

高灵敏中子剂量当量率仪的能量和 剂量响应校准

韩善彪, 刘森林, 袁观俊, 王春红

(中国原子能科学研究院 辐射安全所, 北京 102413)

摘要: 参考国内标准化和国际标准化组织 (ISO) 及国际电工委员会 (IEC) 对中子 (率) 仪校准的相应标准, 对已设计、加工、组装完毕的 1 台长圆柱状、较大体积、高灵敏中子剂量当量率仪, 在宽能区 (热中子~20 MeV) 内进行了能量响应和剂量灵敏度的实验校准。本文介绍了仪器能谱响应函数曲线实验校准方法、实验方案和结果分析, 给出了仪器的综合灵敏度 $48.9 \text{ s}^{-1}/(\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1})$ 及在 3 种特征能谱中的剂量响应。

关键词: 实验校准; 高灵敏度; 校准标准

中图分类号: TL818.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-6931 (2010) S0-0462-05

Calibration of Energy-, Dose-Response for High Sensitivity Neutron Dose Equivalent Rate Meter

HAN Shan-biao, LIU Sen-lin, YUAN Guan-jun, WANG Chun-hong

(Radiation Safety Department, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: Based on the corresponding standards of the National Standardization Organizations, the International Organization for Standardization and the International Electrotechnical Commission for neutron dosimetry calibration, the energy response of a well designed and manufactured neutron dose equivalent meter of high sensitivity which is of cylindrical type and large volume was calibrated on a wide energy range (from thermal energy to 20 MeV). The calibration methods, experimental program results and analysis were mainly introduced, and the comprehensive sensitivity of neutron dose equivalent $48.9 \text{ s}^{-1}/(\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1})$ as well as dose equivalent responses in three characteristic neutron spectrum fields were presented.

Key words: calibration experiment; high sensitivity; calibration standard

中子的探测在核探测技术中占有特殊的地位, 特别是中子剂量的测量受到同行们的广泛关注, 逐渐成为了一专门的应用和研究课题。目前, 在宽能量范围内对中子全能谱测量难度较大, 主要是中子能量范围宽 (跨十几个

数量级), 且常伴随有较强的光子辐射, 剂量-剂量转化系数随能量变化很大等^[1]。因此, 为确保中子辐射防护监测的质量和测量的准确性, 中子仪表的原理和结构设计不仅要符合实际测量的需要, 且仪器的正确和恰当的校准也是至

收稿日期: 2010-05-24; 修回日期: 2010-07-28

基金项目: 中核预研项目 (4160205030309)

作者简介: 韩善彪 (1982—), 男, 山东聊城人, 工程师, 硕士, 环境保护与辐射防护专业

关重要的^[2]，它是明确仪器仪表各性能指标和实现其功能的关键过程。

本文在参考现相关标准^[3-8]的基础上，对已有 HN-1 型中子剂量当量率仪从模拟计算和具体实验操作上进行较精确校准。NH-1 型中子剂量当量率仪是 1 套由 ³He 计数管、慢化体和电子仪表等组成，测量能量范围从热中子到 20 MeV 快中子的长圆柱状高灵敏的中子仪器^[2]，在理论模拟优化的基础上，经过精心的设计、加工、组装、调试，其各部件性能良好，整体测量读数稳定。本文重点结合 NH-1 型中子剂量当量率仪自身的特点，对其在宽能区（热中子~20 MeV）内进行能响曲线和剂量响应的校准实验。

1 实验方法

1.1 校准方法

校准一般有 4 种方法^[4]，本工作采用文献 [4] 中的第 2 种方法（measurements with a monitor for the source output），如图 1 所示。由加速器单能中子源、参考仪器（已校准）、监测器等组成。描述辐射剂量特性的物理量（中子注量率）随时间的变化可用监测器和照射的参考仪器对待校准的仪器进行修正。这一技术通常用于修正交替放置于试验点的校准仪器和参考仪器所受中子辐照的注量率的变化。

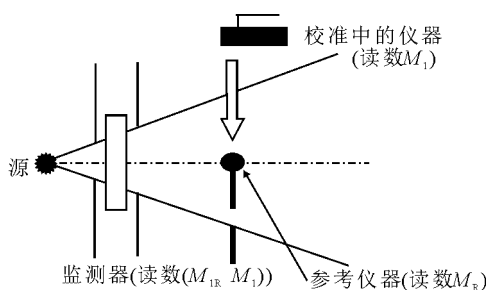


图 1 校准方法

Fig. 1 Calibration method

参考仪器（右下角用 R 标注），在校准证书中给出它的校准因子为 N_R ，则可用适当的剂量当量的转换系数确定参考点的周围剂量当量 $H(10)$ ，参考仪器测量指示值为 M_R ，则：

$$H(10) = kN_R M_R \quad (1)$$

(k 为修正系数)

1.2 校准程序

中子测量装置的校准分 3 步进行：1) 首先按照被校准的剂量仪（计）确定中子的能量和剂量（率）范围，从 ISO 8529 规定的参考中子辐射中选择合适的中子辐射场；2) 将参考仪器和监测器分别放置于参考点和监测点上，按照标准规定确定参考点上辐射场的基本量（中子注量及其能量和角分布）以及应用转换系数所必需的修正，此后，将受校准装置置于参考点上，确定受校准装置的（能量）注量响应 R_0 ；3) 利用注量-剂量当量转换系数确定剂量当量响应 R_H 和校准因子 $M^{[9]}$ 。

2 实验方案和方法

本文中 NH-1 中子剂量当量率仪是一较大体积、长圆柱状、高灵敏的中子仪器，探头尺寸 $\phi 24 \text{ cm} \times 124 \text{ cm}$ ，装置在小车上可自由移动。在校准时，主要考虑实验室是否足够宽敞（空间散射的大小）、实验室设备稳定性与精度以及提供中子辐射能量范围是否满足要求。

2.1 中子辐射场选择

在参考国际标准化组织 ISO 8529 和国家标准 GB/T14055 相关规定，结合本仪器设计要求和国内现有试验条件的基础上。选择如下种子辐射场：1) 加速器中子参考场，由于北京大学重离子加速器可提供宽能区的中子场，首先在北京大学重离子加速器上完成了仪器的能响曲线的相对校准，然后在中国原子能科学研究院放射性计量测试部对其作进一步的绝对校准；2) 同位素中子源选用 ISO 8529 建议的 ²⁵²Cf 同位素中子源；3) 热中子参考辐射场，由于目前国内不能提供此类热中子参考辐射场，仪器的低能响应数据由模拟数据给出。

实验中采用 3 种不同的固体靶（⁷Li 靶、氘靶、氚靶）、4 种不同的核反应单能中子源，选择了 7 个能量点^[10]。实验方案列于表 1。

2.2 实验条件

校准试验中主要用到的设备有粒子束流积分仪、参考仪器、监测仪器、靶、各仪器支架、影锥等。参考仪器和监测仪器采用两套经国防科工委放射性一级计量站校准过的 BF₃ 长计数器，此长计数器从热中子到 5 MeV 的能量区间的探测效率随能量的变化是很平坦的，

表1 实验方案

Table 1 Experimental program

序号	中子能量 ¹⁾ /MeV	测量角度/(°)	核反应	固体靶种类	固体靶厚/(mg·cm ⁻²)	束流能量/MeV
1	0.230	90	⁷ Li(p,n) ⁷ Be	⁷ Li 靶	0.055	2.0
2	0.573 ²⁾	90	⁷ Li(p,n) ⁷ Be	⁷ Li 靶	0.055	2.3
3	1.200	90	T(p,n) ³ He	氘钛靶	0.78	2.0
4	2.213	90/60/30	T(p,n) ³ He	氘钛靶	0.78	3.0
5	5.020	90	D(d,n) ³ He	氘钛靶	0.78	1.8
6	14.80	90	T(d,n) ⁴ He	氘钛靶	0.78	0.11
7	18.00	90	T(d,n) ⁴ He	氘钛靶	0.78	1.8

注: 1) 中子能量经过了靶的厚度修正和空气衰减修正

2) 0.573 MeV 能量点在放射性计量测试部和北京大学重离子所均进行了实验, 其他能量点在北京大学重离子重离子加速器完成实验

其相对偏差不超过 5%~10%。影锥是为该实验而特别设计加工制作的。支架选择结构简单的铁支架, 含氢物质较少, 便于移动、转动, 高度选在实验室天花板和地板中间的位置。选择 3 种靶: ⁷Li 靶 (55 μg·cm⁻²)、氘钛靶 (0.78 mg·cm⁻²)、氘钛靶 (0.78 mg·cm⁻²)。

3 实验安排

3.1 加速器中子场实验

对实验进行如图 2 所示的布局。束流积分仪用来监测加速粒子流的稳定性和束流的准直, 也用于实验数据的归一, 本实验用监测仪器数据进行归一处理。

在实验过程中, 监测仪器放在距离靶 4 m、45°的位置, 影锥前端距离靶 7 cm; 参考仪器和 NH-1 仪在粒子束流直线上, 参考仪器放置在其校准距离 (L_R) 2 m 处, 主要考虑到仪器大小和所受散射的影响原因, 校准实验中在移去参考仪器之后, NH-1 仪放置在距离靶 4 m 处, 因此在计算 NH-1 仪所在处的实际注量时, 进行了 $1/R^2$ 的修正。

实验设备 (监测仪器、参考仪器和 NH-1 仪) 的数据获取系统处在加速器大厅外的实验操作间内, 不受辐射的影响。3 台仪器位置及与墙的距离较远且分布合理, 使其相互所受散射影响较小。

3.2 同位素参考中子场实验

同位素参考中子场实验 (图 3) 在露天空旷地进行, 对探测器剂量响应校准验证。

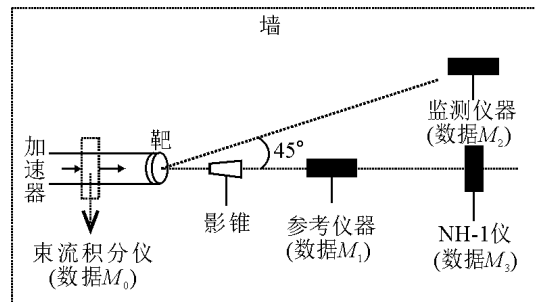


图2 加速器大厅实验布局

Fig. 2 Schedule of experiment in accelerator hall

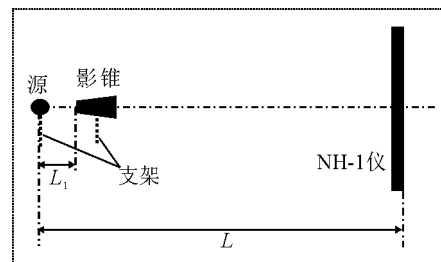


图3 同位素参考中子场实验布局

Fig. 3 Schedule of experiment in reference neutron field

4 实验结果和分析

4.1 加速器实验结果及分析

加速器束流打靶产生的中子能量经过靶厚度、空气衰减修正而得到, 如图 2 所示, 参考仪器读数和 NH-1 型仪器读数通过监测仪器读数归一, 可推算出 NH-1 型仪器所在处实际单位注量率响应为:

$$R_{\phi} = \frac{4 \left[\left(\frac{M_3}{M_2} \right) - \left(\frac{M_3}{M_2} \right)_{\text{加锥}} \right]}{N_R \left[\left(\frac{M_{10}}{M_{20}} \right) - \left(\frac{M_{10}}{M_{20}} \right)_{\text{加锥}} \right]} \quad (2)$$

式中： M_{10} 为参考仪器在实验之前和监测仪器比对时，对参考条件修正之后参考仪器测量计数率； M_{20} 为监测仪器在实验之前和参考仪器比对时，修正到校准条件下监测仪器的测量计数率； M_2 为修正到校准条件下监测仪器测量计数率； M_3 为 NH-1 型仪器测量计数率； N_R 为参

考仪器的校准因子（在参考条件下）。

单位剂量当量率响应为：

$$R_H = \frac{R_{\phi}}{f} \quad (3)$$

式中： R_{ϕ} 为 NH-1 型仪器单位注量率的响应； f 为中子注量剂量当量转换系数。

NH-1 仪器实验能响数据和 MCNP4C 程序模拟响应曲线以及 ICRP74 号报告给出的周围剂量当量系数 H^* (10) 曲线比较如图 4 所示。

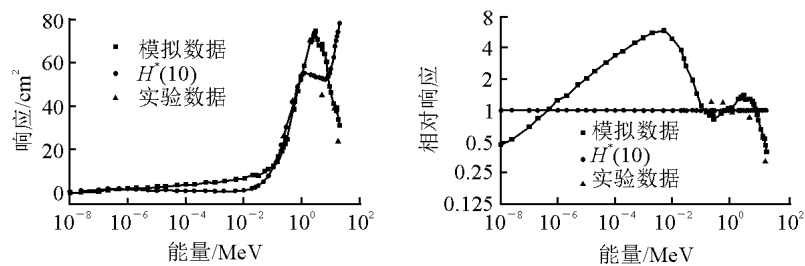


图 4 探测器校准响应曲线、MCNP 计算响应曲线及 H^* (10) 比较

Fig. 4 Comparison of calibration energy response, MCNP calculated response and H^* (10)

综合上图数据可看出：3 条曲线趋势基本一致，但在高能区仪器能注量响应下降较快。

1) MCNP 计算数据在热中子处响应值比理想值偏低约 50%，在中能区间响应值偏高达 5 倍之多，在 0.1~12 MeV 区间响应偏差在 30% 以内，而在 12~20 MeV 之间，响应值偏低达 59%；2) 在实验过程中，14 MeV 以上能量的中子在实验大厅的散射较大，对仪器读数有一定影响；同时， $T(d, n)^4\text{He}$ 反应随着时间推移，将伴随发生 $D(d, n)^3\text{He}$ 反应（特别是对于薄靶），仪器读数将相应地成比例增加，即使通过修正后的仪器响应值也不可避免地偏低。

4.2 同位素源实验结果

按实验安排，在距 ^{252}Cf 同位素中子源不同的位置处对 NH-1 仪进行了灵敏度测量。实验结果与灵敏度理论计算值比较^[2]列于表 2。

4.3 仪器灵敏度的确定

1) NH-1 仪的综合灵敏度

通过实验得知 NH-1 仪在宽能区内的能注量响应曲线，本文将 NH-1 仪器的灵敏度确定

为 $48.9 \text{ s}^{-1} / (\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1})$ 。主要依据为：1) 仪器使用中最关注的能量区间为 0.1~12 MeV，3 条曲线符合较好，相差在 30% 以内。仪器灵敏度用最小平方方法求得；2) NH-1 仪设计用于低剂量的环境中子辐射环境中，天然环境中子能谱在 $10^{-8} \sim 10^{-6} \text{ MeV}$ 和 0.1~10 MeV 有两个峰，其对剂量的主要贡献在 0.1~10 MeV 之间^[11-13]，其中，中子能注量率分布平均权重因子为 $200 \text{ cm}^2\cdot\text{Sv}^{-1}$ ^[11]，此值对应能量点为 0.25 MeV；3) 本探测器与市场上常见中子探测器 LB6411 和 LEAK 能量响应曲线进行了比较，参考了其灵敏度的确定办法。

表 2 理论计算值与实验值比较^[2]

Table 2 Comparison between calculated and experimental values^[2]

数值来源	注量率灵敏度/ (cm^2)	剂量当量率灵敏度/ ($\text{s}^{-1}/(\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1})$)	相对偏差/%
计算	58.8	42.4	28
实验	75.7	54.6	

注：相对偏差 = (实验值 - 计算值) / 计算值 × 100%

2) 特征谱中仪器灵敏度

所有中子剂量(率)计对辐射剂量当量响应都有相对强的能量依赖关系^[4]。因此,在已知 NH-1 仪器能注量响应曲线情况下,可通过计算确定实际工作条件中遇到的特征中子辐射场(已知)下的仪器灵敏度。如镅铍源中子谱^[12]、铀源中子谱^[12]、海平面宇宙射线中子能谱^[13-14]这3种特征谱的形状,各能量点对应注量比例已知,因此,可由下面公式得到各特征谱下的仪器的灵敏度:

$$R_H = \frac{N_{NH-1}}{H^*(10)} = \frac{\int_{10^{-8}}^{20} \phi(E) R(E) dE}{\int_{10^{-8}}^{20} \phi(E) f(E) dE} \quad (4)$$

式中: N_{NH-1} 为 NH-1 型仪器计数率; $H^*(10)$ 为测量点处的周围剂量当量率; $\phi(E)$ 为测量点处的中子能量注量率; $R(E)$ 为 NH-1 型仪器的能量注量响应; $f(E)$ 为中子注量-剂量当量转换系数。

计算得知, NH-1 仪器对镅铍中子源、铀中子源、海平面宇宙射线中子能谱的灵敏度分别为 42.3、42.5 和 34.6 $s^{-1}/(\mu Sv \cdot h^{-1})$ 。

5 结论

NH-1 型中子剂量当量率仪的校准是严格按照有关校准标准进行的。考虑到仪器的几何结构等特点,在实验方法和理论计算上给与了相应的修正,并利用实验和理论计算二者相结合的方法确定了 NH-1 型中子剂量当量率仪在较宽能区(热中子~20 MeV)内的能量响应曲线;在此基础上,综合考虑给出了仪器在宽能区的灵敏度值;同时,计算得出了在3种特征中子谱辐射场(镅铍中子源场、铀源场、海平面宇宙中子射线场)中的仪器灵敏度和校准因子,较好地实现了其现场测量功能。

参考文献:

- [1] 丁大钊, 叶春堂, 赵志祥, 等. 中子物理学——原理、方法与应用[M]. 北京: 原子能出版社, 2005.
 - [2] 魏迎光, 刘森林, 孙莉峰, 等. 一种高灵敏度环境中子剂量当量仪的能量响应计算与实验验证[J]. 核技术, 2007, 30(4): 376-380.
- WEI Yingguang, LIU Senlin, SUN Lifeng, et al.

Calculation and experimental validation of neutron response for a high sensitivity environmental neutron dose equivalent meter[J]. Nuclear Techniques, 2007, 30(4): 376-380(in Chinese).

- [3] ISO. ISO 85291 Reference neutron radiations—Part 1, 2, 3[S]. [S. 1.]: ISO, 2001.
 - [4] IAEA. Calibration of radiation protection monitoring instruments, IAEA Safety reports series No.16[R]. [S. 1.]: IAEA, 2002: 92-108.
 - [5] ISO. ISO 12789 Reference neutron radiations—Characteristics and methods of production of simulated workplace neutron fields [S]. [S. 1.]: ISO, 2002: 23-31.
 - [6] IEC. IEC Standard 1005 Poortable neutron ambient dose equivalent ratemeters for use in radiation protection [S]. [S. 1.]: IAEA, 1990: 9-17.
 - [7] 全国核仪器仪表标准化技术委员会. GB/T 14318—2008 辐射防护仪器——中子周围剂量当量率仪[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 6-9, 17-21.
 - [8] 全国核能标准化技术委员会. GB/T17437-1998 辐射防护用的中子测量仪表的校准及其响应的确定方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998: 8-15.
 - [9] 李景云. 参考中子辐射与辐射防护中子测量装置校准[J]. 辐射防护通讯, 2003, 23(6): 8-23.
- LI Jingyun. Reference neutron radiation and calibration of measuring device for radiation protection purpose[J]. Radiat Prot Bull, 2003, 23(6): 8-23(in Chinese).
- [10] 马鸿昌, 等. 加速器单能中子源常用数据手册[M]. 北京: 原子能出版社, 1976: 7-146.
 - [11] UNSCEAR. 电离辐射源与效应[M]. [出版地不详]: UNSCEAR, 2000: 81-84.
 - [12] ICRP. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation: ICRP publication 74[M]. [S. 1.]: ICRP, 1996: 274-275.
 - [13] GOLDHAGEN P. The energy spectrum of cosmic-ray induced neutrons measured on an airplane over a wide range of altitude and latitude[J]. Radiation Protection Dosimetry, 2004, 110(1-4): 387-392.
 - [14] 李桃生. 空间辐射环境概述[J]. 辐射防护通讯, 2008, 28(2): 1-9.
- LI Taosheng. Brief introduction for space radiation environment[J]. Radiat Prot Bull, 2008, 28(2): 1-9(in Chinese).