: US, 7117092 B2[P]. 2006-10-03.

[10] ODOM R C, BAILEY S M, WILSON R, *et al.* Pulsed Neutron Density Measurements: Modeling the Depth of Investigation and Cased-Hole Wellbore Uncertainties[C]. SPWLA 40th Annual Logging Symposium. USA: Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, 1999: Paper JJ.

[11] ODOM R C, STREETER R W, WILSON R D W. Formation Density Measurement Utilizing Pulse Neutrons: US, 5900627[P]. 1999-05-04.

[12] HE Xiongying, ZHENG Shiping, LU Xiaolong, *et al.* High Power Laser and Particle Beams, 2013, **25**(1): 253. (in Chinese)  
(何雄英, 郑世平, 卢小龙, 等. 强激光与粒子束, 2013, **25**(1): 253.)

- [13] BRIESMEISTER J F. MCNPTM-A General Monte Carlo N-particle Transport Code. Version 4C. US: Los Alamos National Laboratory, 2000: 1-37.
- [14] State Economic and Trade Commission. SY/ T 6582. 4-2003 Part 4 of The Petroleum Nuclear Well Logging Instrument Scale, Compensated Neutron Logging Tool Scale[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 1-4.(in Chinese)  
(国家经济贸易委员会. SY/ T 6582. 4-2003 石油核测井仪刻度第4部分, 补偿中子测井仪刻度[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 1-4.)
- [15] ZE'EN Y, PENG L, KOBAYASHI T, *et al.* Nuclear Science and Techniques, 2007, **18**(6): 330.
- [16] WU Wensheng, HUANG Longji. Chinese Journal of Geophysics, 2004, **47**(1): 164.(in Chinese)  
(吴文圣, 黄隆基. 地球物理学报, 2004, **47** (1): 164.)

## Monte Carlo Simulation on n- $\gamma$ Density Logging Using A D-D Neutron Generator

HE Xiongying<sup>1</sup>, XU Dapeng<sup>1</sup>, XIE Qin<sup>1</sup>, LU Xiaolong<sup>1</sup>, ZHENG Shiping<sup>2</sup>, YAO Zeen<sup>1, 3</sup>, LAN Changlin<sup>1</sup>

(1. School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. Logging While Drilling Center, CNPC Logging, Xi'an 710061, China;

3. Engineering Research Center for Neutron Application, Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China )

**Abstract:** A D-D neutron source model was developed according to the neutron spectrum and the neutron angular distribution of D-D reaction. A standard calibration well model was built. The transports of the D-D neutrons and  $\gamma$ -rays in the well were simulated using MCNP code. The mixed  $\gamma$ -spectra and inelastic  $\gamma$ -spectra in the NaI detector were obtained for both different distances from a neutron source and different densities. Mixed  $\gamma$  count in the energy range of 2.5 to 5.0 MeV as a function of distance shows that the NaI detector should be located at a distance of 30~80 cm from the neutron source. The nonlinear relationships between the density and the mixed  $\gamma$  count were presented in this paper. It was demonstrated that the energy spectrum of mixed  $\gamma$  rays can realize the n- $\gamma$  density logging.

**Key words:** density logging; D-D neutron generator; monte-carlo simulation; limestone

Received date: 8 Sep. 2012; Revised date: 9 Oct. 2012

Foundation item: Fundamental Research Project of the 11th Five-year Plan at China National Petroleum Corporation

Corresponding author: YAO Zeen, E-mail: zeyao@lzu.edu.cn

<http://www.npr.ac.cn>