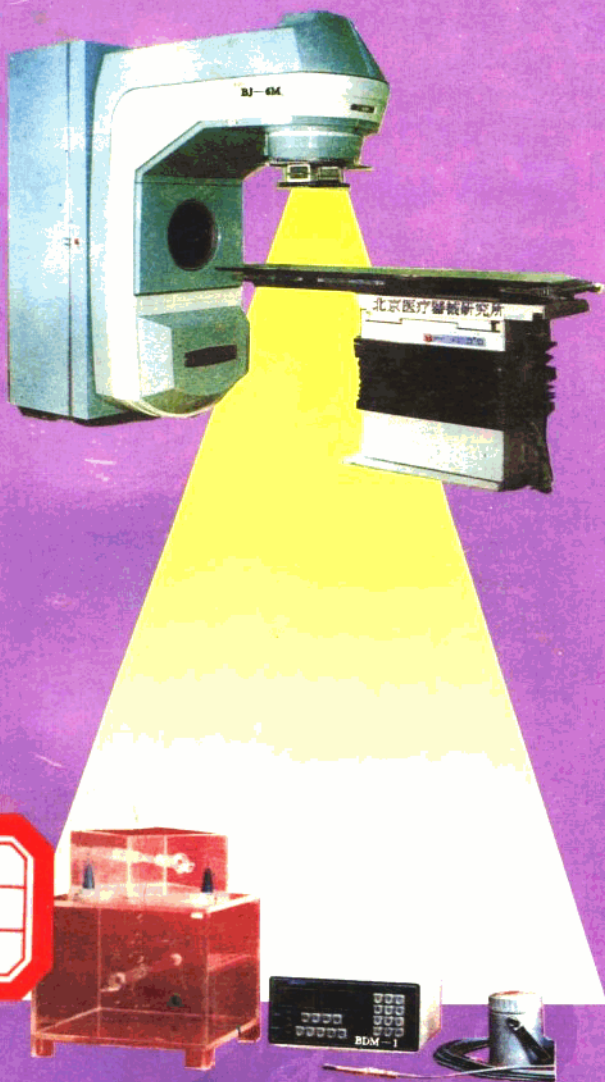


● 邢桂平 王树华 主编

实用医学放射剂量学



黄河出版社

前 言

随着医学科学的飞速发展,电离辐射在医学上的广泛应用,医疗、科研单位电离辐射源和射线装置不断增加,从事放射诊断、治疗的放射工作人员,放射物理工程技术人员,医学放射计量检定人员和放射卫生防护工作人员的队伍也不断壮大,接受放射诊断和治疗的人员逐年递增。因而,医用放射剂量学日益受到人们的重视,并在医疗、教学、科研领域得到广泛应用。

医学放射剂量学是放射诊断、治疗,放射计量检定,放射事故和放射防护评价的重要基础。它为研究辐射效应的作用机理,实施辐射治疗和防护的剂量监测与评价,进行放射损伤的诊断和治疗提供了可靠的依据。据调查,近几年从事放射治疗等医用放射剂量的人员更新快,放射剂量专业基础知识有待进一步提高。为配合医学放射计量工作和放射卫生防护工作的开展,适应和满足放射诊断、治疗,放射防护和放射计量检定人员的需要,我们编写了《实用医学放射剂量学》一书。在编写过程中,我们参阅了国内外权威书刊资料,并结合临床和放射计量检定的实践经验,重点阐述了实用性计算方法。

全书共分八章。主要内容包括两大部分,一部分阐述了放射剂量学基础,重点叙述了肿瘤放射治疗患者剂量计算;放射事故受照人员剂量估算;放射工作人员个人剂量和受检者受照剂量的估算。另一部分为放射计量专业基础,包括放射剂量测量的基本方法;医用放射源检定和医用剂量仪检定,并收集了国家和军队的有关计量法律、法规和规章制度等开展医学计量工作的指导性文件。

《实用医学放射剂量学》一书实用性强,是放射治疗人员、放射防护人员、放射计量检定人员进行计量检定和剂量计算的教材和便于查阅的工具书,也是各级卫生行政人员、医务工作者的参考书。

由于编者水平有限,书中难免有不少缺点、错误,恳请各界专家和读者给予指正。

本书在编写过程中承蒙军事医学科学院史元明、郭勇研究员审阅并对本书提出了有益的建议,在此表示谢意。

编者

1995年10月

目 录

前言	(1)
第一章 电离辐射剂量学基础	(1)
1.1 电离辐射剂量学的物理基础	(2)
1.1.1 基本概念	(2)
1.1.2 电离辐射的种类	(5)
1.1.3 电离辐射与物质的相互作用	(8)
1.2 辐射剂量学的量和单位	(14)
1.2.1 放射性的量和单位	(14)
1.2.2 辐射学的量和单位	(14)
1.2.3 相互作用系数	(15)
1.2.4 剂量学的量和单位	(16)
1.2.5 辐射防护中使用的量和单位	(16)
第二章 放射计量专业基础	(20)
2.1 放射计量学概论	(20)
2.1.1 放射计量学的任务和研究范围	(20)
2.1.2 放射计量的管理与监督	(20)
2.1.3 放射计量器具和量值	(22)
2.2 放射计量学术语	(22)
2.2.1 计量、计量学	(22)
2.2.2 量和单位	(23)
2.2.3 测量	(27)
2.2.4 计量器具	(29)
2.2.5 计量器具的特性	(36)
2.2.6 测量误差	(39)
2.2.7 计量器具的误差	(47)

2.2.8	计量检定	(49)
2.2.9	计量管理	(53)
2.3	放射计量实验室的技术要求	(54)
2.3.1	计量标准装置	(55)
2.3.2	辐射场性能	(56)
2.3.3	标准照射量(率)计	(62)
2.3.4	其它配套检定设备	(63)
2.3.5	标准实验室	(65)
第三章	放射剂量测量的基本方法	(67)
3.1	电离室在剂量测量中的应用	(67)
3.1.1	电离室的工作原理及结构	(67)
3.1.2	电离室在剂量测量中的应用	(68)
3.1.3	射线质的确定	(72)
3.2	热释光剂量仪在剂量测量中的应用	(75)
3.3	剂量测量的其他方法	(77)
3.3.1	闪烁计数器	(77)
3.3.2	胶片剂量仪	(78)
3.3.3	半导体剂量仪	(78)
3.4	放射剂量测量器具的检定	(79)
3.4.1	X、 γ 射线治疗水平照射量计的检定	(79)
3.4.2	X、 γ 射线防护水平剂量计的检定	(84)
3.4.3	环境监测用X、 γ 辐射空气吸收剂量率的检定	(91)
3.4.4	α 、 β 表面污染仪的检定	(95)
3.4.5	直读式验电器型个人剂量计的检定	(100)
3.4.6	医用放射性核素活度计的检定	(104)
3.4.7	放射计量测量器具的保养与维护	(109)
第四章	医用放射源及其检定	(110)

4.1	γ射线辐射源	(111)
4.1.1	常用的几种γ放射性同位素源	(111)
4.1.2	点状源和点状源的输出额	(112)
4.1.3	⁶⁰ Co 治疗机	(114)
4.1.4	⁶⁰ Co 远距离治疗辐射源的检定	(121)
4.2	X射线辐射源	(124)
4.2.1	X射线的产生及X射线的能谱	(124)
4.2.2	60—250kV X射线机的一般构造	(127)
4.2.3	医用加速器	(128)
4.2.4	60—250kV X射线治疗辐射源的检定	(134)
4.2.5	医用加速器X辐射源的检定	(139)
4.3	医用加速器电子辐射源的检定	(145)
第五章	肿瘤放射治疗患者剂量计算	(151)
5.1	射线束轴百分深度剂量	(151)
5.1.1	建成效应	(152)
5.1.2	深度剂量随射线能量的变化	(152)
5.1.3	照射野面积和形状对深度剂量的影响	(153)
5.1.4	不同源皮距百分深度剂量的计算	(155)
5.1.5	百分深度剂量表的选用原则	(157)
5.1.6	电子束百分深度剂量表的选用	(158)
5.2	组织空气比	(159)
5.2.1	源皮距对组织空气比的影响	(160)
5.2.2	射线能量、组织深度和射野大小对组织空气比的影响	(160)
5.2.3	反散射因子	(161)
5.2.4	组织空气比与百分深度剂量的关系	(162)
5.3	散射空气比	(163)
5.4	组织最大剂量比	(164)

5.4.1	原射线与散射线剂量	(164)
5.4.2	射野输出因子和体模散射因子	(164)
5.4.3	组织体模比和组织最大剂量比	(165)
5.4.4	散射最大剂量比	(166)
5.5	等剂量分布	(167)
5.5.1	等剂量图的测定	(167)
5.5.2	能量对等剂量分布的影响	(168)
5.5.3	源皮距和放射源大小对 ⁶⁰ Co γ射线剂量分布的影响	(168)
5.5.4	射野平坦度和对称性	(168)
5.5.5	楔形野等剂量分布与楔形角	(170)
5.6	放射治疗患者剂量计算	(171)
5.6.1	临床剂量学原则	(174)
5.6.2	外照射靶区剂量分布的几个概念	(175)
5.6.3	水模体中吸收剂量的计算	(176)
5.6.4	固定源皮距和等中心给角放射治疗剂量计算	(180)
5.6.5	旋转治疗剂量计算	(183)
5.6.6	不规则形状照射野的剂量计算	(185)
5.6.7	档铅块照射野的剂量计算	(188)
5.6.8	人体表面弯曲和组织不均匀性修正计算	(189)
5.6.9	楔形野百分深度剂量计算	(193)
第六章	放射事故受照人员的剂量估算	(195)
6.1	事故照射条件的确定	(195)
6.1.1	辐射场性质的确定	(196)
6.1.2	人员受照条件的确定	(196)
6.2	事故后模拟剂量测量	(196)
6.3	事故受照人员剂量的估算	(200)

6.3.1	非均匀照射剂量的估算	(200)
6.3.2	均匀照射剂量的估算	(201)
6.3.3	分次和延时照射的剂量表示	(202)
第七章	放射工作人员个人剂量估算	(204)
7.1	放射工作人员的剂量限值	(204)
7.1.1	国家放射卫生防护标准规定的限值	(205)
7.1.2	国际放射防护委员会建议书推荐的限值	(207)
7.2	放射工作人员个人剂量的计算方法	(208)
7.2.1	国家标准规定的计算方法	(209)
7.2.2	剂量计算中有关放射防护的最新量	(215)
7.3	外照射个人剂量的估算	(218)
7.3.1	X、 γ 射线照射个人剂量的估算	(218)
7.3.2	医用诊断 X 射线工作者受照剂量的估算	(222)
第八章	X 射线诊断和核医学诊断与治疗患者剂量的估算	(228)
8.1	X 射线诊断检查受检者的受照剂量	(228)
8.2	核医学诊断、治疗患者受照剂量估算	(229)
附表目录	(238)
附表	(243)
附表 1.	X 射线百分深度剂量:HVT0.01—8.0mmAl, 圆形照射野	(243)
附表 2.	X 射线百分深度剂量:HVT1.0—4.0mmCu, (闭端限束筒)方形及矩形照射野	(252)
附表 3.	X 射线百分深度剂量:HVT0.5—3.0mmCu (光阑限束)	(259)
附表 4.	$^{60}\text{Co}\gamma$ 射线百分深度剂量	(269)
附表 5.	X 射线 4—24MeV 百分深度剂量	(273)

附表 6. 电子束 2—20MeV 深度剂量	(284)
附表 7. 矩形照射野等效圆形照射野的直径	(286)
附表 8. 矩形照射野等效方形照射野的边长	(287)
附表 9. ^{60}Co 衰变修正系数表	(288)
附录	(289)
1. 中华人民共和国计量法	(289)
2. 中华人民共和国计量法实施细则	(295)
3. 国防计量监督管理条例	(307)
4. 军队医学计量监督管理办法实施细则	(314)
主要参考资料	(323)

第一章 电离辐射剂量学基础

目前,几乎每所医院都在利用一种或数种电离辐射源,如X射线机、CT设备、电子加速器以及各种放射性同位素等。它们已成为临床诊断和治疗的重要工具。人们一方面利用电离辐射的穿透性进行医学诊断和利用它对各种肿瘤细胞的杀伤作用进行治疗;另一方面又必须有效地减少它对受照者的健康造成的损伤,这就形成了放射诊断学、放射治疗学、核医学、放射医学和放射防护学等各专门学科。电离辐射剂量学则是这些学科的物理基础,它为研究辐射效应的作用机理,实施辐射防护剂量监测和评价,进行放射治疗和放射病诊断提供了可靠的科学依据。电离辐射剂量学主要是用物理方法研究电离辐射的能量在物质中的转移和吸收规律,受照射物质内的剂量分布,辐射效应与剂量之间的关系,剂量的测量和计算等。这门学科涉及四类物理量。第一类描述“辐射源”,包括辐射的种类、产生辐射的机制和源的强度等。第二类描述“辐射场”,对辐射及其能量在时空上的分布予以定量。第三类为电离辐射与物质的相互作用量,用以描述各种电离辐射的能量在物质中的转移和吸收过程。第四类为剂量学量,它包括两种,分别采用不同的研究方法描述电离辐射的能量在物质中的转移和传递,一种如吸收剂量、比释动能等,可看成是辐射场量和相互作用量的乘积,因此属于平均量,从宏观上量度物质受电离辐射照射的“程度”;另一种如比能、线能等为随机量,从微观上描述电离辐射能量在物质特别是在生物有机体中的沉积。就目前的科学和技术水平而言,第四类量中的前一种剂量学量无论是对医学还是对放射防护学都是最重要的,因此它也是我们进行辐射剂量测量和计

量的重点。

本章重点介绍电离辐射剂量学的基本概念和常用的电离辐射量和单位。

1.1 电离辐射剂量学的物理基础

1.1.1 基本概念

1. 原子结构

原子是构成物质的基础,是用任何化学方法都不能再分的最小单元。自然界中一切物质都是由各种元素的原子组成。原子的中心是带正电荷的原子核,核外有带有等量负电荷的电子沿着一定的轨道绕着原子核高速转动,因此整个原子呈电中性。原子的直径约为 10^{-10}m ,把一亿个氧原子排成一行,其长度不过 1cm 多。原子核的直径约为 10^{-15}m ,它只占原子体积的几千亿分之一,但它几乎集中了原子 99.9% 以上的质量。

原子中的每个电子都有它自己的固定轨道,若干个轨道组成一个壳层。最靠近核的壳层称为 K 壳层,向外依次为 L、M、N、O、P、Q 壳层。这些壳层所容纳的电子依次分别称为 L、M、N、O、P、Q 电子,并统称为轨道电子。每一壳层中可容纳的电子数目是有限的,电子壳层的序号 n 和每一壳层中可容纳的最大电子数目 N_n 之间可用一简单的关系式来表示

$$N_n = 2n^2 \quad (1-1)$$

式中, $n=1, 2, 3, 4, \dots$, 对应于 K、L、M、N、... 等壳层。由上式可算出各壳层中可容纳的最大电子数目依次为 $2, 8, 18, 32, \dots$, 等。

不同壳层上的电子所具有的能量是不同的。处于 K 壳层上的电子的能量最低,越往外面的壳层,其电子的能量越高。在正常情况下,原子中的电子总是尽先占据能量较低的能级。在没有外来能

量干扰的正常情况下,这些电子在轨道上运动时既不吸收也不放出能量,此时原子处于稳定的基态。图 1-1 表示几种原子壳层的结构示意图。氢原子核外只有一个电子,所以只有一个壳层,该电子占领最低能量轨道 K 轨道;碳原子核外有 6 个电子,其中两个占领最低能量轨道,由于 K 轨道最多只能容纳两个电子,所以其余 4 个电子分布在能量较高的 L 轨道;氧原子核外有 16 个电子,其中两个处于 K 轨道,8 个处在 L 轨道,由于 L 轨道最多只能容纳 8

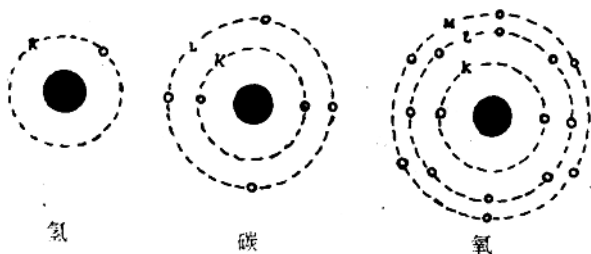


图 1-1 几种原子壳层的结构示意图

个电子,所以其余 6 个电子分布在能量更高的 M 轨道。

2. 原子核的组成

原子核由质子和中子组成,因此通常又把质子和中子统称为核子。质子相当于氢原子的原子核,其静止质量为 $1.007825048u$ (u 是原子质量单位的符号, $1u = 1.6605402 \times 10^{-27} \text{kg}$),它带有一个单位的正电荷 ($1.60217733 \times 10^{-19} \text{C}$)。中子是不带电的中性粒子,其质量与质子近似相等,它的静止质量为 $1.008664904u$ 。根据原子核所带正电荷的电量,可以确定核内的质子数,核内质子数用符号 Z 表示,称为核电荷数,亦即元素在周期表中的原子序数。各种元素的原子中,正常情况下,核内质子数和核外电子数相等,故整个原子呈电中性。根据原子序数和原子量,我们便能知道原子的组成。例如原子量为 31 的 15 号元素 P,其原子核内有 15 个质子,

有 16 个中子(31—15),核外有 15 个电子。

3. 核素、同位素和同质异能素

在原子核物理学中常采用下列术语:

(1)核素:凡核内质子数、中子数和能量状态完全相同的原子的集合都称为核素,例如 ^{32}P 、 ^{12}C 和 ^{13}C 等。

(2)同位素:凡核内质子数(从而核电荷数和原子序数)相同而中子数(从而原子量)不同的核素,它们彼此称为同位素。例如 ^{125}I 和 ^{131}I ,核内都含有 53 个质子,同属 53 号元素,在元素周期表占据相同的位置,只是它们的核内分别含有 72 和 78 个中子,故原子量不同,它们是元素碘(I)的两种同位素。由于同位素具有相同的核外电子结构,所以它们具有相同的化学性质。

(3)同质异能素(或称同核异能素);凡核内质子数和中子数都相同而原子核处于不同能量状态的核素,彼此称为同质异能素。例如 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 和 ^{99}Tc ,前者左上角加注的 m 表示它比后者处于较高的能量状态。

4. 放射性同位素

同位素可以分成两大类:一类同位素的原子核不会自发地衰变,能够稳定地存在,这类同位素称为稳定性同位素;另一类同位素的原子核能自发地衰变而转变为另一种元素的原子核,同时放射出射线,这类同位素称为放射性同位素。放射性同位素又可以分成两类:一类是天然存在的,称为天然放射性同位素,例如原子序数在 84 以后的自然界存在的各种元素都是放射性核素;另一类是用人工方法(例如反应堆、加速器)制备的,称为人工放射性同位素。临床医学上常用的放射同位素几乎都是人工放射性同位素,例如 ^{32}P 、 ^{51}Cr 、 ^{131}I 、 ^{198}Au 、 ^{60}Co 等。

5. 衰变

放射性核素的原子核自发辐射出一种或几种粒子而变成另一种核素的原子核的现象称为衰变。核衰变不依外界条件而改变,完

全遵循自身规律进行,物理学上称之为衰变规律, $N = N_0 e^{-\lambda t}$ 。即在某种放射性核素样品中,原有的具有放射性的原子数为 N_0 ,经过 t (秒)时间的衰变后,剩下的具有放射性的原子数为 N , λ 为该核素固有的衰变常数。经过推算可得 $\lambda = 0.693/T_{1/2}$, $T_{1/2}$ 称为半衰期,它表示某种放射性核素的核子数因衰变而减少到原来的一半所需要的时间。

6. 电离

电离是从母体原子或分子中释放一个或多个电子的过程。这个过程主要是由具有足够动能的带电粒子与原子中的轨道电子相碰撞而引起的。不同的物质,原子的壳层电子受原子核的束缚的程度不同,因而造成电离所需的带电粒子的最小能量也不同。光子引起物质的电离则首先是通过它从原子的壳层中击出电子,这些电子称为次级电子,再由次级电子引起物质的电离。中子可以通过与原子核碰撞形成反冲核,继而由反冲核造成物质原子的电离。

7. 电离辐射

电离辐射是由能够产生电离的带电粒子(如 α 粒子,正、负电子,质子或其它重粒子)或非带电粒子(如光子,中子)组成的辐射。电离辐射在空间或介质中进行传播的范围,称为电离辐射场。

1.1.2 电离辐射的种类

1. X、 γ 射线

X、 γ 射线都是高能电磁辐射, γ 射线的能量并非一定比 X 射线高,它们的区别仅在于产生的方式不同。 γ 射线是在核转变过程中原子核从高激发态跃迁回到低激发态或基态时放出的光量子,它是单能的,能量一般在 10keV 至 10MeV,例如, ^{60}Co 原子核衰变时放出两个光子(图 1-2),能量分别为 1.173MeV 和 1.332MeV,其平均能量为 1.25MeV。

X 射线产生于原子核外的物理过程。X 射线由两种过程产生。

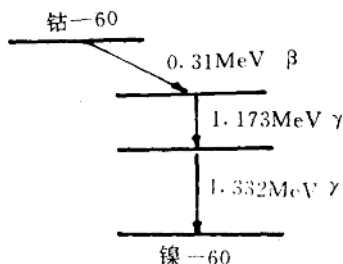


图 1-2 ^{60}Co 核蜕变图

①高速电子在物质中受阻而减速,其全部或部分能量以电磁辐射的形式放出,这种辐射称为韧致辐射,其能量是连续的,最大能量等于轰击靶的电子的动能。②高速电子与靶原子碰撞,把内壳层某一能级上的电子击出原子,然后外壳层某一能级上的电子去填补内壳层留下的空位,同时放出能量等于这两个能级之差的光子,它能反映靶原子内层电子的能级特征,故这种辐射称为特征 X 射线。特征 X 射线为几种单能光子,能量取决于靶原子的电子层结构,利用特征 X 射线的能谱可以识别靶元素,故特征辐射亦称标识辐射。就 X 射线机发生的 X 射线的组成来说,特征辐射所占比例较小,轰击电子的能量越高,特征 X 射线所占的比例越小。一个典型的 X 射线谱如图 1-3 所示。

在放射治疗中,常用电子直线加速器、电子回旋加速器产生高能电子或 X 射线,其常用的能量可达数十 MeV。

2. α 射线

α 射线的本质就是氦核流。一个 α 粒子含有两个质子和两个中子,带有两个静电荷,质量数为 4,通常由放射性核素 α 衰变产生。放射性核素在 α 衰变之后,它的质量数减少 4,原子序数减少 2,例如:

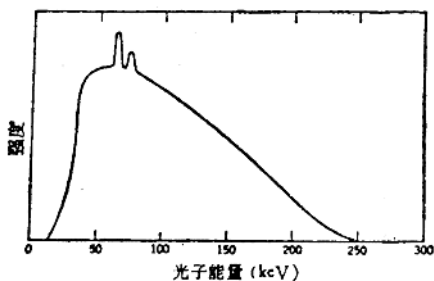
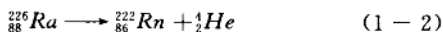


图 1-3 典型的 X 射线谱, 它由 250keV 电子打在钨靶上产生,
图中所示的两条特征 X 射线比实际强度大大缩小了。



3. 电子和正电子

电子带有一个最小单位的负电荷, 静止质量约为 $9.1093897 \times 10^{-31}\text{kg}$, 仅为质子质量的 $1/1836$ 。正电子是电子的反粒子, 带正电荷, 它可由原子核发生 β^+ 衰变时产生。电子和正电子在放射生物学里的重要性在于它们是 X 射线和 γ 射线与物质作用后产生的次级粒子, 而这两种电磁辐射的生物效应主要是通过次级电子引起的。

4. 质子

质子就是氢原子核 ${}^1\text{H}$, 带一个正电荷, 通常产生于粒子加速器(如回旋加速器)。从 50 年代开始就有人将它用来治疗肿瘤等疾病。初级宇宙射线中 79% 的带电粒子也是质子。这些都构成了质子在放射生物学中的重要性。

5. 中子