

组织等效电离室光子定度的研究及其验证

张之彬 陈 迪 郭 勇

(中国计量科学研究院)(军事医学科学院放射医学研究所)

本文详细地研究了 γ 定度的方法,从而求得了空腔中气体的质量,以计算吸收剂量。还直接测量了空腔的体积,由气体的密度推出了空腔气体的质量。这两种方法得到的结果在0.5%内符合。这表明:本文采用的定度程序、引用的物理常数是正当的。本文介绍的测定气体质量的方法亦可作为测定 $(Wc/e) \cdot S_{m,g}$ 的一个实验方法。

关键词: 组织等效电离室 吸收剂量定度因子 滞后效应 修正因子

一、序 言

从1959年以来,国际上已举行过多次规模不等的以电离室方法为主的中子吸收剂量比对。通过这些比对推动了中子剂量测量的改进提高,降低了测量结果的不确定度。从国际比对的数据来看,参加比对的电离室的 γ 定度因子变化相当大,在比对中心给出的定度因子与仪器持有实验室给出的定度因子之间有着明显的差别^[1],这是造成中子剂量国际比对结果分散的原因之一。改进中子剂量测量的一个重要方面是国家标准实验室进行 γ 定度的研究工作。为此要对组织等效电离室的结构及特性进行系统的分析,选定性能适宜的电离室,研究各项修正因子的实验测定方法,确定组织等效电离室的 γ 定度因子。根据上面结果及国际公认的物理参数可求出电离室空腔气体的质量。本文除进行了上述工作外,还直接测量了电离室空腔的体积,通过计算空腔中TE气体的密度,求出了空腔中气体的质量。通过所得结果的比较,可以对电离室的结构是否合理、修正因子的实验方法是否得当、所用物理参数是否有系统误差等问题进行验证,从而有助于提供更可靠的 γ 定度因子。

二、电离室与电离电流的测量

1. 电离室

根据文献[2]的介绍与我们的经验,制成了IRM-81T型组织等效电离室(见图1)。结构特点是:电离室的中心收集极与保护极的直径相同,两者之间只有很小的间隙。理论计算与实验测量结果表明:只要收集极、保护极与高压极的直径及保护极的长度选择适当,就能保证在间隙附近的电力线与收集极的轴线垂直。这样就使收集极体积边缘的电场分布规则,能够通过电极的几何尺寸测量确定收集体积的数据。

2. 电离电流的测量

用空气电容、静电计和数字电压表组成

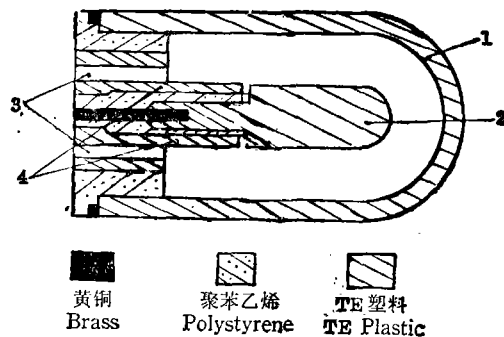


图1 IRM81T-TE电离室的结构

1. 高压极 2. 收集极 3. 气体进出口 4. 保护极

Fig1. Structure of IRM81T-TE ionization chamber

1. High voltage electrode 2. Collecting electrode

3. Gas passage 4. Guard electrode

汤逊补偿电荷测量装置。测量电荷的准确度高于 0.1% 。单次测量的标准偏差 $<0.05\%$ 。

改变电离室的收集电压数值或极性后的短时间内, 电离电流的变化大小与电离室结构有关, 通常为千分之几。这种滞后现象文献[2]中已有许多报道。因之每个电离室都有建立稳定读数所必须的稳定时间。我们观测了所用电离室在收集电压数值和极性变化或频繁改变各种情况下建立稳定电流读数所需的时间。从大量数据看, 读数稳定时间为2—5min, 在此后的较长时间内(1h左右)读数的波动 $<0.1\%$ 。达到稳定读数所需时间与所加的收集电压值有关, 电压值越小, 所需时间越长。

三、电离室的 γ 定度与气体质量的计算

将被定度的电离室置于光子场中, 用 γ 射线基准电离室测出相当于电离室几何中心处无电离室时的照射量率 $\dot{X}[(C/kg)/s]$, 电离室放在此点时的电离电荷为 $R_C(C)$, 则照射量定度因子 N_C 为:

$$N_C = \frac{\dot{X}_C}{R_C \cdot \pi k_R} [(C/kg)/C] \quad (1)$$

式中, πk_R 是各项修正因子的乘积, 包括温度、气压修正; 漏电修正; 复合损失修正; 极性效应和气流率影响等。脚标 C 表示标准 γ 定度场。吸收剂量定度因子 $a_C^{[3]}$ 为:

$$a_C = N_C(f_t)_C(\pi k_A)_C \quad (2)$$

式中, $(f_t)_C$ 是光子照射量与吸收剂量的转换因子(J/C); πk_A 是室壁减弱和散射、杆的散射、 γ 场的不均匀性等项修正因子的乘积。

根据空腔理论, 推出电离室空腔中气体的质量 $Mg^{[3]}$ 为:

$$Mg = \frac{1}{a_C} \cdot \frac{W_C}{e} (S_{m,g})_C \left[\frac{(\mu_{en}/\rho)_t}{(\mu_{en}/\rho)_m} \right]_C \quad (3)$$

式中, W_C/e 是在电离室气体中产生一对离子所需的平均能量(J/C); $S_{m,g}$ 是次级电子在电离室室壁材料和空腔气体中的质量阻止本领比; $(\mu_{en}/\rho)_t$ 和 $(\mu_{en}/\rho)_m$ 分别是组织和室壁材料的质量能量吸收系数。

四、修正因子的测定

1. 气流率效应及气流率修正因子 k_f

用组织等效电离室在混合场中测量时, 电离室内要充以组织等效气(TE气), 并必须有一定的气流率。电离室的响应与气流率有关^[2], 为了研究比效应, 在电离室的气流入口、出口处分别接上U形管压力计, 以直接测量不同气流率时该两处的气压与外部大气压之差 ΔP_1 、 ΔP_2 。取其平均值 ΔP 作为电离室内部气压与外部大气压之差, 即电离室内的实际气压为: $P + \Delta P$ 。

实验表明: 电离室的响应随气流率的增加而增加, 在20—80cm³/min范围内, 响应约增加1%。增加的数值与气流系统的结构有关。对电离室的响应按电离室内的实际气压做修正后, 得到一条与气流率无关的响应曲线(气流率20—80cm³/min), 见图2。这个实验表明: 电离室响应随气流率的变化是由室内气压增加所引起的。为了消除气流率效应, 应该实际测定电离室内的气压, 或者保持在混合场中测量时使用的气流率与定度时使用的气流率相同。

我们选定的气流率在20—30cm³/min之间, 对我们的气流系统电离室内气压比外部大气压高0.3%。气流率修正因子为 $k_f = 0.997$

2. 复合损失修正因子 k_{sat}

k_{sat} 可表示为

$$k_{sat} = i_s / i_u$$

式中, i_s 是饱和电流, i_u 是收集电压为 u 时测得的电离电流。按下述方法做了测量: a. 电离室加正(或负)高压, 由10V增至500V; b. 电离室加正(或负)高压, 由500V降至10V; c. 电离室加一定高压, 用正、负极性电压测量取平均, 然后再增或降电压。d. 加收集电压后等30—40min再进行测量。上面四种方式的测量结果用 $1/i$ 与 $1/u$ 直线拟合, 求出的 k_{sat} 值在0.02%范围内符合, 表明测量结果消除了前面提到的滞后效应的影响。电离室收集电压为225V时, $k_{sat} = 1.0009 \pm 0.0001$ 。

3 室壁吸收和散射修正因子 k_w

利用一组组织等效塑料增长帽, 在光子场中测出电离电流与壁厚关系曲线。用最小二乘法拟合外推至零壁厚, 求得电离电流 i_0 , 室壁厚度为 d 时的壁吸收、散射修正因子 $k_w = i_0 / i_d$ 。壁厚为 $0.59 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时的 $k_w = 1.013 \pm 0.001$ 。

4. 电离室的漏电流修正因子 k_i

通常电离室的漏电流小于 $2 \times 10^{-15} \text{ A}$, 与定度时的电离电流 10^{-11} A 相比可忽略, 取 $k_i = 1.000$ 。

5. 电离室杆散射修正因子 k_{st}

紧靠电离室顶端, 对称地放置另一只同样的电离室, 测出放置此电离室的电离电流 i_{st} , 除以无此电离室时测到的电流 i , 即得到杆散射修正因子 $k_{st} = i / i_{st}$ 。测量结果未发现电流有变化, $k_{st} = 1.000$ 。

6. 极性效应修正因子 k_p

定度实验时, 电离电流两种极性测量之差小于0.1%, 测量结果均取正、负极性的电流平均值, 故 $k_p = 1.000$ 。

7 辐射场的不均匀性修正因子 k_u

定度用的 γ 辐射场, 在垂直于射束轴的平面上, 电离室所占的整个区域内, 其变化 $< 0.1\%$ 。定度时所用的距离为75cm。在这个距离假定电离室的有效中心就是电离室的几何中心而引入的误差可以忽略。故取辐射场的轴向、径向不均匀性修正 $k_u = 1.000$ 。

五、电离室的 γ 定度结果

组织等效电离室的 γ 定度是在计量院的 ^{60}Co γ 辐射场中进行的。 ^{60}Co 源产生准直束, 距源75cm处的射野为 $15 \times 15 \text{ cm}^2$ 。该处的照射量率用石墨基准空腔电离室测量。1984年1月29日的测量值为 $1.116(1 \pm 0.62\%) (\text{mC/kg})/\text{min}$ 。

定度时组织等效电离室的中心轴线垂直于准直束, 电离室的几何中心置于准直束的中心轴上。用测距仪(精度0.01mm)测定电离室中心至源的距离。基准电离室和组织等效电离室

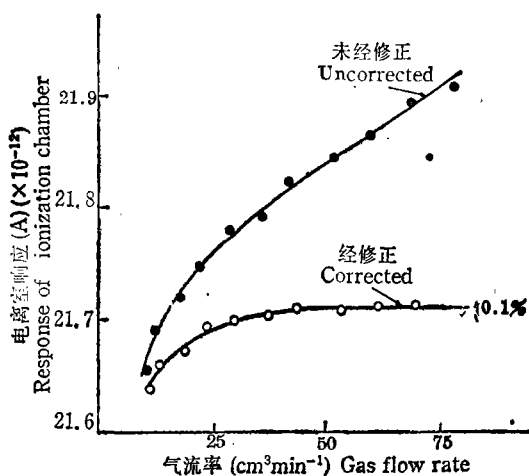


图2 电离室的气流率效应
Fig. 2 The effect of gas flow rate on ionization current

都是在距源75cm处测量的。距离的测量误差可以忽略。

电离室分别在充空气和通组织等效气(北京氧气厂配制, 标称分压比是: CH_4 , 64.4%; CO_2 , 32.4%; N_2 , 3.2%)两种条件下进行定度。两种条件下定度因子的比值可反映气体成分差别的影响。定度时将电离室、TE气瓶和气流装置放在定度室内足够长的时间, 使其和周围环境达到平衡后, 用大流量($>80\text{cm}^3/\text{min}$)TE气驱赶电离室内的空气约10—30min, 然后调节气流稳到 $\sim 20\text{cm}^3/\text{min}$, 测出电离室的收集电荷 R_c , 利用式(1)、(2)、(3), 可以计算出照射量定度因子、吸收剂量定度因子和电离室空腔中TE气体的质量。计算时所用修正因子的数值及其不确定度列在表1。表1中还给出了所用参数的数值, 取自文献[3]。

表1 各项修正因子及物理参数的数值及其不确定度

Table 1 Values and their uncertainty of correction factors and physical parameters

修正因子或物理参数	Correction factors or physical parameters	数值 Value	不确定度(%) Uncertainty
$(\pi k_R)_c$	电离电流测量	Measurement of ionization current	0.1
	复合修正	Recombination loss correction	1.0009
	漏电流修正	Leakage correction	1.00
	极性效应修正	Polarity effect correction	1.00
	气流率修正	Gas flow-rate correction	0.997
	温度-气压修正	Temperature-pressure correction	0.04
	距离测量	Distance measurement	<0.1
X_c			0.8
$(\pi k_A)_c$	室壁减弱和散射	Wall attenuation and scattering	1.013
	γ 场的不均匀性	Non-uniformity of γ field	1.00
	杆的散射	Stem scatter	1.00
$(f_1)_c$		37.326J/C	0.5
$\bar{W}_{c/e}$		29.3J/C	
$S_{m,g}$		1.00	2.0
$[(\mu_{en}/\rho)_i/(\mu_{en}/\rho)_m]_c$		1.001	0.1

计算结果如下(其不确定度按均方和计算):

照射量定度因子

充空气时: $N_{C,air} = 9.195 \times 10^5 [(\text{C/kg})/\text{C}] \pm 0.82\%$

充TE气时: $N_{C,TE} = 7.967 \times 10^5 [(\text{C/kg})/\text{C}] \pm 0.82\%$

吸收剂量定度因子

$a_{C,TE} = 3.012 \times 10^7 \text{Gy/C} \pm 0.98\%$

电离室空腔中TE气体质量

$M_g = 9.74 \times 10^{-7} \text{kg} \pm 2.2\%$

六、体积测量法确定空腔气体质量

电离室空腔中气体的质量亦可通过测量空腔的体积再乘以气体的密度求得。为此要求电离室设计成有明确的收集体积, 在结构上也要使得体积的测量易于实现。

在指形电离室的高压帽上配上有机玻璃塞。取出电离室的收集极及保护极后, 用有机玻

璃塞盖紧高压帽。加工有机玻璃塞时要保证有机玻璃塞伸进高压帽的深度与装收集极时伸入的深度相同。为了减少水银弯月面的影响,将水银灌满有机玻璃塞上的两个小孔(图3)。设高压帽的体积为 $V_{\text{腔}}$, 两个小孔的体积为 $V_{\text{孔}}$ 。用天平称出高压帽内充以水银和无水银时的质量差 Δm , 则 Δm 就是 $V_{\text{孔}} + V_{\text{腔}}$ 体积内水银的质量, 除以该温度时的水银密度, 就求出了 $V_{\text{腔}} + V_{\text{孔}}$ 。由计量科学院长度处测出收集极和保护极的几何尺寸, 计算出它们的体积 $V_{\text{保}}$ 和 $V_{\text{收}}$ 。其数值及不确定度如表2。

表2 空腔体积的测量数值及不确定度

Table 2 Value and uncertainty of the cavity volume

数 值 及 不 确 定 度 (cm^3)		
$V_{\text{腔}}$	V_{cavity}	1.4646 ± 0.0015
$V_{\text{孔}}$	V_{hole}	0.0322 ± 0.0004
$V_{\text{保}}$	V_{guard}	0.460 ± 0.004
$V_{\text{收}}$	$V_{\text{collector}}$	0.122 ± 0.0005

这样电离室的收集体积($V_{\text{腔}} - V_{\text{孔}} - V_{\text{保}} - V_{\text{收}}$)为 $(0.8504 \pm 0.0043) \text{cm}^3$ 。按照 TE 气体的成分计算出在 $1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$ 、 0°C 条件下的密度为: $\rho_{\text{TE}} = 1.1421 \times 10^{-6} \text{kg/cm}^3$, 所以空腔内收集体积的质量为:

$$M'_g = 9.71 \times 10^{-7} \text{kg}.$$

M'_g 的总不确定度取决于体积测量和气体成分分析的不确定度。体积测量的不确定度为 0.5%, 若气体分压测量的不确定度为 0.5% (即如 CO_2 的分压比为 $(32.4 \pm 0.5\%)$), 则会使 ρ_{TE} 的计算结果变化 $\pm 0.5\%$, 由此计算出 M'_g 的总不确定度为 0.7%。

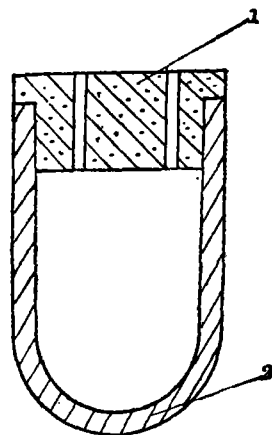


图3 电离室的高压帽及有机玻璃塞

1. 有机玻璃塞 2. 高压帽

Fig. 3 Cap of high voltage electrode and perspex plug

1. Perspex plug 2. Cap of high voltage electrode

七、结果和讨论

1. 上面的测量结果表明: 用 γ 定度法推出的空腔气体有效质量与由空腔体积测量推出的数值在误差范围内相符, 而数值上相差很少。这可证明: 在 γ 定度中采用的定度程序, 各种修正系数的测定方法及引用的物理参数数值是恰当的。

2 由空腔体积的测定推出空腔气体的有效质量 m , 通过气流效应的研究等实验, 以正确的方法测出照射时空腔中产生的电离电荷的绝对值 Q , 就可用空腔理论公式

$$D_t = \frac{Q}{m} \cdot \frac{W}{e} \cdot r_{m,g} \left[\frac{(\mu_{en}/\rho)_t}{(\mu_{en}/\rho)_m} \right]$$

来确定组织等效材料的吸收剂量。这些工作为用电离室法进行中子剂量的绝对测量创造了条件。

3. 由于在 M_0 的误差中 W_c/e 的误差为主要来源, 如果我们用(3)式反推 W_c/e , 则推出的值为 $29.25(1+1.2\%)J/C$, 与国际上常用的值 $29.3(1+2\%)$ 很相近。

参 考 文 献

- [1] J. R. Williams and J. R. Greening, *Phys. Med. Biol.*, 25 (1980), 2: 215.
- [2] CEC., Ion chambers for neutron dosimetry, Harwood Academic Publishers, 1980.
- [3] J. J. Broerse et al., *Brit. J. Radiology*, 54(1981), 882.

Calibration of a tissue-equivalent ionization chamber and the experimental evidence

Zhang Zhibin

(National Institute of Metrology)

Chen Di Guo Yong

(Institute of Radiation Medicine, Academy of Military Medical Science)

Abstract

A calibration procedure in a photon beam for a tissue-equivalent ionization chamber is described. To verify the calibration we also measured the volume of cavity and obtained the mass of gas in the cavity directly using gas density. The agreement between the two methods is better than 0.5%, showing that the procedure and the physical parameters used in the calibration are proper. The method used for measuring the mass of gas in the cavity is also valid for the experimental determination of $(W_c/e) \cdot S_{m,e}$.

Keywords: Tissue-equivalent ionization chamber Absorbed dose calibration factor

Hysteresis

Correcting factor

(1987年8月25日收到)