

# MC 法模拟地层元素测井仪优化中子屏蔽体

朱力<sup>1</sup>, 葛良全<sup>1</sup>, 张庆贤<sup>1</sup>, 程鹏亮<sup>1,2</sup>, 任茂强<sup>1</sup>

(1. 成都理工大学, 成都 610059; 2. 铜仁市核与辐射安全管理中心, 贵州铜仁 554300)

**摘要:**利用 MC 法模拟了 D-T 中子源发出的粒子通过地层元素测井仪内部屏蔽体结构的过程, 获得了不同粒子通过不同材料的屏蔽体后能量和核反应截面的分布, 从而得出不同材料在不同厚度下的粒子屏蔽效果。模拟结果表明: 采用 17 cm 厚的三层复合屏蔽体结构, 所用材料第一层为 10 cm 厚的钨镍合金, 第二层为 5 cm 厚含 20% 碳化硼的聚乙烯, 第三层为 2 cm 厚的铅。三层结构对中子的屏蔽率达到 98.47%, 对  $\gamma$  光子的屏蔽率达到 97.68%。可有效降低仪器内部元素干扰, 提高分辨率与精确度。

**关键词:**地层元素; 测井仪; MC 法; 中子屏蔽;  $\gamma$  射线屏蔽; MCNP5

**中图分类号:**P 631.84; P 631.81 **文献标志码:**A **文章编号:**0258-0934(2016)9-0974-04

新一代元素测井仪采用脉冲中子发生器代替同位素放射源, 通过对  $\gamma$  能谱分析, 获取地层岩石骨架重要元素的含量数据, 从而确定岩性和骨架参数<sup>[1]</sup>。此种分析方法不仅能够确定多种元素的份额和骨架元素的含量, 还能够测量碳酸盐中的锰, 提高镁和铝的测量精度, 这对重晶石、油基泥浆钻井及碳酸盐岩、页岩和煤层的评价都具有重要意义。

为了减小仪器本底谱线的干扰, 提高地层中各元素的测量精度。吴文圣<sup>[2]</sup>、罗鹏<sup>[3]</sup>、王鑫等人<sup>[4]</sup>、严慧娟等人<sup>[5]</sup>先后利用蒙特卡罗 (MC) 方法对地层元素能谱测井仪进行优化, 特别是对探测器和中子源之间的屏蔽体进行了深入的研究。但是均没有考虑中子与屏蔽体发生  $(n, \gamma)$  和  $(n, n' \gamma)$  反应和 D-T 反应中特有的中子能谱和角分布等因素, 使得  $\gamma$  射线进入

探测器引起测量误差, 最终影响对元素的测量精度。

本工作将利用蒙特卡罗 (MC) 方法对屏蔽体采用三层组合的方式进行优化, 对中子发生器按照特定的中子能谱和角分布进行研究, 获得不同粒子通过不同材料的屏蔽体后能量和核反应截面的分布, 计算出不同材料在不同厚度下的粒子屏蔽效果, 为合理选择屏蔽方式和屏蔽材料提供必要的科学依据。

## 1 屏蔽材料选择

有文献<sup>[7]</sup>表明: 当中子通过一定厚度的屏蔽体可以将大多数中子能量降低到 2 MeV 以下, 其中子能谱以 2 MeV 为主峰。从图 1 可知: 应选取  $^{184}\text{W}$ 、 $^{186}\text{W}$ 、 $^{155}\text{Gd}$ 、 $^{157}\text{Gd}$  这四种非弹性散射截面比较大的物质。对于 14 MeV 的中子, 当能量在 1 MeV 以上时非弹性散射截面比较大的是  $^{186}\text{W}$ , 但是  $^{186}\text{W}$  的非弹性散射截面在中子能量为 7~9 MeV 时有所降低, 此时应该选用  $^{184}\text{W}$  来填充。

从图 2 可知: 在中子能量低于 1 MeV 时, 上述三种物质各有利弊, 但是考虑到仪器本身的重量, 采用含 H 物质。构建屏蔽结构体如

收稿日期: 2016-08-03

基金项目: 863 计划“资源与环境技术领域”主题项目 (2012AA061803) 资助。

作者简介: 朱力 (1992-)。男, 陕西西安人, 在读硕士研究生, 研究方向为核能与核技术。通信作者: 葛良全, 男, 教授, E-mail: glq@cdut.edu.cn。

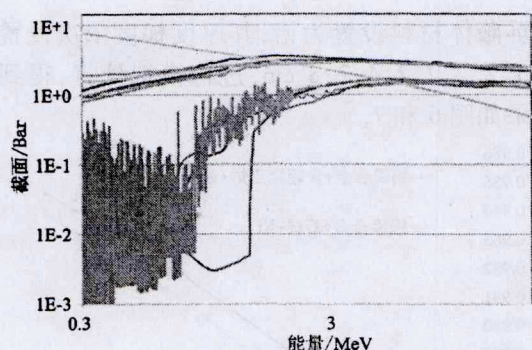


图1 不同物质中子反应非弹性散射截面示意图

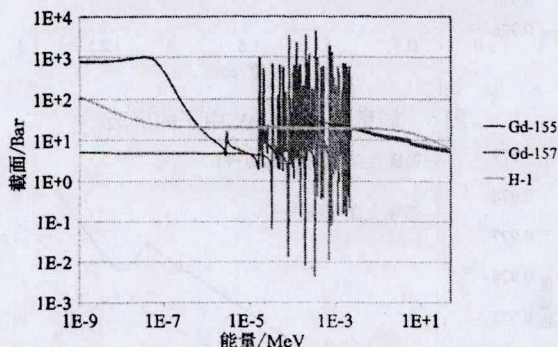


图2 Gd、H 物质中子反应弹性散射截面示意图

下:第一层为钨或者钨镍合金。当 14 MeV 中子从中子管中出来首先与物质发生非弹性散射,此时选用非弹性散射截面大的重金属,在经过 2~3 次非弹性散射后能够大幅降低中子的能量;第二层为石蜡或者含 20% 碳化硼的聚乙烯<sup>[8]</sup>。此屏蔽层主要对通过第一层屏蔽体后,能量小于 2 MeV 的中子进行弹性散射。根据弹性散射的相关理论,采用原子序数低的元素,对中子的慢化效果好,可以将中子能量降低到热中子能区,加入碳化硼主要是对热中子进行吸收;第三层采用铅,主要对第一层和第二层中产生的感生  $\gamma$  射线进行屏蔽<sup>[9-11]</sup>。几种屏蔽体密度见表 1(表中,硼聚乙烯含硼 20%)。

表1 屏蔽体物质密度

物质名称	钨	钨	石蜡	聚乙烯	硼聚乙烯	铅
密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	18.00	7.95	0.90	0.96	1.06	11.20

## 2 MC 模型构建

通过调研文献<sup>[5,12]</sup>,建立地层元素测井仪模型如图 3。在测井模型基本参数中,地层模型为圆柱体,高为 130 cm、半径为 65 cm;填充材料为石灰岩,孔隙度为 45%;仪器总长度为 125 cm,分为两段,尺寸分别为  $\Phi 90 \times 450 \text{ mm}^2$  和  $\Phi 130 \times 800 \text{ mm}^2$ 。为了对中子源进行更准

确的描述,采用何英雄<sup>[13]</sup>、罗鹏<sup>[3]</sup>等人所描述的钨靶 D-T 反应中子能谱和角分布的数值计算方法,按照公式(1)将中子角分布转化为角产额,然后将角产额的数据输入到 MCNP5 程序中,分别对中子能量和出射角进行控制。按照实际情况将 D-T 中子源设置为  $\Phi 16 \text{ mm}$  的面源,抽样粒子  $10^8$ ,利用 F2 卡计数,误差不大于 5%。

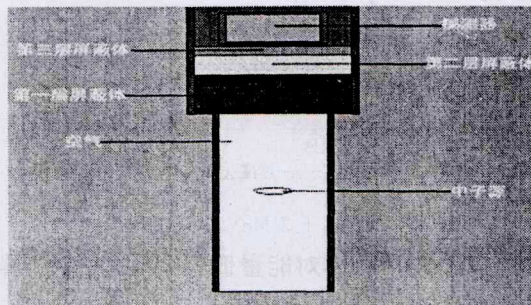


图3 地层元素测井仪模型

$$dY/d\theta = 2\pi \sin\theta [dY(\theta)/d\Omega] \quad (1)$$

式中: $dY/d\theta$  为中子角产额; $\theta$  为中子出射角; $dY(\theta)/d\Omega$  为中子角分布。

## 3 模拟结果与讨论

由于不同能量的中子具有不同的核反应截面,因此采用不同的屏蔽体屏蔽不同能量的中子。在通常情况下,采用多层屏蔽体结构设计,第一层主要通过非弹性碰撞使高能中子损失减速,第二层主要通过弹性碰撞将快中子减速与吸收,第三层主要是对前两层屏蔽体中产生的  $\gamma$  射线和残余的热中子进行进一步吸收和屏蔽。

### 3.1 第一层屏蔽体对快中子屏蔽效果

设第一层屏蔽体的材料分别为钨以及钨镍合金,其厚度梯度为 1、2、4、6、8、10 cm,模拟得到的结果如图 4 所示。从图 4 可知:当第一层屏蔽物为钨或者钨镍合金时,二者的屏蔽效果基本相同。当二者厚度增加时,屏蔽体的屏蔽率也增加,但当厚度增加到一定程度时,屏蔽率增速逐渐减缓,最终保持在一定水平,这说明并不是厚度越厚,屏蔽率就无限制的增大。原因是:中子的能量已经逐渐下降到 2 MeV,此时中子相互作用截面变小,发生弹性散射,上述两种材料不再适合作为屏蔽体。在实际中由于考虑到仪器本身的重量和经济性,最佳材料选择钨



镍合金。综上所述,屏蔽体结构第一层屏蔽物选择 10 cm 厚钨镍合金,其屏蔽效果可以将快中子能量降低到 2 MeV,屏蔽率可达 91.35%。

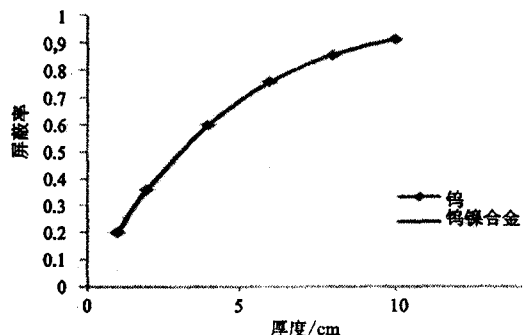


图4 能量高于 2 MeV 中子的屏蔽

### 3.2 第二层屏蔽体对能量低于 2 MeV 中子屏蔽效果

在第一层屏蔽物的基础上加上第二层屏蔽物,通过分析弹性散射截面的大小,将第二层屏蔽物材料分别设置为石蜡以及含 20% 碳化硼的聚乙烯,其厚度梯度依次设置为:1、2、3、4、4.4、4.8、5 cm,得到如图 5 的模拟结果。

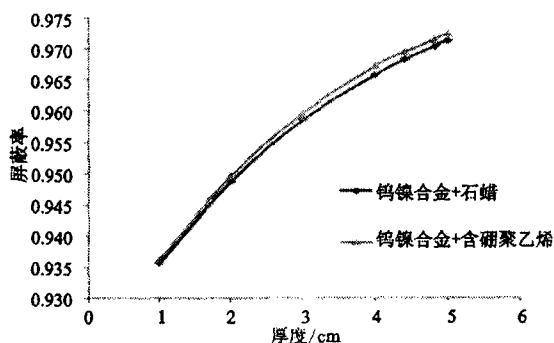


图5 能量低于 2 MeV 中子的屏蔽

由图 5 可知:石蜡组合的屏蔽率比相同厚度下含 20% 碳化硼聚乙烯的组合要低,由此可见选择钨镍合金 + 含 20% 碳化硼的聚乙烯屏蔽效果好。但并不是第二层屏蔽体越厚,对中子的屏蔽率就越高,这说明第一层屏蔽体与第二层屏蔽体的厚度存在最佳比例,该比例为 2:1<sup>[12]</sup>。

### 3.3 第三层屏蔽体对中子及感生 $\gamma$ 射线屏蔽效果

对中子进行彻底屏蔽,不仅要考虑快中子、热中子的屏蔽,还要考虑对中子与物质相互作用后产生的次级  $\gamma$  射线进行屏蔽,而对  $\gamma$  射线的屏蔽效果最好是铅。基于以上考虑,将第三

层屏蔽体材料设置为铅,其厚度梯度依次设置为 1、2、2.2、2.4、2.8 cm,进行模拟计算,得到结果如图 6 和 7。

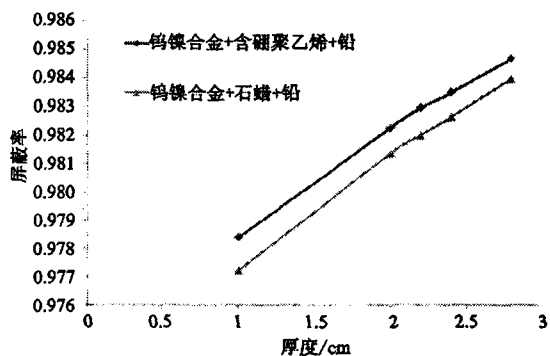


图6 能量低于 2 MeV 中子的屏蔽

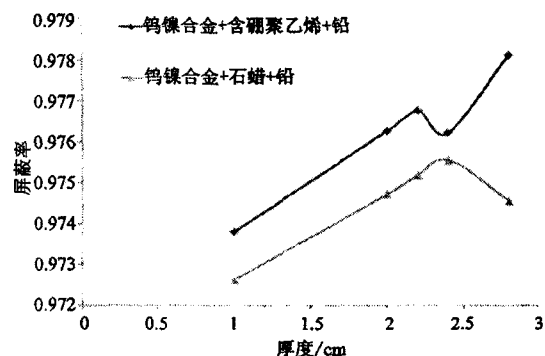


图7  $\gamma$  射线的屏蔽

从图 6 和 7 可知:对中子而言,随着第三层屏蔽体厚度的增加,屏蔽率依次增大;对  $\gamma$  光子而言,随着屏蔽体厚度的增加,屏蔽体对  $\gamma$  光子的屏蔽率并不是逐渐增大,尤其是在 2.4 cm 处出现一个拐点,这个拐点是由于中子与物质相互作用( $n, \gamma$ )反应和( $\gamma, n$ )反应造成的。对于钨镍合金 + 含硼聚乙烯 + 铅以及钨镍合金 + 石蜡 + 铅这两种不同材料而言,前一组材料出现极小值而后一组出现极大值,这是中子与三层屏蔽体结构相互作用的结果。不同成分的屏蔽材料,中子屏蔽能力不同,进而导致中子通过非弹性散射和弹性散射损失的能量也不同,最终造成中子与物质发生相互作用的方式不同。综上所述可知,第三层屏蔽体的最佳厚度为 2.2 cm,对中子的屏蔽率达到 98.47%,对感生  $\gamma$  光子的屏蔽率达到 97.68%,达到地层元素测井仪的屏蔽要求。

## 4 结论

基于 MCNP5 模拟软件,通过 MC 法对地层

元素测井仪中子屏蔽体进行模拟分析,可以得到如下结论:(1)不同材料对中子减速屏蔽能力不同,采用三层屏蔽体结构,屏蔽体的最佳厚度比为10:5:2。(2)第一层屏蔽体选择钨镍合金,主要通过非弹性散射对2 MeV 以上的中子进行减速屏蔽;第二层屏蔽体最佳材料为含20% 碳化硼的聚乙烯,主要是对能量低于2 MeV 的中子进行屏蔽减速和对热中子进行吸收;第三层屏蔽体采用了铅,是因为铅对 $\gamma$ 射线具有良好的屏蔽能力。(3)采用总厚度为17 cm 的三层屏蔽体结构,对中子的屏蔽率达到了98.47%,对 $\gamma$ 射线的屏蔽率达到了97.68%。(4)采用三层复合屏蔽体结构对地层元素测井仪的屏蔽效果最好,可最大限度地减少 $\gamma$ 谱线对仪器干扰,从而提高仪器的分辨率和精确度。

#### 参考文献:

- [1] National Research Council (U. S.). Committee on Radiation Source and Replacement. Radiation Source Use and Replacement [M]. Abbreviated Version. Washington: National Academies Press, 2008.
- [2] 吴文圣. 中子 $\gamma$ 测井仪的中子屏蔽研究[J]. 核电子学与探测技术,2004,24(1):24-26.
- [3] 罗鹏. D-T 反应中子源准直屏蔽体及中子束特性研究[D]. 兰州大学,2009.

- [4] 王鑫,谷德山,刘林茂,等. D-T 中子发生器慢化体结构的蒙特卡罗方法研究[J]. 核电子学与探测技术,2008,28(5):958-960.
- [5] 严慧娟,岳爱忠,赵均,等. 地层元素测井仪器结构参数的蒙特卡罗数值模拟[J]. 测井技术,2012,36(3):282-285.
- [6] 黄隆基. 核测井原理[M]. 北京:石油大学出版社,2000.
- [7] 乔亚华,张敏,孙汉城,等. 以中子管为激发源的中子活化分析系统慢化屏蔽体设计[J]. 核电子学与探测技术,2010,30(10):1325-1328.
- [8] 彭凤梅. 复合材料对14 MeV 中子源屏蔽的M-C 模拟研究[D]. 东华理工大学,2012.
- [9] 赵新辉,谷德山,任万彬,等. 基于MCNP 程序模拟的14 MeV 中子准直屏蔽材料的研究[J]. 东北师大学报(自然科学版),2006,38(4):59-63.
- [10] 曹琴琴. D-D 和D-T 中子源中子照相慢化准直屏蔽系统模拟设计[D]. 兰州:兰州大学,2006.
- [11] 戴宏毅,杨化中,苏桐龄. 用蒙特卡罗方法计算快中子屏蔽体的厚度[J]. 国防科技大学学报,1996,18(1):129-134.
- [12] 于华伟,肖红兵. 随钻D-T 中子孔隙度测井屏蔽体的蒙特卡罗研究[J]. 核电子学与探测技术,2013,33(9):1123-1126.
- [13] 何雄英. 中子- $\gamma$ 密度测井及地层元素测井的蒙特卡罗模拟研究[D]. 兰州大学,2013.

## The Monte Carlo Simulation Optimizes of Formation Elements Logging Instrument Neutron Shielding

ZHU Li<sup>1</sup>, GE Liang-quan<sup>1</sup>, ZHANG Qing-xian<sup>1</sup>, CHENG Peng-liang<sup>1,2</sup>, REN Mao-qiang<sup>1</sup>

(1. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Tongren Nuclear and radiation safety center, Tongren, GuiZhou 554300, China)

**Abstract:** The monte carlo method was used to simulate interaction of neutron between the detector and the neutron source shield structure. The neutrons were produced by the D-T neutron source. Access to the distribution of energy and nuclear reaction cross section by the different particles with different materials, the shielding efficiency of the different materials with different thickness is got. The simulation using three-layer composite structures of 17 cm shows good results, Tungsten(W) - Nickel(Ni) alloy as the first layer when the thickness is 10 cm; containing 20% Boron(B) polyethylene as the second layer when the thickness is 5 cm; the third layer is Pb when the thickness is 2 cm. At the same time neutron shielding rate reached 98.47% and  $\gamma$ -ray shielding rate reached 97.68%. It could reduce the interference of instrument internal elements and improve the accuracy and resolution of the logging tool formation elements.

**Key words:** formation elements; the logging; monte carlo method; neutron shielding;  $\gamma$ -ray shielding; MCNP5