

CN 9201791

CNIC-00538

IAE-0095

中国核科技报告

周围剂量当量计和定向剂量当量计
的实验研究

AMBIENT DOSE EQUIVALENT AND DIRECTIONAL
DOSE EQUIVALENT INSTRUMENTS

(in Chinese)



原子能出版社

中国核情报中心
China Nuclear Information Centre

CNIC-00538

IAE-0095

周围剂量当量计和定向剂量当量计 的实验研究

金 花

(中国原子能科学研究院,北京)

摘 要

根据国际辐射单位和测量委员会(ICRU)39号报告推荐的在工作场所或环境监测中新的实用辐射量定义,研制了球形周围剂量当量计和平板形定向剂量当量计,并对其主要性能进行了实验测量,刻度了响应因子。

AMBIENT DOSE EQUIVALENT AND DIRECTIONAL DOSE EQUIVALENT INSTRUMENTS

(In Chinese)

Jin Hua

(CHINA INSTITUTE OF ATOMIC ENERGY, BEIJING)

ABSTRACT

According to definitions of the new operational radiation quantities for environmental (area) monitoring recommended by the International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU) report 39, a spherical ambient dose equivalent meter and a parallel-plane directional dose equivalent meter were designed and developed. Experimental measurements for main performances and calibrations for response factors were made.

引言

在1971年和1976年ICRU 19号^[1]和25号^[2]报告中引入对外部辐射源辐射防护的新的辐射量,随后1977年国际放射防护委员会(ICRP)出版了第26号出版物^[3],提出了一套完整的剂量限制体系,规定辐射防护的基本限值量为有效剂量当量(H_E)和皮肤剂量当量($H_{皮肤}$),但都无法直接测量。1985年ICRU 39号报告^[4]对于工作场所或环境监测推荐了两个新的实用辐射量,即用于强贯穿辐射监测的周围剂量当量 $H^*(d)$ 和用于弱贯穿辐射监测的定向剂量当量 $H'(d)$,分别用以估计辐射防护基本限值量有效剂量当量 H_E 和皮肤剂量当量 $H_{皮肤}$ 。1988年ICRU 43号报告^[5]又进行了详细的理论描述。目前在国际辐射防护领域中,主要集中在转换因子的计算和实验研究^[6-9]。对现有辐射防护仪器的响应分析^[10-12]和用于个人监测剂量计的各种不同材料与形状的体模反散射因子研究^[13-17],但对工作场所或环境监测仪器的研究工作报道很少^[18,19],主要因为在引入新的实用辐射量时,已考虑了现有仪器的情况,作适当的近似估计,并不想在设计方面引入较大的改变,其次是因为有关仪器的第三部分ICRU报告还未发表。本工作根据ICRU 39号报告推荐的用于工作场所或环境监测的新的实用辐射量定义,研制了球形周围剂量当量计和平板形定向剂量当量计,周围剂量当量计的响应值与ICRU推荐值在33 keV~1.25 MeV能量范围内小于±7%相一致,测量范围 $1 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1} \sim 10 \text{mSv} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

1 周围剂量当量计

1.1 周围剂量当量计的设计要求及电离室结构

在工作场所或环境监测中,周围剂量当量 $H^*(10)$ 是唯一用于估计辐射防护的基本限值量——有效剂量当量 H_E 的依据。目前现有的用于辐射防护监测仪器一般都是测量照射量率或空气吸收剂量率。

从图1可以看出^[4], H^*/X (周围剂量当量/照射量)的比值在200 keV以上能区变化较小,而在低能端~70 keV处,由于新的实用辐射量考虑了反散射影响,导致比值增加,达到1.55。又由于10 mm软组织中对辐射的吸收,在15 keV处比值降到0.3左右。由此可以看出,如果使用测量照射量的仪器,估算有效剂量将引入较大的误差。目前解决的办法是通过刻度现有仪器和使用转换因子作一些近似估计,但根本的办法是按定义设计周围剂量当量计。根据ICRU 39号报告,辐射场中某一点处的周围剂量当

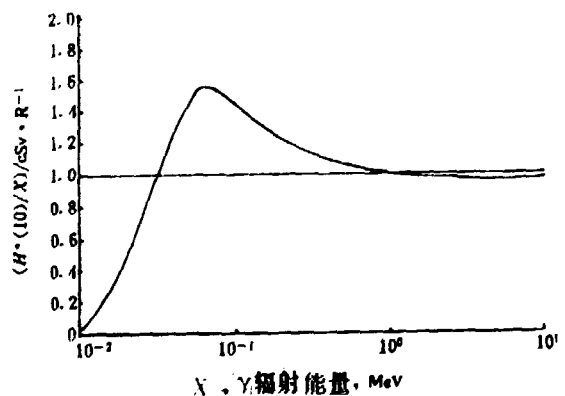


图1 H^*/X (周围剂量当量/照射量)随 γ 辐射能量变化

量 $H^*(d)$ 是指相应的齐向扩展场在 ICRU 球体内对着辐射入射方向的半径上, 深度为 d 处产生的剂量当量, 对 $H^*(d)$ 推荐的深度为 10 mm。扩展场是个假想的辐射场, 引入齐向扩展场的概念, 只是用来定义相应的量, 使得它对辐射场的每一点均有确定的数值, 因此一个具有各向同性响应, 按 $H^*(d)$ 定义刻度的剂量仪表可以用来测量辐射场中的周围剂量当量 (辐射场在仪表尺寸范围内应是均匀的)。

本工作研制的周围剂量当量计测量的主要对象是 X、 γ 和高能 β 辐射 (4 MeV)。在 0.01 MeV 至 10 MeV 能量范围的 X、 γ 辐射与物质相互作用过程主要是光电效应、康普顿效应和电子对效应。对于低原子序数的物质, 康普顿效应在很宽的能量范围内占优势。对于组织等效材料原子序数接近 $Z_{\text{组织}} = 7.46^{[20]}$, 主要考虑吸收和散射作用, 这就要求探测器的材料与 ICRU 组织等效球有相近的线吸收系数, 这是组织等效材料的必要条件, 但并不要求质量密度和质量相关的系数相等。

表 1 列出了几种组织等效材料, 如 A-150、聚苯乙烯和有机玻璃与 ICRU 球的线吸收系数之比值。

表 1 几种材料与 ICRU 球线吸收系数的比值^[20]

| 材 料 | μ/μ_{ICRU} | | | | | | | | |
|-------|-------------------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 30 (keV) | 50 (keV) | 80 (keV) | 100 (keV) | 200 (keV) | 500 (keV) | 1.0 (MeV) | 2.0 (MeV) | 3.0 (MeV) |
| A-150 | 1.030 | 1.088 | 1.108 | 1.111 | 1.116 | 1.117 | 1.118 | 1.117 | 1.113 |
| 聚苯乙烯 | 0.740 | 0.931 | 1.003 | 1.017 | 1.032 | 1.035 | 1.036 | 1.035 | 1.030 |
| 有机玻璃 | 0.940 | 1.082 | 1.133 | 1.143 | 1.154 | 1.156 | 1.157 | 1.156 | 1.154 |

表 2 中列出了 ICRU 球、水、空气和以上三种材料的密度和有效原子序数。

表 2 几种材料的密度和有效原子序数

| 材料 | 密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) | 有效原子序数 Z_{eff} | 参考文献 |
|--------|--|-------------------------|------|
| ICRU 球 | 1.00 | 7.46 | [20] |
| 水 | 1.00 | 7.40 | [21] |
| 空气 | 0.001293 | 7.64 | [20] |
| A-150 | 1.12 | 6.86 | [21] |
| 聚苯乙烯 | 1.06 | 5.30 | [22] |
| 有机玻璃 | 1.18 | 6.50 | [20] |

从表中可以看出, A-150 等三种材料基本可视为组织等效材料。A-150 导电塑料是较理想的组织等效材料, 但国内没有生产。聚苯乙烯需浇铸加工, 有一定困难。除材料外, 探测器的设计还需考虑在低能端软组织的反散射影响, 解决的办法是选择稍高于空气原子序数的材料, 在低能端增加光电吸收。Burgess P. H. 根据对许多电离室型仪器的能响分析调查, 提出在电

离室型仪器中将会更多地使用铝做内衬材料^[10]，对于探测器的尺寸，ICRU 39 号报告，一般不要求和球形体模一致。根据 IEC 45B 标准提出的周围剂量当量计测量从 $1 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ 到 $10 \text{mSv} \cdot \text{h}^{-1}$ ，所以在设计电离室时还应考虑测量灵敏度的要求。

根据以上考虑，周围剂量当量计的探测器选为电离室型，由两个有机玻璃半球对接而成，内衬两个薄铝半球，相互紧密对接，作为高压电极。室壁与 ICRU 组织等效球 10 mm 深度具有等效厚度，球外径 210 mm。收集板是直径 38 mm 表面镀铝空心塑料球，用直径 6 mm 的细铝杆固定在电离室中心，经三轴金属-陶瓷绝缘子(绝缘电阻 $\geq 10^{16} \Omega$)引出，有效体积 3.74 L。工作气体为自由空气。电离室结构如图 2 所示。

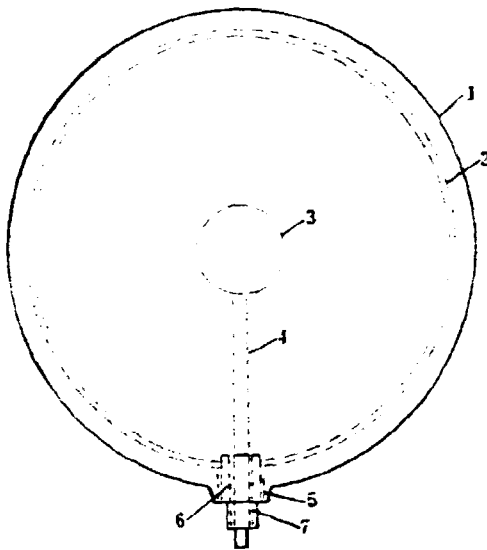


图 2 电离室结构图

1. 有机玻璃外壳；
2. 铝壳；
3. 收集板；
4. 收集板中心杆；
5. 柯伐；
6. 陶瓷绝缘子；
7. 保护环

1.2 电离室的主要性能

1.2.1 饱和特性

在吸收剂量率分别为 $1.40 \times 10^{-4} \text{Gyh}^{-1}$ 、 $1.30 \times 10^{-3} \text{Gyh}^{-1}$ 和 $1.14 \times 10^{-2} \text{Gyh}^{-1}$ 的 $^{60}\text{Co} \gamma$ 射线参考辐射场中，测量了电离室的饱和特性，如图 3 所示。

从图中可以看出在 $1.14 \times 10^{-2} \text{Gyh}^{-1}$ 时，150 V 达到饱和。 $1.14 \times 10^{-2} \text{Gyh}^{-1}$ 相当于 $11 \text{mSv} \cdot \text{h}^{-1}$ ，用于测量从 $1 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ 到 $10 \text{mSv} \cdot \text{h}^{-1}$ 的剂量当量率时，选用 300~400 V 极化电压即可达到饱和收集。

1.2.2 方向性

由于电离室为球形结构，可认为无方向性影响。

1.2.3 能量响应特性

ICRU 39 号报告中要求新的实用辐射量必须在齐向扩展场条件下刻度。为满足“扩展”要求，全部能量响应及刻度实验是在自由空气中，经过准直的平面平行射线束的辐射场中进

行,源与探测器几何中心距离 2~4 m,辐射场水平遵从反平方律。因此,可把经过准直的平面平行射线束辐射场视为齐向扩展场。

能量响应刻度实验工作是根据国际标准化组织(ISO)颁布的校准测量仪表用的 X、γ 射线参考辐射标准 ISO 4037,在国防科工委放射性计量一级站进行。本工作使用三个规范所提供的参考辐射,即 K 荧光参考辐射规范,低照射量率过滤参考 X 辐射规范和窄束过滤参考 X 辐射规范,覆盖能量范围从 17.5 keV 到 248 keV,以及 ^{137}Cs 和 ^{60}Co γ 射线参考辐射能量。这些标准仍然是照射量率标准,可溯源到国家计量标准。

为达到 ICRU 39 号报告的能量响应要求,考虑了不同材料的壁效应,分别在有机玻璃球壳内壁镀铝(约 $1\ \mu\text{m}$)和衬以一定厚度的薄铝壳,用窄束过滤 X 射线参考辐射标准进行了能量响应实验,见图 4。从图中可以看出,由于镀铝层较薄,主要还是有机玻璃壁起作用,有机玻璃的有效原子序数 $Z_{\text{eff}} = 6.5$ 与空气有效原子序数 $Z_{\text{air}} = 7.64$ 比较接近,因此在很宽的能量范围内,有机玻璃的质量能量吸收系数与空气十分接近,在低能端响应较小。当内衬一定厚度铝壳时,由于铝的原子序数高于空气,在低能端,铝光电吸收远大于空气,因而在低能端响应增大。同时也可以看出,内衬铝层厚度不同,在低能区对电离室的灵敏度也有较大的影响。

实验结果表明,选择与 ICRU 球近似等效材料和适当厚度的内衬材料可以达到 ICRU 39 号报告推荐的能量响应要求。为比较,用三个规范 X 射线参考辐射所作的能量响应实验值,用 ^{137}Cs γ 射线参考辐射能量响应值归一,列于表 3。

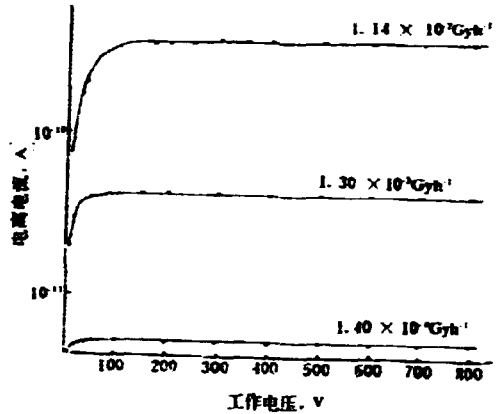


图 3 周围剂量当量计的饱和特性曲线

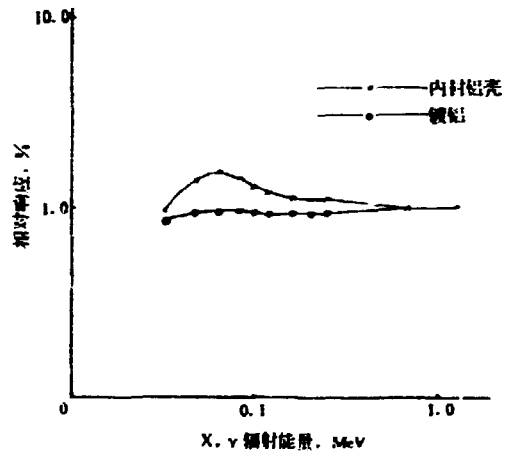


图 4 内衬不同厚度铝时相对能量响应曲线

表 3 周围剂量当量计对不同能量的 X 和 γ 射线的响应

| 系列 A | K 受光参考辐射(照射量率) | | | | | | | | ¹³⁷ Cs | ⁶⁰ Co | |
|---------|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|-------------------|------------------|------|
| 能量(keV) | 17.5 | 25.3 | 37.3 | 49.1 | 59.3 | 68.8 | 75.0 | 662 | 1250 | | |
| 相对响应 | 0.25 | 0.65 | 1.11 | 1.43 | 1.53 | 1.51 | 1.51 | 1.00 | 1.02 | | |
| 系列 B | 低照射量率过能参考 X 辐射(照射量率) | | | | | | | | ¹³⁷ Cs | ⁶⁰ Co | |
| 能量(keV) | 30 | 48 | 60 | 87 | 109 | 148 | 185 | 211 | 662 | 1250 | |
| 相对响应 | 0.91 | 1.41 | 1.56 | 1.39 | 1.24 | 1.12 | 1.09 | 1.10 | 1.00 | 1.02 | |
| 系列 C | 平常过能参考 X 辐射(照射量率) | | | | | | | | ¹³⁷ Cs | ⁶⁰ Co | |
| 能量(keV) | 33 | 48 | 65 | 83 | 100 | 118 | 151 | 205 | 248 | 662 | 1250 |
| 相对响应 | 0.97 | 1.39 | 1.55 | 1.43 | 1.29 | 1.20 | 1.13 | 1.10 | 1.10 | 1.00 | 1.02 |

从表 3 数据可以看出,用不同规范所提供的参考辐射测量的能量响应实验值符合较好。

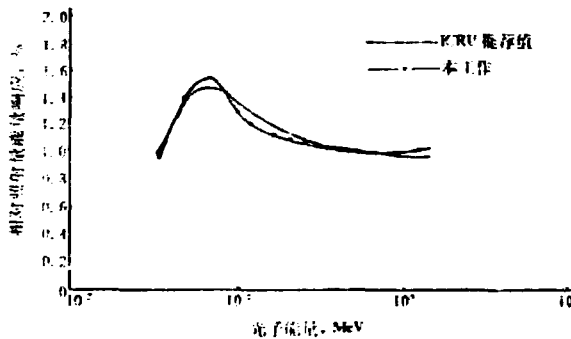


图 5 周围剂量当量计相对照射量的能量响应曲线(用¹³⁷Cs 能量点值归一)

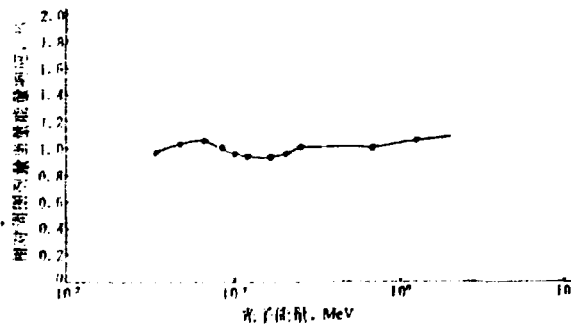


图 6 周围剂量当量计(用¹³⁷Cs 能量点值归一)的相对能量响应曲线

图 5 画出了所研制的周围剂量当量计和 ICRU 推荐值的相对照射量能量响应曲线。本工作与 ICRU 推荐值最大差 7%，一般在 ±5% 内符合，在 100 keV 到 205 keV 四个点偏低。图 6 是周围剂量当量计相对周围剂量当量的能量响应曲线，能量响应值在 ±7% 相一致。实验

表明有机玻璃不失为比较合适的 ICRU 球组织等效材料的代用品。目前在个人剂量计刻度的体模中,已建议采用 $30 \times 30 \times 15 \text{ cm}^3$ 有机玻璃(PMMA)板作为标准刻度体模^[24]。因为与 ICRU 球相同的材料难以广泛采用,而有机玻璃材料容易得到,并易于加工成所需的任何形状。

1.2.4 周围剂量当量计的线性

周围剂量当量计线性实验是在 $0.9 \sim 11 \text{ mSv h}^{-1}$ 范围内测量的。线性回归得到, $A = -6.19 \times 10^{-3}, B = 3.013, \gamma = 0.9999$, 表明周围剂量当量计的线性很好。

1.3 响应因子的刻度及其不确定度估计

ICRU 39 号报告定义的新的实用辐射量,尚没有相应的刻度标准,仍采用现有的对 X 和 γ 辐射照射量率标准。本工作用 ^{137}Cs 标准源 γ 射线参考辐射对周围剂量当量计进行了刻度。

刻度实验使用 FJ-356 型动电容静电计测量电离室的电离电流,测量方法为压降法,响应因子为:

$$R_s = \frac{1}{8.73 \times 10^{-3}} \frac{V_s - V_0}{R} \cdot K_{Tp} \cdot \frac{r^2}{A I_{Co}} \quad (1)$$

式中, R_s —— 用 ^{137}Cs 源刻度的响应因子, A/Gyh^{-1} ;

V_s —— 源加本底的总电压值, V ;

V_0 —— 本底电压值, V ;

R —— 高电阻值, Ω ;

r —— 源到电离室几何中心距离, m ;

A —— 源活度, Bq ;

I_{Co} —— 照射量率常数, $\frac{\text{R} \cdot \text{m}^2}{\text{h} \cdot \text{Bq}}$;

K_{Tp} —— 温度和气压修正值, $K_{Tp} = \frac{T}{T_0} \cdot \frac{p_0}{p}$, T_0, p_0 为标准状态下的温度和气压。

表 4 周围剂量当量计响应因子的各项不确定度及其相对值

| | | 项 目 | 得 到 方 法 | 相对不确定度 % |
|---|-------|-----------------|---------|-----------|
| 类 | A | ΔV | 静电计表头 | ± 1.5 |
| | | ΔR | 静电计说明书 | ± 3.0 |
| 别 | R_s | ΔT | F、湿温度计 | ± 1.0 |
| | | Δp | 水银压力计 | ± 0.1 |
| | | ΔT^* | 刻度证书 | ± 2.0 |
| | | ΔI_{Co} | 根据参考文献 | ± 0.6 |
| | | $2\Delta r$ | 水平测量仪 | ± 0.5 |

注: * ^{137}Cs 标准源活度的不确定度

刻度结果的总不确定度包括各参数的读数误差以及元件标称值和物理常数的不确定度,列于表 1。不确定度合成采用国际计量委员会(CIPM)建议的方法进行。

不确定度为:

$$S = (\sum S_A^2 + \Sigma(\frac{S_B}{3})^2)^{1/2} = 1.97\%$$

相应于99.7%置信水平的总不确定度为:

$$U = \pm 3S = \pm 5.9\%$$

用¹³⁷Cs参考辐射源刻度的响应因子为:

$$R_n = (3.28 \pm 0.19) \times 10^{-8} \text{A/Gy} \cdot \text{h}^{-1} \quad (2)$$

或

$$\begin{aligned} R_n &= \frac{R_n}{f} = \frac{1}{1.18} (3.28 \pm 0.19) \times 10^{-8} \text{A/Sv} \cdot \text{h}^{-1} \\ &= (2.78 \pm 0.16) \times 10^{-8} \text{A/Sv} \cdot \text{h}^{-1} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, R_n ——以周围剂量当量率表示的响应因子, A/Sv·h⁻¹, 系数1.18为¹³⁷Cs辐射源662 keV能量的 $H^*(10)$ 转换系数^[1], Sv/Gy。

1.4 周围剂量当量率 $H^*(10)$ 的测量

若在实际辐射场中某一参考点上测得该电离电流值为 I , 通过以下计算可求得该参考点处的周围剂量当量率 $H^*(10)$:

$$H^*(10) = \frac{I}{R_n} \cdot K_T \quad (4)$$

将(3)式代入(4):

$$H^*(10) = 3.60 \times 10^7 I \cdot K_T \quad (5)$$

按(5)式将周围剂量当量计测量的电流示值线性定标出周围剂量当量率, 单位 Sv·h⁻¹, 便可测出上述实际辐射场中参考点上的周围剂量当量率 $H^*(10)$ 。

2 定向剂量当量计

2.1 定向剂量当量计设计要求及结构

ICRU 39号报告推荐的用于工作场所或环境监测的定向剂量当量 $H'(0.07)$ 是用于估计辐射防护限值中的皮肤剂量当量 $H_{\text{皮肤}}$, 其定义是: 辐射场中某一点处的定向剂量当量 $H'(d)$ 是相应扩展场在 ICRU 球体内、指定方向的半径上深度 d 处产生的剂量当量, 对 $H'(d)$ 推荐的深度 d 为0.07 mm。仪器的设计除可测出0.07 mm 深度处的剂量当量, 还需考虑反散射的影响和在 2π 立体角内具有均匀的角响应。

根据以上要求, 电离室结构选择平板形, 入射窗直径7.6 cm 为铝化聚四氟(近似组织等效), 模拟皮肤角质层厚度 ($7 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$), 用作高压电极。电离室空腔为圆柱形, 深度为 $5 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 有效空气层, 收集极为10 mm 厚有机玻璃板镀铝, 侧壁也是10 mm 有机玻璃, 有效体积175 cm³。

2.2 主要性能

2.2.1 饱和特性

用⁹⁰Sr+⁹⁰Y β 辐射平面源, 在 $6.8 \text{ mGy} \cdot \text{h}^{-1}$ 的辐射场中测量定向剂量当量计的饱和特性。电压为20 V 已达饱和, 选电离室工作电压为100 V (测量线性范围 $1 \text{ mSv} \cdot \text{h}^{-1} \sim 10 \text{ Sv} \cdot \text{h}^{-1}$)。

2.2.2 角响应

通过调节 B 源到探测器几何中心的距离(一般 > 30 cm)可以产生单向 B 粒子场以符合扩展场的要求。实验用 $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ 、 ^{204}Tl 面源(活性区面积分别为 12.56 和 26.41 cm²)，源与电离室间距 30 cm，改变源法线与电离室中心轴之间的夹角，分别为 0°、15°、30°、45°、60°、75°、90°，以 0° 响应值归一得出定向剂量当量计的角响应曲线(见图 7)。从图 7 中可以看出，角度依赖性比较大，因此在测量中应保持入射窗与射线垂直方向。

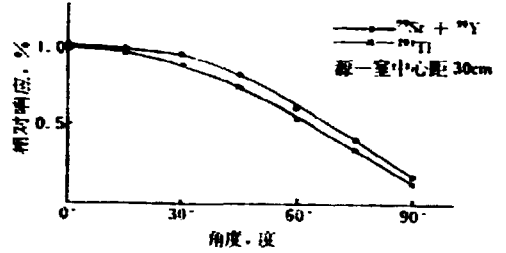


图 7 定向剂量当量计角响应曲线

2.3 响应因子的刻度及不确定度估计

定向剂量当量计刻度采用吸收剂量率标准，用有限面源在源—电离室几何中心距离为 30 cm 处近似在扩展场中进行刻度，实验中使用的活性区半径 $R = 2$ cm 的 $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ 和 $R = 2.8$ cm 的 ^{204}Tl 面源视为点源处理。测量用 FJ-356 型动电容静电计，测量方法为压降法，定向剂量当量计在 β 辐射垂直入射时，刻度得到的响应因子见表 5。不确定度估计与周围剂量当量计不确定度估计方法相同，得到刻度响应因子的不确定度为 $\pm 2.3\%$ ，置信水平为 99.7% 时总不确定度为 $\pm 6.9\%$ 。

表 5 定向剂量当量计在 β 辐射垂直入射时的响应因子

| 核素 | 源—探测器距离 (cm) | 响应值 k_e ($\times 10^{-12} \text{A/mGy}\cdot\text{h}^{-1}$) | 备注 |
|----------------------------------|-----------------|---|------------|
| $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ | 30 | 1.16 | 由本院外准电离室标定 |
| ^{204}Tl | 30 | 0.92 | 由英国进口 |

2.4 定向剂量当量 $H'(0.07)$ 的测量

定向剂量当量计在实际辐射场中某一参考点上测量出电离电流 I ，通过计算可以得到吸收剂量率 \dot{D} ，从而可以得出在相应扩展场中的 ICRU 球内对着辐射入射方向的半径深度为 0.07 mm 的定向剂量当量率：

$$H'(0.07) = Q \cdot N \dot{D} \quad (6)$$

式中， Q ——辐射品质因子，对电子等于 1；

N ——ICRP 规定为 1；

从(6)式可以看出用定向剂量当量计只要测量出吸收剂量率就可以得出定向剂量当量率。

3 结 语

1. 电离室型周围剂量当量计，选用近似组织等效材料的有机玻璃材料做外球壳，内衬铝球壳，由于内衬的铝材料的有效原子序数高于空气，增加了低能端光电吸收。通过调节铝内球壳的厚度，可以使电离室获得相当好的低能端过响应效果，使之满足 ICRU 39 号报告推荐

的能量响应标准,以正确估计辐射防护限值量有效剂量当量 H_E 。

2. 经过反平方律检验的平面平行射线束辐射场可视为齐向扩展场,采用现有的照射量率参考辐射标准,用于刻度周围剂量当量计。改变 β 辐射源与探测器几何中心之距离,一般大于 30 cm,可视为扩展场,采用现有的 β 辐射吸收剂量率标准,用于刻度定向剂量当量计。

3. 本工作周围剂量当量计的能量响应值与 ICRU 39号报告推荐值在 33 keV~1.25 MeV 能量范围内小于 $\pm 7\%$ 相一致。目前国际上不同实验室用 M-C 方法计算的转换因子之间的差别在 10% 内符合。因此表明,所研制的电离室型周围剂量当量计符合 ICRU 39号报告中用于测量周围剂量当量的仪表性能要求。

4. 本工作对周围剂量当量计没有刻度 6 MeV 能量点,因为国内尚没有适合于辐射防护仪表的照射量率刻度标准。

本工作得到岳清宇研究员的热情指导,陈常茂研究员和毛用泽教授对本工作提出了宝贵意见,万兆勇和程金生两同志在能量响应实验中给予了大力的帮助,刻度用 β 辐射源由周祖荫同志提供,在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] ICRU Report 19, Dose Equivalent and Unit, 1971
- [2] ICRU Report 25, Conceptual Basis for the Determination of Dose Equivalent, 1976
- [3] ICRP Pub. 26, Recommendations of the ICRP, 1977
- [4] ICRU Report 39, Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources, 1985
- [5] ICRU Report 43, Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources Part 2, 1985
- [6] Wagner, S. R. et al., Radiat. Prot. Dosim., 12, 231(1985)
- [7] ICRP Pub. 51, Data for Use in Protection Against External Radiation, Annals of the ICRP, Vol. 17 No 2/3, 1987
- [8] Cross, W. G., Radiat. Prot. Dosim., 28, 41(1989)
- [9] Sollier T. J. L., Radiat. Prot. Dosim., 30, 13(1990)
- [10] Burgess, P. H., Radiat. Prot. Dosim., 12, 211(1985)
- [11] 陈常茂,辐射防护,2,89(1987)
- [12] Thompson, I. M. G., Radiat. Prot. Dosim., 28, 149(1989)
- [13] Seibach, H. J., et al., Radiat. Prot. Dosim., 12, 129(1985)
- [14] Will, W., Radiat. Prot. Dosim., 27, 9(1989)
- [15] Bartlett, D. T., Radiat. Prot. Dosim., 27, 231(1989)
- [16] Hermann, K.-P., et al., Radiat. Prot. Dosim., 28, 73(1989)
- [17] Bohm, J., Radiat. Prot. Dosim., 28, 135(1989)
- [18] 张延生,辐射防护,4,5(8),339(1988)
- [19] Lakshmanan, A. R., Radiat. Prot. Dosim., 32, 127(1990)
- [20] 电离辐射计算丛书,辐射剂量学常用数据,309(1987)
- [21] Nagel, H. D., Phys. Med. Biol., 31, 1381(1986)
- [22] 李星洪,辐射防护基础,158(1982)
- [23] Thompson, I. M. G., Radiat. Prot. Dosim., 12, 203(1985)
- [24] D. T. Bartlett, P. J. Dimbylow and T. M. Francis, Radiat. Prot. Dosim., 32 123(1990)

**周围剂量当量计和定向剂量
当量计的实验研究**

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

原子能出版社激光照排中心排版
北京市海淀区三环快速印刷厂印刷

☆

开本787×1092 1/16·印张 1·字数 11 千字

1991年8月北京第一版·1991年8月北京第一次印刷

ISBN7-5022-0561-6

TL·319

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.

ISBN7-5022-0561-6
TL·319

P.O.Box 2103
Beijing, China

China Nuclear Information Centre