

# 瞬发裂变中子铀矿测井中超热中子探测器的优化研究

王新光 刘丹 王国保  
(中国原子能科学研究院 北京 102413)

**摘要** 瞬发裂变中子铀矿测井是利用脉冲中子源和超热中子探测器,记录热中子和<sup>235</sup>U发生裂变反应产生的瞬发超热中子,得到地层含铀量信息的测井方法。为提高仪器中超热中子探测器的探测效率,利用蒙特卡罗数值计算程序MCNP5对铀矿测井仪的探测器进行了优化计算研究,得到最优的中子慢化体和探测器尺寸组合,并将计算结果用于仪器的改进,取得了满意的实验结果。

**关键词** 超热中子探测器,铀矿测井,瞬发裂变中子,蒙特卡罗模拟,探测效率

**中图分类号** TL816+.3

由于<sup>3</sup>He正比计数管具有较好的高温稳定性以及良好的 $\gamma$ 辐射甄别性能,因此,被广泛应用于测井中热中子的探测。超热中子探测器是在<sup>3</sup>He管外再包裹一层热中子吸收材料和中子慢化材料,从而实现高于热中子能量范围中子的探测<sup>[1]</sup>。热中子吸收材料通常选用钆或镅等具有较高热中子吸收截面的材料,中子慢化材料选用高中子减速截面、低中子吸收截面的材料。由于测井仪器工作环境的特殊性,选取的材料必须耐高温、耐高压并易于加工成形。对于不同能量的中子,在一定的空间限制下,选择合理尺寸的热中子吸收体、中子慢化体和<sup>3</sup>He管组合非常必要。

本文利用蒙特卡罗数值计算程序MCNP5<sup>[2]</sup>,首先模拟计算了在地层条件下,瞬发裂变中子铀矿测井仪探测中子的能量分布,然后计算不同厚度的热中子吸收体、中子慢化体和不同尺寸的<sup>3</sup>He管组合形成超热中子探测器的探测效率,选择最佳的组合,最后利用计算结果对仪器进行改进。

## 1 瞬发裂变中子铀矿测井原理

瞬发裂变中子铀矿测井是采用脉冲中子源和超热中子探测器的组合,脉冲中子源产生的快中子在地层中慢化为热中子,热中子和地层中的<sup>235</sup>U发生裂变反应,产生瞬发裂变中子,通过记录来自地层的瞬发裂变中子计算地层含铀量<sup>[3-5]</sup>。热中子和<sup>235</sup>U发生裂变反应产生瞬发裂变中子是在发生裂变反应的瞬间产生的,其能量分布是连续的,瞬发裂变中

子能谱可用麦克斯韦分布曲线表示:

$$\chi(E) \propto \sqrt{E} \cdot \exp(-E/T_M)$$

函数 $\chi(E)$ 定义为每个瞬发中子能量出现在 $E$ 处的单位能量间隔内的几率, $T_M$ 为麦克斯韦温度。<sup>235</sup>U的瞬发裂变中子相对强度的能量分布如图1所示。

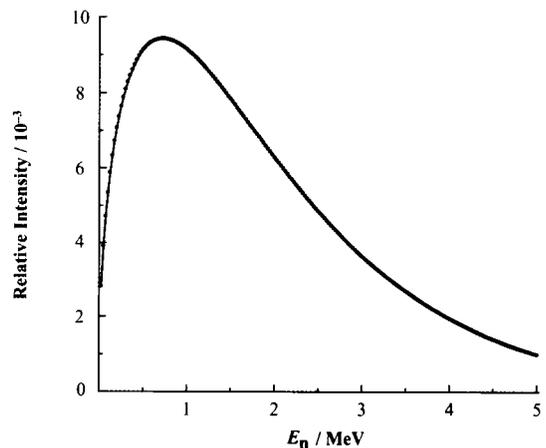


图1 <sup>235</sup>U的瞬发裂变中子能谱  
Fig.1 Prompt fission neutron spectrum of <sup>235</sup>U.

<sup>235</sup>U瞬发裂变中子能谱的平均能量为2 MeV,因此,当地层中含铀时,由于热中子和<sup>235</sup>U发生裂变反应增加了地层中的超热中子通量。来自脉冲中子源慢化产生的超热中子和来自<sup>235</sup>U裂变反应产生的超热中子可以在时间上区分开。记录脉冲中子源产生的中子脉冲结束后,一段时间内的超热中子计数可以反映地层的含铀量。

第一作者:王新光,男,1985年出生,2010年于中国石油大学(华东)获硕士学位,现为中子能谱学博士研究生,专业:核测井方法  
收稿日期:2013-01-28,修回日期:2013-04-01

## 2 地层条件下探测器处 $^{235}\text{U}$ 瞬发裂变中子的能量分布

虽然热中子和  $^{235}\text{U}$  裂变反应产生的瞬发裂变中子能谱可以用麦克斯韦曲线表示, 但次级裂变中子在地层中从产生到被探测器记录的过程中, 和地层中原子核发生碰撞被减速、吸收, 因此由探测器记录的能反映地层含铀量的瞬发裂变中子能量分布并不是初始的麦克斯韦分布。

为了研究地层条件下瞬发裂变中子铀矿测井仪探测中子的能量分布, 利用 MCNP5 数值模拟程序, 建立裸眼井条件下瞬发裂变中子铀矿测井的计算模型<sup>[6-8]</sup>: 井眼直径为 10 cm, 地层设置为内外半径分别为 5 cm 和 75 cm、高为 140 cm 的圆筒状, 地层骨架为含铀砂岩, 地层孔隙度为 5%, 孔隙中饱含淡水; 测井仪器外径为 56 mm, 采用 14 MeV 的 D-T 脉冲中子源, 中子源位于仪器下端, 仪器贴井壁, 中子脉冲宽度设为 40  $\mu\text{s}$ ; 超热中子探测器中心与源距离为 35 cm; 模拟的源抽样粒子数为  $2 \times 10^8$  个, 采用分裂与赌的减小方差技巧, 保证总计数误差小于 1%; 数值模拟的地层及仪器模型示意图见图 2。

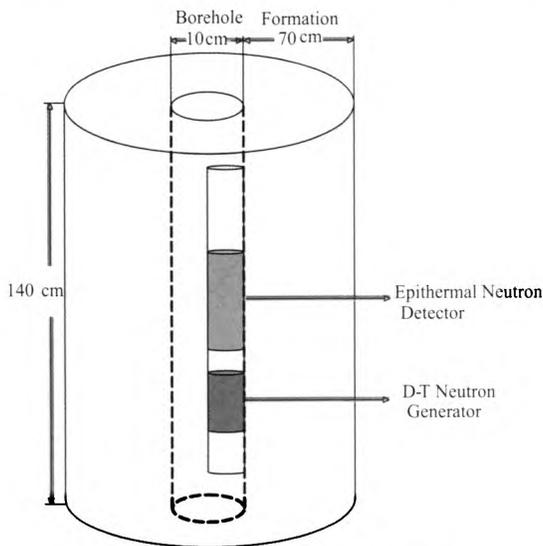


图 2 蒙特卡罗数值模拟模型示意图  
Fig.2 Schematic diagram of MCNP simulation model.

在超热中子探测器处, 分别记录地层含铀和不含铀时, 源中子脉冲结束后, 进入探测器栅元的中子能量分布, 进行归一化, 然后将两种条件下的能谱按能量进行相减, 从而得到地层条件下由于含铀而增加的裂变中子能量分布, 如图 3 所示。

对比图 1 和图 3 可以看出, 在地层中由于瞬发裂变中子和各种核素发生碰撞、慢化, 使得探测器处能记录到的裂变中子能量分布发生了变化, 不再符合麦克斯韦分布, 低能中子相对强度变大。因此,

研究铀矿测井仪的超热中子探测器探测效率时, 需以裂变中子在地层中的能量分布为依据。

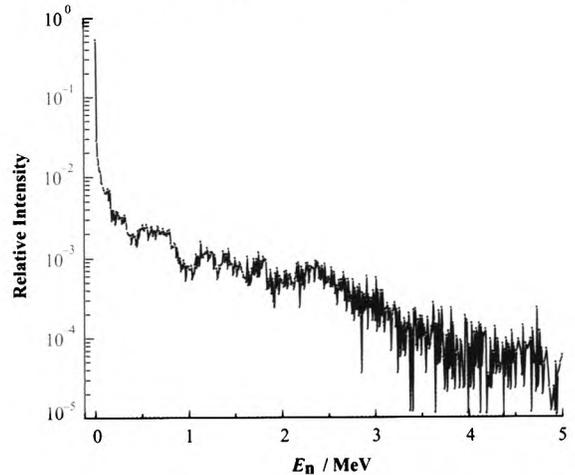


图 3 地层条件下探测器处瞬发裂变中子能谱  
Fig.3 Detected spectrum of prompt fission neutron in formation.

## 3 超热中子探测器的优化设计

### 3.1 热中子吸收体的选择

选用最常用的热中子吸收材料镉(Cd), 为研究不同厚度的镉片对热中子吸收情况, 利用 MCNP5 程序模拟热中子透过不同厚度( $D_{\text{Cd}}=0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1\text{ mm}$ )镉片后剩余的热中子通量, 计算得到镉片对热中子的吸收率和镉片厚度的关系, 如图 4 所示。

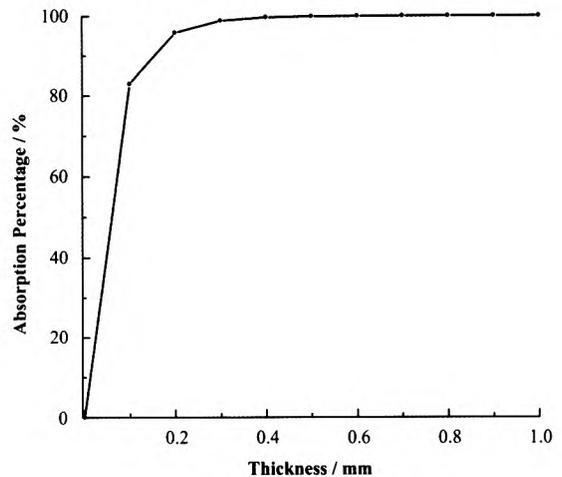


图 4 镉热中子吸收率和厚度的关系  
Fig.4 Relationship between thermal neutron absorption rate and thickness.

由图 4 可以看出, 0.3 mm 的镉片对热中子的吸收率已经超过了 90%, 在实际仪器设计过程中采用 0.5 mm 的镉片包裹在超热中子探测器的最外层, 已经能吸收绝大部分来自源中子慢化产生的热中子。

### 3.2 中子慢化材料

测井仪中采用的中子慢化材料除了需要具有较高的中子减速截面外，还需要具有易加工成形、具有一定的结构强度并耐高温高压的特点，本文选用最常用的聚乙烯和有机玻璃作为研究对象。

### 3.3 中子慢化体和<sup>3</sup>He管的尺寸

由于铀矿测井仪器的骨架尺寸限制，超热中子探测器在径向上尺寸一定，在轴向上有直径为4.9 cm的空间，去除前述厚为0.5 mm的包裹镉片，中子慢化体和<sup>3</sup>He管有直径为4.8 cm的空间。

为研究不同厚度中子慢化材料和<sup>3</sup>He管组合对来自地层的瞬发超热中子探测效率，利用MCNP5程序建立探测器数值模拟计算模型：探测器模型为圆柱型，外径4.9 cm，由外到内依次为0.5 mm的镉皮、慢化材料和<sup>3</sup>He管探测器，模型横截面如图5所示。在探测器外设置圆柱型中子源，源能量分布为如图3所示的瞬发裂变中子地层谱，<sup>3</sup>He管探测器内充气压为1.0 MPa。

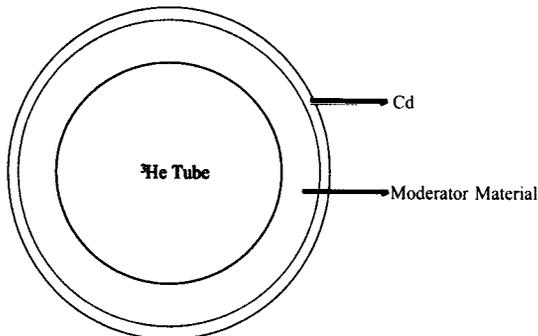


图5 超热中子探测器蒙特卡罗模型横截面图  
Fig.5 Cross section diagram of Monte Carlo model of epithermal neutron detector.

慢化体厚度和<sup>3</sup>He管探测器直径如表1所示。在<sup>3</sup>He管探测器栅元处利用F4计数卡记录进入探测器的中子数，结合Fm卡计算和<sup>3</sup>He发生反应的中子数，得到不同组合条件下探测器的探测效率，如图6所示。

由图6可以看出，在相同厚度的慢化体条件下，利用聚乙烯作慢化体的超热中子探测器，其探测效率高于有机玻璃；在空间一定的条件下，随着慢化体厚度的增加以及探测器尺寸的减小，超热中子探测器的探测效率先增加后减小，存在一个最佳的尺寸组合，使探测器的探测效率最大；由图6中数据可以得到，在外径为4.8 cm条件下，聚乙烯或有机玻璃作慢化体时，1.1 cm的慢化体和直径2.6 cm的<sup>3</sup>He管组合达到最大的超热中子探测效率。

表1 慢化体厚度和<sup>3</sup>He管直径尺寸  
Table 1 Thickness of moderator material and diameter of<sup>3</sup>He tube.

慢化体厚度 Moderator thickness /cm	<sup>3</sup> He管直径 Diameter of <sup>3</sup> He tube/cm	慢化体厚度 Moderator thickness /cm	<sup>3</sup> He管直径 Diameter of <sup>3</sup> He tube /cm
0.2	4.4	1.2	2.4
0.3	4.2	1.3	2.2
0.4	4.0	1.4	2.0
0.5	3.8	1.5	1.8
0.6	3.6	1.6	1.6
0.7	3.4	1.7	1.4
0.8	3.2	1.8	1.2
0.9	3.0	1.9	1.0
1.0	2.8	2.0	0.8
1.1	2.6	—	—

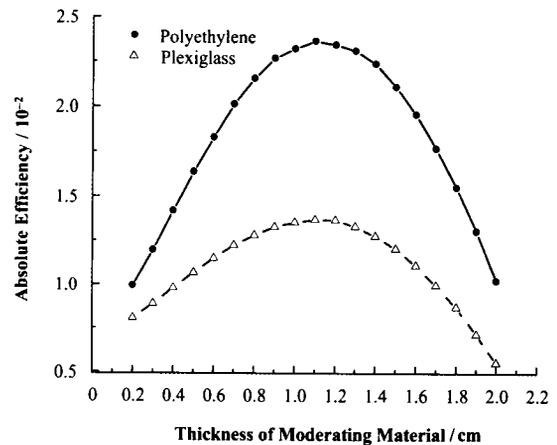


图6 不同组合条件下的探测效率  
Fig.6 Detection efficiency under different combination conditions.

## 4 仪器实验结果

根据上述的数值模拟计算结果，在实际的仪器设计中优化慢化体材料、慢化体厚度和<sup>3</sup>He管的尺寸，在相同测量环境下，对比仪器优化前后的探测效率。

仪器的超热中子探测器最外层镉片厚度0.5 mm不变，分别改变慢化体材料、厚度，采用相应尺寸的<sup>3</sup>He管，如表2所示。

仪器其他参数保持不变，在同一个模型井中分别进行同样工作参数的试验，得到不同探测器条件下的超热中子计数率时间衰减谱，如图7所示。

由图7可以看出，超热中子时间衰减谱可以分为三部分：第一部分为超热中子计数率快速上升时间段( $0 < t < 50 \mu\text{s}$ )；第二部分为超热中子计数率快速下降段( $50 \mu\text{s} < t < 100 \mu\text{s}$ )；第三部分为超热中子计数率相对缓慢下降段( $t > 100 \mu\text{s}$ )。由瞬发裂变中子铀矿

测井原理可知, 前 100  $\mu\text{s}$  为中子源产生的快中子慢化得到的超热中子计数, 100  $\mu\text{s}$  之后为来自地层的由热中子和  $^{235}\text{U}$  发生裂变反应产生的裂变超热中子。对比实验组 1 和 2 得到的时间衰减谱可以看出, 相同的慢化厚度条件下, 利用聚乙烯作慢化材料的探测器计数率高于有机玻璃为慢化材料的; 对比实验组 2 和 3 得到的时间衰减谱可以看出, 1.1 cm 厚的聚乙烯和直径 2.6 cm 的  $^3\text{He}$  管探测器组合计数率高于 0.6 cm 厚聚乙烯和直径 3.2 cm 的  $^3\text{He}$  管探测器组合, 和前述数值模拟结果一致。

表 2 超热中子探测器探测效率实验条件  
Table 2 Experiment condition of epithermal neutron detector efficiency.

实验组 Experiment group	慢化体材料 Moderator material	慢化体厚度 Moderator thickness / cm	$^3\text{He}$ 管直径 Diameter of $^3\text{He}$ tube / cm
1	有机玻璃 Plexiglass	0.6	3.2
2	聚乙烯 Polyethylene	0.6	3.2
3	聚乙烯 Polyethylene	1.1	2.6

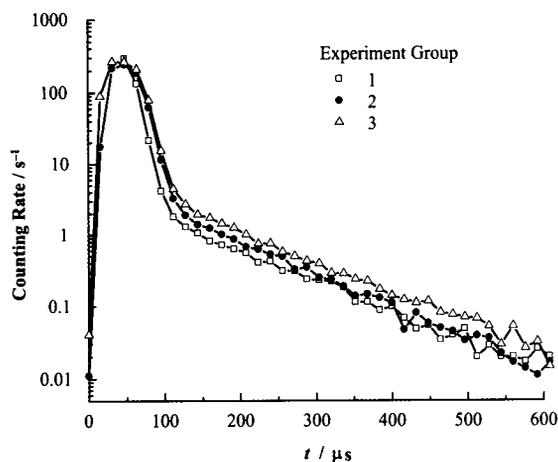


图 7 不同条件下实测超热中子时间衰减谱  
Fig.7 Measured epithermal neutron time spectrum under different conditions.

计算地层含铀量是利用来自地层的裂变超热中子计数, 即时间  $t > 100 \mu\text{s}$  的计数率为反映地层含铀信息的有效计数率。根据图 7 中数据, 实验组 1、2、3 有效计数率分别为 8.22/s、11.01/s 和 13.69/s, 以实验组 1 数据为基准, 实验组 2 有效计数率提高了 33.94%, 实验组 3 有效计数率提高了 66.55%, 说明优化探测器设计有效地提高了仪器的探测效率。

## 5 结语

利用 Monte Carlo 程序 MCNP5, 模拟研究了瞬发裂变中子铀矿测井探测的来自地层的瞬发裂变中子的能量分布, 以及超热中子探测器慢化体和  $^3\text{He}$  管探测器的尺寸与探测效率的关系。模拟结果表明, 以聚乙烯作慢化材料的超热中子探测效率高于有机玻璃作慢化材料的探测器; 在外径 4.8 cm 的空间内, 利用聚乙烯或有机玻璃作慢化材料, 1.1 cm 的慢化体和直径 2.6 cm 的  $^3\text{He}$  管组合达到最大的超热中子探测效率; 根据模拟结果对仪器进行了优化设计并进行实验对比, 实验结果和数值模拟结果吻合, 厚度为 1.1 cm、0.6 cm 的聚乙烯慢化体和  $^3\text{He}$  管组成的探测器探测效率比厚度 0.6 cm 的有机玻璃慢化体组成的探测器分别高 66.55% 和 33.94%。

## 参考文献

- 刘应都, 张国强, 王宏伟, 等.  $^3\text{He}$  正比计数器探测效率模拟及灵敏度刻度[J]. 核技术, 2012, 35(3): 175-178  
LIU Yingdu, ZHANG Guoqiang, WANG Hongwei, *et al.* Simulation of detection efficiency for a  $^3\text{He}$  proportional counter and its sensitivity calibration[J]. Nuclear Techniques, 2012, 35(3): 175-178
- Briesmeister J F. MCNP-A general Monte Carlo N-particle transport code[R]. Los Alamos National Laboratory, 2000
- 张法邦, 吴清泉. 核反应堆运行物理[M]. 北京: 原子能出版社, 2000: 38-42  
ZHANG Fabang, WU Qingquan. Nuclear reactor operating physics[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2000: 38-42
- Czubek J A. Pulsed neutron method for Uranium well logging[J]. Geophysics, 1972, 37(1): 160-173
- West J, Hallenborg J. Uranium ore body analysis using the DFN technique[C]. SPWLA 19<sup>th</sup> annual logging symposium, 1978
- 张锋, 徐建平, 胡玲妹, 等. PNN 测井方法的蒙特卡罗模拟结果研究[J]. 地球物理学报, 2007, 50(6): 1924-1930  
ZHANG Feng, XU Jianping, HU Lingmei, *et al.* Monte Carlo simulation result for the pulsed neutron-neutron logging method[J]. Chinese J Geophys, 2007, 50(6): 1924-1930
- 黄隆基. 放射性测井原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996: 136-158  
HUANG Longji. Nuclear logging principle[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996: 136-158

- 8 张锋, 王新光. 脉冲中子全能谱测井闪烁探测器响应特性的蒙特卡罗模拟[J]. 原子能科学技术, 2009, 43(1): 90–96  
ZHANG Feng, WANG Xinguang. Monte-Carlo simulation for response characteristic of scintillator detector in pulsed neutron whole energy spectrum logging[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2009, 43(1): 90–96

## Optimization study of epithermal neutron detector in prompt fission neutron uranium logging

WANG Xinguang LIU Dan WANG Guobao

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**Abstract Background:** Prompt fission neutron uranium logging is a method for uranium exploration. Pulsed neutron source and epithermal neutron detector are used to detect the prompt epithermal neutron from the fission of thermal neutron and  $^{235}\text{U}$ . **Purpose:** The efficiency of epithermal neutron detector of the logging instrument need to be improved. **Methods:** The energy distribution of fission neutron detected by the epithermal neutron detector, as well as the detection efficiency of epithermal neutron detector with different sizes of moderator are studied by Monte Carlo simulation. **Results:** Under the studied conditions, the optimal sizes of neutron moderating material and neutron detector are obtained, which is the combination of 0.5-mm thick cadmium, 1.1-cm thick polyethylene and 2.6-cm diameter  $^3\text{He}$  tube. **Conclusions:** In the space with outer diameter of 4.8 cm, the maximum of the epithermal neutron detection efficiency was achieved by combination of a 1.1-cm thick tube and a 2.6-cm diameter  $^3\text{He}$  moderator when using polyethylene or organic glass as the moderator material.

**Key words** Epithermal neutron detector, Uranium logging, Prompt fission neutron, Monte Carlo simulation, Detection efficiency

**CLC** TL816<sup>+</sup>.3