

## 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

张 锋<sup>1</sup>, 靳秀云<sup>2</sup>, 侯 爽<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学(华东) 地球资源与信息学院, 山东 青岛 266555;

2. 中石化胜利油田 东辛采油厂, 山东 东营 257094)

**摘要:** 利用蒙特卡罗方法模拟研究了 D-T 脉冲中子发生器和<sup>241</sup>Am-Be 中子源产生的中子与地层的作用过程, 以探讨 D-T 脉冲中子发生器在随钻中子孔隙度测井中的应用价值。模拟结果显示, 使用这两种中子源, 热中子计数均随源距增加而呈指数下降; 孔隙度较小时, 两者的计数差异较小, 当地层孔隙度达到 40% 时, D-T 脉冲中子发生器产生的热中子和超热中子计数均比<sup>241</sup>Am-Be 中子源高很多, 其分布范围也更宽, 近探测器的源距选择 20~30 cm, 远探测器的源距选择约 60~70 cm; D-T 脉冲中子发生器用于中子孔隙度测井时对地层孔隙度的灵敏度降低, 而相同源距条件下探测深度几乎不变。以上结果提示, 利用 D-T 脉冲中子发生器可以进行补偿中子孔隙度测井, 在增加源距的同时既可以保证计数统计性, 又可以提高灵敏度和探测深度, 在随钻测井仪器设计中可以取代<sup>241</sup>Am-Be 中子源。

**关键词:** D-T 脉冲中子发生器; <sup>241</sup>Am-Be 中子源; 随钻测井; 中子孔隙度测井; 蒙特卡罗模拟

**中图分类号:** P631.8; TL816 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7512(2010)01-0015-07

## Monte Carlo Simulation on Compensated Neutron Porosity Logging in LWD With D-T Pulsed Neutron Generator

ZHANG Feng<sup>1</sup>, JIN Xiu-yun<sup>2</sup>, HOU Shuang<sup>1</sup>

(1. Faculty of Geo-resources and Information, China University of Petroleum,  
Qingdao 266555, China;

2. Dongxin Oil Recovery Plant, SINOPEC Shengli Oil Field Company, Dongying 257094, China)

**Abstract:** The process of neutron interaction induced by D-T pulsed neutron generator and <sup>241</sup>Am-Be source was simulated by using Monte Carlo method. It is concluded that the thermal neutron count descend exponentially as the spacing increasing. The smaller porosity was, the smaller the differences between the two sources were. When the porosity reached 40%, the ratio of thermal neutron count generated by D-T pulsed neutron source was much larger than that generated by <sup>241</sup>Am-Be neutron source, and its distribution range was wider. The near spacing selected was 20-30 cm, and that of far spacing was about 60-70 cm.

The detection depth by using D-T pulsed neutron source was almost unchanged under condition of the same spacing, and the sensitivity of measurement to the formation porosity decreases. The results showed that it can not only guarantee the statistic of count, but also improve detection sensitivity and depth at the same time of increasing spacing. Therefore,  $^{241}\text{Am-Be}$  neutron source can be replaced by D-T neutron tube in LWD tool.

**Key words:** D-T pulsed neutron generator;  $^{241}\text{Am-Be}$  neutron source; LWD; compensated neutron porosity; Monte Carlo simulation

过去的 20 年中,随钻核测井中普遍采用放射性化学源。从第一代随钻核测井仪中的补偿密度中子孔隙度测井(CDN)到第二代的方位密度中子孔隙度测井(AND)都采用同位素中子源<sup>[1-2]</sup>。目前,补偿中子孔隙度测井仍采用电缆测井时所用的 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源和两个 $^3\text{He}$ 管中子探测器,它们是通过记录两个探测器的热中子计数比获取中子孔隙度<sup>[3]</sup>。同位素中子源会对操作人员造成人体辐射,在随钻测井过程中利用放射源比在电缆测井中具有更大的风险,利用脉冲中子发生器代替化学源,既可以减小辐射风险,又可以增加岩石物理测量的可靠性。脉冲中子发生器的无源中子测量在裸眼井测量中已应用了近 50 年,主要用于碳氧比能谱测井和中子寿命测井。已有的应用和研究结果均表明,无论是电缆测井还是随钻测井,采用脉冲中子发生器是未来测井发展的方向<sup>[4]</sup>。考虑到辐射安全以及其他参数参量,斯伦贝谢公司 2005 年开始研究在随钻过程中利用 D-T 脉冲中子发生器进行补偿热中子孔隙度测井<sup>[5-7]</sup>。国内还未见到相关的研究成果。本工作拟利用蒙特卡罗(Monte Carlo, MC)方法模拟中子与地层物质的作用过程,对比研究随钻过程中 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源和 D-T 脉冲中子发生器的补偿中子孔隙度测井的响应特性,为实现国产的随钻测井仪器选用中子源提供理论依据。

## 1 D-T 脉冲中子发生器和 Am-Be 中子源的中子特性

D-T 脉冲中子发生器产生中子的核反应为<sup>[8-9]</sup>:  $\text{d} + {}^3\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + \text{n}$ 。其产生的快中子能量为 14 MeV,中子产额可以达到  $10^8/\text{s}$ ,已经在电缆测井中得到广泛应用。而电缆测井中的补偿中子孔隙度测井仪采用的 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源活度为 0.666 TBq(18 Ci),平均中子能量为 4.2~5 MeV,中子发射率为  $(2.22 \sim 2.74) \times 10^{-4}/$

$(\text{s} \cdot \text{Bq})$ ,是中子测井中常用的中子源,实际测井时常用 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源的中子产额约为  $4 \times 10^7/\text{s}$ 。

由于 D-T 脉冲中子发生器比 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源产生的中子能量高,进入地层的减速长度大,热中子在地层中的分布范围更宽;另外从中子产额来看,D-T 脉冲中子发生器比 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源高 1~2 个数量级,在增加源距的条件下既可以保证探测的热中子计数率统计性,又可以提高随钻补偿中子孔隙度测井的探测深度,因此从计数统计性和探测深度方面看,在随钻测井中利用 D-T 脉冲中子发生器替代 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源是可行的。

## 2 随钻中子孔隙度测井的蒙特卡罗模拟

### 2.1 蒙特卡罗模拟方法及计算模型

#### 2.1.1 蒙特卡罗模拟方法

蒙特卡罗方法,又称随机抽样技巧或统计实验方法。该方法是建立一个概率模型或随机过程,通过逐一模拟和记录单个粒子的历程来计算所求参数的统计特征,给出所求解的近似值。MCNP 程序是用来模拟中子和光子联合运输过程,通过逐一记录单个粒子的历程,对中子或光子与原子核发生碰撞时的位置、能量、运动方向、反应类型、源分布等多方面进行抽样,其平均结果反映中子和光子在物质中的运输<sup>[10]</sup>。

利用 MCNP-4C<sup>[11]</sup>程序对 D-T 脉冲中子发生器产生的快中子与地层元素原子核的作用过程进行模拟,分别记录不同探测器位置处的热中子。为了研究问题的方便,本研究过程不考虑 $^3\text{He}$ 管探测器的响应特性;模拟过程中所选取的截面数据为 ENDF/B-VI.0,模拟时追踪的历史中子计数为  $5 \times 10^7$ ,记录的热中子能量范围为 0~0.1 eV,热中子计数为相对一个源中子的计数,计数误差小于 3%,计数时间为 150 min。

### 2.1.2 蒙特卡罗模拟计算模型

利用蒙特卡罗方法建立裸眼井条件下的计算模型, 井眼直径为 20 cm, 井眼内充满淡水; 把地层设为内外半径分别为 10 和 70 cm、高为 147 cm 的圆筒状几何模型, 如图 1 所示。地层分别填充不同岩性和流体物质。把整个地层划分成高 3 cm、环距 2 cm 的相邻栅元, 共有 1 470 个栅元。测井仪直径为 85 mm, 将 D-T 脉冲中子发生器和  $^{241}\text{Am-Be}$  中子源置于仪器下端 25 cm 处。

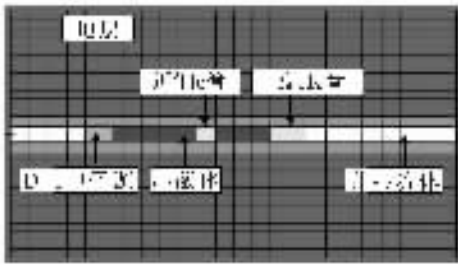


图 1 计算模型

## 3 结果分析

### 3.1 D-T 补偿中子孔隙度测井源距的选择

#### 3.1.1 热中子计数随源距变化的规律

利用图 1 的计算模型, 井眼为水、地层是孔隙度  $\varphi$  分别为 10%、20%、30% 和 40% 的饱和水砂岩。测井仪的结构和尺寸相同, 中子源分别为 D-T 脉冲中子发生器和  $^{241}\text{Am-Be}$  中子源, 记录不同源距  $L$  处的热中子计数  $N$ , 模拟得到热中子计数随源距的变化规律, 结果示于图 2。

从图 2 可以看出, D-T 脉冲中子发生器和  $^{241}\text{Am-Be}$  中子源的热中子计数除与源距有关外, 还与地层的孔隙度有关。源距增大, 两种中

子源的热中子计数都呈指数衰减。地层孔隙度对其的影响表现为: 孔隙度较小时, 两者的计数差异较小, 当地层孔隙度达到 40% 时, D-T 脉冲中子发生器产生的热中子计数比  $^{241}\text{Am-Be}$  中子源高很多。这主要是由于 D-T 脉冲中子发生器产生的中子能量高, 地层孔隙度越大, 中子减速长度和  $^{241}\text{Am-Be}$  中子源差异越大, 其热中子分布范围越宽。在井眼和地层条件下, 利用 D-T 脉冲中子发生器和  $^{241}\text{Am-Be}$  中子源补偿孔隙度测井时零源距相差不大, 大约为 12 cm。

此外, 从图 2 的模拟结果还可以看出, 同一源距处 D-T 脉冲中子发生器记录的热中子计数和  $^{241}\text{Am-Be}$  中子源不同。利用图 2 得到相同地层条件下同一源距处  $^{241}\text{Am-Be}$  中子源和 D-T 脉冲中子发生器的热中子计数比  $N_{\text{Am}}/N_{\text{D}}$ , 其随源距的变化示于图 3。

由图 3 可以看出, 源距小于 30 cm 时,  $^{241}\text{Am-Be}$  中子源热中子计数高于 D-T 脉冲中子发生器, 原因是 D-T 脉冲中子发生器产生的中子能量高, 快中子慢化成热中子走过的路程长, 源距越小的区域慢化的热中子越少; 当源距大于 30 cm 时, 两种中子源产生的中子慢化后热中子的数量与地层的含氢指数有关; 当地层孔隙度较小时, 同一位置处 D-T 脉冲中子发生器产生的热中子数低于  $^{241}\text{Am-Be}$  中子源; 当地层孔隙度较大时, 正好相反, 且地层孔隙度越大, 其热中子计数相差也越大。

在常规地层条件下, D-T 补偿中子孔隙度测井所设计的短源距处热中子计数大约是  $^{241}\text{Am-Be}$  中子源的 90%, 而长源距处的热中子计数可以达到  $^{241}\text{Am-Be}$  中子源的 1 倍多; 再加上中子

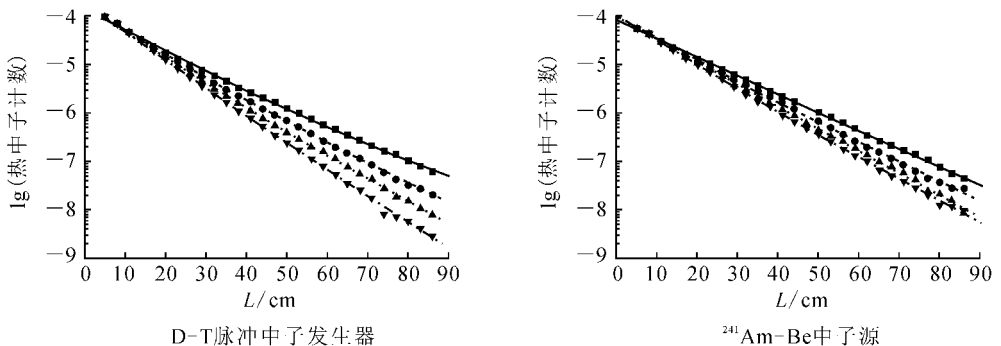


图 2 热中子计数与源距的关系

■—— $\varphi=10\%$ ; ●—— $\varphi=20\%$ ; ▲—— $\varphi=30\%$ ; ▼—— $\varphi=40\%$

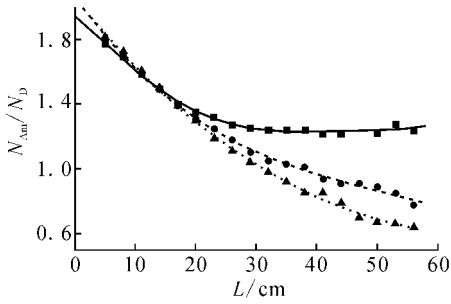


图 3 两种中子源的热中子计数比与源距的关系

■—— $\varphi=10\%$ ；●—— $\varphi=30\%$ ；▲—— $\varphi=40\%$

产额大约是 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源的 3~5 倍,因此从计数统计性来看,可以增加长源距,以便增加随钻 D-T 脉冲中子发生器补偿中子孔隙度测井的探测深度。

### 3.1.2 D-T 中子源距的选择

由于 D-T 脉冲中子发生器产生的热中子分布比中子源范围宽,常规地层条件下可以保证远近探测器的计数统计性,因此选择最佳长源距时,可以通过增加长源距来提高对地层孔隙度测井响应的灵敏度。

考虑实际补偿中子孔隙度测井,在常规地层条件下选取近探测器源距为 20~30 cm,为了选择最佳长源距,固定短源距为 26 cm,且热中子计数为  $N_S$ ,依次增加 3 cm 改变长源距,相应的热中子计数为  $N_L$ ,模拟得到孔隙度分别为 10% 和 40% 含水砂岩地层的近远探测器热中子计数比  $R = N_S/N_L$  及相对孔隙度的动态变化  $(R_2 - R_1)/((\varphi_2 - \varphi_1) \times 100)$ ,结果列于表 1。

从表 1 数据可以看出,短源距一定的条件下,远近探测器热中子计数比随着源距的增加而增大;不同孔隙度地层的热中子计数比差值随源距增加而增大,动态范围增加。因此单纯从孔隙度测井响应来看,长源距越大,对孔隙度的变化越灵敏,长源距选择越远越好。若采用 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源,短、长源距分别选取 26 cm 和 53 cm 时,孔隙度为 40% 和 10%,地层的热中子计数比差值为 21.88,相对孔隙度 10% 地层,计数比的动态变化可以达到 220%,远大于 D-T 脉冲中子发生器的 89.93%,考虑到 D-T 脉冲中子发生器的计数远高于常用的中子源,为提高地层孔隙度的灵敏度,长源距可以相对选择大一些,综合考虑选择在约 60~70 cm。

表 1 源距对热中子计数比及孔隙度响应的影响

| 源距/cm | $\varphi_1=10\%$        |                 | $\varphi_2=40\%$        |                 | $R_2 - R_1$ | $\frac{(R_2 - R_1)}{(\varphi_2 - \varphi_1) \times 100} / \%$ |
|-------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|-------------|---|
|       | $N_L$                   | $R_1 = N_S/N_L$ | $N_L$                   | $R_2 = N_S/N_L$ |             |   |
| 26    | $7.7015 \times 10^{-6}$ | 1.00            | $4.8830 \times 10^{-6}$ | 1.00            | 0.00        | 0.00  |
| 29    | $5.9619 \times 10^{-6}$ | 1.29            | $3.4687 \times 10^{-6}$ | 1.41            | 0.12        | 0.40  |
| 32    | $4.5948 \times 10^{-6}$ | 1.68            | $2.4828 \times 10^{-6}$ | 1.97            | 0.29        | 0.97  |
| 35    | $3.5555 \times 10^{-6}$ | 2.17            | $1.8083 \times 10^{-6}$ | 2.70            | 0.53        | 1.77  |
| 38    | $2.7026 \times 10^{-6}$ | 2.85            | $1.3024 \times 10^{-6}$ | 3.75            | 0.90        | 3.00  |
| 41    | $2.1358 \times 10^{-6}$ | 3.61            | $9.1494 \times 10^{-7}$ | 5.34            | 1.73        | 5.77  |
| 44    | $1.6795 \times 10^{-6}$ | 4.59            | $6.5450 \times 10^{-7}$ | 7.46            | 2.87        | 9.57  |
| 50    | $1.0125 \times 10^{-6}$ | 7.61            | $3.6468 \times 10^{-7}$ | 13.39           | 5.78        | 19.27   |
| 53    | $7.7674 \times 10^{-7}$ | 9.92            | $2.5929 \times 10^{-7}$ | 18.83           | 8.92        | 29.73   |
| 56    | $6.0667 \times 10^{-7}$ | 12.69           | $1.7804 \times 10^{-7}$ | 27.43           | 14.73       | 49.10   |
| 59    | $4.6833 \times 10^{-7}$ | 16.44           | $1.3223 \times 10^{-7}$ | 36.93           | 20.48       | 68.27   |
| 62    | $3.3617 \times 10^{-7}$ | 22.91           | $1.0132 \times 10^{-7}$ | 48.19           | 25.28       | 84.27   |
| 65    | $2.6131 \times 10^{-7}$ | 29.47           | $6.5885 \times 10^{-8}$ | 74.11           | 44.64       | 148.80  |
| 68    | $2.1178 \times 10^{-7}$ | 36.37           | $5.0194 \times 10^{-8}$ | 97.28           | 60.92       | 203.07  |
| 71    | $1.6327 \times 10^{-7}$ | 47.17           | $3.8445 \times 10^{-8}$ | 127.01          | 79.84       | 266.13  |
| 74    | $1.3594 \times 10^{-7}$ | 56.65           | $2.8704 \times 10^{-8}$ | 170.11          | 113.46      | 378.20  |
| 77    | $1.0673 \times 10^{-7}$ | 72.16           | $2.0220 \times 10^{-8}$ | 241.49          | 169.33      | 564.43  |
| 80    | $7.4986 \times 10^{-8}$ | 102.71          | $1.2797 \times 10^{-8}$ | 381.58          | 278.87      | 929.57  |

### 3.2 D-T 补偿中子孔隙度测井响应及灵敏度

3.1.1 中子孔隙度测井响应 利用上面的计算模型,地层孔隙度分别为 5%、8%、10%、12%、15%、18%、20%、23%、25%、28%、30%、32%、35%、38%和 40%,骨架为石灰岩,孔隙度饱和水,分别采用 D-T 脉冲中子发生器和<sup>241</sup>Am-Be 中子源,长短源距分别选取 50 和 22.5 cm,模拟近远探测器处相应的热中子计数,得到近远探测器热中子计数比随孔隙度的变化,结果示于图 4。

根据图 4 数据可以拟合得到<sup>241</sup>Am-Be 中子源和 D-T 脉冲中子发生器相应的近远探测器计数比与孔隙度的响应关系,分别为:

$$R = 5.3899 + 0.3572\phi + 0.0072\phi^2 \quad (1)$$

$$R = 4.5782 + 0.3508\phi - 0.0015\phi^2 \quad (2)$$

(1)、(2)式中, $R$  为近远探测器热中子计数比; $\phi$  为孔隙度(%)。

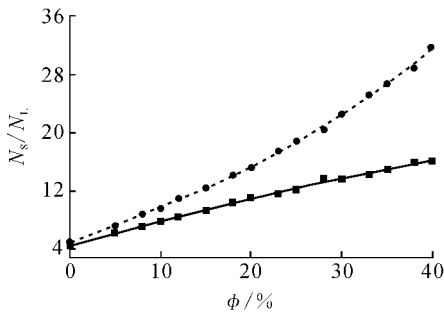


图 4 近远探测器热中子计数绝对比值与孔隙度的关系

■——D-T 脉冲中子发生器; ●——<sup>241</sup>Am-Be 中子源

显然,两种中子源对应的中子孔隙度响应特性相同,近远探测器的热中子计数比都随着孔隙度的增加而增加,但 D-T 脉冲中子发生器对应的热中子计数比变化缓慢,而<sup>241</sup>Am-Be 中子源变化剧烈,即在相同源距条件下,利用 D-T 脉冲中子发生器进行补偿中子孔隙度测井时,近远探测器的计数比随孔隙度的变化小,对地层孔隙度反应的灵敏度降低。

### 3.2.2 中子孔隙度测井的灵敏度

补偿中子孔隙度测井的近远探测器计数比  $R$  和孔隙度  $\phi$  的关系为补偿中子孔隙度测井的响应函数,定义其响应曲线的斜率  $\frac{\partial R}{\partial \phi}$  为孔隙度灵敏度。实际工作中常用相对孔隙度灵敏度  $S$  来表示,其定义为:

$$S = \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial \phi} \quad (3)$$

根据公式(3)及相应数据,分别计算两种中子源时不同孔隙度地层的中子孔隙度测井相对灵敏度,结果列于表 2。

由表 2 可知,在相同的源距下,<sup>241</sup>Am-Be 中子源的近远探测器计数比大,且其孔隙度灵敏度和相对灵敏度都要高于 D-T 脉冲中子发生器;随着地层孔隙度的增加,采用<sup>241</sup>Am-Be 中子源时,孔隙度灵敏度增加,采用 D-T 脉冲中子发生器时则下降,而相对灵敏度都在下降。因此在进行补偿中子孔隙度测井时,在近远探测器的源距相同时,D-T 脉冲中子发生器对地层孔隙度的灵敏度降低。

表 2 两种中子源的孔隙度灵敏度对比

| 孔隙度 $\phi$ / % | $R$                  |        | $\partial R / \partial \phi$ |       | $S / \%$             |      |
|----------------|----------------------|--------|------------------------------|-------|----------------------|------|
|                | <sup>241</sup> Am-Be | D-T    | <sup>241</sup> Am-Be         | D-T   | <sup>241</sup> Am-Be | D-T  |
| 10             | 9.727                | 7.888  | 0.502                        | 0.336 | 5.16                 | 4.26 |
| 20             | 15.238               | 11.151 | 0.646                        | 0.321 | 4.24                 | 2.88 |
| 30             | 22.568               | 13.696 | 0.791                        | 0.306 | 3.51                 | 2.24 |
| 40             | 31.906               | 16.134 | 0.936                        | 0.292 | 2.93                 | 1.81 |

### 3.3 D-T 脉冲中子发生器补偿中子孔隙度测井的探测特性

为了对比两种中子源的中子孔隙度探测深度,建立裸眼井条件下的计算模型,在井眼中充满淡水,地层为饱和水砂岩且孔隙度为 10%,在径向上从井壁开始每隔 2 cm 依次把地层的孔隙

度改变为 40%;仪器尺寸不变,居中测量;中子源分别为 D-T 脉冲中子发生器和<sup>241</sup>Am-Be 中子源;短源距和长源距分别为 22.5 cm 和 50 cm,模拟并得到两种中子源时近远探测器的热中子计数随着孔隙度为 40%地层的径向厚度变化的关系,结果示于图 5。

由图 5 可以看出,两种中子源产生的中子进入不同地层后的热中子计数变化规律略有不同,在短源距处,<sup>241</sup>Am-Be 中子源开始计数很高,随着孔隙度改变地层径向厚度的增加下降很快,达到 20 cm 时几乎不再发生变化,而 D-T 脉冲中子发生器计数比<sup>241</sup>Am-Be 中子源低,达到饱和和径向厚度的值略为增加;长源距处规律和短源距不同,开始<sup>241</sup>Am-Be 中子源的热中子计数高,随着地层孔隙度大的介质径向厚度增加,D-T 脉冲中子发生器对应的热中子计数比<sup>241</sup>Am-Be 中子源大,显然利用 D-T 脉冲中子发生器时,随着地层径向厚度的变化,近远探测器的热中子计数比变化小,对径向厚度的灵敏度降低。

为了对比补偿中子孔隙度测井的探测深度,用模拟结果得到的近远探测器热中子计数比对地层径向厚度变化作图,结果示于图 6。以孔隙

度为 10% 饱含水砂岩地层为基准,对近远探测器热中子计数比随着径向厚度的变化进行归一化,得到两种中子源的探测深度特性关系,结果示于图 7。

从图 6 可以看出,当地层孔隙度较小时,两种中子源得到的热中子计数比相差不大,随着径向厚度的增加,地层孔隙度增大,比值都在增加,但 D-T 脉冲中子发生器对应的近远探测器热中子计数比上升慢,然后达到饱和比。而图 7 显示出两种中子源的探测深度几乎相同,D-T 脉冲中子发生器和<sup>241</sup>Am-Be 中子源的探测深度都约为 25 cm,因探测深度受源距的影响很大,由于 D-T 脉冲中子发生器的中子产额高,可以通过增加长、短源距的方法进行中子孔隙度测井,从而增加其探测深度。

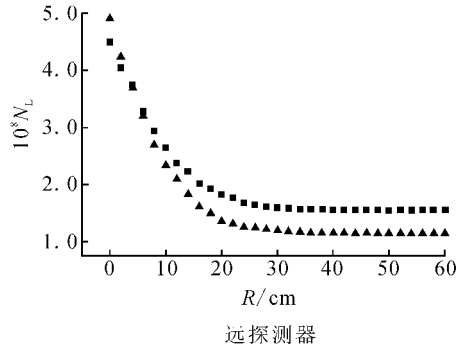
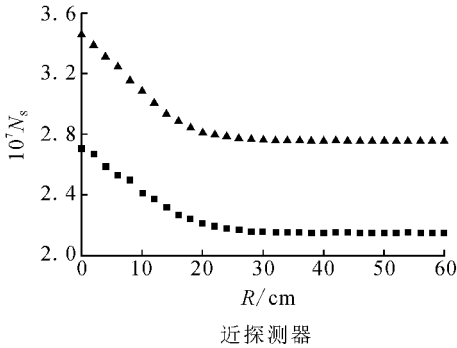


图 5 不同探测器处的热中子计数随孔隙度改变地层径向厚度的变化关系  
▲——<sup>241</sup>Am-Be 中子源; ■——D-T 脉冲中子发生器

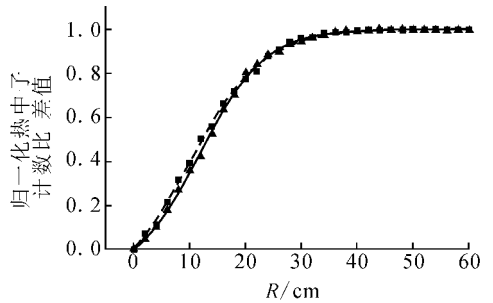
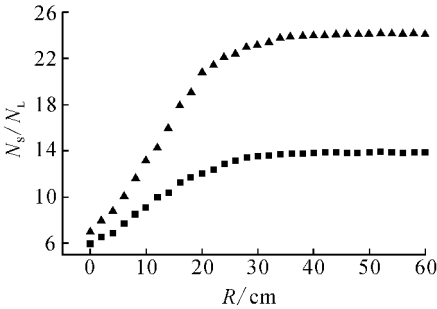


图 6 不同中子源的近远探测器热中子计数比与径向厚度的关系  
▲——<sup>241</sup>Am-Be 中子源;  
■——D-T 脉冲中子发生器

图 7 不同中子源的探测深度  
▲——<sup>241</sup>Am-Be 中子源;  
■——D-T 脉冲中子发生器

## 4 结 论

(1)由于D-T脉冲中子发生器无放射性,且产生的中子能量为14 MeV,中子能量高,中子减速距离大,中子产额可以达到 $10^8/s$ ,探测器计数率高,统计性好,在随钻补偿中子孔隙度测井中可以替代 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源。

(2)热中子计数随源距增加而呈指数衰减,当地层孔隙度较大时,D-T脉冲中子发生器的中子减速长度大,热中子计数比 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源高的多,其分布范围更宽。因此近探测器的源距选择20~30 cm、远探测器的源距选择60~70 cm。

(3)在长、短源距相同的情况下,采用D-T脉冲中子发生器对地层孔隙度灵敏度和相对灵敏度都要降低,而探测深度几乎相同,可以通过增加源距的方法来提高灵敏度和探测深度。

### 参考文献:

- [1] Aitken JD, Holenka JM, Torbett DE, et al. Operational and environmental safety with nuclear LWD tools, SPE27226 [R]. Jakarta, Indonesia: Society of Petroleum Engineers, 2005.
- [2] Labat CP, Doghmi M, Tomlinson JC. Image-dip calculation using new-generation LWD density-porosity tools, SPE74270 [R]. Villahermosa, Mexico: Society of Petroleum Engineers, 2002.
- [3] 黄隆基.核测井原理[M].东营:石油大学出版社, 2000:249-259.
- [4] Aitken JD, Adolph R, Evans M, et al. Radiation sources in drilling tools: comprehensive risk analysis in the design, development and operation of LWD tools, SPE73896 [R]. Kuala Lumpur, Ma-

aysia: Society of Petroleum Engineers, 2002.

- [5] Fricke Scott, Madio DP. Thermal neutron porosity using pulsed-neutron measurements [C]//SPW-LA 49th Annual Symposium. Edinburgh, Scotland: Society of Petrophysicists and Well Log Analysts, 2008.
- [6] Weller G, Griffiths R, Stoller C, et al. A new integrated LWD platform brings next-generation formation evaluation services [C]//SPWLA 46th Annual Symposium. Louisiana, USA: Society of Petrophysicists and Well Log Analysts, 2005.
- [7] Weller G, EI-Halawani T, Tribe I, et al. A new integrated LWD platform delivers improvement drilling efficiency, well placement, and formation evaluation services, SPE96652 [R]. Aberdeen, Scotland: Society of Petroleum Engineers, 2005.
- [8] Atsuhiko Morioka, Satoshi Sato, Masaharu Kinno, et al. Irradiation and penetration tests of boron-doped low activation concrete using 2.45 and 14 MeV neutron sources[J]. Journal of Nuclear Materials, 2004, 329-333: 1 619-1 623.
- [9] Koivunoro H, Bleuel DL, Nastasi U, et al. BNCT dose distribution in liver with epithermal D-D and D-T fusion-based neutron beams[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2004, 61: 853-859.
- [10] 张锋,首祥云,张绚华.碳氧比能谱测井中能谱及探测器响应的数值模拟[J].石油大学学报:自然科学版,2005, 29(2): 34-37.
- [11] Briesmeister JF. MCNPTM-A general Monte Carlo N-particle transport code, Version 4C. Los Alamos National Laboratory Report LA-13709-M [R]. New Mexico: Diagnostics Applications Group, 2000.