

国际辐射单位与测量委员会第 21 号报告

初始能量 1 到 50 兆电子伏电子的

辐射剂量学

原子能出版社

国际辐射单位与测量委员会第21号报告

初始能量 1 到 50 兆电子伏
电子的辐射剂量学

(1972)

于耀明 张树强 于伟明 译
沈 恂 校

原子能出版社

**Radiation Dosimetry:
Electrons with Initial Energies
Between 1 and 50 MeV
(1972)**

初始能量 1 到 50 兆电子伏电子的辐射剂量学

于耀明 张树强 于伟明 译
沈 恂 校

☆

原子能出版社出版
北京印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售
(限国内发行)

☆

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 $3 \frac{1}{2}$ · 字数 76 千字
1977 年 10 月北京第一版·1977 年 10 月北京第一次印刷
统一书号: 15175 · 102
定 价: 0.32 元

内 容 简 介

本书译自国际辐射单位与测量委员会 (ICRU) 第 21 号报告。

文章介绍了对初始能量在 1 到 50 兆电子伏之间的电子的吸收剂量的测定、电子束监测器系统的结构和用途、电子束特性的测量和控制。最后讨论了深部吸收剂量曲线的一般特点、吸收剂量分布及被照射介质中不均匀性的影响。

本书可供从事放射医学、放射生物学、同位素应用、辐射化学、辐射防护和计量学工作的人员参考。

目 录

1. 引言	1
2. 电子束的基本参数	3
2.1 电子能量的测定	3
2.2 电子束的能谱	14
2.3 电子注量的测量	20
2.4 能量损失和多次散射	25
3. 吸收剂量的测定	35
3.1 电子剂量学的一般概念	35
3.2 量热法	45
3.3 电离法	50
3.4 化学方法	59
3.5 固体方法	64
3.6 各种方法的比较	68
4. 电子束监测器	71
4.1 引言	71
4.2 透射电离室	72
4.3 次级发射监测器 (S. E. M.)	74
4.4 感应监测器	76
4.5 用电离室监测部分电子束	78
4.6 利用收集电子的方法监测部分电子束	78
4.7 监测器的稳定性与加速器运转条件的关系	80
4.8 监测器的选择	81
5. 电子束特性的测量和控制	83
5.1 电子束虚源位置的测定	83
5.2 电子束方向的确定	86

5.3	电子束断面的测定	86
5.4	电子束方向波动的测量	87
5.5	电子束能量波动的测量	90
6.	实用剂量学	91
6.1	参考点处吸收剂量的测定	91
6.2	刻度	92
6.3	测定模型中任一点处水中的吸收剂量	94
6.4	模型	97
6.5	影响吸收剂量分布的一些实际因素	98
6.6	韧致辐射和中子对电子束的污染	106

1. 引言

国际辐射单位与测量委员会(ICRU)第19号报告给出了一组与电离辐射有关的量的概念和定义,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切剂量学量,诸如注量(fluence)、吸收剂量、质量阻止本领等,在上述报告中都曾加以定义。

本报告的目的,是为了考察对于初始能量在1到50兆电子伏之间的电子这些量特别是吸收剂量是如何测定的。选取这一能量范围,是为了使之包含由直线加速器和回旋加速器所产生的并且主要用于医学、辐射化学以及放射生物学目的的那些辐射。

本报告主要涉及的是十分精确而且在标准化方面被公认为很有用的方法。然而,也论及使用热释光材料的固体剂量学,因为就实用电子剂量学而言,体积很小的固体辐射探测器作为辐射场测量仪器是特别有效的。

用于电子剂量学的某些剂量学方法也可用于高能光子剂量学,这些方法在国际辐射单位与测量委员会第14号报告中有过介绍。遇到这种情形,可以参阅该报告,而本报告只给出对快电子剂量学所作的一些特殊的变更。

现在已经能够产生出注量率很高的快电子,因而在将这种电子束用于治疗时,可能发生超剂量事故。所以,在使用这种电子束时,可靠的监测系统是必要的。本报告以一节的篇幅就监测系统的结构和用途提出了建议。

高能电子的剂量测量结果对所用电子束的物理性质非常

敏感。所以，本报告对那些可以推荐用于测量和控制电子束特性（例如电子能量）的方法作了扼要的论述。

本报告虽未提供关于临床应用的吸收剂量分布的广泛资料，但仍然讨论了深部吸收剂量曲线的一般特点、吸收剂量分布及被照射介质中不均匀性的影响。希望这一资料也可供高能电子的其它应用方面参考。

本报告没有涉及对病人或工作人员的辐射防护。同这一课题有关的资料可以在美国辐射防护委员会第 38 号、第 31 号报告及西德工业标准 DIN 6847 中找到。

2. 电子束的基本参数

2.1 电子能量的测定

电子束的物理性质,例如在物质中的贯穿能力等,都是和电子的动能 E 有关的。由于电子束在穿过诸如出射窗、散射箔、照明镜、监测室和空气层之类的物质层时能量的损失引起了电子动能 E 的改变,所以在电子能量的任何测量或说明中必须考虑到这种能量损失。

2.1.1 电子束的能量参数

加速器能量 E_a 在加速器的出射窗内侧某一点处,电子注量(electron fluence)按能量的分布通常是一个非常狭窄的峰,可以用“加速器能量” E_a (参阅图 2.1)这样一个单一的能量值充分地加以表征。在加速器的内靶上所产生的韧致辐射的最大光子能量将等于 E_a 。

在表面上的能量 E_0 。在临床应用中,电子束在到达模型或体表以前,必先通过加速管的出射窗或壁、散射箔、照明镜、监测室及总厚度相当可观的空气层。电子在这些物质层中的能量损失,使电子谱向低于 E_a 的能量移动,与此同时,电子谱由于能量损失的涨落而展宽。由此形成的电子注量按能量的分布是由一个高能峰和一个延伸到低能的“尾巴”所组成的(参阅图 2.1 与第 2.2.2 节中的文献)。

倘若这些能量损失比 E_a 小得多,我们仍可以讲,在表面处有一个单一的能量值 E_0 :

$$E_0 = E_a - \Delta E_{\Sigma} \quad (2.1)$$

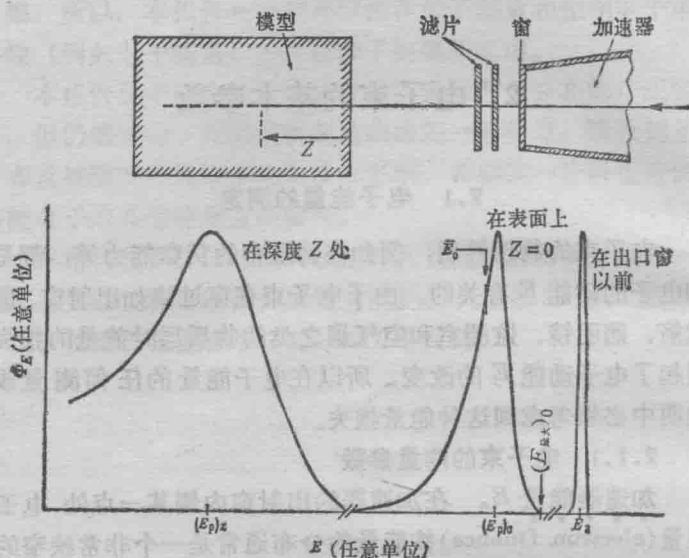


图 2.1 电子束所用到的能量参数的图示

这里 $\Delta E_{\text{总}}$ 是电子束到达该表面以前在所穿过的物质层中的平均总能量损失（碰撞和韧致辐射所引起的能量损失之和）。每一厚度为 dl 且总阻止本领为 S 的单层对 $\Delta E_{\text{总}}$ 的作用是 $dl \cdot S$ 。

如果 $\Delta E_{\text{总}}$ 并不比 E_a 小很多，我们就不得不考虑表面上的注量按能量的分布 $(\Phi_E)_0$ 。分布曲线可以用两个能量值来表征，一个是与其峰相应的能量值，称为“最可几能量” $(E_p)_0$ ，而另一个是“平均能量” $\bar{E}_0$ ，它定义为

$$\bar{E}_0 = \frac{\int E (\Phi_E)_0 dE}{\int (\Phi_E)_0 dE} \quad (2.2)$$

由于能量分布的不对称, $\bar{E}_0$ 小于 $(E_p)_0$ 。

$(E_p)_0$ 可以由 E_a 减去电子束在穿过物质层时所发生的最可几能量损失而求得。因为最可几能量损失可以用碰撞所产生的平均能量损失 $\Delta E_{\text{碰}}$ 非常近似地表示, 所以下列关系式往往作为求得 $(E_p)_0$ 的一个近似式来使用:

$$(E_p)_0 \approx E_a - \Delta E_{\text{碰}} \quad (2.3)$$

$\bar{E}_0$ 由下式计算出来:

$$\bar{E}_0 = E_a - \Delta E_{\text{总}} \quad (2.4)$$

式中 $\Delta E_{\text{总}}$ 的意义与式(2.1)中的相同。

$(\Phi_E)_0$ 异于零时的最高能量称为“最大能量” $(E_{\text{最大}})_0$ 。测量这一值是困难的, 但是有几种方法所求出的能量值接近 $(E_{\text{最大}})_0$ 的程度要胜过接近 $(E_p)_0$ 或者 $\bar{E}_0$ 的程度。

在模型或体内某点处的能量 $(E)_Z$ 在模型或被照射的人体内, 在厚度 Z 相当大的物质层后面, 我们总是必须考虑电子注量按能量的分布 $(\Phi_E)_Z$ 。表面上的电子谱 $(\Phi_E)_0$ 和电子在穿入模型或人体时所进一步产生的能量损失都会影响这一分布。

分布 $(\Phi_E)_Z$ 可以用最可几能量 $(E_p)_Z$ 、平均能量 $\bar{E}_Z$ 和最大能量 $(E_{\text{最大}})_Z$ 表征; 这三个量的定义是和表面上的能量 E_0 的那三个定义相似的。因为在模型或人体中的深度可以和电子的射程相比较(参阅第 2.2 节), 所以计算这三个量要比计算表面上相应各量复杂得多。

电子能量的说明 在用单能参数描述电子照射的特征时, 我们必须仔细地考虑由上述的不同可能性中所作出的选择。目前正在使用的对电子能量的说明有以下这几种:

(1) 由所用的散射箔给出的 E_a 。

(2) 由近似式(2.3)计算出来的 $(E_p)_0$ 。

(3) 由(2.4)式计算出来的 $\bar{E}_0$ 。

(4) 利用那些能得到接近于 E_a 、 $(E_p)_0$ 、 $\bar{E}_0$ 或 $(E_{\text{最大}})_0$ 的值的实验方法所测定的能量。

显然,只是在明确地规定了所选取的能量参数的类型时,才能对吸收剂量分布和电子束的其它物理数据进行比较。

2.1.2 电子能量的测量

利用磁谱仪或发光晶体谱仪可以得到电子束的完整能谱(参阅第 2.2 节)。当要用单能参数 $[E_a$ 、 $(E_p)_0$ 或 $(E_{\text{最大}})_0$] 表征电子束能量时,可以推荐核反应阈测量法(第 2.1.2.1 节)、射程测量法(第 2.1.2.2 节)和契伦科夫辐射阈(第 2.1.2.3 节)测量法。

2.1.2.1 核反应阈 光子或电子与原子核的相互作用能够导致核反应,并发射出一个或多个核子。某一核反应的阈能 $E_{\text{阈}}$, 等于靶核的静止能与剩余核加发射出来的核子(或几个核子)的静止能之差。仔细地计算质谱学数据和核反应能,就可以准确地定出许多核的静止能。当由质心坐标系变换到实验室坐标系时, $E_{\text{阈}}$ 必须加以修正,即增加 $E_{\text{阈}}^2/2m_Tc^2$, 这里 m_T 是靶核的质量。因此,可以用这一计算值来确定光子或电子束的最大能量。

用能量超过 $E_{\text{阈}}$ 的电子照射某一样品时,样品中的核反应或者是由电子所直接引起的[例如 $(e, e'n)$ 反应],或者是由样品中产生的韧致辐射光子所引起的[例如 (γ, n) 反应]。这两种过程对反应速率的相对作用依赖于电子的能量以及样品的原子序数和厚度。但是,这两个反应具有相同的阈能,因而在测量电子能量时不必将它们之中的一个或另一个消除掉。电子束不应当被最大光子能量超过待测电子能量的韧致辐射所污染;当所用电子束的能谱由于在加速器的出射窗或在箔

中的能量损失而发生移动时，这种污染情况就有可能出现。

实验方法是利用以下的事实：剩余核一般说来将发生一次放射性衰变，衰变中发出的射线可以用计数器探测。对名义能量标度（电子感应加速器的积分器，偏转磁场等）上的一系列数值相继测量计数率的变化。这样得到的计数率的起始点正好是电子束中粒子最大能量等于阈能的时候。利用表 2.1 中所推荐的四种核反应阈，可以在一个很宽的能量范围内进行刻度。

表 2.1 核反应阈的物理数据

反应的有关特点	反 应			
	$\text{Cu}^{63}(\gamma, n)\text{Cu}^{62}$	$\text{O}^{16}(\gamma, n)\text{O}^{15}$	$\text{C}^{12}(\gamma, n)\text{C}^{11}$	$\text{O}^{16}(\gamma, 2n)\text{O}^{14}$
阈能（核质量数据已对实验室座标系作了校正）	10.855 (± 0.005) 兆电子伏	15.678 (± 0.001) 兆电子伏	18.737 (± 0.001) 兆电子伏	28.916 (± 0.001) 兆电子伏
活化曲线的“间断点”	—	15.86 兆电子伏 15.99 兆电子伏 16.22 兆电子伏 17.27 兆电子伏	18.79 兆电子伏 18.86 兆电子伏 19.00 兆电子伏	—
感生放射性衰变	$\text{Cu}^{62} \xrightarrow{\beta^+} \text{Ni}^{62}$	$\text{O}^{15} \xrightarrow{\beta^+} \text{N}^{15}$	$\text{C}^{11} \xrightarrow{\beta^+} \text{B}^{11}$	$\text{O}^{14} \xrightarrow{\beta^+} \text{N}^{14}$
半衰期	9.73分	124 秒	20.5分	70.48(± 0.15) 秒
辐 射	β^+ 、湮没光子 (0.511 兆电子伏)	β^+ 、湮没光子 (0.511 兆电子伏)	β^+ 、湮没光子 (0.511 兆电子伏)	β^+ 、 γ (2.3兆电子伏)、湮没光子 (0.511兆电子伏)
探测材料	铜	水	苯	水

实际的实验程序需要若干个由靶物质制成的完全相同的样品。利用监测仪器，使每个样品都受到能量不同但注量相

同的电子的照射，注量的大小由此监测器指示。照射后，在固定的计数几何条件下对每一样品的感生放射性进行测量。在整个实验中，照射、计数及样品传递所用的时间都保持不变。减去本底后的计数率降为零的那一点即指示反应阈。

我们建议应用以下几种方法来提高测量的精度：

(a) 由于改变照射期间感生放射性的衰变，电子束强度的变化将引起计数率的变化。为了补偿这一效应可以使监测仪器的充电电容器与一只电阻并联，此电阻的阻值应使电容器放电的半值时间等于感生放射性的半衰期。

(b) 在对来自被照射的正电子发射样品的湮没光子进行计数时，如果闪烁计数器和已调准到全吸收峰（0.511 兆电子伏）的单道脉冲幅度分析器一起使用，那末就可以减少本底脉冲数。

(c) 在计数统计性不佳的情形下，表 2.1 中所指出的活化曲线斜率的突然变化（“间断点”）容易和反应阈相混淆。为了证实反应阈已被找到，还应当观察到一、两个间断点。就 O^{16} 的 (γ, n) 反应来说，反应阈附近所存在的两个间断点使确定反应阈的工作复杂化。因此，在活化曲线上 16.22 兆电子伏处的间断点可以作为参考能量。

(d) 确定反应阈相对于名义 (provisional) 能量标度的位置的一个精确方法是使测得的活化曲线和包含精确的反应阈点的“平均活化曲线”进行拟合（参阅图 2.2）。曲线的这种拟合是利用半对数标绘图进行的，图的纵座标是测得的放射性强度减去本底放射性，横座标是与能量的准确值只差一个小的常数值的名义能量。沿着这两条座标轴移动平均活化曲线，就可以使它和测得的活化曲线拟合。因此可以读出与反应阈相应的名义能量。按照这一方法，准确度的限度是由拟

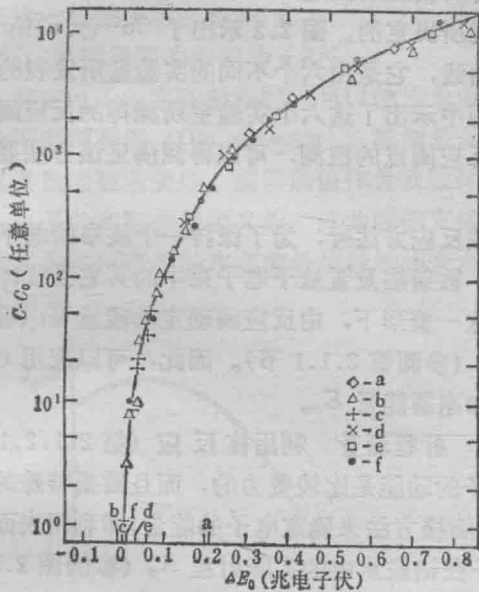


图 2.2 确定铜的核反应阈用的平均活化曲线

纵座标是测得的计数率与本底计数率之差 $C-C_0$ ，以相对单位表示。横座标是电子能量超过阈能的增量 ΔE_0 。 ΔE_0 是以最可几示值(C)为基础的。

- a——参阅 Baldwin, G. C., and Koch, H. W. (1945). "Threshold measurements of the nuclear photoeffect," Phys. Rev. **67**, 1.
- b——参阅 Birnbaum, M. (1954). "Precision determination of photon neutron thresholds," Phys. Rev. **93**, 146.
- c——参阅 Bendel, W. L., McElhinney, J., and Tobin, R. A. (1958). "Photon neutron reactions in N, O, F, Cu, Ag and In," Phys. Rev. **111**, 927.
- d——Penfold, A. S., and Garwin, E. L. (1959), "Photonuclear reaction energies," Phys. Rev. **115**, 420.
- e——Pohlit, W. (1965). *Dosimetrie Zur Betatrontherapie* (Georg Thieme Verlag, Stuttgart).
- f——Harder, D. (1967). *Determination of Electron Energy*, Report (Physics Dept., Univ. Würzburg, Würzburg).

合整条曲线时的精度所决定，而不是由所测得的曲线在反应阈附近的精度所决定的。图 2.2 示出了 $\text{Cu}^{63}(\gamma, n)\text{Cu}^{62}$ 反应的平均活化曲线，它是由六个不同的实验室所发表的测量结果组成的。图中示出了这六个实验室所测得的反应阈位置。通过初步对反应阈点的粗测，可以得到满足该方法要求的名义能量标度。

在应用核反应方法时，为了保持一个狭窄的电子谱，所用的出射窗、散射箔及置放于电子束中的其它吸收体应尽可能地少。在这一情形下，由反应阈确定的能量可以看做单值的表面能 E_0 (参阅第 2.1.1 节)。因此，可以应用 (2.1) 式由 E_0 计算加速器能量 E_a 。

2.1.2.2 射程测量 利用核反应 (第 2.1.2.1 节) 绝对地测定电子的动能是比较费力的，而且需要特殊的设备。所以，经常用间接方法来确定电子的能量，即利用表面上的能量 E_0 和电子在铝或水中的实际射程 R_p (参阅图 2.3) 之间已经很好建立起来的经验关系式：

$$\rho R_p = k_1 E_0 - k_2 \quad (2.5)$$

式中 ρ 是铝或水的密度。我们建议使用如下的常数 k_1 和 k_2 ：

物 质	k_1 (克·厘米 ⁻² ·兆电子伏 ⁻¹)	k_2 (克·厘米 ⁻²)
水	0.521	0.376
铝	0.530	0.106

对于水和约自 5 到 40 兆电子伏的电子，以及对于铝和约自 5 到 30 兆电子伏的电子来说，由这一经验关系式求出的能量值对真值的偏差小于 2%。由于韧致辐射产额随电子

能量的增加而增加，所以可以预期，在 30 兆电子伏以上时会偏离这一线性关系。在 50 兆电子伏时，对水得到的偏差为 -5%，对铝得到的偏差为 -8%。

在测定电子的实际射程时，可以使用象电离室或计数管之类的平面探测器 (flat detector)。被测量是和同时使用的监测仪器的读数有关的。测得的值作为吸收体中深度的函数作图。电子的实际射程定义为：此曲线的直线下降部分的外推线和 X 射线所产生的本底的外推线的相交点处的深度，如图 2.3 所示。

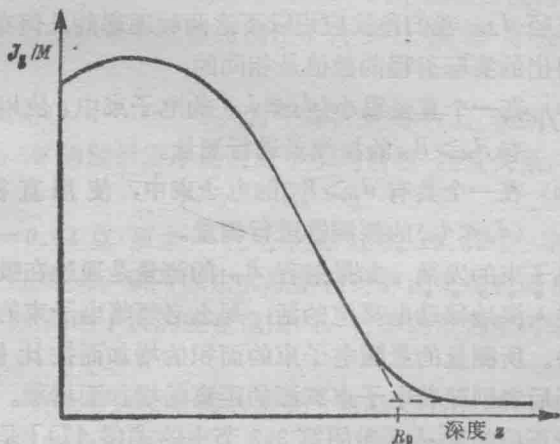


图 2.3 电子的实际射程的定义

纵座标是 J_g 对 M 的比值，这里 J_g 是电离电荷除以质量， M 是任一监测器的读数值，横座标是吸收体中的深度 z 。本图绘出了 J_g/M 和 z 的函数关系。(这一定义相应于国际辐射单位与测量委员会第 16 号报告中对“外推投影射程”所下的定义，不过这里的外推线必须外推到韧致辐射本底。)

对于粒子能量可以连续改变的加速器来说，在确定与某一能量 E_0 相应的实际射程 R_p 时，建议使用相反的程序。在这一情形下，探测器是固定在吸收体中某一深度处，而缓慢