

国际辐射单位与测量委员会第14号报告

最大能量为0.6—50 MeV X射线 和 γ 射线的辐射剂量学

原子能出版社

国际辐射单位与测量委员会第14号报告

**最大能量为0.6—50 MeV X射线
和 γ 射线的辐射剂量学**

原子能出版社

I C R U Report 14
Radiation Dosimetry: X Rays and Gamma
Rays with Maximum Photon Energies Between
0.6 and 50MeV

I C R U, 1969
最大能量为 0.6—50MeV X 射线
和 γ 射线的辐射剂量学

张之彬 译

原子能出版社出版
(北京 2108 信箱)

国防科委印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 787×1092 $1/32$ ·印张 2·字数 43 千字

1982年5月第一版·1982年5月第一次印刷

印数 001—1600·统一书号: 15175·406

定价: 0.24元

目 录

1. 引言	1
1.1 范围	1
1.2 注量的测量	1
1.3 照射量	2
1.4 吸收剂量的测量原理	5
2. 用电离法测定吸收剂量	8
2.1 空腔电离的测量和布喇格-格雷原理的应用	8
2.2 使用校准过的照射量仪表测定吸收剂量	14
3. 用化学法测定吸收剂量	23
3.1 剂量计的选择	23
3.2 硫酸亚铁剂量计的使用	23
3.3 水中吸收剂量的测定及其不确定度	28
4. 用量热法测定吸收剂量	29
4.1 量热法原理	29
4.2 在参考材料中测定吸收剂量的不确定度	35
4.3 吸收剂量校准值向水中一点的传递	36
4.4 用量热计和传递仪器结合的方法测定水中吸收剂量时的 不确定度	39
5. 吸收剂量校准值向其他刻度中心的传递	40
5.1 由光子最大能量的差别造成的影响	41
5.2 由滤片的差别造成的影响	42
5.3 使用吸收剂量仪表测量时的不确定度	42
6. 结论	43
附录A 质量阻止本领比的平均值	45
附录B 刻度吸收剂量的标准条件	52
参考文献	53

1. 引 言

1.1 范围

国际辐射单位与测量委员会 (ICRU) 第 11 号报告给出了一些量的概念和定义, 这些量具有内在的一致性, 而且具有充分的普遍性, 能够满足当前的需要。本报告中所要用到的一些量〔象注量 (fluence)、比释动能 (Kerma) 和吸收剂量〕都曾在第 11 号报告中加以定义。本报告的目的是考察对最大能量为 0.6—50 MeV X 射线和 γ 射线的上述辐射量特别是吸收剂量是如何测定的。选取这一能量范围, 是为了使之能包括辐射治疗中最广泛使用的放射性核素(^{137}Cs 和 ^{60}Co)以及最高能电子加速器所产生的那些辐射。对其他的辐射(例如高能电子)仅考虑和高能光子剂量学有关的资料。本报告主要论及的是十分准确而且在标准化方面被公认为很有用的方法, 之所以没有提到象固体剂量仪和胶片剂量仪那样的系统, 因为它们一般是用作现场测量仪器或者是吸收剂量空间分布的测量仪器。

虽然本报告没有专门论及辐射防护的剂量学问题, 但希望这些建议也可供辐射防护剂量学方面参考。

1.2 注量的测量

当用高能光子束作纯物理研究时, 通常认为描述射束本身的物理量比描述射束和某些物质作用结果的物理量更为重要, 因此对这样的研究工作来说, 需要知道的物理量是注量

(fluence) 或能量注量以及它们按光子能量的分布函数。Pruitt 和 Koch 对测量这些量的方法做过广泛的评论。他们评述了用于射束总能量绝对测量的五种仪器, 即:

- (1) 全吸收量热计;
- (2) 大晶体闪烁谱仪;
- (3) 平衡转换器 (这个装置是测量射束通过原子序数不同的物质构成的薄箔后产生的电离);
- (4) 利用布喇格-格雷原理做成的多层电离室, 应用这种电离室来测定授予一个无限介质的总能量 (吸收剂量的空间积分);
- (5) 对偶 (Pair) 谱仪。

在原则上, 根据包围某点的介质中的光子注量或光子能量注量以及电子输运方面的有关资料, 是有可能把这点的吸收剂量值计算出来的。但是, 因为只有少数理想几何条件下的电子输运资料可资应用 (参看 Spencer, 1959; Berger, 1963), 并且随光子能量的增加, 被光子击出的电子的射程也增加, 以致它可以和光子本身的平均自由程相比, 从而电子能量中损失于韧致辐射的部分逐渐增加, 使得计算越来越困难和越不准确。因此, 对高能光子一般希望用比较直接的方法来测定吸收剂量。

1.3 照射量

伦琴作为一个物理量的单位虽然已使用了差不多四十年, 但直到最近 (ICRU, 1962 b) 才给这个物理量下了明确的定义, 并取名为照射量。伦琴这个名称于 1928 年国际放

射学会议上通过，并把它作为辐射治疗中的一个剂量单位来使用。它从两个方面起到这个作用：

(1) 能对辐射场作定量的描述；

(2) 在所研究的组织中，能对现在称为吸收剂量的这个物理量至少可给出近似的度量。此外，照射量是一个和可测量的量即单位质量空气中的电离电荷有密切关系的物理量。

某点的照射量与该点的能量注量有关，它的值应是能量注量与空气的质能吸收系数的乘积。而这个系数是随光子能量缓慢变化的函数。这样，在电子平衡的条件下，要根据测到的能量注量来确定照射量，仅需光子能谱的近似数据就足以进行。

同样，在电子平衡的条件下，某点的吸收剂量与该点的照射量有关，它的值应是照射量和介质与空气的质能吸收系数比值的乘积。而对低原子序数材料，像组织、骨骼，这个比值是随光子能量（特别是本报告涉及的光子能量）缓慢变化的函数。这样，在电子平衡的条件下，从照射量来确定吸收剂量是很容易做到的。

1.3.1 由照射量求相关的吸收剂量时遇到的困难

在本报告所讨论的能量范围内，有两种明显的情况并不满足严格的电子平衡条件，因此从照射量换算相关的吸收剂量就比较困难。这种困难是在光子能量高于几 MeV 时开始发生的。上述两种情况是：(1) 所研究的点在材料中的深度小于光子所激发的电子的最大射程；(2) 该点的深度大于电子的最大射程。

当测量点在材料中的深度小于电子射程时，电子注量（因而还有吸收剂量）不仅仅和光子在这个材料中激发的电子有

关，而且与在材料外产生的和光子一起入射的电子有关。这些额外产生的电子数目可以有很大的差别。在这种条件下，照射量和吸收剂量之间没有简单的关系。

当测量点在材料中的深度大于电子最大射程时，在这点产生吸收剂量的电子注量表现了前面某一段距离处光子注量的特征。虽然这段距离比电子的最大射程要小，但是对于能量高于几 MeV 的光子来说，在这段距离内它的减弱可能是很显著的。可是该点的照射量是由该点的光子能量注量决定的，因此，在电子平衡条件下得出的吸收剂量和照射量之间的简单关系式不能用于这种“瞬时”平衡情况。如要引用这个简单的关系式，需要进行有关能量的修正。对 1.25 MeV 光子，约需 0.5% (ICRU, 1962b, p32; Cormack 和 Johns, 1954)，对 40 MV X 射线，约需 10% (Zendle 等, 1956)。这些修正值通常是由理论计算得出的。

1.3.2 照射量的绝对测量

对于激励电压从几 kV 到 500 kV 的 X 射线，所有国家的标准化实验室都用自由空气电离室进行照射量的标准测量 (ICRU, 1962b)。从目前来说，这个能量范围内的光子照射量测量比起用化学的、量热的、电离的方法测量吸收剂量来要精确得多，而且各个国家的标准之间也进行过广泛的比对。

在以前的报告中 (ICRU, 1962b, p.32)，曾给出了使用空腔电离室作为照射量标准测量时所必需的修正项，它们可综述如下：

(1) 考虑到室壁并非完全空气等效这个事实而引入的阻止本领修正；

(2) 光子在室壁中的减弱和散射修正;

(3) 由于未达到完全平衡而引入的修正。

在低能光子范围 (1 MeV 以下), 已经建立了照射量标准, 并进行了广泛的比对。此外, 在这个能区内, 从照射量换算到欲求的吸收剂量仅引入了可以忽略或者很小的对非平衡条件的修正。因此在低能光子范围, 照射量很可能继续作为标准化的量使用。照射量能够使用的能量上限由具体的使用情况决定。例如: 对于防护目的测量, 高达 8 MeV 的光子仍可能继续使用照射量来测量, 而对辐射治疗来说, 能够使用照射量进行有效测量的最大光子能量, 大概不会超过 2 MeV。当能量高于可以用照射量作为标准化的量使用的范围时, 应选择吸收剂量作为标准化的量。当然, 低于这个能量时, 使用吸收剂量也是有效的。本报告假定, 需要对能量在 0.5 MeV 以上的光子束建立吸收剂量标准。

1.4 吸收剂量的测量原理

通常把一个适宜的探头插到被照射的介质中去测量吸收剂量。对于这种情况, 可认为探头是一个含有灵敏区域的元件, 在灵敏区域里, 电子产生一个信号。而这些电子可以是在灵敏区域内产生的, 也可以是在探头的另一部分(如室壁、容器等)产生的, 亦可来自探头外的物质。这三种可能的电子源的原子组成应该类似。

探头的尺寸不应使光子辐射场发生显著的畸变。设计探头时, 其他方面的考虑由所研究的能量范围决定。当光子的能量低于 0.6 MeV 时, 仪器的响应通常完全由探头本身内部激发的电子决定, 即包围灵敏体积的材料的厚度完全能够达

到建立带电粒子平衡。这样一个探头的读数是表示探头材料里的吸收剂量 D_i 。在相同光子注量的辐照下, 其他一些材料的吸收剂量 D_m , 可以用探头的吸收剂量乘上对能量注量分布取平均的质量能量吸收系数的比值来得到, 即

$$D_m = \frac{(\mu_{en}/\rho)_m}{(\mu_{en}/\rho)_i} D_i \quad (1.1)$$

当光子能量高于 0.6 MeV 时, 要满足上述条件所遇到的困难将逐渐增加。因此, 更有效的办法是设计这样一种探头, 使探头中的信号主要不是由探头本身的灵敏体积或壁中激发的电子产生的, 而是由周围介质中激发的电子产生的。这种探头可以看作是电子探测器。作为探测电子的探头应足够小, 使它不致明显地影响测量点的电子流量。在这个条件下, 探头的吸收剂量 D_i 和周围介质的吸收剂量 D_m , 与平均值 $\bar{S}_{mi}$ 有关, $\bar{S}_{mi}$ 是探头材料 i 和介质 m 的质量碰撞阻止本领 $(S/\rho)_{coll}$ 比值的平均值。这个关系可表示为:

$$D_m = \frac{(\bar{S}/\rho)_{coll, m}}{(\bar{S}/\rho)_{coll, i}} D_i = \bar{S}_{mi} D_i \quad (1.2)$$

和这个关系相类似的布喇格-格雷关系是 (1.2) 式的一个特殊情况, 其中, 探头材料是气体。

电子沿其路径的能量损失不是连续的, 它是通过许多次碰撞损失能量, 而碰撞时传递的能量数值变化很大。为了求得适宜的阻止本领比值 $\bar{S}_{mi}$, 可以把碰撞按照选定的最大能量传递的数值分为两类, 最大传递能量看作是沿粒子径迹所贡献的局部授于能量 (Spencer 和 Attix, 1955; Burch, 1955)。根据这个假设对能量低于 2 MeV 的光子束, 计算了各种空腔尺寸的有限制的阻止本领比值 (ICRU, 1959;

NCRP, 1961)。Harder (1965) 曾证明, 用和 i 等效但在辐照时不产生信号的材料做成薄层来包围探头, 可以减弱阻止本领比值与尺寸的依赖关系。在这样的条件下, 方程(1.2)中应使用包括所有的碰撞并对初始电子注量谱取平均得出的那个阻止本领比值。阻止本领比值的计算见附录 A。

1.4.1 吸收剂量测量值的标准化

在辐射治疗和放射生物学中, 有意义的量是某特定生物物质中的吸收剂量。但是为了吸收剂量的标准化, 必须选择一种意义明确, 容易通用的材料, 而且要在选定的标准条件下进行吸收剂量的测量。根据如下理由, 选择水作为标准材料:

(1) 水的辐射性质与大多数生物组织类似;

(2) 水的组成恒定, 可以在所有的标准化中心应用;

(3) 有关吸收剂量空间分布的大量资料, 诸如中心轴深部剂量数据、肿瘤-空气比值和等剂量曲线等, 都是以水作为参考物质求出来的 (参看 HPA, 1961, 1968)。能影响校准吸收剂量的条件包括入射光子束的能量注量分布, 测量点的深度, 射束的面积和被辐照模体的尺寸。关于这些条件的讨论和对这些参数提出的建议见附录 B。

一般说来, 不可能直接测量水的吸收剂量, 而必须先测量一些从性质上来说对所用的剂量学方法更为适宜的参考材料的吸收剂量。第2、3、4章分别讨论测定吸收剂量的电离法、化学法和量热法, 包括从参考材料中测出的吸收剂量来确定水中吸收剂量的过程。第5章叙述从一个校准中心 (即标准化实验室) 把吸收剂量的标定值传递到另一个校准中心 (如辐射治疗中心) 时所使用的方法。第6章中对各种测量方法的不确定度作了比较。

2. 用电离法测定吸收剂量

本章所涉及的是关于用电离室测量水中一点的吸收剂量及使用校准过的照射量仪表测量吸收剂量方面的问题。

2.1 空腔电离的测量和布喇格-格雷原理的应用

在被照射的介质中，有一个小的充气空腔，这个空腔附近介质的吸收剂量 D_m ，可以按布喇格-格雷方程从空腔中的电离求出：

$$D_m = J_g(W/e)S_{mg} \quad (2.1)$$

式中， J_g 是电离电荷除以气体质量得到的商；

W 是电子在气体中每产生 1 离子对平均消耗的能量；

e 是电子电荷；

S_{mg} 是对于穿过空腔的电子谱，介质相对于空气的质量阻止本领所取的加权平均比值。

在布喇格-格雷理论中暗含着假设 J_g 和空腔的尺寸、气体的压力没有关系。但是经 Spencer-Attix(1955)和Burlin(1966b)改进和发展的理论指出： J_g 是随空腔尺寸或气体压力的变化而变化的。许多作者(Greening, 1957; Attix, de la Verge 和 Ritz, 1958; Burlin, 1966b, 1961)曾设计了比较两个理论正确性的实验。这些作者检查了在原子序数不同的物质空腔中， J_g 随气体压力的变化，证明了实验结果和 Spencer-Attix 理论的符合程度要比与简单的布喇格-

格雷理论符合得好。值得注意的是,在本文所涉及的这个范围内,用 γ 射线(0.67—1.3MeV)照射充空气的石墨壁电离室,Burlin的论述和结果与简单的布喇格-格雷理论相比,并没有显著的差别。在与Burlin的条件相似的情况下,忽略空腔尺寸的影响而引入的误差似乎小于0.5%。

2.1.1 空腔电离室使用的阻止本领

Berger和Seltzer(1964)发表了大量的电子质量阻止本领的计算值。这些值中包括极化效应(密度效应)修正。这个修正这是由于带电粒子穿过介质时,感应的极化现象减少了碰撞能量损失而引起的。这种效应的数值随粒子能量、介质密度的增加而加大。对本报告所涉及的电子能量范围,由于极化效应而导致阻止本领减少的数值,对气体来说可以忽略,而对液体或固体物质可达到百分之几。根据Berger和Seltzer的数据推出的水/空气、石墨/空气的质量碰撞阻止本领比的数值列于表2.1的第2、4栏。它的数值随着电子能量的增加而下降。这主要是由于上面提到的极化效应引起的。在表中也列出了按照附录A中叙述的方法计算出来的有限制的阻止本领比的数值。为了在布喇格-格雷方程中使用阻止本领比的数据,对光子在所研究的材料中激发的各种能量的电子,还需确定其阻止本领比的加权平均值。各种光子束的平均阻止本领比可按附录A中叙述的方法来计算,或者按照以前的报告(ICRU, 1959)中叙述的方法,用电子的平均能量计算。按照这两种方法计算出来的和一些实验测到的阻止本领的数值列于表2.2。应该注意到对激发电压高达20MV的X射线,用电子平均能量作的近似计算和根据复杂电子谱作的计算两者之间的差别不到1%。

表 2.1 瞬时能量为 E 的电子的质量碰撞阻止本领比

电子能量 $E(\text{MeV})$	水/空气		石墨/空气	
	无限制	有限制	无限制	有限制
0.02	1.169	1.169	1.020	1.020
0.05	1.162	1.165	1.017	1.020
0.1	1.157	1.161	1.016	1.017
0.3	1.150	1.157	1.007	1.008
1	1.131	1.136	0.985	0.981
3	1.084	1.078	0.946	0.931
10	1.011	0.976	0.890	0.853
30	0.944	0.884	0.836	0.775
100	0.906	0.825	0.803	0.756

注: 无限制包括 $E/2$ 以下的所有能量损失。有限制包括 10 keV 以下的所有能量损失。

表 2.2 石墨对空气的质量阻止本领比 $\bar{S}_{\text{air}}$ 实验值和计算值的比较

辐 射	计 算 值		实 验 值●
	使用平均能量	使用未经过滤的光子谱	
^{60}Co 射线	1.013	1.006	1.014 ± 0.006
4MVX射线	1.007	1.006	1.015 ± 0.008
7.5MVX射线	0.995	0.994	0.975 ± 0.007
14MVX 射线	0.976	0.979	0.960 ± 0.006
20MVX 射线	0.960	0.969	0.952 ± 0.010

●是从 W/S_{mg} 的测量值计算出来的, 计算时使用的在空气中产生 1 离子对的平均能量数值为 33.73eV。商的不确定度中没有包括 W 的不确定度。

2.1.2 电离室和模体材料

在理想的情况下, 用作布喇格-格雷空腔电离室的室壁材料和这个电离室进行测量的介质应该是连续的。除了空腔气体以外, 电离室不把任何“异物”带入介质。因为通常

最感兴趣的量是在类组织介质、水或水溶液介质中的吸收剂量，所以希望介质的原子序数和水相同。因为空气的使用很方便，它的 W 值又相当准确，所以一般把空气用作空腔气体。

放入吸收介质中的电离室，通常有两种型式：(1)带有中央收集极的圆柱形空腔。(2)用保护环限定收集体积的平行板电离室。前者的优点在于结构简单、牢靠。但后者能提供一个简单的照射形状，有比较均匀的电场，而且还可能用作外推电离室。

为了正确地应用布喇格-格雷方程，在气体中起始或停止的电子对 J_e 的贡献应该能够忽略不计。如果空腔的尺寸和电子在气体中的射程相比很小时，这个条件是可以满足的。如果想用电离量来测定吸收剂量，就要研究电离室的尺寸造成的影响。用外推电离室，即极间距离可以变化的平行板电离室进行这种研究工作是比较方便的。

为了测量导电材料（例如石墨）中一点的吸收剂量，可以把这种材料做成电离室的室壁和电极，但收集极必须和这块材料的其他部分是电绝缘的，绝缘体会把异物带入系统。利用适当的设计，能使绝缘体的影响降到可以忽略不计。为了测量一块非导电材料，诸如聚苯乙烯中一点的吸收剂量，可以用这种材料做成电离室的壁和电极，但是电极表面要涂上一层薄的导电层。这一层的厚度和在这层中产生的次级电子的射程相比要做得很薄，以致在这层里激发的电子对观测到的电离量的贡献完全可以忽略不计。

通常使用的电离室，它的室壁和介质的成分多少有些差别（例如测量水中一点的吸收剂量）。把这样的电离室放到介

质里，它会以各种方式使电子和光子流量发生畸变。除了在气体中激发的电子造成的贡献之外（电离室室壁材料和介质完全相同时，也有这个贡献）， J_g 的数值还受下面因素的影响：（1）室壁材料和介质材料的质量能量吸收系数及阻止本领的不同，（2）由于电离室（空腔、室壁、电离室的杆等）置换一部分介质，引起光子束的减弱和散射的不同。考虑这些影响的因子就是“扰动修正” P 。

对于一个室壁材料近似和介质等效的电离室，在光子能量为 0.6—50 MeV 这个范围内，上述因素（1）的影响一般是可以忽略的。可用测量各种空腔尺寸和壁厚时的 J_g 来研究因素（2）的影响。Day (1965) 使用 ^{137}Cs 到 6 MV 的辐射，研究室壁的影响。他们发现，把一个 Farmer-Baldwin 电离室附加上直到 5 mm 厚的有机玻璃帽，放在 5 cm 深处的水模中照射，引起观测值 J_g 的变化要小于 0.5%。

2.1.3 空腔电离剂量测量的不确定度

应用布喇格-格雷原理按照电离量来测定吸收剂量时，需要的量是 J_g 、 W 和 $\bar{S}_{\text{ms}}$ 。

确定物理量 J_g 时，要测量电荷、空腔体积和气体的密度。用熟知的方法测量收集电荷可以达到很高的精密度，但是考虑到正、负离子的复合，如 Boag (1950, 1952, 1966) 所述，必须加以修正。对本研究所涉及的能量范围，大多数 X 射线发生器产生的是强度极高的短脉冲式辐射，它使离子的浓度很高。当剂量率为每分钟几 rad 时，使用圆柱形或平行板电离室测定 J_g 的不确定度估计为 $\pm 0.2\%$ 。

在以前的报告 (ICRU, 1962 b) 中讨论了 W 的测定问题，对于空气建议采用的数值是 $33.73\text{eV} \pm 0.15$ 。

阻止本领比 S_{mg} 的误差是由单能电子的数据和对介质中电子分布进行平均计算中的不确定度产生的。有关这些量的实验数据及它们的误差很分散，需要有进一步的实验资料。Bewley (1963) 曾对在石墨中用量热计测定的吸收剂量，和用石墨壁电离室所作的测量进行了比较。利用比较的结果，对一定范围的辐射，推出了石墨/空气的 $W \cdot S_{mg}$ 值。采用建议的空气的 W 值 (33.73 eV)，可从 Bewley 的结果中推出 S_{mg} 数值。这些数值和由 Berger 和 Seltzer 数据中计算出的值一起列于表 2.2。由表可以看出，从 ^{60}Co 到 20 MV X 射线，二者之间最大的差别是 2%。

“扰动修正” P 可用理论、实验或两者相结合的方法来测定，这个修正量的不确定度约为 0.5%。

用布喇格-格雷原理测定水中吸收剂量时，所有的不确定度综合在表 2.3 中。在这个表中及这篇报告的其他表中所列出的不确定度都是用标准偏差的两倍计算的 (参看 ICRU, 1968b)。这个值对偶然误差、对大量测量结果的平均值来说，相应的置信水平 (Confidence limit) 是 95%。

表 2.3 应用布喇格-格雷原理，在水中一点作空腔电离剂量测量时的不确定度

来 源	不确定度
1. J_k	0.2%
2. W	1%
3. S_{wg} (w 表示水, g 表示空腔气体)	2%
4. 扰动修正, P	0.5%
总计●	2.3%

●总不确定度是取各项不确定度平方和的平方根。