

用于校准剂量仪和剂量率仪及确定其 能量响应的 X 和 γ 参考辐射 第 2 部分:辐射防护用的能量范围为 8 keV~1.3MeV 和 4MeV~9MeV 的参考辐射的剂量测定

1 范围

GB/T 12162 的本部分规定了用于校准辐射防护仪器的能量范围为 8 keV~1.3MeV 和 4MeV~9MeV 的 X 和 γ 参考辐射的剂量测定程序,给出了不确定度分析的指导。这些参考辐射的产生方法和由这些参考辐射得到的标称比释动能率在 GB/T 12162.1 中给出。

本部分适用于辐射防护用的参考辐射的剂量测定。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过 GB/T 12162 的本部分的引用而成为本部分的条款。凡是注日期的引用文件,其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本部分,然而,鼓励根据本部分达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件,其最新版本适用于本部分。

GB/T 4960(所有部分)核科学技术术语

GB/T 12162.1 用于校准剂量仪和剂量率仪及确定其能量响应的 X 和 γ 参考辐射 第 1 部分:辐射特性和产生方法(GB/T 12162.1—2000, idt ISO 4037-1:1996)

GB/T 12162.3 用于校准剂量仪和剂量率仪及确定其能量响应的 X 和 γ 参考辐射 第 3 部分:场所剂量仪和个人剂量计的校准及其能量响应和角响应的确定(GB/T 12162.3—2004, ISO 4037-3:1999, IDT)

3 术语和定义

下列术语和定义适用于 GB/T 12162 的本部分。

3.1 参考条件 reference conditions

规定用于测量仪器性能试验的条件,亦即保证测量结果比对有效性的条件。

注:参考条件通常规定测量仪器影响量的参考值或参考值的范围。本部分中,规定环境温度、大气压强和相对湿度的参考值如下:

——环境温度:293.15 K;

——大气压强:101.3 kPa;

——相对湿度:65%。

3.2 标准试验条件 standard test conditions

规定用于辐射场剂量测定或进行校准和确定仪表响应时的一组影响量或仪器参量的值(或取值范围)。

注:环境温度、大气压强和相对湿度的值的范围如下:

——环境温度:291.15 K~295.15 K;

——大气压强:86 kPa~106 kPa;

——相对湿度:30%~75%。

在此范围外工作时可能导致准确度降低。

3.3 量的约定真值 conventional true value of a quantity

由初级或次级标准确定,或者由用初级或次级标准校准过的参考仪器确定的被测量量的最佳估计值。

注:对于给定目的约定真值与真值的差别认为不重要,通常认为约定真值足够接近真值。

3.4 电离室 ionization chamber

由充满某种适当气体的空腔组成的电离探测器,在空腔内施以不足以引起气体放大^[3]的适当电场,以便在其收集电极上收集电离辐射在探测器灵敏体积中产生的离子和电子。

注:电离室包括灵敏体积、收集电极和极化电极、保护电极(需要时)、电离室壁、紧接灵敏体积的绝缘体部分以及为保证电子平衡所必需的平衡帽。

3.5 电离室组件 ionization chamber assembly

除测量装置外,电离室以及与电离室永久连接的所有其他部分。

注:对于连有电缆的电离室,电离室组件包括杆,电接插件和可能永久连接的电缆或前置放大器。对于薄窗电离室,还包括电离室嵌入其中的永久性底衬。

3.6 测量装置 measuring assembly

用于测量来自电离室的电流或电荷并将其转换为适于显示、控制或存储形式的装置。

电离室的参考点 reference point of the ionization chamber

电离室上的一点,用于确定从辐射源到指定取向电离室的距离。

注:参考点应由仪器的制造商标记在电离室组件上。如果不能这样做,参考点应在随仪器提供的相关文件中说明。

检验点 point of test

校准时电离室的参考点放置在参考辐射场中的位置,该点的比释动能率约定真值已知。3.9 电离室取向效应 chamber orientation effect

参考辐射入射方向的改变对电离室电离电流的影响。

3.10 校准因子 calibration factor

配有测量装置的电离室组件校准因子是仪器测量的量的约定真值与仪器的指示值的比值,仪器的指示值应修正到规定的参考条件。

3.11 校准因子 calibration factor

无确定测量装置的电离室自身的校准因子是将已修正到参考条件的电离电流或电荷转换为电离室参考点处的剂量学量的约定真值的转换因子。

3.12 响应 response

测量装置的指示值与检验点被测量量的约定真值的比。

注:响应通常随入射辐射的谱分布和方向分布变化。

3.13 响应时间 response time

引起规定突然变化的激励时刻到响应达到并保持在最终稳定值的规定限值内时的时间间隔。

3.14 线性偏差 deviation of linearity δ

线性偏差由下式给出:

$$\delta = 100\% \times \left(\frac{mQ}{Mq} - 1 \right)$$

式中: M 和 Q ——分别表示在选定检验点的指示值和输入值;

m ——其他输入信号为 q 时所观察的指示值。

注:对于多量程仪器,上述定义适用于每个量程。

3.15 漏电流 leakage current

在没有辐射场的情况下,加有工作偏压的探测器的总电流。

3.16 零点漂移 zero drift

输入短路时测量装置指示值随时间的慢变化。

3.17 零点移动 zero shift

将电离室接到测量装置的输入端,在没有电离辐射而只有环境辐射的条件下,当设备的控制开关由“调零”状态转变到“测量”状态时,测量装置表盘读数在任一极性上的突然改变。

3.18 初级标准 primary standard

在指定领域,具有最高计量特性的某个量的标准。

3.19 次级标准 secondary standard

其值通过与初级标准直接或间接比对确定的标准。

4 设备

4.1 概述

用于参考辐射测量的仪器应是次级标准仪器或其他适当的仪器。次级标准仪器通常由电离室组件和测量装置组成。在某些场合可使用其他仪器,如测定低空气比释动能率时使用闪烁剂量仪。对于 4MeV~9MeV 的高能情况(见 10.2 和 10.6.3),也使用热释光(TLD)剂量计和硫酸亚铁(Fricke)剂量计等其他类型的剂量计。

4.2 校准

标准仪器应在所使用的能量和量值范围内进行校准。

4.3 仪器的能量响应

对于平均能量在 30keV 以上(见 GB/T 12162.1)标准仪器所使用的能量范围内,标准仪器的最大与最小响应之比应不超过 1.1,在 8 keV—30keV 之间其比值应不超过 1.2。

应尽可能使用与校准次级标准仪器的参考辐射相同的参考辐射校准辐射防护仪器。

4.4 稳定性检验装置

只要可能,仪器使用之前宜用放射性检验源检验仪器符合要求的工作。

5 一般程序

本章所描述的程序适用于 X 和 γ 参考辐射的测定。

5.1 标准仪器的使用

标准仪器的使用应与其检定/校准证书和使用说明书一致;检定/校准周期和稳定性检验的时间间隔,应遵守国家有关规程的规定。

5.2 稳定性检验

仪器的稳定性检验应使用适当的放射性检验源或经校准的辐射场进行测量,仪器的复现性应好于 $\pm 2\%$ 。检验时应对放射性衰变以及大气压强和温度与参考条件的偏离进行修正。

注:对于多量程仪器,检验源可以只检验仪器的一个特定量程。如果检验源可用于检验一个以上量程,应选用能给出指示值最大读数精度的量程。

5.3 预热时间和响应时间

在进行任何测量之前,应有足够的预热时间使仪器稳定。为使测量结果不依赖于仪器的响应时间,各次测量之间应有足够的时间间隔。测量比释动能率时,相邻两次读数间的时间间隔应不小于所使用仪器量程的响应时间值的五倍。

制造商应说明仪器的预热时间和响应时间。

5.4 调零

如果有调零控制,应在连有探测器的情况下,在仪器的使用量程上进行调节。

5.5 读数次数

使用标准仪器应至少连续读取四个读数。但是为保证读数的平均值具有足够的精度,应根据情况确定读数次数。

5.6 标准仪器的能响应

标准仪器的校准因子对应于特定的谱分布。如果标准电离室的响应与能量有关,当辐射的谱分布与用于校准标准仪器的谱分布有显著差别时,要进行适当修正。

5.7 仪器标度和量程的非线性

应对标准仪器的指示值标度和量程非线性进行修正。

5.8 快门过渡时间

如果标准仪器是通过快门操作来确定照射时间的积分型仪器,可能需要对照射时间进行修正(见 GB/T12162.1)。快门过渡时间 Δt 可用“多次照射技术”来确定。这时需要确定一个标称照射时间量 t 和两个表现比释动能 K_1 和 K_n , 这里 K_1 是指具有标称时间 t (单位为 s) 的单次照射得到的比释动能, K_n 是指 n 次照射的比释动能总和,每次照射的标称时间的为 t/n (单位为 s)。快门过渡时间 Δt , 由于式给出:

$$\Delta t = \frac{t(K_n - K_1)}{(nK_1 - K_n)} \dots\dots\dots (1)$$

对于稳定输出源,这种方法给出的结果很好,否则通过重复测量来得到平均 Δt 值。

5.9 从被测量的量到所需的量的转换

当校准标准仪器的量与所需要的量不同时,应使用适当的转换系数对测得的值进行转换。

6 适用于电离室的程序

6.1 电离室与测量装置分离校准

当电离室组件从整个测量系统中分离出来单独进行校准时,相关的电荷或电流测量装置的校准应追溯到电学标准。

6.2 辐射的入射角度对电离室响应的影响

通常,电离室相对于入射辐射的取向将对测量结果产生影响。取向不准确引入的误差应不超过 $\pm 2\%$ (2σ), 电离室的参考取向应在检定证书中说明。

参考取向应尽可能与制造商的说明一致。

6.3 漏电效应的测量

对于测量比释动能率的仪器,在仅有环境辐射情况下仪器的漏电流应小于最灵敏量程的最大示值的 2% 。对于测量比释动能的仪器,在测量时间间隔内累计漏电指示值应小于在相同测量时间间隔内由参考辐射产生的相应读数的 2% 。如果漏电流显著,应对其进行修正。

注 1:漏电流来源的几个例子:

a)照射后漏电:这种效应由电离室中绝缘子及一部分杆或者电缆在射束中受照射引起。在照射停止后,这种效应继续存在并且一般随时间指数衰减。

b)不存在辐射时绝缘子的漏电:构成电离室、电缆、接头以及静电计和/或前置放大器的高阻抗输入元件的绝缘材料的表面或内部产生的漏电。

c)数字显示仪器:电离室信号由数字化仪器显示时,通常不能指示与电离室中电离产生的电流极性相反的漏电流。在这种情况下,漏电流的大小不能确定,除非使用已知比释动能率或已知比释动能率的比率的适当辐射予以确定。

注 2:与漏电流效应相似的误差源项的几个例子:

a)电缆微颤噪声:同轴电缆当被弯曲或者变形时会产生电子噪声。宜使用低噪声、无微颤噪声电缆,并且为了使机械诱发的电流消失,应经过足够的时间再测量。

b)前置放大器感应信号:前置放大器宜尽可能放在辐射束区域之外,以消除诱发的漏电流,如果不可能这样做,那么前置放大器应进行足够的屏蔽。

6.4 标准电离室的定位和取向

标准电离室应按照校准实验室的规定固定在参考辐射束的轴线上,并按需要选取电离室参考点与源的距离。电离室相对于射束的取向应为参考取向,并与制造商说明的一致。

6.5 几何条件

参考辐射束的截面宜足以照射被校准的标准电离室或装置。整个有用射束截面上比释动能率的变化应小于 5%,并且散射辐射对总比释动能率的贡献应小于 5%(见 GB/T 12162.1)。必要时应进行修正。

由于电离室有一定尺寸,当源至电离室的距离较小时电离室的大小会影响辐射的测量^[4]。

6.6 电离室支撑物和杆的散射

在射束中支撑电离室的结构的设计应使其对散射辐射的贡献尽可能小。由于标准仪器的校准因子中包括校准条件下杆散射以及杆中辐射诱发电流的效应,所以当射束面积与用于校准标准仪器的射束面积没有显著不同时,不宜对这些效应进行修正。

可以在适当几何条件下通过使用和不使用复制杆进行测量来得到杆散射效应。

注:杆散射是参考辐射质和射束面积的函数。散射辐射对随后使用射束校准仪器的影响将依赖于仪器类型及它的支撑方法,除非标准仪器与被校准仪器相同。

6.7 测量修正

标准仪器的读数在必要时需对在 5.6 和 5.7 条中所述效应进行修正以确定测量的结果。

6.7.1 零点移动

这种效应在较灵敏的测量量程中会非常显著,如不能消除,在必要时应通过适当的测量技术进行修正。

6.7.2 电气漏电及辐射(包括环境辐射)诱发漏电的修正

适当时,应对 6.3 条所述漏电效应进行修正。

6.7.3 空气温度、压强和湿度偏离参考条件的修正

对非密封标准电离室,应对测量期间的条件与参考校准条件之间的任何差别进行下述的理想气体修正。

$$M = M_i \times C_{T,p} \times C_h \dots\dots\dots (2)$$

式中:M——修正到下面参考条件的值:

- 参考空气压强, $P_o = 101.3 \text{ kPa}$;
- 参考空气温度, $T_o = 293.15 \text{ K}$;

——参考空气相对湿度, $h_0 = 65\%$ 。

M_i ——在下述测量条件 P, T, h 下得到的值:

P ——测量时的空气压强;

T ——测量时的空气温度;

h ——测量时的相对湿度。

$G_{T,P}$ ——空气温度和气压修正因子,由式(3)给出:

$$G_{T,P} = (P_0 \times T) / (P \times T_0) \dots \dots \dots (3)$$

G_h ——参考条件与测量条件之间相对湿度差别的修正因子。 C_h 的值由电离室的响应作为相对湿度函数的一个经验公式确定^[5]。这个修正通常是很小的,因此对于一般所能达到的相对湿度范围,假定 $C_h = 1$ 。

一些类型仪器具有自动温度和/或气压补偿。如果是补偿到参考条件,则不需要进行修正。

注:把温度和湿度调整到标准试验条件给定的范围值之内是可能的,气压情况则不同。在本部分给出的范围值以外工作会导致不确定度增加,此时可能需要对修正因子进行特殊处理。

6.7.4 离子的不完全收集

当标准仪器在高量程使用时,可能需要对电离室组件的离子收集不完全进行修正。

注1:如果可能,最好避免使用电信号来进行仪器较高量程的修正。如果使用电信号,那么就可能必须对电离室的不完全离子收集进行修正。

注2:建议照射整个探测器组件,因为这种方法可以检验完整的测量系统。

6.7.5 射束的不均匀性

应使用小面积的探测器扫描射束截面或用照相乳胶来确定整个射束截面的比释动能率变化。

7 使用放射性核素源进行 γ 辐射剂量测定特有的附加程序和注意事项

7.1 有证源的使用

有证源的输出不应用来提供辐射场的校准。所有参考辐射的剂量测定应使用经校准的标准仪器来进行,以避免由于有证源输出的初始测量和随后使用时几何条件的差别而引入的误差。

但是对于小于 $10\mu\text{Gy/h}$ 的环境比释动能率的测量,使用适当的经校准的放射源和技术是可接受的。用测量环境比释动能或比释动能率的仪器进行准确的剂量测定及这类仪器的校准存在很多问题。解决这些问题的详细考虑和推荐的校准技术可参阅参考文献[6]。

7.2 平衡帽的使用

为保证标准仪器的校准因子有效,用标准仪器进行测量时所使用的平衡帽应与其校准过程中各能量点使用的一致。

7.3 放射源衰变修正

需要时,应对放射源的衰变进行修正,放射性核素的半衰期见 GB/T 12162.1。

7.4 放射性核素杂质

由于新制作的¹³⁷CS源可能会含相当数量的¹³⁴Cs,基于纯¹³⁷CS同位素进行衰变修正会产生错误。

放射源制造商应给出放射源杂质的详细说明(见 GB/T 12162.1)。

7.5 校准位置间的内插

在偏离距离反平方率不大于 $\pm 5\%$ 的距离范围内,可以使用距离内插法来确定未进行测量的距离上的比释动能率(见 GB/T 12162.1)。

8 X 辐射剂量测定的附加程序和注意事项

8.1 X 辐射输出量的变化

X 射线发生器辐射输出量有可能随时间变化,应使用监测电离室对发生器的输出量进行监测。

注:由于 GB/T 12162.1 规定的参考辐射应用了大量的附加过滤,所以球小的管电压变化也会引起输出量大的变化,如对于低比释动能系列,X 射线管电压 1% 的变化引起的过滤束输出量的变化会达到 15%。除此以外,即使平均电压是常数,整个电压周期内的任何纹波也会产生 X 辐射的瞬时比释动能率的实质性变化(见 GB/T12162.1 给出的电压纹波的限值规定)。

8.2 监测仪

8.2.1 监测仪宜为带有测量装置的非密封透射型电离室组件。

8.2.2 监测电离室中射束穿过的部分应是均质结构。监测电离室应放在附加过滤的后边并靠近附加过滤,监测电离室的壁宜足够薄,以便不对射束增加不适当的过滤。图 1 是一个典型的 X 射线装置的例子。

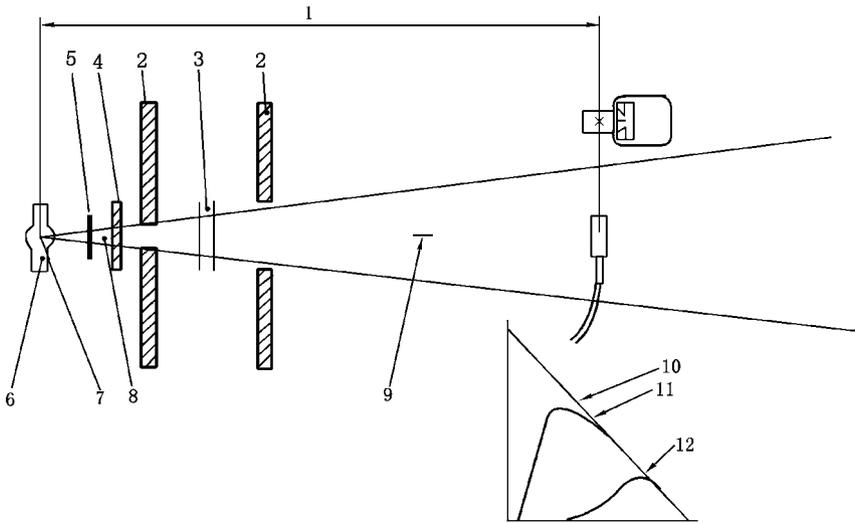


图 1 典型的 X 射线装置示例

- 1——校准距离; 2——限束铅光阑; 3——监测电离室; 4——附加过滤;
5——快门; 6——X 射线管; 7——位置 A; 8——位置 B; 9——位置 C;
10——无过滤(位置 A)的谱; 11——有固有过滤(位置 B)的谱; 12——有附加过滤(位置 C)的谱。

8.2.3 对于所有要用到的比释动能率,监测电离室的电离电荷收集效率应不小于 99%。

8.2.4 对于给定的辐射质,如果监测仪的指示值与标准仪器的指示值的比率在规定的期间内稳定,变化不超过 0.5%,则在这段时间内该监测仪可用作传递仪器。

8.2.5 监测电离室的漏电流应小于最灵敏电流量程最大值的 2%,必要时应进行修正。

8.2.6 对于比释动能率的测量,监测电离室测量系统的时间常数应与标准仪器的时间常数相当,监测电离室测量系统的时间常数宜不大于标准仪器的时间常数。

8.2.7 当温度和气压偏离参考条件时,应对监测电离室测量系统的读数进行修正(见 6.7.3)。

8.2.8 监测电离室组件及其测量装置的性能要求应与标准仪器相似。

8.3 限束光阑

限束光阑应放置在所有附加过滤的后面并靠近附加过滤器,以便将射束截面限制在所需的大小。限束光阑的设计宜使它在检验点引入的散射贡献最小。射束截面应足够大,保证它能够完全照射标准电离室和被校准仪器或设备,但同时又要保证电离室杆和它的支撑物的受照部分最小。在校准过程中射束大小应保持不变。

8.4 快门

快门应位于X射线管和监测电离室之间。快门的厚度应使校准用到的最高能量参考辐射(见5.8)的透射比释动能率减小到原来的0.1%。对于比释动能测量,要在照射完毕后尽快读数,以减少透射比释动能的影响。

8.5 比释动能率的调整

对每一参考辐射,既可以通过改变X射线管电流也可以通过改变到靶的距离得到不同的比释动能率。工作条件的选择,是对散射、束均匀性、输出稳定性、电压纹波及空气衰减这些彼此可能矛盾的要求的折中考虑。

9 荧光X辐射特有的程序和注意事项——射束中外部辐射的限制

9.1 不论实用性还是与要求的比释动能率的一致性方面,X射线机的电压都宜调整到使得辐射体产生的非所需特征辐射最小。

9.2 在这些辐射的应用中,应考虑杂质谱分布的显著性,这对于较低能量K荧光辐射特别重要。

9.3 对于铀的K荧光X辐射,辐射体和铀过滤器都是放射性物质,因此会在监测电离室中产生相当显著的假电流,必要时应对这个电流进行修正。

10 光子能量为4MeV~9MeV的参考辐射剂量测定

10.1 剂量学量

用于表征4MeV~9MeV参考辐射检验点的量应是空气中,即无受体条件下测量的空气比释动能(率);或者是在参考体模中一定深度处测量的规定的组织等效材料或水中,即有受体条件下的吸收剂量(率)。然后,再由这个量导出相关的辐射防护量(参见ICRU39号、ICRU43号、ICRU47号、ICRU51号报告和ICRP74号出版物)。

10.2 剂量学量的测量

空气比释动能(率)和吸收剂量(率)可以用选定的量校准过的仪器进行直接测量确定,也可以间接测量其他量并使用转换系数来确定。10.2.1和10.2.2中给出了直接和间接确定的示例。

10.2.1 无受体条件下空气比释动能(率)的确定:

a)直接法:使用以空气比释动能(率)校准的电离室来测量。

b)间接法:

——由光子注量(率)谱的测量得到;

——对于 $^{19}\text{F}(\text{p},\alpha\gamma)^{16}\text{O}$ 反应在质子能量接近反应阈且束流接近1MA时产生的辐射场,由伴随粒子发射的测量得到。

10.2.2 有受体条件下吸收剂量(率)的确定:

a)直接法:用以组织吸收剂量(率)校准的电离室测量组织吸收剂量(率)。

b)间接法:

——由无受体条件下光子注量(率)谱的测量得到;

——由空气中或者体模中空气比释动能(率)的测量得到。

10.3 测量的几何条件

探测器的参考点应置于检验点上。

从源中心到检验点的距离应使下列截面上光子注量的均匀性好于 5%:

- 无受体条件下,在用于校准参考辐射场的整个探测器组件的截面上;
- 有受体条件下,在用于校准参考辐射场的整个探测器和体模的组件截面上。

射束发散对测量结果的影响不应超过 3%,当检验点的射束截面比被照射的组件截面小时,应以适当的方式进行扫描测量。

10.4 监测仪

在检验点进行的所有测量都应 与监测仪测量同时进行。应选择合适的位置放置监测仪,以使其读数不受在检验点的测量仪器的辐射散射的影响。

监测仪的选择取决于注量率,可供选择的例子有:

- a) 电离室系统;
- b) NaI(Tl)或塑料闪烁体探测器;
- c) GM 计数器;
- d) 伴随粒子计数器或半导体探测器系统。

射束监测仪读数值应与被测量的约定真值成正比,且在 2%内一致。

10.5 无受体条件下空气比释动能(率)的确定

应给出检验点空气比释动能(率)的参考值,这个值可直接或间接地确定。

10.5.1 测量条件

10.5.1.1 探测器的选择和定位

宜使用具有接近空气等效材料室壁的电离室作为探测器。探测器的参考点置于检验点,如果电离室不是在校准的距离上使用,对测得的空气比释动能(率)应进行距离修正。

10.5.1.2 瞬态电子平衡

为了在探测器表面建立瞬态电子平衡,探测器应有可拆装的由空气等效材料制成的板(或帽)。

如果所用材料为非空气等效材料,应对其阻止本领的差别进行修正。用于¹³⁷CS 或⁶⁰Co γ 射场测量时,探测器室壁和帽的总厚度应在 0.4 g/cm² 和 0.6 g/cm² 之间;用于高能参考辐射测量时,探测器室壁和帽的总厚度应为 4.0g/cm² ± 0.1 g/cm²。

10.5.2 使用电离室直接测量

电离室应在空气中以空气比释动能校准。用于能量范围在 4MeV~9MeV 的光子测量时,总壁厚应为 4.0g/cm² ± 0.1 g/cm²。如果可能,电离室应使用与该参考辐射有相似光子谱的参考辐射校准。对于能量为 E_r 的参考辐射,空气比释动能(K_a)_r,可由电离室指示值 M_r¹⁾ 确定:

$$(K_a)_r = M_r \cdot (N_k)_r \dots\dots\dots (4)$$

式中:(N_k)_r——由能量为 E_r 的光子得到的空气比释动能校准因子。

如果不可能用与参考辐射有相似的光子谱的辐射来校准电离室,电离室可以用⁶⁰Co γ 辐射校准,这时电离室的总壁厚在 0.4 g/cm² 和 0.6 g/cm² 之间,对于能量为 E_r 参考辐射的空气比释动能(K_a)_r 由下式确定:

$$(K_a)_r = M_r \cdot N_k [(1 - g_a)k_{air} \cdot k_m]^c \dots\dots\dots (5)$$

式中:N_k——由⁶⁰Co γ 射线得到的校准因子;

(1 - g_a) 在空气中产生韧致辐射的修正;

k_{att} ——初级辐射在电离室壁和平衡帽中吸收和散射的修正;①

k_m ——电离室壁和平衡帽与非空气等效的修正。

附录 A 简要说明了公式(5)的导出。在电离室壁和平衡帽采用相同材料(m 下标)但不一定是空气等效的情况下, k_m 由下式给出:

$$k_m = (\bar{L}/\rho)_{a,m} \cdot (\bar{\mu}_{en}/\rho)_{m,a} \dots\dots\dots (6)$$

式中: $(\bar{L}/\rho)_{a,m}$ ——空气和壁材料的平均限制质量碰撞阻止本领比②;

$(\bar{\mu}_{en}/\rho)_{m,a}$ ——电离室壁和平衡帽材料与空气的平均质能吸收系数之比。对空气等效材料室壁及平衡帽的电离室 k_m 为 1。

在一些测量条件下可包括更多的修正,例如针对高注量密度下的离子不完全收集效应,极化效应,一些类型电离室的光子与其他部件(杆、中心电极)的相互作用,以及当电离室体积相对较大时,几何中心与有效中心的差别修正等。通常这些附加的修正小于 1%,对于辐射防护用的参考辐射场的剂量测定来说可以忽略。在表 1~表 4 中给出了由公式(5)计算 $(K_a)_r$ 所需要的一些数值。表 1 是电离室空气中韧致辐射损失修正值,这些值来自不同作者。表 2 给出了五种不同型号和尺寸的电离室在 1.25MeV 和 7MeV 的 k_{att} 值。

表 1 韧致辐射修正的典型值

光子能量/MeV	$1-\bar{g}_a$	$1-\bar{g}_a$ 的推荐值(归一到 1.25MeV)
1.0 ^a	0.998	1.001
1.25 ^a	0.997	1.00
1.5 ^a	0.996	0.999
4.0	0.988	0.992
4.4 ^b	0.987	0.990
6.0	0.980	0.983
6.1 ^b	0.980	0.983
7.0 ^b	0.976	0.979
8.0	0.972	0.975
8.5 ^b	0.970	0.973
9.0 ²⁾	0.968	0.971
10.0	0.963	0.966

注:引自 H. E. Johns and J. R. Cunningham, The Physics of Radiology, p. 723, Charles Thomas, Springfield USA, 1983.

a 数据出自 DIN 6814, Terms and definitions in the field of radiological technique, Part3: Dose quantities and units, Deutsches Institut für Normung e. V, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Germany, 1985.

b 内插得到的值。

①1) 电离室的读数 M_γ 是使用温度和气压修正因子修正到参考空气密度(见 3.1 和 6.7.3)。

② 这里以符号 \bar{L}/ρ 代替 $L(T, \Delta)$, ρ 表示次级电子平均能量的限制质量碰撞阻止本领, T 的截止能量为 Δ 。而不使用 IAEA277 报告中的 $S_{a,m}$ 以免与非限制碰撞阻止本领混淆。

表2 不同型号电离室的衰减和散射修正因子 k_{att} 的值

电离室				k_{att}^a			
电离室类型	电离室体积/ cm^3	壁厚(材料)/ $(g \cdot cm^{-2})$	电离室尺寸 ^b / cm	在 1.25MeV 壁厚		在 7.0MeV 壁厚	
				$\sim 0.5g \cdot cm^{-2c}$	$4.0g \cdot cm^{-2d}$	$4.0g \cdot cm^{-2h}$	归一到壁厚在 1.25MeV~ $0.5g \cdot cm^{-2d}$
相对浅的 圆柱	0.79	4.0(PMMA)	$r=0.325$ $d \approx 2.4$	~ 0.99	0.98 ± 0.03	$0.95^{d,e}$ 0.96^f	0.98^e —
相对浅的 圆柱	3.0	4.0 (PMMA)	$r=0.630$ $d \approx 2.4$	~ 0.99	0.97 ± 0.02	0.95^d 0.96^f	0.99 —
相对浅的圆 柱	30	4.0 (PMMA)	$R=2.0$ $d \approx 2.4$	~ 0.99	0.96 ± 0.01	0.96^d 0.95^f	1.01 —
深的圆柱 (巡测仪器)	385	~ 4.0 (PMMA)	$R=3.5$ $d \approx 10$	—	0.93 ± 0.01	0.94^d 0.95^f	1.01 —
非常浅的圆 柱	1.9	4.0 (Polystyrene)	$R=1.75$ $D \approx 0.2$	~ 0.99	0.97 ± 0.02	0.98 ± 0.01^d $0.97^{d,g}$	1.01 1.00^g

注:表中数据出自 D. W. O. Rogers(加拿大辐射研究委员会),采用了他以前发表的方法,参见参考文献[12]、参考文献[13]和个人通讯(1987)

a 除非另有说明,此计算值中源到电离室的距离为 100cm

b 符号含义:r=半径,d=深度。

c IAEA 277 号技术报告给出的 35 个体积小于 $1cm^3$ 的电离室的平均值,见 IAEA-TRS277。

d 端前照射

e 和距离无关

f 侧面照射。

g 照射时源到电离室的距离为 50cm。

h 未列出不确定度值的,适用值小于 0.005。

表3 空气相对于一些壁材料平均限制质量碰撞阻止本领比的典型值

光子能量/MeV	$(L/\rho)_{a,w}^a$		$(L/\rho)_{a,PMMA}^b$		$(L/\rho)_{a,polyst}^b$	
	比值	归一到 1.25MeV	比值	归一到 1.25MeV	比值	归一到 1.25MeV
1.25	0.883	1.000	0.907	1.000	0.901	1.000
4.0	0.903	1.023	0.934	1.030	0.928	1.030
4.4	0.906	1.026	0.937	1.033	0.931	1.033
5.0	0.909	1.029	0.942	1.039	0.935	1.038
6.0	0.917	1.039	0.947	1.044	0.941	1.044
7.0	0.920	1.042	0.953	1.051	0.947	1.051
8.0	0.924	1.046	0.956	1.054	0.950	1.054
8.5	0.927	1.050	0.958	1.056	0.951	1.055
9.0	0.929	1.052	0.959	1.057	0.953	1.058

注:次级电子的截止能量为 10keV。下标 w 代表水,PMMA 为有机玻璃,polyst 为聚苯乙烯。

a 引自 P. Andreo and A. E. Nahum,表 1^[14]。

b 下列值由 J. R. Cunningham(Ontario Cancer Institute)利用以前发表的方法^[10,11],和个人通讯(1987)计算。

电离室壁和平衡帽为非空气等效材料时,例如水、有机玻璃(聚甲基丙烯酸甲酯)(PMMA)和聚苯乙烯时,估算 K_m 修正因子需要的阻止本领比值和质能吸收系数比值在表 3 和表 4 中给出。在表 4 中给出的所有质能吸收系数的比值都可用于电子平衡的壁厚和单能光子,由于这些比值随光子能量的变化缓慢,所以即使对一些光子能量 $4.0g/cm^2$ 的壁厚比实际电子平衡的厚度大一些,表中给出的值仍然有效。附录 A 讨论

了表中列出的数值及其应用。

10.5.3 由光子注量(率)确定空气比释动能(率)

空气比释动能(率)可由光子注量(率)谱间接得到,光子注量(率)谱由校准过的固体探测器测量的脉冲高度谱确定(见 10.5.3.1),或者由伴随粒子计数得到总光子注量(率)从而得到空气比释动能(率)(见 10.5.3.2)。

通常,当 Φ_i 是能量为 E_i 的第 i 个能量间隔的注量^[11,16], $(\bar{\mu}_{tr}/\rho)_i$ 是在此间隔的平均质能转换系数,空气比释动能 K_a 由下式给出:

$$K_a = \sum E_i \Phi_i (\bar{\mu}_{tr}/\rho)_i \dots\dots\dots (7)$$

式中: \sum ——对整个注量谱求和;

$(\bar{\mu}_{tr}/\rho)_i$ ——质量转换系数,可由 $\bar{\mu}_{tr}/\rho = (\bar{\mu}_{en}/\rho)$ 计/ $(1\bar{g}_a)$ 算得到(参见 ICRU33 号报告);

$0\bar{\mu}_{en}/\rho$ ——质能吸收系数^[15]

\bar{g}_a ——对初始光子相互作用产生的电子谱的平均得到韧致辐射的辐射产额, $(1-\bar{g}_a)$ 的典型值见表 1。

表 4 非空气等效材料室壁相对于空气的质能吸收系数比的典型值

光子能量/MeV	$(\mu_{en}/\rho)_{w,a}$		$(\mu_{en}/\rho)_{PMMA,a}$		$(\mu_{en}/\rho)_{polyst,a}$	
	比值	归一到 1.25MeV	比值	归一到 1.25MeV	比值	归一到 1.25MeV
1.25	1.112	1.000	1.082	1.000	1.078	1.000
4.0	1.107	0.995	1.070	0.989	1.062	0.984
4.4	1.106	0.995	1.067	0.986	1.057	0.980
5.0	1.104	0.993	1.061	0.981	1.050	0.973
6.0	1.097	0.986	1.048	0.969	1.032	0.957
7.0	1.092	0.982	1.042	0.963	1.024	0.950
8.0	1.089	0.979	1.037	0.959	1.018	0.944
8.5	1.087	0.977	1.034	0.956	1.014	0.940
9.0	1.086	0.976	1.031	0.953	1.010	0.936

注:下标的解释见表 3。

10.5.3.1 光子注量测量确定空气比释动能

光子注量测量可以使用 NaI(Tl)、高纯锗(HPGe)或 Ge(Li)探测器。探测器包壳前表面的中心应置于检验点。如果探测器使用液氮,为避免直接辐射产生的散射辐射贡献,应将杜瓦瓶置于合适的位置。探测器按其响应函数校准,即对指定能量范围的不同能量入射光子,给出探测器连续能量间隔的单位光子注量的计数。如果在指定能区内没有足够数量的放射性核素或加速器源可用来测量探测器的响应函数,可使用计算值。对于¹⁹F(p, α Y)¹⁶O 反应,入射质子能量等于阈能或稍微高于阈能 340keV 时,有高于 97% 的 α 粒子伴随有 6.13MeV 光子发射(见 10.5.3.2),由该反应获得的 6.13MeV 光子可以用来测量探测器 6MeV 附近的响应函数。

为获得公式(7)所需的注量谱,需对测量得到的脉冲高度谱利用探测器的响应矩阵作反卷积。用此方法获得参考辐射束空气比释动能的实际经验是有局限性的,但当射束注量谱限制在用来校准探测器的能量 E_c 附近的一个相对窄的能量段时,可以进行简化,公式(7)表示为:

$$(K_a)_c = n N_\phi E_c (\mu_{tr}/\rho)_c \dots\dots\dots (8)$$

式中: n ——总的入射光子数;

N_ϕ ——定义为 $N_\phi = \phi_c/n$,是探测器对能量 E_c 的注量校准因子;

ϕ_c —— 光子注量;

$(\mu_{tr}/\rho)_c$ —— 在校准能量点 E_c 的空气质能转换系数。

参考文献[17]和参考文献[18]可作为使用校准过的探测器确定参考辐射注量率的示例,这也是获得 6.13MeV 光子源的一个步骤。

10.5.3.2 由伴随粒子计数确定空气比释动能(率)

由伴随粒子计数法确定空气比释动能(率)只适用于¹⁹F(p,αγ)¹⁶O 反应产生的参考辐射,此时入射质子能量略高于阈能 340keV,但不超过几个 keV。低的质子能量可以保证入射质子穿透的靶层厚度比由质子在靶中产生的 α 粒子在靶中的射程小,且没有¹⁶O 的高激发态及¹⁹F(p,p')¹⁹F 竞争反应对探测器计数的贡献。但对这样低的质子能量,为了使参考辐射有足够的强度用来校准辐射防护仪表,可能需要束流达到 1MA。而对于 NaI(Tl)和 HPGe 或 Ge(Li)探测器的校准,束流可低几个量级。

伴随粒子计数装置由一个准直的 α 粒子探测器(例如一个硅探测器)组成,安装在管道的末端,该管道与安装在质子加速管上的靶相对,并与加速管抽成相同的压力。

测量时不需要另外的束流监测仪。

由于 α 粒子发射基本上是各向同性的,所以对于伴随粒子与加速器靶管之间角度的选择不是很关键。即使存在小的各向异性^[17,21],也可以通过使伴随粒子管与加速管之间成 55°(即质子束轴线方向与被探测的 α 粒子束轴线方向成 125°)^[19]加以完全消除。入射到 CaF₂ 靶上的质子能量只能比 340keV 大几个 keV。

为保持韧致辐射产额的低水平,只要结构上可行,靶底衬材料的原子序数和厚度宜尽可能小。来自靶底衬上的库仑散射质子和其他散射质子可以用置于伴随粒子探测器前面的铝箔吸收掉。铝箔的厚度大约为 1Mg/cm²,这对于被探测的 α 粒子的射程来讲应是很薄的。贴近靶处应置一准直器以阻止伴随粒子靶管上的散射粒子。与靶距离为 d 的检验点光子注量率 Φ 由 $\phi_1 = n_a / (\Omega d^2)$ 给出,这里 n_a 是伴随粒子计数率, Ω 是 α 粒子探测器的准直器对 CaF₂ 靶中心所呈的立体角。

因此,空气比释动能率可表示为:

$$(K_a)_r = \frac{N_a}{\Omega d^2} E_r (\mu_{tr}/\rho) r \dots\dots\dots (9)$$

式(9)中 $E_r = 6.13\text{MeV}$ 。6.13MeV 的光子应与伴随 α 粒子同时计数,并应作光子探测器宇宙射线本底、湮灭辐射、剩余的散射 α 粒子和光子的修正。图 2 给出了伴随计数器几何条件的例子。

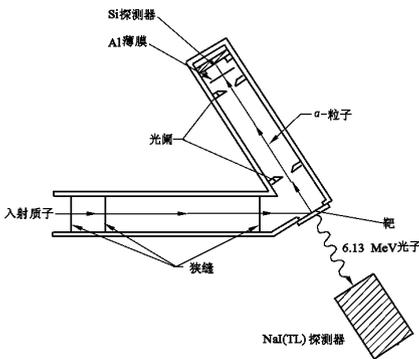


图 2 伴随粒子计数校准注量,探测器的装置示例^[19]

靶特性:在 0.38Mm 厚的钼膜上蒸发 100μg/cm² 的 CaF₂。α 粒子和光子都在与靶平面正交的方向探测。α 粒子探测器前的 Al 膜厚为 0.87Mg/cm²。图中的 NaI(Tl)探测器是要被校准的。

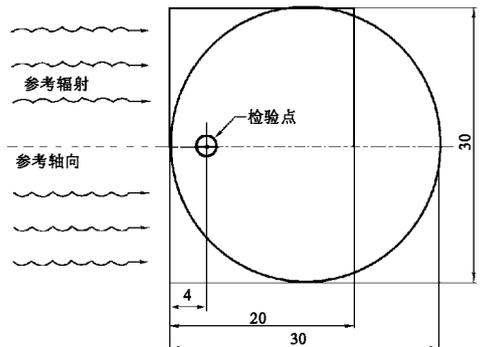


图 3 30cm 直径的球和 30cm × 30cm × 20cm 的平行体两种体模测量时的几何条件

10.6 有受体条件下组织吸收剂量(率)的确定

检验点吸收剂量率的参考值可通过直接或间接测量得到。

10.6.1 直接测量的条件 应使用由合适的组织等效材料构成的参考体模。

10.6.1.1 体模材料 体模材料应是 ICRU47 号报告给出的无微量元素的 ICRU 组织或合适的替代品^[22,23]。对于 GB/T 12162.1 规定的高能参考辐射,水也可认为是组织等效的。

10.6.1.2 体模形状及尺寸

通过测量组织吸收剂量来确定周围剂量当量,参考体模应是直径 30cm(参见 ICRU47 号报告)的球。而确定个人剂量当量的体模应是截面 30cm×30cm,高 20cm 的板模。

10.6.1.3 检验点 对于确定吸收剂量参考值,辐射测量仪器灵敏体积的几何中心应放置检验点上,位于体模表面下 4.0g/cm² 耐处,如图 3 所示。对于个人剂量当量确定,检验点相应于被检验剂量仪参考点的位置。

10.6.1.4 辐射测量仪器的选择

根据检验点参考辐射吸收剂量的水平,可使用不同型号的仪器。仪器的尺寸和组成应使它对体模内辐射场的干扰引起的测量不确定度贡献不很大。

10.6.2 电离室测量的方法(用于吸收剂量率大于几个 mGy/h)^[24,25,26]

电离室测量可以:(1)通过使用一个用相似于参考辐射能谱光子在参考几何条件下以水的吸收剂量(率)校准的小体积电离室直接测量。或者(2)如果不能按第一种情况进行校准时,使用在⁶⁰Co 射束中以空气比释动能校准的电离室间接测量。

在第一种情况下,对于参考能量的水吸收剂量(D_w)_r可由电离室读数 M_r 确定:

$$(D_w)_r = M_r (N_{absd})_r \dots\dots\dots (10)$$

这里 (N_{absd})_r 是在参考能量光子中获得的水吸收剂量校准因子。当电离室是以空气中空气比释动能校准时(第二种情况),对于光子能量为 E_r 的参考辐射,水吸收剂量可由仪器在体模上的读数值 M_r 得到:

$$(D_w)_r = M_r N_k [(L/\rho)_{w,a}]_r [(1-\bar{g}_a)k_{att}k_m]_c \dots\dots\dots (11)$$

式中: N_k——用⁶⁰Co_γ射线的空气中比释动能校准因子;

(1- \bar{g}_a)——空气中产生的韧致辐射修正;

k_{att}——初级辐射在电离室壁和平衡帽的吸收和散射修正;

k_m——电离室壁和平衡帽的材料不同于空气的修正,参见附录 A;

其他各符号的意义与公式(5)相同。

在某些测量条件下可能还包括其他的修正,例如,由空气代替体模材料所引起的光子谱的扰动修正,高注量密度时的离子收集不完全的效应,极化效应和光子与某些类型电离室其他部件(杆,中心电极)作用的效应修正。由公式(11)计算(D_w)_r需要的这些修正值的例子在表 1~表 4 中给出。附录 A 对列表值和它们的应用予以讨论。

使用参考辐射场进行辐射防护剂量测定时,这些附加修正可忽略。

10.6.3 用硫酸亚铁溶液直接测量(水吸收剂量从几十到几百 Gy)^[27,28,29]

当水吸收剂量太高而不宜用小电离室测量时,可采用密封的或磨口玻璃封住的硼硅酸盐玻璃小瓶中的硫酸亚铁溶液(Fricke)进行测量。由于不是作高强度脉冲参考辐射测量,可加入 NaCl 以降低系统对有机杂质的灵敏度。溶液吸光度值的变化 ΔA,应使用带有温度控制读数室的分光光度计读取 304nm 附近的亚铁离子的吸收峰值。

水的吸收剂量 D_w 可以用式(12)表示:

$$D_w = \frac{\Delta A}{G(\text{Fe}^{3+}) \Delta \epsilon \cdot d \cdot \rho [1 + 0.007(T - 298)]} \dots\dots\dots (12)$$

式中: $G(\text{Fe}^{3+})$ ——是亚铁离子到铁离子反应的辐射化学产额;

$\Delta \epsilon$ ——铁离子和亚铁离子的摩尔吸收系数的差(也称摩尔消光系数), $(\text{Fe}^{3+}) - (\text{Fe}^{2+})$;

d ——通过剂量计溶液的光程;

ρ ——剂量计溶液的密度;

T ——在吸光度测量时的剂量计溶液温度;因子 0.007 是以温度的倒数为单位的 $\Delta \epsilon$ 的温度系数。

在光程为 0.01M, 298 K 温度下测量 304mm 吸收峰的吸光值, 假设 Fricke 溶液密度为 1 024 kg/m³ 和 $\Delta \epsilon \cdot G(\text{Fe}^{3+}) = 352 \times 10^{-6} \text{ M}^2/\text{kgGy}$, 公式(12)可简化为:

$$D_w = 278 \Delta A \dots\dots\dots (13)$$

式(13)中 D_w 单位是 Gy。

10.6.4 用以水吸收剂量校准的热释光剂量计(TLD)直接测量(吸收剂量率小于几个 mGy/h)

在吸收剂量率很小以至于不能在体模内使用电离室测量的情况下, 可使用平均原子序数与组织或水接近并以吸收剂量校准的 TLD 小型裸片测量^[30]。

对于在加速电压 4MV—30MV 的韧致辐射束中的体模中测量, 结果显示在 5% 或更小的不确定度范围内, 单位水吸收剂量的氟化锂(LiF) TLD 响应不随加速电压变化, 且等于⁶⁰Co 辐射的响应。所以, 如果不可能在参考辐射进行校准得到校准因子, 可利用用⁶⁰Co 辐射得到的体模中水吸收剂量校准因子。

11 测量不确定度^①

11.1 概述 不确定度由两种方法确定; 随机不确定度是由相同量重复测量结果的统计分析得到的不确定度, 通常在 95% 的置信水平下计算; 系统不确定度是建立在判断和经验上可能的最佳估计值得到的不确定度。

11.2 不确定度的成分

11.2.1 不确定度由 11.2.2 和 11.2.3 描述的不确定度成分³⁾合成得到。

11.2.2 次级标准校准的不确定度如下:

- a) 初级量确定的不确定度;
- b) 将初级量传递到次级标准的不确定度。

11.2.3 由标准仪器及其使用带来的参考辐射测量的不确定度如下:

- a) 根据 5.5 进行的测量结果的统计分析导出随机不确定度。
- b) 以下系统不确定度成分, 可以由对读数值使用的修正因子或未使用修正因子的效应本身引起:
 - 1) 零点移动(见 6.7.1);
 - 2) 漏电和环境辐射(见 6.7.2);
 - 3) 测量仪器标度和量程的非线性(见 5.7)——这些修正的不确定度可在标准校准证书中得到;
 - 4) 校准次级标准仪器和校准防护仪表所用的参考辐射的能量的不同(见 5.6);
 - 5) 温度、压气和湿度的变化(见 6.7.3)——温度、湿度和气压测量的不确定度;
 - 6) 校准距离(见 6.5)——这个不确定度来自不能将标准电离室的参考点准确放置在射束轴线上所要求的位置和不能准确确定放射源的几何中心。也可能来自源和电离室距离较小, 但测量使用的标准电离室体积较大;

① 本章的内容与我国的有关规定略有不同, 详见 JJG 1059—99。

- 7) 射束中电离室的取向(见 6.4)—如果标准电离室的响应依赖于它的取向和电离室在参考辐射束中重复定位,会产生这个不确定度;
- 8) 射束场不均匀性(见 6.7.5);
- 9) 杆散射(见 6.6);
- 10) 快门过渡时间(见 5.8);
- 11) 仪器的长期稳定性(见 5.2)—如果有检查源,应给出仪器使用时检查源的读数值(经适当的修正)并与校准证书的值相比较;
- 12) 标度指示的分辨率。

11.3 不确定度的报告^[31,32,33,34,35]

11.3.1 对参考辐射剂量测定的不确定度报告应包括 11.3.2 到 11.3.3 的内容。

11.3.2 随机不确定度的报告包含以下内容:

a) 实验标准偏差; b) 95% 置信水平下的置信限; c) 自由度。

11.3.3 系统不确定度的报告包含以下内容:

- a) 列出主要的不确定度项, 不确定度值和评估方法;
- b) 使用的合成方法(例如平方和根或算术和);
- c) 总的系统不确定度。

11.3.4 如果总不确定度表述为随机和系统不确定度的合成, 应给出合成方法。

附录 A

(资料性附录)

用电离室测量方法确定无受体条件下空气比释动能和有受体条件下组织(水)吸收剂量

A.1 概述

本附录给出了当电离室不能在与被测参考辐射相似的参考辐射场中校准时, 用电离室测量来确定, 气比释动能和水的吸收剂量的方法。在这种情况下, 参考辐射空气比释动能和水的吸收剂量的值, 可由电离室的读数及用⁶⁰Co 射线无受体条件下得到的校准因子, 及一些转换系数和/或修正因子计算得到。

为得到这些修正因子, 可采用为得到辐射治疗中水的吸收剂量而开发的一些程序和方案中的公式

本部分中, 采用 IAEA TRS 277 号“Absorbed Dose Determination in Photon and Electron Beams An International Code of Practice”中的公式, 因为它在国际上被广泛接受。

无受体条件下测量空气比释动能和有受体条件下测量水吸收剂量的公式及其应用在下面简要叙述。因为在辐射防护剂量学中要求的准确度比在辐射治疗剂量学中要低, 在 IAEA TRS 277 号中涉及的, 但其值在本标准考虑的能量范围内接近于 1 的修正因子, 在本部分中不予考虑。尽管在一些测量件下应给予特别考虑。

由于 GB/T 12162 的本部分实际上只针对单能参考辐射, 而治疗使用的高能光子是宽谱韧致辐射, IAEA TRS 277 号列表中给出的各种治疗辐射剂量学方案的转换系数和修正因子除用于校准该电室⁶⁰Co 辐射外都不应用。

A.2 公式

公式中用到“电离室空气吸收剂量因子” N_D , 定义为:

$$N_D = \bar{D}_a / M \dots\dots\dots (A.1)$$

式中： \bar{D}_a ——电离室空腔内空气平均吸收剂量；

M ——修正到参考温度和气压的电离室读数①。

根据 Bragg—Gray 理论，一定体积中某种材料的吸收剂量是它的比释动能减去逸出该体积的韧致辐射份额。公式(A. 1)可写成：

$$N_D = (1/M) K_a (1 - \bar{g}_a) k_{att} k_m \dots\dots\dots (A. 2) \text{ 式中:}$$

K_a ——空气比释动能；

\bar{g}_a ——空气中的平均韧致辐射产额；

k_{att}, k_m ——修正因子，分别是考虑电离室壁和电离室壁吸收和散射程度与空腔和空腔中空气吸收和散射不同的因子。这在 10. 5. 2 中已讨论过。

很容易的看出， N_D 正比于 W/e 除以空腔内空气的质量，如果 W/e 与能量无关，则 N_D 也与辐射的能量无关。

A. 3 无受体条件下用电离室测量空气比释动能

假设在给定能量区间 W/e 与能量无关，可令：

$$(N_D)_c = (N_D)_r \dots\dots\dots (A. 3)$$

这里下标“C”和“r”分别表示在校准和参考束照射的条件，将(A. 2)代入(A. 3)解出 $(K_a)_r$ 可得：

$$(K_a)_r = (M_r/M_c) (K_a)_c [(1 - \bar{g}_a) k_{att} k_m]_r^c \dots\dots\dots (A. 4)$$

或使用空气比释动能校准因子 $N_k = (K_a)_c/M_c$ ，则公式(A. 4)可表示为：

$$(K_a)_r = M_r N_k [(1 - \bar{g}_a) k_{att} k_m]_r^c \dots\dots\dots (A. 5)$$

这就是 10. 5. 2 中的公式(5)，在公式(A. 4)和(A. 5)中，括号上的上下标“C”“r”表示在标准条件和参考辐射中测量条件下这个表达式之比。

如果对一特定的电离室， N_D 已知，公式(A. 5)可表示为：

$$(K_a)_r = M_r N_D / [(1 - \bar{g}_a) k_{att} k_m]_r \dots\dots\dots (A. 6)$$

A. 4 有受体条件下用电离室测量水吸收剂量

根据 IAEA TRS 277 号的公式推导，参考能量时的水吸收剂量可写为：

$$(D_w)_r = M_r N_k [(\bar{L}/\rho)_{w,a} k_{pert}]_r [(1 - \bar{g}_a) k_{att} k_m]_c \dots\dots\dots (A. 7)$$

或

$$(D_w)_r = M_r N_D [(\bar{L}/\rho)_{w,a} k_{pert}]_r \dots\dots\dots (A. 8)$$

当忽略 k_{pert} 时，此式即为 10. 6. 2 中的公式(11)。对于能量在 4MeV 到 9MeV 的光子，大多数用于体模中较小体积非空气等效材料室壁电离室的 k_{pert} 的值在 1. 000 到 1. 005 之间②。

A. 5 关于计算 $(K_a)_r$ 和 $(D_a)_r$ 所需因子的列表值

已做了相当的努力以给出计算⁶⁰Co γ 辐射中空气比释动能所需因子的数值，但对 4MeV ~ 9MeV 能量区间的单能光子(非治疗应用)，其相应值是相对很少的。在编制本部分时已有的数据在正文的列表由给出。使用者可酌情使用它们，或忽略一切接近 1 的因子，或选择其他合适的值，例如 IAEA TRS277 中⁶⁰Co 的 k_{att} 和 k_m 的值，或可能出现的新的 高能光子的值。

表 3，表 4 给出了计算有非空气等效室壁电离室修正因子 k_m 所需的碰撞阻止本领比和质能吸收系数比

① 电离室空气吸收剂量 N_D 相当于北欧方案^[25]中的“电离室吸收剂量因子”实质上也相应于美国方案^[24]中的“空腔气体校准因子” N_{gas} 。

② 这可由 Andreo, Hrahme^[34]给出的公式导出。参见 IAEA277 报告的图 14 和表 13，其中 k_{pert} 在 TPR₃₀ 的值为 0. 7 和 0. 8 之间，大体上相当于 4MeV 之间的单能光子值。

的数值(空气等效材料的 k_m 为 1)。表 3 中的所有数据均建立在 ICRU37 号报告给出的质量碰撞阻止本领上。表 1 第 3 列的 $(\bar{L}/\rho)_{a,w}$ 值是由 Andreo 和 Nahum 给出的薄靶韧致辐射数据表内插得到,该值的得到借助于同表给出的具有水中相同深度与韧致辐射束阻止本领比相同的单能光子值。作者也在同一出版物的第 3 版中指出,一旦达到电子平衡深度,阻止本领比随体模中参考深度的变化非常缓慢。所以不必特别考虑在校准和参考能量下平衡帽厚度的差异。

如果认为电离室室壁材料与体模相匹配或者因为空气等效而可忽略,也可用表 3 中的限制碰撞阻止本领比的倒数由公式(A. 7)计算 $(D_e)_r$ 。当水吸收剂量是由非水材料体模中测量得到公式(A. 7),这时的修正因子等于此材料与水阻止本领比和质能吸收系数比之积,对于 PMMA 和聚苯乙烯的修正可在表 3、表 4 中查到。

参 考 文 献

- [1]ICRU Report 25,1976,Conceptual Basis for Determination of Dose Equivalent
- [2]ICRU Report 39,1985,Determination of Dose Equivalent Resulting from External Radiation Source, and ICRU Report 47,1992,Measurement of Dose Equivalent from External Photon and Electron Radiations
- [3]IEC Publication 50(391),1975,International Electrotechnical Vocabulary—Detection and Measurement of Ionizing Radiation by Electric Means
- [4]Kondo,S. and Randolph,M. L. ;Effect of Finite Size of Ionization Chambers on Measurement of Small Photon Sources,Radiation Research,13,1960,pp. 37—60
- [5]ICRU Report 31,1979,Average Energy Required to Produce an Ion Pair
- [6]Gibson,J. A. B. ,Thompson,I. M. G. and Spiers,F. W. ;A Guide to the Measurement of Environmental Gamma Radiation,National Physical Laboratory(British Committee on Radiation Unit and Measurements),1993
- [7] Evans,R. D. X-ray and Gamma-ray Interactions;in Radiation Dosimetry I,(edited by Attix and Roesch),second edition,Academic Press,New York and London,1968
- [8]Attix,F. H. ,Health Phys. 36,1979,pp. 347—354.
- [9]Greening,J. R. ,Fundamentals of Radiation Dosimetry,Medical Physics Series,Adam Hilger Ltd. ,Bristol,1982,p. 23,Table 2.4
- [10]Cunningham,J. R. and Schulz,R. J. ,On the Selection of Stopping—Power Ratios and Mass energy—Absorption Coefficient Ratios for High—Energy X—ray Dosimetry,Med. Phys. ,11(5),1984,pp. 618—623
- [11]Johns,H. E and Cunningham,J. R. ,The Physics of Radiology,Charles C. Thomas, Springfield, IL, fourth edition,1983
- [12]Bielajew,A. F. ,Rogers,D. W. O. ,and Nahum,A. E. The Monte Carlo Simulation of Ion Chamber Response to ^{60}Co —Resolution Anomalies Associated with Interfaces;Phys. Med. Biol. 30(5),1985,pp. 419—428.
- [13]Rogers,D. W. O. ,Bielajew,A. F. ,and Nahum,A. E. ,Ion chamber Response and A_{wall} Correction Factors in a ^{60}Co Beam by Monte Carlo Simulation;Phys. Med. Biol. 30(5),1985,pp. 429—444(10),
- [14]Andreo,P. and Nahum,A. E. ,Stopping—Power Ratio for Photon Spectrum as Weighted Sum of the

Values for Mono-energetic Photon Beams, *Phys. Med. Biol.* 1985, pp1055-1065

- [15] Higgins, P. D. , Attix, F. H. , Hubbell, J. H. , Seltzer, S. M. , Berger, M. J. and Silbata, C. H. , Mass Energy-Transfer and Mass Energy-Absorption Coefficients, Including InFlight Positron Annihilation for Photon Energies 1 keV to 100MeV, Report NISTIR 4812, Gaithersburg, MD 20899, USA, 1992
- [16] See, e. g. , Burlin, T. E. , Cavity-Chamber Theory; in *Radiation Dosimetry I.* (edited by Attix, F. H. and Roesch, W. C.) , Academic Press, New York and London, second edition, 1968
- [17] Mach, H. and Rogers, D. W. O. , A Measurement of Absorbed Dose to Water per Unit Incident 7MeV Photon Fluence; *Phys. Med. Biol.* 29, 1984, pp. 1555-1570
- [18] Duvall, K. C. , Seltzer, S. M. , et al. , Dosimetry of a Nearly Monoenergetic 6MeV to 7MeV Photon Source by NaI Pulse-Height Analysis; *Nucl. Instr. Meth.* A272, 1988, pp. 866-870
- [19] Mach, H. and Rogers, D. W. O. , An Absolutely Calibrated Source of 6. 13MeV Gamma-ray, *IEEE Tran. Nucl. Soc. NS-30*, 1983, pp. 1514-1517
- [20] Hall, R. S. and Poole, D. H. A Radiation Source Using a Positive Ion Accelerator; Report RD/B/N265, Central Electricity Generating Board, Berkeley Nuclear Laboratories, 1967
- [21] Rogers, D. W. O. , A Nearly Mono-Energetic 6-13MeV Photon Calibration Source, *Health Phys.* 45, 1983, pp127-137
- [22] ICRU Report 44, 1989, Tissue Substitutes in Radiation Dosimetry and Measurement
- [23] Harder, D. and Hermann, K. P. , Tissue Equivalent Materials and the ICRU Sphere, *Rad. Prot. Dosim.* 12(2), 1985, pp. 125-128
- [24] A Protocol for the Determination of Absorbed Dose from High-Energy Photon and Electron Beams. Task Group 21, Radiation Therapy Committee, American Association of Physicist in Medicine, *Med. Phys.* 10, 1983, pp. 741-771, 28. Nordic Committee of Clinical Physics (NACP); Procedures in External Radiation Therapy Dosimetry with Electron and Photon Beams with Maximum Energies between 1MeV and 50MeV; *Acta Radiol. Oncol.* 19, 1980, pp. 55-
- [25] Hospital Physicists Association, Scientific Committee; Revised Code of Practice for the Dosimetry of 2 to 25MV X-ray, and of Cesium-137 and Cobalt-60 Gamma-ray Beams, *Phys. Med. Biol.* 28, 1983, pp. 1097-1104
- [26] Fricke, H. and Hart, E. J. , Chemical Dosimetry; in *Radiation Dosimetry II.* (edited by Attix, F. H. and Roesch, W. C.) , Academic Press, New York and London, second edition, 1966
- [27] ASTM E 1026-84, 1985, Standard Method for Using the Fricke Dosimeter to Measure Absorbed Dose in Water, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA
- [28] Matthews, R. W. , Aqueous Chemical Dosimetry, *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* 33, 1982, pp. 1159-1170
- [29] Saez Vergara, J. C. , Gomez Ros, J. M. , Delgado, A. ; High Energy Response of Different Environmental TLD's, *Radiat. Prot. Dosim.* , 1993, pp. 327-330
- [30] Soares, C. G. and Ehrlich, M. ; A Thermoluminescence Dosimetry System for use in a Survey of High Energy Bremsstrahlung Dosimetry, *IEEE Trans Nucl. Sci.* , NS-28, 1981, pp. 1614-1620
- [31] ISO 2602:1980, Statistical interpretation of test results-Estimation of the Mean-Confidence interval

-
- [32]ISO 3534(all parts),Statistic—Vocabulary and symbols
- [33]Campion,P. J. ,Burns,J. E. and Williams,A. ;A Code of Practice for the Detailed Statement of Accuracy,N. P. L. ,HMSO,1973
- [34]Andreo,P. ,Mahum,A. E. ,Brahme,A. ,Chamber—Dependent Wall Correction Factors in Dosimetry,Phys. Med. Biol. 31,1986,pp. 1189—1199