

# 应用双电离室方法测定 15 MeV 中子场内化学样品中的吸收剂量

郎淑玉 张仲伦 孟香琴

(中国科学院生物物理研究所)

**摘要** 本文研究了 BPT 型指形 TE-TE 和 Mg-Ar 电离室的特性。在由  $T(d, n)^4\text{He}$  反应产生的混合场中, 对电离室的各项修正因子进行了实验测定与计算。TE-TE 电离室 500 V 的饱和修正因子为 1.007, Mg-Ar 电离室 200 V 的饱和修正因子为 1.017。在 15 MeV 中子场中应用双电离室方法测定了葡萄糖和 FBX 溶液体系(硫酸亚铁-苯甲酸-二甲酚橙)中的吸收剂量。确定了样品中中子吸收剂量与  $\gamma$  射线吸收剂量的比值。并给出了在混合场中中子吸收剂量测量不确定度为  $\pm 6.3\%$ 。

**关键词** 双电离室方法; 中子吸收剂量; 组织等效电离室; 中子- $\gamma$  射线混合场。

## 前言

近二十年来快中子在放射医学、放射生物学、辐射育种、中子活化分析等领域中获得了日益广泛的应用。在中子效应的研究中, 样品中吸收剂量的确定是必不可少的; 各种化学体系中 G 值的测定也是辐射化学领域中普遍关心的一个问题。目前在这些领域中测定快中子剂量采用最多的方法为双探测器法, 这种方法使用比较方便。我们实验室研制了指形组织等效电离室(T)与中子不灵敏电离室(U), 对其各项修正因子进行了实验测定与计算。应用双探测器方法确定了 15 MeV 中子场内化学样品的吸收剂量。

## 中子吸收剂量测量中某些参数的选择

在双探测方法中, 探测器 T 具有对中子和光子近似相同的灵敏度; 探测器 U 的中子灵敏度低于对  $\gamma$  射线的灵敏度。T、U 探测器的响应由以下方程给出

$$\begin{cases} R_T' = K_T D_N + h_T D_G \\ R_U' = K_U D_N + h_U D_G \end{cases} \quad (1)$$

方程(1)中所有的符号代表的意义与 ICRU 26 号报告中完全一致, 不再赘述。

在我们使用的双探测器方法中, T 探测器是指形 TE-TE 电离室; U 探测器是指形 Mg-Ar 电离室。一般可以认为两种电离室的相对光子灵敏度都为 1, 即  $h_T = h_U = 1^{[1]}$ 。对中子不灵敏的 Mg-Ar 电离室的相对中子灵敏度  $K_U$ , 是在一个已知的中子场中测得的。首先使用成对的平板形外推电离室, 将距靶某一处的中子和  $\gamma$  的剂量值测定出来; 然后使用我们的 Mg-Ar 电离室在平板室测定的位置上测量。平板 Mg-Ar 电离室的相对中子灵敏度曾用铅减弱法确定, 结果为  $K_U = 0.193 \pm 0.011^{[2]}$ 。用平板室所得结果以及指形 Mg-Ar 电离室测量结果进行计算得到指形 Mg-Ar 电离室的  $K_U = 0.150 \pm 0.009$ 。

指形 TE-TE 电离室的相对中子灵敏度  $K_T^{[1]}$  可以按下式计算得到

$$K_T = \frac{\bar{W}_C}{\bar{W}_N} \cdot \frac{(S_{m,g})_C}{(S_{m,g})_N} \cdot \frac{(K_t/K_m)_C}{(K_t/K_m)_N} \quad (2)$$

式中  $\bar{W}$  是产生一个离子对所消耗的平均能量;  $S_{m,g}$  是壁相对于空腔气体的有效阻止本领比;  $K_t$  是组织的比释动能因子;  $K_m$  是电离室壁材料的比释动能因子; 上标 C 表示用于刻度的  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线; 下标 N 表示 15 MeV 的中子; 式中参量的选择如表(1)。根据表(1)的数据可以计算出 TE-TE 电离室的相对中子灵敏度  $K_T = 0.9715$ 。

表 1 式(2)中的参量

Table 1 The parameters in equation (2)

| 参量 Parameters                             | 数值 Value |
|-------------------------------------------|----------|
| $\bar{W}_N/\bar{W}_C$                     | 1.062    |
| $(K_t/K_m)_N$                             | 0.98     |
| $[(\mu_{en}/\rho)_t/(\mu_{en}/\rho)_m]_C$ | 1.001    |
| $(S_{m,g})_N/(S_{m,g})_C$                 | 0.99     |

使用指形 TE-TE、Mg-Ar 双电离室测量中子吸收剂量, 四个主要参数的选择如表 2

### 指形 TE-TE, Mg-Ar 电离室刻度因子与在 15 MeV 中子场内修正因子

TE-TE 电离室室壁是由组织等效塑料制

表 2 双探测器法中的主要参数

Table 2 Basic physical parameters used in twin chamber method

|                                          | T 电离室 (TE-TE)<br>TE-TE chamber | U 电离室 (Mg-Ar)<br>Mg-Ar Chamber |
|------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 相对光子灵敏度<br>Relative photons sensitivity  | $h_T = 1$                      | $h_U = 1$                      |
| 相对中子灵敏度<br>Relative neutrons sensitivity | $K_T = 0.9715$                 | $K_U = 0.150 \pm 0.009$        |

成, 电离室是流气式的, 空腔内流动的气体是组织等效气体。Mg-Ar 电离室室壁是由高纯金属镁制成, 室内所流气体为高纯氩气。根据文献<sup>[4]</sup> 电离室的响应  $R'$  与仪器的读数  $X$  之间的关系为:

$$R' = KD_N + hD_G = a_c(\pi_i f_i)X \quad (3)$$

其中  $a_c$  是刻度因子, 用  $^{60}\text{Co}$  光子刻度得到;  $a_c(\pi_i f_i)$  是 15 MeV 中子场中的各修正因子的乘积;  $f_1$  为饱和特性修正;  $f_2$  为响应的角度依赖性的修正;  $f_3$  为柄散射的修正;  $f_4$  为温度与气压的修正。

#### 1. 饱和特性修正( $f_1$ )

电离室饱和特性是由电离室空腔内电荷的复合决定的。复合随着电离室内场强的增加而减少。

在中子场中收集电压  $V$  与饱和电流  $I'$  有如下的关系

$$\frac{I'}{I} = 1 + \frac{\text{常数}}{V}$$

取不同的收集电压  $V$ , 可得到相应的电离电流  $I$ , 用  $I'/I$  和  $1/V$  作图, 可得一条直线。将实验数据做直线回归处理, 可得在 15 MeV 中子场中 TE-TE 电离室的常数为 3.75。直线相关系数为 0.990; 500 V 的饱和修正系数为 1.007; 收集效率为 0.993; Mg-Ar 电离室的常数为 3.52, 直线相关系数为 0.990; 200 V 的饱和修正系数为 1.017, 收集效率为 0.983。图 1 给出两个电离室在 15 MeV 中子场中的饱和特性曲线。

## 2. 响应的角度依赖性的修正( $f_2$ )

在 15 MeV 的中子场中, TE-TE 电离室对射线束入射角度的响应, 归一化到 90°, 示于图 2。电离室对称轴与靶面法线之间角度小于 90° 时, 响应基本相同。而超过 120° 后, 电离室的柄和后面的联接部分开始屏蔽电离室, 响应只有 90° 时响应的 0.89。电离室的响应对角度的依赖性是由电离室的结构造成的。电离室的柄和联接头对射线的散射、室壁和中心电极有效面积的变化, 对响应都有影响。

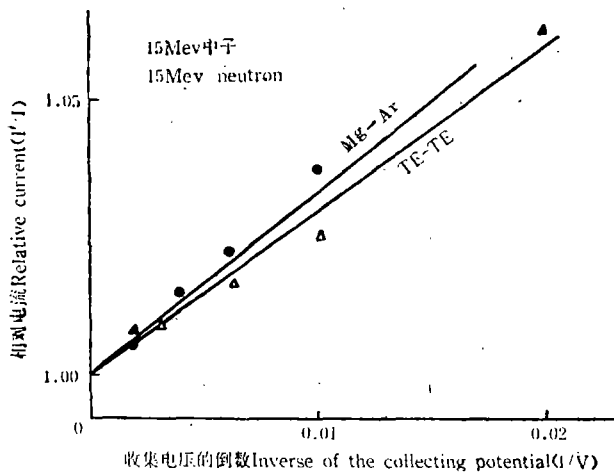


图 1 指形 TE-TE、Mg-Ar 电离室饱和特性曲线  
Fig. 1 Saturation characteristics curve of thimble TE-TE and Mg-Ar chambers for 15 MeV neutron

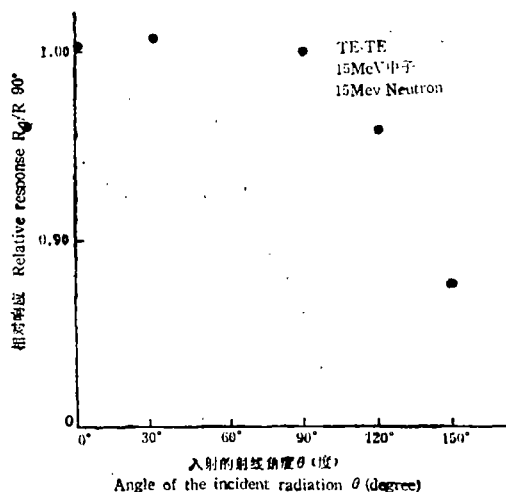


图 2 TE-TE 电离室响应对角度的依赖性  
Fig. 2 Angular dependence of response for TE-TE chamber relative to 90° for 15 MeV neutron

## 3. 柄散射的修正( $f_3$ )

射线在电离室空腔后部的柄上发生的散射, 可能使测得的电离电流值有所增大, 对此也应进行修正, 以求得无柄散射时电离室的电离电流。在 15 MeV 中子场内 TE-TE 电离室柄散射修正因子为  $0.990 \pm 0.017$ ; Mg-Ar 电离室柄散射修正因子为  $0.997 \pm 0.017$ 。

## 4. 温度与气压修正( $f_4$ )

电离室空腔内气体的压力和温度变化对电离电荷的测量也会产生影响。电离室  $\gamma$  刻度时温度为 20°C, 气压为 760 mmHg, 所以在每次使用时, 都要对温度、气压进行修正, 修正因子  $f_4$  可由下式给出

$$f_4 = \frac{293.2 + t}{293.2} \times \frac{760}{P}$$

## 5. 刻度因子 $a_c$

我们的 TE-TE 和 Mg-Ar 电离室都是由北京计量局在  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线场内, 使用英国的法莫电离室进行刻度的。TE-TE 室的刻度因子为  $5.43 \times 10^9 \text{ R/C}$ , Mg-Ar 室刻度因子为  $3.30 \times 10^9 \text{ R/C}$ 。

电离室的  $\gamma$  刻度先后做了三次, Mg-Ar 电离室在 1% 内一致, TE-TE 电离室在 2% 内一致。结果的相对值列于表 3 内。从表 3 中可以看出, TE-TE 电离室在不同时间所做的刻度值相差在 2% 之内。造成的原因是因为在每次刻度时使用的 TE 气体的配比不完全相同造成的。在《BPS 型组织等效球形电离室》一文中曾详细地讨论了由于气体的配比不同造成的测量结果的误差。

总之, 在 15 MeV 中子场内, 使用 TE-TE、Mg-Ar 电离室, 要根据实验的目的, 实验的条

表 3  $\gamma$  刻度因子相对值比较  
Table 3 Comparison of relative values of calibration factors for  $\gamma$ -ray

| 日 期<br>Date | TE-TE 室<br>TE-TE Chamber | Mg-Ar 室<br>Mg-Ar Chamber |
|-------------|--------------------------|--------------------------|
| 1982.5      | 1.007                    | 0.994                    |
| 1982.8      | 1.018                    | 1.013                    |
| 1983.5      | 1.000                    | 1.000                    |

件对实验数据进行必要的修正, 以保证数据的准确可靠。

## 应用成对指形电离室测定化学样品中的中子吸收剂量

### 1. 实验安排

在 ZF-300 型发生器上, 由  $T(d,n)^4\text{He}$  反应产生  $(n,r)$  混合场。氘束加速器电压 200KV, 在与靶法线成  $0^\circ$  度角时, 中子能量为 15 MeV。在靶面法线方向  $\pm 35^\circ$  之内, 距靶 10 cm 处, 放置

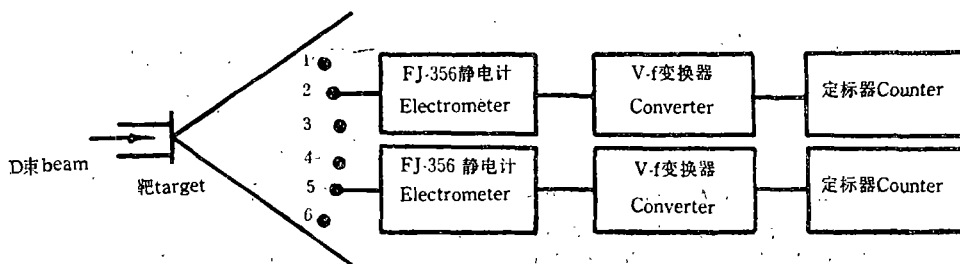


图 3 实验装置图  
Fig. 3 Experimental arrangement

照射的化学样品和电离室。实验布置如图 3。辐照容器是由聚乙烯制成的圆柱形的盒, 直径为 20 mm, 长 63 mm(包括盖), 壁厚 2 mm。辐照时电离室也放在相同的容器中。辐照时电离室产生的电离电流送到 FJ-356 型静电计, 从静电计的放大器引出电压讯号, 经电压-频率转换器, 将电压讯号转换成脉冲频率, 经定标器进行积分计数。

### 2. 化学样品中的吸收剂量的计算

实验中辐照的样品为葡萄糖和 FBX 溶液。葡萄糖( $C_6H_{12}O_6 \cdot H_2O$ )、呈粉末状。FBX 溶液; 组成为  $\text{FeSO}_4$  [0.2 mM], 二甲酚橙(三钠) [0.2 mM], 苯甲酸 [5 mM] 及  $\text{H}_2\text{SO}_4$  [0.05 N]。用 TE-TE、Mg-Ar 电离室测量得到电离室室壁材料内的  $D_N$  和  $D_G$ 。在次级带电粒子平衡的条件下, 电离室室壁材料的吸收剂量等于壁材料的 Kerma 值, 所以

$$\frac{D_{\text{室壁}}}{D_{\text{样品}}} = \frac{\text{Kerma}_{\text{室壁}}}{\text{Kerma}_{\text{样品}}}$$

这样就得到化学样品内的吸收剂量值  $D_N$ 。样品中的  $D_G$  可由电离室壁材料中的吸收剂量  $D_G$  换算得到, 换算因子  $j$  由下式给出

$$j = \frac{[(\mu_{en}/\rho)]_{\text{壁材料}}}{[(\mu_{en}/\rho)]_{\text{样品}}}$$

### 3. 测量结果及讨论

我们曾在 3 月 24 日、4 月 7 日及 7 月 1 日三个时间内对葡萄糖样品进行了 7 次测量。从测

量的结果看来同一天照射的样品  $D_G$  与  $D_N$  之比较接近。在3月24日和7月1日照射的样品中  $D_G$  与  $D_N$  之比很接近。虽然两次照射间隔时间很长,但由于中子发生器的靶都是刚换上的新靶,发生器的参数调节很好控制,所以产生的中子场中  $\gamma$  射线与中子之比很接近。而4月7日照射时中子发生器的靶已经使用了较长时间,这样就造成了样品中的  $D_G$  与  $D_N$  之比的变化。对于究竟有多少种因素影响中子场中的  $\gamma$  射线与中子之比看来是个值得探讨的问题。

在同一天内,我们对FBX溶液进行了连续12次照射,剂量值约从0.3 Gy直到2.9 Gy,由于发生器使用的是同一块靶,发生器的参数变化也不大,经12次照射,样品中的  $D_G$  与  $D_N$  之比很接近均值为  $0.078 \pm 0.001 (\pm 1.8\%)$ 。

我们曾使用中子场中的这套实验装置在  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线场中测量 Fricke 剂量计的  $G$  值。在  $\gamma$  射线场中只使用 TE-TE 电离室,测量 Fricke 剂量计中的吸收剂量。在紫外分光光度计上测量剂量计溶液光密度的变化,从而计算 Fricke 剂量计的  $G$  值,共测量了五次,五次的均值都为  $15.56 \pm 0.20 (\pm 1.2\%)$ 。Fricke 剂量计的  $G$  值国际上普遍承认的是15.6,我们的实验值与公认值之间符合较好,从而也可以看出这套实验装置、以及实验中的各种修正和某些物理参数的选取是可行的。

#### 4. 吸收剂量不确定度的估计

使用 TE-TE、Mg-Ar 电离室测量 n-r 混合场中化学样品中的吸收剂量,总不确定度将是若干参数不确定的合成。根据我们的实验结果,以及在计算中所选用的物理参数,总的不确定度估计列于表4

表4 总不确定度  
Table. 4 Uncertainties in neutron-beam calibration

| 项 目<br>Item                               | 不确定度(%)<br>Uncertainties(%) |
|-------------------------------------------|-----------------------------|
| $R_T$ (电离室响应)                             | 0.3                         |
| $\pi_i f_i$ (各种修正因子乘积)                    | 1.7                         |
| $a_c$ ( $\gamma$ 刻度因子)                    | 2                           |
| $S_i$ (距靶的距离)                             | 2                           |
| $W_N/W_C$                                 | 4*                          |
| $(K_t/K_m)_N$                             | 3*                          |
| $[(\mu_{en}/\rho)_t/(\mu_{en}/\rho)_m]_C$ | 0.1*                        |
| $(S_{m,g})_N/(S_{m,g})_C$                 | 2*                          |
| 总 合                                       | 6.3                         |

\* 选自文献[3]。

在表4中前四项是我们实验中不确定度的估计。后四项是几个基本的物理参数的不确定度。从中可以看出不确定度的来源主要是几个基本的物理参数,这几个参数引起的不确定度远远超过实际测量中造成的不确定度。例如,样品与电离室之间由于距靶的距离不同造成的吸收剂量的不确定度估计为2%, $\gamma$  刻度因子造成的不确定度为2%,再加上另外两项不确定度,所有实际测量中造成的不确定度仅为总的不确定度的小部分,而由各种物理参数引起的不确定度占总不确定度的大部份,所以要想提高双电离室法的准确度,必须改善基本物理参数的准确度。我们的几个主要参数的选择是根据 ICRU 26 号报告和 Goodman and Coyne 1980

的报告以及 Caswell et al 1980, Hubbell (1977) Bichsel and Rubach 1978 等人的报告。我们实验中不确定度估计为6.3%。

致谢 本文实验工作得到核工业部三所加速器组全体同志的大力支持,在此表示衷心感谢。

## 参 考 文 献

- [1] ICRU, Neutron Dosimetry for Biology and Medicine, Report, No 26, *International Commission on Radiation Units and Measurements*, Washington, DC, 1977.
- [2] 孟香琴, 张仲伦, 李凤章, 林桂京, 郎淑玉, 辐射防护, 3(3) 161(1983).
- [3] J. Zoetelief, "Dosimetry and Biological Effects of Fast Neutron", P. 61, Druk, Vadeli Den Haag, 1981.
- [4] J. J. Broerse, "Ion Chambers for Neutron Dosimetry" PP. 131~149, Harwood Academic Publishers GmbH, Switzerland, 1980.

(1984 年 1 月 30 日收到)

## THE DETERMINATION OF ABSORBED DOSES IN CHEMICAL SAMPLES IN 15 MeV NEUTRON FIELD BY A TWIN CHAMBER METHOD

Lang Shuyu    Zhang Zhonglun    Meng Xiangqin

(Institute of Biophysics, Academic Sinica)

**ABSTRACT** The characteristics of the model BPT thimble TE-TE and Mg-Ar ionization chambers have been studied. The correction factors of the ionization chambers in mixed field produced by T(d,n) <sup>4</sup>He reaction were measured and calculated. The saturation correction factors is 1.007 and 1.017 for TE-TE(500V) and Mg-Ar (200V) chambers respectively in the mixed field. The absorbed doses in the samples of glucose and FBX (Ferrous Sulphate-Benzoic acid-Xylenol orange) in 15 MeV neutron field were measured by the twin chamber method. The ratios of absorbed doses of neutrons and  $\gamma$ -rays in the samples were presented. The uncertainty of absorbed dose measurement was  $\pm 6.3\%$  for the mixed field.

**KEY WORDS** Twin chamber method; Neutron absorbed dose; Tissue equivalent ionization chamber; Neutron- $\gamma$  ray mixed field.