

CNIC-00990

CN9600336

BNIF-0008

中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE
AND TECHNOLOGY REPORT

BH3105 型高灵敏中子剂量当量仪

**BH3105 TYPE NEUTRON DOSE EQUIVALENT
METER OF HIGH SENSITIVITY**

(In Chinese)



中国核情报中心
原子能出版社

China Nuclear Information Centre
Atomic Energy Press

VOL. 27 No. 08



汲长松：北京核仪器厂研究员级高级工程师。
1964年毕业于莫斯科工程物理学院物理系。

Ji Changsong; Professor of Beijing Nuclear Instrument Factory. Graduated from The Physics Faculty of Moscow Engineering Physics Institute in 1964.

CNIC-00990

BNIF-0008

BH3105 型高灵敏中子剂量当量仪

汲长松 张恩山 杨剑峰 张 鸿 黄继玲

(北京核仪器厂)

摘 要

考虑到在传统的“吸收筛”设计原理框架内难以设计成高灵敏度中子剂量当量测量仪,研制了一种基于全新的中子剂量生物等效调整原理——“吸收棒”法的 BH3105 高灵敏度中子剂量当量仪。该仪器的灵敏度达 $10 \text{ cps}/(\mu \text{ Sv} \cdot \text{h}^{-1})$,比国外同类仪器高 18~40 倍,比国产 FJ342 型中子雷姆仪高约 10^4 倍。其量程范围为 0.1~1 Sv/h,比同类仪器扩展 1~2 个量级。其它性能,如耐 γ 性能、能量响应及方向性等,皆达到与超过国外同类产品水平。

BH3105 TYPE NEUTRON DOSE EQUIVALENT METER OF HIGH SENSITIVITY

(In Chinese)

Ji Changsong Zhang Enshan Yang Jianfeng Zhang Hong Huang Jiling
(BEIJING NUCLEAR INSTRUMENT FACTORY)

ABSTRACT

It is noted that to design a neutron dose meter of high sensitivity is almost impossible in the frame of traditional designing principle —— "absorption net principle". Based on a newly proposed principle of obtaining neutron dose equivalent biological effect adjustment —— "absorption stick principle", a brand-new neutron dose-equivalent meter with high neutron sensitivity BH3105 has been developed. Its sensitivity reaches $10 \text{ cps}/(\mu \text{ Sv} \cdot \text{h}^{-1})$, which is 18~40 times higher than one of foreign products of the same kind and is 10^4 times higher than that of domestic FJ342 neutron rem-meter. BH3105 has a measurement range from $0.1 \mu \text{ Sv/h}$ to 1 Sv/h which is 1 or 2 orders wider than that of the other's. It has the advanced properties of gamma-resistance, energy response, orientation, etc.

前 言

随着核反应堆、核电站及核潜艇等核设施数量的增长，核武器储量的增大，放射性测井技术的普及，以及中子辐照、中子照相、中子测水技术的发展与广泛应用，对中子剂量测量手段的需求越来越迫切，而变成带有广泛性的一项任务了。

中子射线对人体的危害机理较复杂，中子射线生物效应的能量响应更为复杂，因此，研制在一定中子能量范围内较好地反应中子生物效应的中子剂量当量仪，是一项技术难度很大的课题。

另外，中子剂量当量仪的研制过程中必须依靠核反应堆、静电加速器及高压倍加器等大型实验装置来提供单能中子束，因而研制工作量相当可观，经费开支也相当大。国内外有条件从事这类仪器研制的单位是屈指可数的。

最早研制成功的慢化型中子剂量当量仪，是由 Andersson 等人在 60 年代初期完成的^[1]。探头系圆柱形结构，硼塑料作吸收层，BF₃ 计数管为中子探测器。我国（261 厂）于 70 年代末期研制出 FJ342 型中子雷姆仪，80 年代（401 所）研制成 NH1 型中子剂量当量仪。同时期，英、美、法、日等国也推出多种型号的中子剂量当量仪。研制组收集到 12 种商品中子剂量当量（雷姆）仪资料及实物，其中 FJ342 型与 NH1 型为中国产；NM-2，MK-7 等型号共十种为英、美、法等国家的最新产品。其中甚至包括了国外 80 年代末期的新产品，如日本富士 NS10001，法国 CINN32 型中子剂量当量仪，文献资料一直收集到 1991 年。概括来看，现有的国内外商品中子剂量当量仪的基本原理相同，探头结构大同小异，性能指标相近，主要是借助由慢中子吸收材料制成的“吸收筛”担当中子剂量生物等效的调整器，这类仪器的共同弱点是灵敏度极低。

现有仪器的中子探测器除北京核仪器厂生产的 FJ342 应用杯状 ZnS (Ag) 闪烁体探头之外，其它 11 种产品皆选用 BF₃ 正比计数管或 ³He 正比计数管作中子探测器。

气体探测器的中子探测效率较低。而 ZnS (Ag) 杯中子探测器由于中子谱的连续分布，且低幅度端具多，并因 γ 甄别阈较高之故，中子探测器效率也不理想。

本研制组接受了为我国核潜艇配置高灵敏便携式中子剂量当量仪的研制任务。为了实质性地提高该仪器的中子灵敏度，在分析了现已收集到的 12 种中子剂量当量仪技术性能的基础上，形成了本研制课题的技术方案。

(1) 将不同长度的镉棒插入中子慢化体表层内，使之成为外表层大量吸收热中子；中表层适量吸收热中子及中能中子；内层探测慢化了的快中子、渗进（扩散）的热中子及中能中子的立体化中子能量响应调整体。用此取代传统的网筛式吸收层的调整方法。该措施可望大大减小慢（热）化了的快中子吸收。

(2) 用探测效率极高的 ⁶Li 玻璃闪烁体探测器，取代 BF₃，³He 正比计数管。

由这两条关键技术措施研制成功的 BH3105 型中子剂量当量仪的中子灵敏度、量程范围、能量响应、耐 γ 性能以及方向性响应等主要技术指标皆达到或超过国外同类产品的水平。

1 设计原理

1.1 中子剂量的生物等效

1994年11月发布的国际标准 IEC1322^[6]中,公布了单位中子注量的周围剂量当量值与中子能量的关系。表1列出了这些转换系数值。为了便于设计仪器时进行方案分析,在表中列出了以能量为1 MeV的中子的转换系数为基准(取作1)的转换系数的归一值。我们将它们简并成三个能量组进行归一对比,结果示于表2。

表1 单位中子注量的周围剂量当量值

中子能量 MeV	转换系数 pSv·cm ²	归一系数
2.5 E (-8) (thermal)	13.1	0.03
1.0 E (-6)	16.2	0.037
1.0 E (-5)	14.8	0.03
1.0 E (-4)	11.7	0.03
1.0 E (-3)	9.3	0.021
1.0 E (-2)	13.2	0.03
1.0 E (-1)	116.3	0.26
5.0 E (-1)	367	0.84
1.0	439	1
2.0	470	1.07
5.0	472	1.08
1.0 E (1)	463	1.06
2.0 E (1)	561	1.28

表2 中子注量-周围剂量当量转换系数与归组能量的关系

中子能量/eV	转换系数/pSv·cm ²	归一对比	组别
2.5 E (-2) ~ E (+4)	9.3~16.2	0.03 (0.021~0.037)	T
E (5)	116.3	0.26	S
5 E (5) ~ E (7)	439~472	1 (0.84~1.08)	F

表2列出了不同能量的中子生物等效的探测效率归一对比关系。由表可见,若将探测1.0 MeV中子的探测效率取作1,则10 MeV中子的探测效率在8%的误差范围内也可取作1。而0.1 MeV中子的探测效率应为0.26;热中子应为0.03。这便是本研制工作应达到的简化的能量响应技术指标。为叙述简便,表2列出了三个能组的代号,分别记作T, S与F。

1.2 中子剂量生物等效调整法——吸收棒法

由表2可见,为实现对中子剂量的生物等效要求,即要求仪器的结构能使入射中子到达中心探测器时充分慢化;并大量吸收热中子;适量吸收中能中子;尽可能少地吸收1 MeV以上能量的快中子。因为金属镉(Cd)的热中子俘获截面很大,约为 $3 \times 10^{-25} \text{ m}^2$,而快中子俘获截面又极小。为此,本工作设计了借助镉棒吸收慢中子的原理,进行中子剂量当量调整的吸收棒式中子剂量当量调整器。在中子慢化体内,沿表面层径向插入多根镉棒。镉

棒按长度分为三层，这样的结构使入射中子在到达中心探测器的整个过程中，不断经历慢化或扩散；入射中子的慢（热）中子经历三层吸收；中能中子经历两层吸收；快中子极少可能被吸收的“微分”探测过程。用镉棒实现中子生物等效探测的探头示意结构见图 1。显然，吸收棒除用镉材料外，其他如硼材料也是可取的。

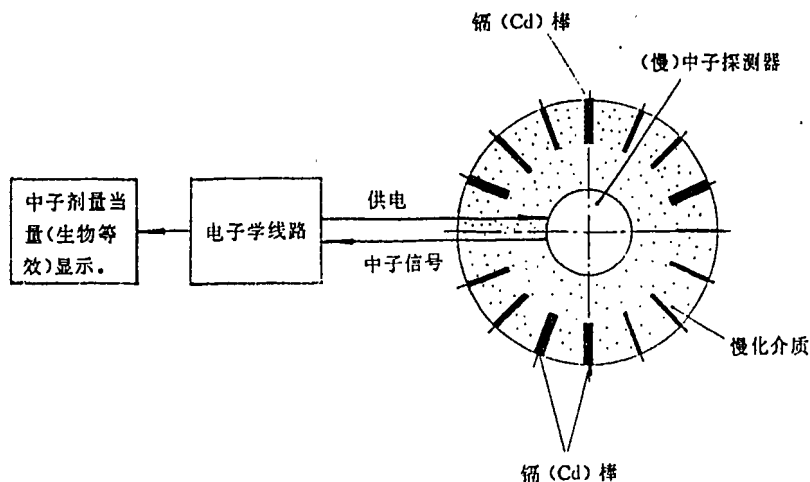


图 1 吸收棒法中子剂量当量调整原理示意

2 仪器设计

2.1 中子慢化体

本设计通过 10 cm 厚度的聚乙烯结构(图 1)以图达到快中子 (>1 MeV)，慢中子 (~ 200 keV)，热中子 (0.025 eV) 组的中子探测效率比近似为 $1 : \sim 0.25 : \sim 0.025$ 的生物等效效果。

BH3105 型中子剂量当量仪慢化体的结构示意见图 2，球面上基本均匀地分布着 98 根镉棒。其中一部分分布在从表面算起 $0 \sim 2.5$ cm 的 A 层；另一部分长棒在 $0 \sim 5.0$ cm 的 A, B 层中。

2.2 中心探测器

本设计选用慢中子探测器。

探测器为球形 ST602 锂玻璃闪烁探头^[3]，光电倍增管为 GDB28。为获得良好的抗 γ 辐射性能，闪烁体的厚度为 1.5 mm，探测器中心是球形有机玻璃光导，结构示意见图 2。

2.3 电子学线路

本设计的电子学线路将探头送来的电信号加以放大、甄别后，借助单片微处理机完成量程自动转换、量程指示、计数率定性显示及测量指示等功能。测量进行过程中，液晶显示实测脉冲计数 (20 s)，然后马上自动转换成以 $\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ (或 $\text{mSv} \cdot \text{h}^{-1}$) 为单位的测量结果。

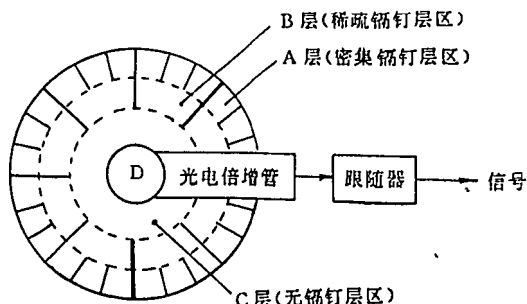


图 2 慢化体结构原理示意图

本设计编制了专用程序控制光电倍增管高压供电。在测量开始前 3 s 产生高压, 仅仅在测量定时时间内保持高压输出。定时终止时程控关闭高压, 单片机掉电, 而保持输出显示。这样的线路降低了待机功耗, 使仪器在典型使用条件 (2~3 次测量/d) 下, 一组 (六节) 2 号干电池的总功耗, 与电池本身的自消耗相比可以忽略。

由于玻璃闪烁探测器在高频计数率 ($\sim 10^6 \text{ s}^{-1}$) 时, 脉冲死时间漏计数严重, 本设计采用软件进行高频补偿修正技术措施, 为使本设计的量程比同类先进技术拓宽 1~2 个数量级起了重要作用。

本设计通过程序, 实现测量过程的前 500 ms 高速元件对输入信号分频, 单片机判别状态。若高计数率, 则分频后单片机采集计数, 略去分频余数; 若低计数率, 则程控到直接计数通道, 从而完成量程自动转换与显示。

本仪器可给出自检, 欠压报警, 信号声响及光指示。

2.4 机械结构

本结构充分考虑了对高温、低温、潮湿、盐雾与霉菌环境的适应性。另外, 还考虑了探头与电子学部分的一体化结构, 耐震, 耐冲击性能, 使本设计成果有较高的商品化水平。

3 仪器原理框图

仪器的原理方框图示于图 3。

4 研制中的核物理实验方法

4.1 中子谱与探测阈

本仪器选用球形含锂玻璃闪烁探测器作为探头的中心探测器。与充气的 BF_3 及 ^3He 正比计数管不同, 玻璃闪烁探测器能给出幅度分辨很好的中子峰。图 4 (a) 示出了 Am-Be 源中子的实验谱。峰分辨率 $R = 13.3\%$; 峰/谷比约 40:1。它没有气体电离计数器中子信号的低幅度连续分布 (壁效应区)。因此, BH3105 玻璃闪烁探头的中子谱, 具有可供选作甄别阈的广阔的“谷区”。其积分计数相对仪器工作参数 (高压, 放大倍数, 阈值等) 漂移而导致的谱漂移来说, 是非常稳定的实验参数。

实验给出, 不同能量的中子谱的形状与参数相同。甄别阈的选取主要依据对 γ 辐射甄别水平的要求。

4.2 γ 谱及耐 γ 特性

玻璃闪烁体对 γ 射线的探测, 是闪烁体厚度, γ 射线能量, 入射方向及探测几何的函数。

据 IEC1005 (1990-09) 国际标准的规定^[2], 选用 ^{137}Cs γ 射线作为判定中子剂量当量仪耐 γ 特性 (或 γ 灵敏度) 的参考辐射。

图 4 示出了用 BH3105 型中子剂量当量仪样机探头所测定的中子谱及中子与 ^{137}Cs 的 $n+\gamma$ 谱。 γ 吸收剂量率约为 10 mGy/h。由图可见, BH3105 样机已具备了极好的 $n-\gamma$ 甄别特性。谱上给出, 当中子计数阈选在谷区时, 仪器已基本上对 γ 射线不灵敏。

4.3 中子辐射源

(1) Am-Be 中子源 中子发射率: 1.05×10^7 中子 $\cdot \text{s}^{-1}$ 。当用作中子源时, 源与测量点间不加慢化介质, 测量仪器周围 1.5 m 范围内无明显的散射物体 (包括实验室墙壁)。中子注量率通过几何条件算出。

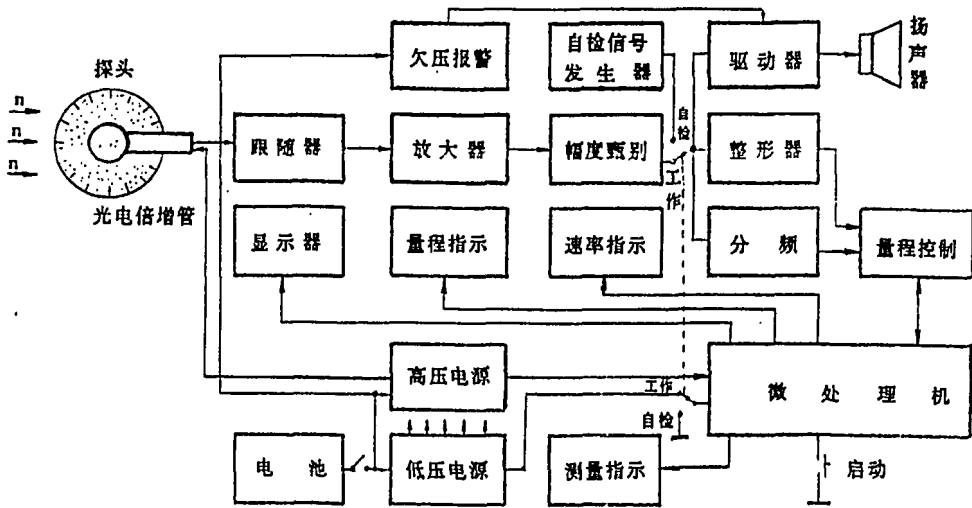


图3 BH3105型中子剂量当量仪框图

当用作慢化中子源时,直接用20 cm厚的聚乙烯材料将中子源围起。测量点的中子剂量当量率,用英国NE公司生产的NM-2中子雷姆仪测定。

(2) 热中子源 反应堆热柱。

(3) 静电加速器中子源

用 ${}^6\text{Li}(p, n)$ 反应获取 $E_n = 215 \text{ keV}$ 单能中子束;

${}^3\text{H}(p, n)$ 反应获取 $E_n = 0.985 \text{ MeV}$ 单能中子束;

${}^2\text{H}(d, n)$ 反应获取 $E_n = 4.44 \text{ MeV}$ 单能中子束。

(4) 高压倍加器中子源

用 ${}^3\text{H}(d, n)$ 反应获取 $E_n = 14.5 \text{ MeV}$ 单能中子束。

用加速器获得单能中子束时,以同步的方式用精密长中子计数器进行中子注量率测定。

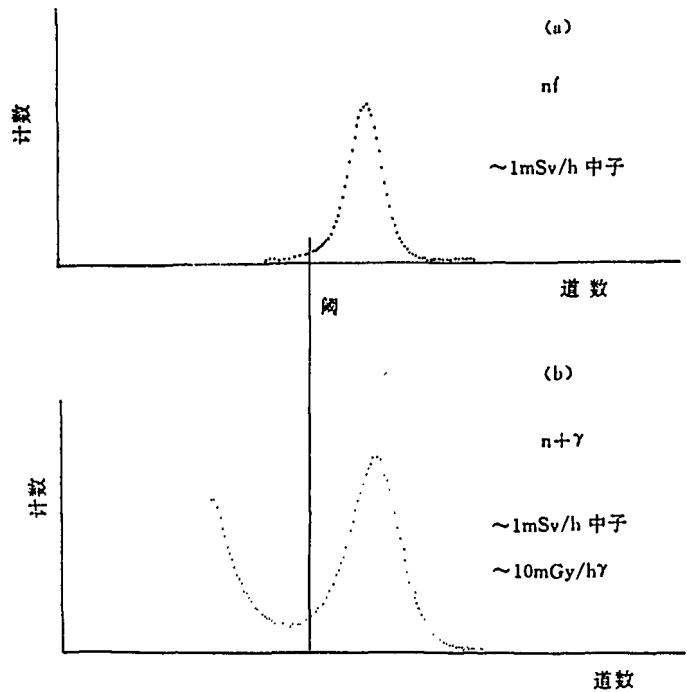


图4 5号样机 $\sim 1\text{mSv/h}$ 中子及 10 mGy/h γ 脉冲幅度微分谱

5 技术指标

5.1 中子灵敏度

提高中子剂量当量仪的中子灵敏度,是本职工作最主要的任务。采取措施有两条:一是采用新的“吸收棒法”进行中子能量响应特性调整,取代传统的“吸收筛法”;二是采用探

测器效率高的⁶Li玻璃闪烁探头, 取代BF₃, ³He气体探测器, 及ZnS闪烁探头。由于吸收棒的长度及分布取决于中子能量响应特性而不是灵敏度的要求。本节不作讨论。

中子剂量当量仪的灵敏度, 通常取单位中子剂量率(如 $\mu\text{Sv/h}$), 对应的单位时间脉冲计数(如每秒计数, cps)表征。本工作也采用通用的每 $\mu\text{Sv/h}$ 的计数 s^{-1} 来表征。

当中子辐射场、慢化条件及探测器几何不变时, 探测器的中子探测效率是玻璃闪烁体厚度的函数, 并受闪烁体面积大小的制约。本工作用厚度为3 mm, 1.8 mm, 1.5 mm的玻璃闪烁体, 以及闪烁体面积比为1.9, 1.4及1时的探头, 对灵敏度进行了测定, 其结果列于表3。出于获得较好的耐 γ 特性考虑, BH3105剂量当量仪选定第五行的结构与数据。即, BH3105型中子剂量当量仪的中子灵敏度为 $10\text{ cps}/\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ 。本仪器的测量时间为20 s, 所以相应的计数-剂量当量系数 $\eta = 200\text{ 计数}/\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ (20 s)。

表3 灵敏度实验表

No	闪烁体厚 mm	闪烁体面积 (相对单位)	热中子孔道 计数 测量时间 100 s	计数-剂量当量系数 η 计数/ $(\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1})$ 仪器的测量时间 20 s [*]	灵敏度 $\text{cps}/\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$
1	3.0	1.9	3929	541	27.1
2	1.8	1.9	3012	416	20.8
3	1.8	1.4	2486	343	17.2
4	1.8	1	1925	266	13.3
5	1.5	1	1449	200	10.0

* 对一确定(选定)的辐棒分布;

** 剂量当量值由英国NM-2中子雷姆计测出。

5.2 γ 辐射灵敏度

正如中子探测时n- γ 甄别特性一样, 中子剂量仪表耐 γ 辐射的性能是其核性能的重要标志之一。长期以来, 关于如何衡量中子剂量当量仪的耐 γ 性能, 或如何给出耐 γ 辐射的技术指标, 一直没有统一的标准。因而, 出现了很多不太科学的表示方法。如有的仅提将 γ 辐射压低若干倍; 有的给出能耐多大 γ 照射量率; 有的提 γ 导致的中子剂量当量的误差多大; 有的产品简介甚至给出在多强的 γ 照射量条件下, 仪器“无响应!”。从中看不出仪器的耐 γ 辐射特性的水平。

研制方案实施过程中, 由于获得了极高的中子灵敏度指标, 因此, 本研制组对于仪器的耐 γ 性能指标给予特殊的注意。首先在耐 γ 性能的评价上, 选定了IEC1005 (1990~09)最新国际标准中所规定的评价方法。其次, 为了使仪器的耐 γ 水平达到国内外先进水平, 曾适当牺牲了部分中子灵敏度指标。具体说来, 研制组选取玻璃闪烁体膜(1.5 mm)这种超薄闪烁体作为中子灵敏物质, 大大降低了其 γ 灵敏度。据文献报道, 在商品仪器中采用这样薄的闪烁玻璃, 在国内外尚属首次。在制作工艺上也有了新的进展。另外, 适当减小了闪烁体的面积, 减少 γ 射线两次或更多次穿过闪烁体的事件数, 对提高仪器的耐 γ 性能有实际的贡献。

IEC1005国际标准规定, 用¹³⁷Cs γ 源, 吸收剂量率为 10 mGy/h 时, 仪器的中子剂量当量率指示应不大于 0.1 mSv/h 。即 γ 辐射抑制倍数不小于 $100:1$ 。同时, 标准还规定, 此 γ 场对 1 mSv/h 的中子场导致的误差应不大于 $\pm 10\%$ 。

为此,研制组选用 4.44×10^8 Bq (12 mCi) 的 ^{137}Cs γ 源,发射率为 1.05×10^7 中子 \cdot s $^{-1}$ 的 Am-Be 中子源进行了耐 γ 性能实验。图 4 示出了用 No5 样机对 ~ 1 mSv/h 中子 (a), 10 mGy/h ^{137}Cs γ (b) 测试所得之脉冲幅度谱。由图已直观地看出本仪器的良好耐 γ 特性。实验结果及数据列于表 4。为了便于分析,同时将灵敏度稍有差异的 4 号样机数据列出。由表可见,4 号与 5 号样机的 γ 抑制倍数分别为 4600:1 与 1260:1。皆远远优于 IEC1005 国际标准规定的指标 (100:1)。同时,其对 1 mSv/h 量级的中子示值造成的误差分别为 -5.7% 及 -5.8% ,皆低于标准规定的指标 ($< \pm 10\%$)。

表 4 γ 灵敏度实验值

指 标	4 号样机	5 号样机
中子剂量当量率 mSv/h	0.84 (167, 643/20 s)	0.73 (145, 720/20 s)
10 mGy/h γ 时示值 μ Sv/h	2.1 (416/20 s)	8.0 (1603/20 s)
γ 抑制倍数	4600:1	1260:1
10 mGy/h γ 场 对中子示值的影响 mSv/h	0.79 (158, 078/20 s)	0.69 (137, 278/20 s)
γ 干扰误差/%	-5.7	-5.8

注:括号内为 20 s 计数。

5.3 能量响应

作为中子周围剂量当量测定仪器,在规定的中子能量区间内,能量响应(即固有误差)性能必须满足要求或规定。本研制组把达到这一性能要求作为第一指标。虽然通常不把仪器的能量响应性能视作衡量仪器核性能的关键指标,但是,它却是任何一种中子剂量当量仪必须具备的特性。

实际上,本研制组设计的,取代“吸收筛”法的“镭吸收棒”法能否成功,就要看本研制仪器的能量响应性能是否合乎规定。

在前述的设计思想指导下,研制组对吸收棒(镭棒)按球面的分布、吸收棒长度及插入深度进行了近十种方案的试验。最后在实验室 Am-Be 中子源无慢化、适当慢化与充分慢化三个能量点上,以英国 NM-2 中子雷姆计为参照仪器(考虑到其固有误差)确定了现 BH3105 型中子剂量当量仪的“镭吸收棒”法探头的几何结构。经加速器单能中子束的验证,能量响应特性完全达到现国内外同类仪器的水平,符合 ICRP “2 因子区间”的推荐规定。

$E_n = 215$ keV 时,固有误差为 $+72.5\%$ 与 $+75.7\%$ (两台样机)。

$E_n = 0.985$ MeV 时,固有误差为 -25.2% 与 -19.3% 。

$E_n = 4.44$ MeV 时,固有误差为 -46.5% 与 -43.7% 。

上述实验的能量的固有误差走向与 NM-2 基本一致,且皆满足“2 因子区间”规定。

另外,用 Am-Be 快中子进行 $E_n = 4.4$ MeV 中子能响实验,给出了与加速器单能 ($E_n = 4.44$ MeV) 中子,长计数器监测中子注量率相吻合的结果 (-43.5% 及 -43.7%)。Am-Be 源 NM-2 直接监测中子剂量,加速器中子源与长计数器系间接监测中子剂量,这两组无关实验给出固有误差相近的结果表明,实验结果有较高的可信性。结果又直接说明, BH3105 与 NM-2 在实验点 $E_n = 4.44$ MeV 具有相近的能响特性。

对于 $E_n = 14.5 \text{ MeV}$ 实验点, 由于快中子不能充分慢化, 探测器效率低, 因而便携式中子剂量当量仪固有误差为负, 且皆超过 -50% “2 因子区间”。通常国际上给出允许下降或不超过四倍的约定标准。本研制成果 14.5 MeV 固有误差为 $-(72\sim77)\%$ (即约下降 $3.6\sim3.7$ 倍) 符合约定俗成的要求。

能响实验结果表明, BH3105 中子剂量当量仪具有与英国 NM-2 同水平的能响特性; 两台实验样机具有较理想的一致性能响性能。进而, 该项实验结果证实了“镉吸收棒”法设计方案的成功。

值得指出的是, 本研制过程中能响性能的调整处于可控状态下, 即根据前次实验结果可“微分式”地改善局部能响性能, 因而大大缩短了能响调整周期, 使加速器、反应堆实验经两轮便取得了上述初步满意的结果。

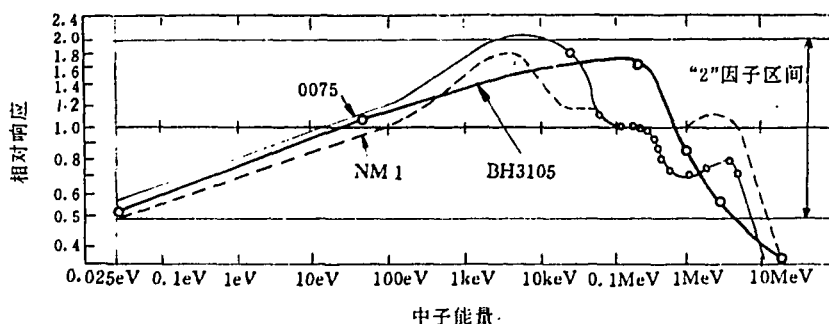


图 5 BH3105 能响性能曲线

为了更直观地反映出能响对比特性, 在图 5, 借助英国 NM-2 中子雷姆计能响曲线, 直接用实点标上了本研制成果的固有误差。由图可见, 其能响性能极为相似。

5.4 方向响应

按 IEC1005 国际标准的规定, 中子剂量当量仪在以中轴线为基准的 0° 至 90° 之间的范围内, 角响应偏差应小于 $\pm 25\%$, 而 90° 至 180° 间的角响应偏差不作规定, 而由生产厂家给出。

本设计尽量采用球对称机械结构, 取得了较理想的角 (方向) 响应性能。

用点 Am-Be 中子源, 对方向响应每隔 30° 进行一次测试, 结果列于表 5。

由表可见, BH3105 中子剂量当量仪, 在 0° 至 90° 间值最大偏差仅为 -6.6% , 远小于 IEC 标准 $\pm 25\%$ 的规定。而 180° 时, 偏差也仅为 26.9% 。

5.5 重复性误差

重复性误差小, 是包括中子剂量当量仪在内的各种测量仪器的重要的技术指标之一。本成果所拥有的高灵敏度为仪器的好重复性提供了先决条件。玻璃闪烁体的发光衰减时间很短 ($\sim 80 \text{ ns}$); 中子峰的分辨好; 很高的中子脉冲幅度谱峰/谷比, 以及电子学线路中一些温度性能稳定措施等, 使本成果具有很好的测量重复性。

表 5 BH3105 方向响应实验

角 度	测量值/ $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$				误差/%	IEC 标准/%
	№1	№2	№3	平均		
0°	24.2	24.0	24.3	24.2	基准	基准
30°	23.6	23.9	24.1	23.9	-1.2	<±25
60°	23.4	23.4	23.2	23.3	-3.7	
90°	22.5	22.7	22.6	22.6	-6.6	
120°	22.8	22.7	22.8	22.8	-5.8	不规定
150°	20.9	20.9	20.6	20.8	-14.0	
180°	17.7	17.6	17.7	17.7	-26.9	

经过对 $10\ \mu\text{Sv}/\text{h}$ 中子剂量当量率的场合的测定,重复性误差为 $\pm 5\%$ 。而此情况下,以 20 s 测量计数为例,国外仪器的测量结果,仅统计误差一项已达 14% *。所以 BH3105 中子剂量当量仪具有重复测量结果一致性好的特点。

5.6 测量范围

剂量仪器的测量范围是另一个重要的实用技术指标。一般国内外现有的中子剂量当量仪的测量范围为 4 至 5 个数量级。

研制组考虑到该类仪器主要工作于小剂量(如此限值低一个量级, $\sim 2.4\ \mu\text{Sv}/\text{h}$) 场合,因此,仪器的高灵敏技术指标是诱人的。然而,高量程技术指标也不能放弃。经过简单的估算,选择锂玻璃闪烁探头作为中子探测器。

测量范围的上限至少比国内外现有商品中子剂量当量仪高 2 个量级。

至于测量下限,实际值为 $0.1\ \mu\text{Sv}/\text{h}$ 。该值相当于一般自然 γ 的环境剂量当量率水准。采用了单片机控制,使测量结果自动换档而无须人工拨动旋钮选取。显示单位取 $\mu\text{Sv}/\text{h}$ 和 mSv/h 两档。

5.7 其它功能与技术参数

本研制仪器应用微处理机完成程序控制。显示时,先示出实测脉冲计数,随后即转化成剂量当量率 ($\mu\text{Sv}/\text{h}$ 或 mSv/h) 示值。

单次测量持续 20 s。

仪器设“自检”键,正常显示为“1024”。

测量时,仪器可同步给出声响,并通过指示灯组(由四个发光管组成)定性地显示计数率的高低。

仪器的探头及仪表为一体结构,总重约 8.5 kg。

供电采用 6 节 2 号干电池,功率小于 500 mW。寿命不小于 2500 次测量,间断工作持续 40 h 的测量值漂移不大于 15%。

6 与国内外现有同类仪器的对比

将收集到的国内外同类仪器共七个国家 12 种,按评价中子剂量当量仪的五个主要技术

* 灵敏度取 $0.26\ \text{cps}/(\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1})$;
计数时间 20 s;

$H = 10\ \mu\text{Sv}/\text{h}$; 统计误差 = $1/\sqrt{(0.26 \times 10 \times 20)} = 0.14$

指标：中子灵敏度，量程，能量响应区间，耐 γ 性能与方向性列于表6进行对比，由表可见：

表6 各种中子剂量当量仪性能对比

性能		BH3105	最优技术指标	最优相关技术来源与指标		
中子灵敏度/ 计数·s ⁻¹ / (μ Sv·h ⁻¹)		10	~0.5	0.25 中国原子能院 NH1		
				0.5 日本富士 NSN10001		
				0.32 英国 CENTRONIC		
				0.32 英国 NE, MK7		
				0.33 瑞典 2202D		
				0.24 西德 REM909		
量 程/ μ Sv/h		0.1~1×10 ⁶	0.1~1×10 ⁵	1~1×10 ⁵ 美国 TA, REM-PUG		
				~1×10 ⁵ 英国 NE, NM2		
				~1×10 ⁵ 西德 REM909		
				0.1~1×10 ⁴ 中国原子能院 NH1		
				0.1~1×10 ⁴ 日本富士 NSN10001		
				1~1×10 ⁴ 英国 CNETRONIC		
能量响应区间/MeV		2.5×10 ⁻⁸ ~14	2.5×10 ⁻⁸ ~14	2.5×10 ⁻⁸ ~14	法国 CINN32	
					西德 REM909	
耐 γ 性能*	抑 制 系 数	~1500:1	优于 100:1	法 国 Nardeux	100:1	国际 标准 IEC1005
	附 加 误 差	~-5.8%	<±10%		<±10%	
方向响应 (0~90°)		<7%	<±25%	国际标准 IEC1005 (1990~09)		

* 按国际标准规定， γ 场为 10 mGy/h, ¹³⁷Cs γ ；中子剂量当量率为 1 mSv/h。

(1) 本仪器最突出的特点是中子灵敏度极高，达 10 计数·s⁻¹ / (μ Sv·h⁻¹)。该指标比目前国内外先进产品的指标高 20 倍左右，比原国产 FJ342 型中子雷姆仪高约 10⁴ 倍，比 NH1 型中子雷姆仪高 18 倍^[5]。

(2) 本仪器的量程范围比国内外同类产品至少高 1~2 个量级。

(3) 本仪器的能量响应特性(以固有误差量度)与国外同类产品水平相当，且符合 ICRP 的推荐标准，及按惯例采用的指标规定。

(4) 本仪器的耐 γ 性能优于 IEC1005 国际标准规定的 100:1 抑制指标达一个数量级以上。

(5) 本仪器的方向响应特性远优于国际标准规定的指标。

7 结 论

综上所述，基于“镭吸收棒”法进行中子生物等效能量响应调整原理，采用⁶Li 玻璃闪烁体进行中子探测，而研制成功的 BH3105 型中子剂量当量仪符合 1990 年 9 月发布实施的 IEC1005 便携式防护用中子周围剂量当量仪国际标准的有关规定；其中子灵敏度，量程范围及耐 γ 性能等主要技术指标达到或超过了现今国际上同类产品的水平。

梁红，布素平，张淑岚，孙大同及王祥馥参加了部分工作。中国原子能院静电加速器室，核应用室提供了加速器中子源及协助完成中子注量率监测，在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] Andersson I O, Braun J. Nucleonik, 1964, 6 (5), 237
- [2] IEC1005. Portable Neutron Ambient Dose Equivalent Ratemeters for Use in Radiation Protection. International Standard. 1990-09
- [3] 汲长松. 玻璃闪烁体. 核技术, 1984, 5, 1
- [4] 英国 NE 公司样本
- [5] 陈常茂等. 便携式中子剂量当量率仪. 辐射防护, 1990, 10 (2), 107
- [6] IEC1322. International Standard. Radiation Protection Instrumentation-Installed Dose Equivalent Rate Meters, Warning Assemblies and Monitors for Neutron Radiation of Energy from Thermal to 15 MeV. 1994-11

(京) 新登字 077 号

图书在版编目 (CIP) 数据

BH3105 型高灵敏中子剂量当量仪 = BH3105 TYPE
NEUTRON DOSE EQUIVALENT METER OF HIGH
SENSITIVITY/汲长松等著. —北京:原子能出版社,1995.

10

ISBN 7-5022-1401-1

I. BH… I. 汲… III. 中子反照率-剂量计量-剂量当
量-高灵敏度-仪器 N. TL818

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 11908 号



原子能出版社出版发行

责任编辑:李曼莉

社址:北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码:100037

中国核科技报告编辑部排版

核科学技术情报研究所印刷

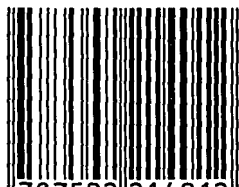
开本 787×1092 1/16·印张 1/2·字数 18 千字

1995 年 10 月北京第一版·1995 年 10 月北京第一次印刷

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

This report is subject to copyright. All rights are reserved. Submission of a report for publication implies the transfer of the exclusive publication right from the author(s) to the publisher. No part of this publication, except abstract, may be reproduced, stored in data banks or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior written permission of the publisher, China Nuclear Information Centre, and/or Atomic Energy Press. Violations fall under the prosecution act of the Copyright Law of China. The China Nuclear Information Centre and Atomic Energy Press do not accept any responsibility for loss or damage arising from the use of information contained in any of its reports or in any communication about its test or investigations.

ISBN 7-5022-1401-1



9 787502 214012 >