

# 中子气泡探测器 用于核测井中子个人剂量监测的研究

邓 君<sup>1</sup>, 岳保荣<sup>1</sup>, 张贵英<sup>2</sup>, 曹 磊<sup>1</sup>, 王 毅<sup>3</sup>, 倪邦发<sup>2</sup>

(1. 中国疾病预防控制中心 辐射防护与核安全医学所, 北京 100088;

2. 中国原子能科学研究院, 北京 102413; 3. CANBERRA 公司北京代表处, 北京 100086)

**摘要:**为研究国产中子气泡探测器在核测井中子个人剂量监测中的适用性,采用国内研制的中子气泡探测器对核测井运源车外表面、车内兼用储源仓周围等关注点的中子辐射水平进行监测,同时采用进口 LB6411 型中子周围剂量当量仪进行比对监测。实验结果表明,当运源车兼用储源仓内仅装载中子源时,中子气泡探测器与 LB6411 的测量结果无显著统计学差异,两者测量结果符合较好,中子气泡探测器的测量结果准确可信;当兼用储源仓分别装载中子源、中子- $\gamma$ 源时,两组中子气泡探测器的测量结果也无显著统计学差异,中子气泡探测器适用于中子- $\gamma$ 混合辐射场中子辐射剂量的测量。中子气泡探测器在运源车现场与在<sup>241</sup>Am-Be源标准中子场中的剂量响应灵敏度因子间的相对偏差为 7.4%,验证了其较好的能量响应特性,并显示了在核测井现场条件下用于中子个人剂量监测的适用性。

**关键词:**中子气泡探测器;核测井;中子个人剂量监测;场刻度

**中图分类号:**TL818.1      **文献标志码:**A      **文章编号:**1000-6931(2010)11-1376-04

## Application of Bubble Neutron Detector to Neutron Personal Dosimeter in Nuclear Well Logging

DENG Jun<sup>1</sup>, YUE Bao-rong<sup>1</sup>, ZHANG Gui-ying<sup>2</sup>, CAO Lei<sup>1</sup>, WANG Dian<sup>3</sup>, NI Bang-fa<sup>2</sup>

(1. National Institute for Radiological Protection, Chinese Center for Disease Control and Prevention, Beijing 100088, China; 2. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;

3. CANBERRA Company Beijing Office, Beijing 100086, China)

**Abstract:** In order to study the feasibility of bubble neutron detector (BND) to neutron personal dosimeter in nuclear well logging, radiation levels at points concerned inside and outside the radiation source vehicle for nuclear well logging were measured by using both domestic BNDs and neutron ambient dose equivalent meter (LB6411). The results show that there are no statistical differences both between the measured data from BND and LB6411 while neutron source loaded in the vehicle alone and between the data from BND at neutron- $\gamma$  source loaded and without  $\gamma$ -source loaded in vehicle, respectively. The BND' dose response performance was calibrated at two field conditions, and the relative deviation between the calibrated sensitivity factors is 7.4%. It is clear that the

BND can be used in measuring neutron radiation in neutron- $\gamma$  mixed field, and the dose response is independent of neutron energy within a certain energy range. And the applicability of BND to neutron personal dose monitoring in nuclear well logging is experimentally validated.

**Key words:** bubble neutron detector; nuclear well logging; neutron personal dose monitoring; field calibration

核测井环境下中子- $\gamma$ 混合辐射场的辐射危害不容忽视<sup>[1]</sup>。监测核测井从业人员的个人辐射剂量,对于保护作业人员的安全与健康有重要意义。本工作采用中国原子能科学研究院研制的中子气泡探测器(BND)对核测井运源车的中子辐射水平进行现场测量,以研究国产BND的性能,并探讨在核测井中应用BND实现中子个人剂量监测的可行性。

## 1 实验

### 1.1 现场辐射场

核测井运源车内兼用储源仓主要装载<sup>241</sup>Am-Be中子源和<sup>137</sup>Cs等<sup>[1]</sup>。视工件规格,可选择不同活度的中子源和 $\gamma$ 源。本实验采用<sup>241</sup>Am-Be中子源( $6.66 \times 10^{11}$  Bq)和<sup>137</sup>Cs源( $5.55 \times 10^{10}$  Bq)各1枚。核测井运源车的辐射场为中子- $\gamma$ 混合辐射场。

### 1.2 测量仪器

#### 1) 中子气泡探测器

由BND能量响应曲线<sup>[2]</sup>可知,在120 keV~15 MeV能区内,探测器的能量响应曲线平坦,产生的气泡数与能量无关。这一特性在理论上可满足核测井源运输中对复杂能谱的中子辐射测量要求。因BND为各向同性探测器,其角响应曲线无明显趋势性变化<sup>[3]</sup>。有关测试结果<sup>[3]</sup>显示,BND的灵敏度最高可达 $4 \mu\text{Sv}^{-1}$ 。

#### 2) 中子周围剂量当量仪

为进行对比,测量中采用中子周围剂量当量率仪LB6411。该仪器经国家计量院<sup>241</sup>Am-Be中子源标准场检定,且处在检定有效期内。

LB6411的相关性能参数列于表1。

### 1.3 辐射水平测量

依据GB Z142—2002<sup>[6]</sup>,对运源车及兼用储源仓的辐射水平进行检测。分别对距运源车外表面、车内兼用储源仓外表面的中子和 $\gamma$ 辐射水平进行测量。

为研究BND的性能及其在中子- $\gamma$ 混合辐射场中的适用性,分别在两种情况下进行测量:1) 运源车仅装载中子源,此时采用BND和LB6411分别测量关注点处的中子剂量水平;2) 装载中子源- $\gamma$ 源,此时分别采用BND、 $\gamma$ 巡测仪测量关注点处的中子和 $\gamma$ 剂量水平。

### 1.4 BND剂量响应曲线

实验所用中子气泡探测器的剂量响应刻度采用<sup>241</sup>Am-Be中子源参考标准场(JL-1,源强 $2.67 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ ,注量-剂量当量平均转换系数为 $4.11 \times 10^{-10} \text{ Sv} \cdot \text{cm}^2$ )。刻度时,将BND紧贴在ICRU标准平板体模(材料为有机玻璃,尺寸为 $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ , $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ 平面垂直于射束轴线)的中心部位,源的几何中心与体模前表面间距离2 m。直接照射BND达到实验要求的个人中子剂量当量值后,目测BND中产生的气泡数目,计算产生气泡数与所接受的照射剂量之比值,得到探测器的探测灵敏度,从而获取在<sup>241</sup>Am-Be中子源参考标准场下的BND剂量响应曲线。

核测井辐射场的中子能谱复杂,个人剂量计的能量依赖性较强,故现场刻度是中子个人剂量计刻度校准的一项重要技术。通过现场刻度技术,利用中子剂量当量的约定真值,在现场

表1 LB6411主要性能参数<sup>[4]</sup>

Table 1 Parameters of LB6411<sup>[4]</sup>

探测器	生产厂家	探测能量范围	量程	能响特性 <sup>[5]</sup>	$\gamma$ 射线响应
<sup>3</sup> He中子计数管	德国 Berthold	热中子~20 MeV	100 nSv/h~100 mSv/h	100 keV~10 MeV内 最大偏差为 $\pm 20\%$	$< 30 \text{ s}^{-1}$ (在 <sup>137</sup> Cs 10 mSv/h场中)

条件或人为的杂散辐射场中实验确定剂量响应刻度曲线。一般情况下,借助于多球或单球参考剂量仪给出。与多球谱仪相比较,单球技术简单、适用<sup>[7]</sup>。在本工作中,将 LB6411 的测量结果转换到个人剂量当量后作为场刻度的约定真值<sup>[8]</sup>,进而对 BND 进行现场刻度。

## 2 测量结果与分析

### 2.1 测量结果

#### 1) 辐射水平

BND 是 ICRP60 号出版物推荐的一种适用于任务相关监测的中子个人剂量计<sup>[9]</sup>,其在标准场中的刻度方法决定了测量结果为个人剂量当量。参考 GB Z/T202—2007《用于中子外照射放射防护的剂量转换系数》内附录 D

表 D.1“ISO 同位素中子源由中子注量到周围剂量当量和用 ICRU 平板作为模体的个人中子剂量当量的转换系数”,<sup>241</sup>Am-Be 中子源周围剂量当量的转换系数  $H^*(10)/\Phi(H^*(10))$  为周围剂量当量,  $\Phi$  为中子注量)为 391,正向零度照射时,个人剂量当量转换系数  $H_p(10)/\Phi(H_p(10))$  为周围剂量当量)为 411<sup>[8]</sup>。所以,对<sup>241</sup>Am-Be 源中子, LB6411 的测量结果修正到个人剂量当量的导出转换系数为 1.05。

运源车及兼用储源仓周围关注点处的中子和  $\gamma$  辐射水平检测结果列于表 2。在表 2 中,已将中子周围剂量当量  $H^*(10)$  转换为个人剂量当量  $H_p(10)$ 。

表 2 运源车及源罐外表面剂量当量率检测结果

Table 2 Radiation level at points concerned inside and outside radiation source vehicle

测量位置	$H_p(10)/(\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1})$						$\gamma$ 巡测仪		
	LB6411			BND					
	单次测量值			均值					
源罐前面	3.6	4.3	4.2	3.9	4.0	4.0	4.36	5.03	3.0
源罐后面	—	4.3	4.1	4.2	3.9	4.0	4.02	4.69	10.8
源罐左面	4.7	5.0	4.7	4.3	5.0	4.7	5.03	4.69	12.3
源罐右面	5.8	4.7	5.4	4.9	5.3	5.2	5.70	6.03	11.6
源车左面	0.7	1.2	1.3	0.9	0.9	1.0	1.34	1.67	1.3
源车右面	1.2	1.9	1.4	1.7	1.6	1.6	1.67	2.01	0.9

#### 2) BND 剂量响应刻度曲线

在<sup>241</sup>Am-Be 中子源参考标准场和核测井运源车辐射场下刻度的 BND 剂量响应曲线示于图 1。在中子源标准场下, BND 的探测灵敏度为  $2.98 \mu\text{Sv}^{-1}$ ; 在核测井辐射场下, 为  $3.20 \mu\text{Sv}^{-1}$ 。两者间相对偏差的绝对值为 7.4%。现场刻度过程中引入的误差主要来自 LB6411 的能量响应、角响应以及 BND 与 LB6411 测量位置的偏差等。该结果与文献[2]给出的 BND 能量响应曲线特性符合较好。

### 2.2 测量结果的统计检验

根据表 2 所列数据,对运源车仅装载中子源下 BND 与 LB6411 的测量结果进行两因素不平衡设计的方差分析。分析时采用计算机统计分析软件 SAS 9.1。经检验,数据组各样本数据独立,来自正态总体,且方差齐性,满足方差分析条件。均取检验水准  $\alpha=0.05$ 。

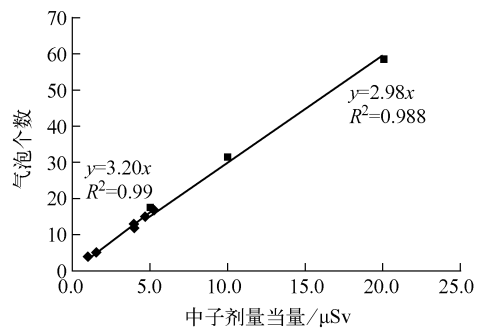


图 1 BND 剂量响应曲线

Fig. 1 Dose response curves of BND

■——<sup>241</sup>Am-Be 参考标准中子场;◆——核测井辐射场

方差分析结果列于表 3。由于两因素交互效应的  $P=0.8423 > 0.05$ ,交互效应不显著,故采用 III 型离均差平方和的统计检验。结果显示,两种仪器的测量结果无显著统计学差异 ( $P=0.0753 > 0.05$ )<sup>[10]</sup>。

同理,将装载中子源或装载中子源与 $\gamma$ 源两种情况下BND的测量结果进行配对样本的 $t$ 检验。经预检验,由数据组导出 $d$ ( $d$ 为只有中子源时测量的气泡探测器测量的结果与中子加 $\gamma$ 源时测量的气泡探测器测量的结果的差)

的正态检验结果为 $W=0.817\ 644, P=0.084\ 2, P<W$ ,说明适用 $t$ 检验。经分析, $t$ 检验结果为统计量 $t=-2.213\ 82, P>0.05$ ,BND<sup>1</sup>与BND<sup>2</sup>的测量结果无显著统计学差异<sup>[10]</sup>,即BND对<sup>137</sup>Cs $\gamma$ 辐射场响应低。

表3 BND与LB6411测量结果的方差分析

Table 3 Variance analysis of results measured by BND and LB6411

变异来源	自由度	离均差平方和(Ⅲ型)	均方值	F	P
仪器	1	0.304 988 83	0.304 988 83	3.47	0.075 3
关注点	5	51.735 577 72	10.347 115 54	117.72	<0.000 1
仪器与关注点的交互作用	5	0.176 723 13	0.035 344 63	0.40	0.842 3

### 3 结论

1) 对中子周围剂量当量率仪的测量结果与采用ICRU平板模刻度的中子气泡探测器的测量结果的方差分析表明,两者无显著统计学差异。中子气泡探测器(BND)用于核测井源运输条件下的中子辐射测量数据准确可信,且可溯源到国家计量标准;通过 $t$ 检验分析表明,在<sup>241</sup>Am-Be中子辐射场、<sup>241</sup>Am-Be和<sup>137</sup>Cs混合辐射场下的测量结果也无显著统计学差异。由于<sup>241</sup>Am-Be中子辐射场也存在一定的 $\gamma$ 辐射,可判定BND对放射性同位素 $\gamma$ 射线的响应低。在核测井条件下,采用BND测量可有效甄别出中子- $\gamma$ 混合场中的中子辐射剂量。

2) BND的能量响应曲线在较宽能区内平坦,探测器体积较小,数据读取方便,并在一定程度上兼具主动式测量和被动累计测量方法的优点,能及时判断(可直观)受到个人中子剂量当量的高低,是较为理想的中子剂量计。考虑到BND的时间衰减特性(每天使用,寿命为4个月<sup>[11]</sup>),BND更适用于个人剂量监测中的任务相关剂量监测,是核测井个人剂量监测工作的有益补充。

### 参考文献:

[1] UNSCEAR. Sources and effects of ionizing radiation, 2000 report volume I: Sources [R]. [S. l.]: [s. n.], 2000.

[2] ING H, NOULTY R A, MCLEAN T D. Bubble detectors: A maturing technology [J]. Radiat Means, 1997, 27(1): 1-11.

[3] 曹磊,胡爱英,张贵英,等. 中子个人剂量监测

[C]//全国个人剂量监测技术研讨会资料汇编.[出版地不详]:[出版者不详],2009.

- [4] Berthold Radiation Measuring Instruments for Industry. Operating manual neutron probe LB 6411 [M]. Germany: Berthold, 1996.
- [5] WINTER M, BECK P, KINDL P, et al. Characterisation of radiation detectors in photon and high energetic particle fields[J/OL]. [2008-12-08]. [http://www.icg.tu-graz.ac.at/Members/winter/IMP\\_publications/1997\\_Characterisation\\_of\\_Radiation\\_Detectors.pdf](http://www.icg.tu-graz.ac.at/Members/winter/IMP_publications/1997_Characterisation_of_Radiation_Detectors.pdf).
- [6] 中华人民共和国卫生部. GB Z142—2002 油(气)田测井用密封型放射源卫生防护标准[S]. 北京:人民卫生出版社,2002.
- [7] 李景云. 中子个人剂量监测[J]. 辐射防护通讯, 1995,12(2):10-17.
- [8] 中华人民共和国卫生部. GB Z/T202—2007 用于中子外照射放射防护的剂量转换系数[S]. 北京:人民卫生出版社,2007.
- [9] 张贵英,倪邦发,吕鹏,等. 自制个人中子气泡探测器特性的批内一致性[J]. 原子能科学技术, 2008,42(6):543-545.
- ZHANG Guiying, NI Bangfa, LÜ Peng, et al. In-batch homogeneity of personal home-made neutron bubble detectors[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2008, 42(6): 543-545 (in Chinese).
- [10] 沈其君. SAS统计分析[M]. 南京:东南大学出版社,2001:34-37.
- [11] VANHAVETE F, LOOS M, THIERENS H. The life span of the BND-PND bubble detector [J]. Radiation Protection Dosimetry, 1999, 85 (124): 27.