

射线防护知识浅谈

——写给从事放射性同位素应用工作的新同志

李 健

人造卫星上用的核电池；探矿用的辐射源；工业生产上使用的某些测试仪器；各种过程的示踪；农业上辐照育种、防治病虫害；医学上某些疾病的诊断、治疗以及水文、气象、科学研究等方面都在使用着各种放射性同位素。

本文简要介绍一下在使用放射性同位素(主要指封闭式的、低强度的各种辐射源)过程中有关射线防护的一些基本知识，以便使从事这方面工作的新同志有个一般的了解，希望对他们有所帮助。

一、前言

放射性同位素放出的射线一般是指 α 、 β 、 γ 射线，中子等。诚然，射线，特别是能量高、强度大的射线对人体在超过一定量的照射时能造成危害，但是射线并不可怕，就象人们日常用电一样，只要了解它的规律，使用方法正确，又采取一定的防护措施，使之不超过限度，就完全可以利用射线来为生产和科学实验服务，而不使其对人体造成危害。实际上我们每个人几乎每时每刻都受到射线的照射，或者在治疗某些疾病时也受到某种射线的照射，只是这种照射没有超过限度，所以没有危害，或者象在治疗肿瘤时，所伤害的只是肿瘤细胞。表1举例给出了一些人类在日常生活中和治疗时所受到各种射线的剂量。

表1 人类在日常生活中所受到的各种射线的剂量

照射类型	照射量 (或剂量)
自然界铀、钍、镭系同位素的外照射	0.13 毫雷姆/天
宇宙射线的外照射	0.07 毫雷姆/天
人体内镭及其子体的内照射	0.25 毫雷姆/天(在海平面, 纬度50°)
人体内钾-40的内照射	0.15 毫雷姆/天
上述几项天然本底辐射对人体的总剂量	0.60 毫雷姆/天
一次胸部X光照相	0.1—2 伦琴
一次牙齿透视检查	1.5—15 伦琴
治疗肿瘤每疗程	3000—20000 伦琴

党和国家对从事放射性工作的人员的安全十分重视，采取了必要的劳动保护措施，还制定了国家标准《放射防护规定》(内部试行)。为做到安全生产，从事这方面工作的同志，一定要认真学习并严格执行国家标准。

二、辐射防护中常用的量和单位

1. 照射量 X X射线或 γ 射线在某一位置的照射量，是根据它们产生电离的能力而定的一种对辐射的度量。它的专用单位是伦琴(用符号 R 表示)。在1伦琴的X或 γ 射线照射下，在0.00129克空气(即在标准状态下1厘米³干燥空气的质量)中产生总电荷为1静电

单位的正(或负)离子, 即

$$1 \text{ 伦琴} = \frac{1 \text{ 静电单位电荷}}{0.00129 \text{ 克}} \\ = 2.58 \times 10^{-4} \text{ 库仑/克.}$$

2. 吸收剂量 D 吸收剂量是指授给单位质量物质(或被单位质量物质吸收)的任何电离辐射的平均能量。它的专用单位是拉德(用符号 rad 表示)。

$$1 \text{ 拉德} = 100 \text{ 尔格/克.}$$

照射量和吸收剂量是两个不同的概念。照射量是根据 X 或 γ 射线对空气的电离本领来表示的辐射源的输出量; 而吸收剂量则用来表示每克受辐照物质所吸收的能量, 它不仅取决于辐照场, 而且还取决于受辐照物质本身的性质。例如, 骨骼和软组织在同样的照射量下, 不一定接受同样的吸收剂量。

然而, 照射量与吸收剂量间又有一定的联系。借助下列公式, 可由所测得的空气中任一点的照射量 X (伦琴) 算出该点生物组织的吸收剂量 $D_{\text{物质}}$ (拉德):

$$D_{\text{物质}} = fX,$$

式中 f 为伦琴-拉德换算系数, 不同能量的光子对水、骨骼和肌肉的 f 值列于表 2。

表 2 伦琴-拉德换算系数*

射线能量, 兆电子伏	水	骨 骼	肌 肉
0.01	0.910	3.55	0.924
0.02	0.878	4.23	0.916
0.05	0.891	3.58	0.925
0.10	0.947	1.46	0.947
0.20	0.972	0.978	0.962
0.50	0.964	0.924	0.956
1.0	0.964	0.918	0.955
3.0	0.961	0.928	0.953
常用核素 $\begin{cases} {}^{137}\text{Cs} & 0.66 \\ {}^{60}\text{Co} & 1.25 \end{cases}$	0.965	0.921	0.955
	0.965	0.921	0.955

* 摘自《电离辐射剂量学基础》, 苏州医学院编, 1975 年。

[例] 有一个 ${}^{60}\text{Co}$ 源, 在此 γ 场中 A 点测得照射量为 50 伦琴, 试计算 A 点处人体肌肉的吸收剂量。

${}^{60}\text{Co}$ γ 射线能量为 1.25 兆电子伏, 由表 2 查得 $f=0.955$, 代入公式得

$$D_{\text{肌肉}} = 0.955 \times 50 = 47.75 \text{ 拉德.}$$

3. 剂量当量 H 不同类型的射线对生物组织的作用是不同的。在防护工作中, 对各种辐射, 希望能有一个共同的量来表示工作人员所受剂量造成的损害, 于是引进剂量当量 H , 定义为

$$H = DQN,$$

式中, D 为所求点的吸收剂量; Q 为辐射的品质因数; N 为其他一些修正因数。

对于外照射, 取 $N=1$; 对于内照射, 某些亲骨性的放射性核素由于它们在骨组织中分布不均匀, 取 $N=5$; 对于分布在其他器管中的核素, 也取 $N=1$ 。为便于应用, 表 3 给出了不同射线的 Q 值。

表 3 Q 值

照射类型	射线种类	Q 值
外照射	X, γ 电子	1
	热中子及能量小于 0.005 兆电子伏的中能中子	3
	中能中子(0.02兆电子伏)	5
	中能中子(0.1兆电子伏)	8
	快中子(0.5~10兆电子伏)	10
	重反冲核	20
内照射	β^- , β^+ , γ , e^- , X	1
	α	10
	裂变过程中的碎片, α 发射过程中的反冲核	20

剂量当量的专用单位是雷姆(用符号 rem 表示)。在 H 的表示式中, 当吸收剂量 D 用拉德表示时, 剂量当量即以雷姆表示。

例如, 人体的肝脏受 α 射线内照射, 吸收剂量为 1 拉德, 则该组织接受的剂量当量为

$$H = DQN = 1 \times 10 \times 1 = 10 \text{ 雷姆};$$

同是这一组织, 若受 β 射线内照射, 吸收剂量为 10 拉德, 在这种情况下, 该组织受的剂量当量为

$$H = DQN = 10 \times 1 \times 1 = 10 \text{ 雷姆}.$$

可见, 同一组织, 受到不同类型电离辐射的照射, 又得到大小不同的吸收剂量, 但剂量当量相同, 这表明受到的损害程度一样。

必须说明, 剂量当量只限于防护中使用, 而且只有在剂量当量等于或小于最大容许剂量当量的范围内才适用。

三、最大容许剂量当量和限制剂量当量

为了保证从事放射性工作人员的健康, 国家标准中对工作人员的每年最大容许剂量当量和对相邻及附近地区工作人员和居民的每年限制剂量当量作了严格规定(见表 4)。

表 4 职业性放射性工作人员的年最大容许剂量当量和居民的年限制剂量当量

受照射部位		职业性放射性工作人员的年最大容许剂量当量*, 雷姆	放射性工作场所相邻及附近地区工作人员和居民的年限制剂量当量*, 雷姆
器官分类	名称		
第一类	全身, 性腺, 红骨髓, 眼晶体	5	0.5
第二类	皮肤, 骨, 甲状腺	30	3**
第三类	手, 前臂, 足, 踝	75	7.5
第四类	其他器官	15	1.5

* 表内所列数值均指内、外照射的总剂量当量, 不包括天然本底照射和医疗照射;

** 16岁以下人员甲状腺的限制剂量当量为1.5雷姆/年。

职业性放射性工作人员, 其全身照射的终身累积剂量当量不得超过 250 雷姆。

对于表 4 给出的数据, 可视情况灵活掌握。在受照剂量均匀的条件下, 可按月剂量当量控制; 如工作需要, 连续三个月内一次或多次受的总剂量可允许达年最大容许剂量当量

的一半,但一年内所受的剂量当量不得超过表4的规定;在十分必要时,经过事先周密计划,由领导批准,健康合格的工作人员一次可接受10雷姆的全身照射,但以后所接受的照射应适当减少,以使受照的前五年及后五年的十年累积剂量当量低于50雷姆,后五年内不得再接受此类照射。

四、射线防护的基本方法

在一个给定的辐射场内,决定人体所接受的总照射量的因素有以下三个:(1)照射时间;(2)离开源的距离;(3)屏蔽的情况。针对这三种因素,人们在使用放射性物质的实践过程中,总结出了时间防护法、距离防护法和屏蔽防护法。这三种方法可以单独使用,也可以结合使用。

1. 时间防护法 时间因素简单地讲就是人体在辐射场内停留时间越长,所受剂量越大。那么为了减少人体所受剂量,就要尽可能地缩短在辐射场内停留的时间。这就要求我们在进入辐射场之前,作好一切必要的准备工作,仔细而周密地计划好工作程序,以使用最短的时间去完成所做的工作。如果由一个人去完成这项工作时间仍长,所受剂量超出国家规定的标准,那么就要考虑组织几个人轮流进入辐射场内工作,用几个人的小剂量代替一个人的大剂量。

2. 距离防护法 采用距离防护法是由于人体所受剂量大小与其离辐射源的距离平方成反比,因此用增大人体与辐射源之间的距离,可以使所受剂量显著地减小。这就是说,在条件允许的情况下,操作应尽可能远离放射性物质。例如,用长柄钳或镊子,比用手直接操作剂量要小得多,如果有简易机械手就更好了。当然,即使放射源表面无沾污,也严禁用手直接接触放射性物质。

3. 屏蔽防护法 即在工作人员和被操作的放射性物质之间加上某种屏蔽物,以达到防护目的。

选用屏蔽材料要考虑:(1)防护效果。对于不同的射线要选用不同的材料;(2)选用经济的材料;(3)选用的材料不宜过于笨重,或占很大空间,要有一定的机械强度,材料受辐照后不致产生毒物或沾污等。

(i) α 射线及其屏蔽。 α 射线的射程很短,能量很大的 α 粒子在空气中的射程仅几厘米。5兆电子伏的 α 射线,在人体表皮组织中,最大射程也只有0.045毫米。可见,对于 α 射线的防护比较简单。在操作时,带手套不使它直接接触皮肤就可以了。对 α 射线最重要的是不使它进入体内形成内照射。

(ii) β 射线及其屏蔽。 β 射线较 α 射线有较大的穿透能力。 β 射线被有机体吸收后,对机体有一定的危害,因而需要适当的防护。一般来说,材料密度越大,对 β 射线的吸收性能越好;但 β 射线被密度大的物质吸收后,会产生韧致辐射,它比 β 射线有更大的穿透能力。 β 射线能量越高,产生的韧致辐射就越强。因此,经常采用原子序数较低的物质,如铝、塑料、有机玻璃等材料屏蔽 β 射线。也可采用复合方法,先用一层轻物质(如塑料)来屏蔽 β 射线,外边再用一层重物质(如铁、铅)来屏蔽韧致辐射。

屏蔽 β 射线的材料厚度可根据下列经验公式估算:

① β 射线能量在0.1兆电子伏以下时,不必考虑其屏蔽。

② β 射线能量在0.15~0.8兆电子伏间,

$$R(\text{克/厘米}^2) = 0.407 E^{1.38}.$$

式中, E 为 β 射线能量(兆电子伏), R 为所屏蔽材料的质量厚度, R 除以所选用材料的密度, 即为该材料的线厚度。

③ 当 β 射线能量大于 0.8 兆电子伏时,

$$R(\text{克/厘米}^2) = 0.542 E - 0.133.$$

(iii) γ 射线及其屏蔽。 γ 射线有很强的穿透能力, 穿透物质时其减弱规律可以指数形式表示, 即

$$I = I_0 e^{-\mu x},$$

式中 I_0 和 I 分别表示 γ 射线原强度和通过屏蔽物后的强度; μ 为屏蔽物的密度; x 为屏蔽物厚度。

由上式可见, 采用高密度物质较好。考虑到经济效果, 经常采用铁、铅、混凝土、水作为 γ 射线的屏蔽材料。

一般常用“半减弱厚度”方法来估算屏蔽层厚度, 以避免上式计算的繁复。所谓“半减弱厚度”, 就是把 γ 射线强度减弱一半所需要的屏蔽厚度。表 5 给出了常用材料的“半减弱厚度”值。

表 5 几种材料屏蔽 γ 射线的半减弱厚度

射线能量, 兆电子伏	屏蔽物质半减弱厚度, 厘米			
	水	水泥	铁	铅
0.5	7.4	3.7	1.1	0.41
1.0	10.3	5.0	1.5	0.90
1.2	11.0	5.5	1.6	1.03
1.4	11.9	6.0	1.8	1.2
1.6	12.6	6.6	2.0	1.3
1.8	13.4	7.2	2.1	1.4
2.0	14.2	7.6	2.3	1.5
2.4	15.7	8.2	2.5	1.6
2.8	17.0	8.8	2.8	1.6
3.0	17.8	9.1	2.9	1.6

[例] 有一个 ^{60}Co 源, 强度为 150000 克镭当量, 贮存在 6 米深水池内, 问池内放入多深的水, 可使池口的照射量率小于 1 微伦/秒?

无水时池口照射量率为

$$P_0 = \frac{0.23 m}{R^2} \text{ (微伦/秒)},$$

式中, R 为源到池口的距离, 米; m 为源强, 毫克镭当量。代入各量得

$$P_0 = 0.9583 \times 10^6 \text{ 微伦/秒}.$$

需要减弱的倍数

$$K = \frac{0.9583 \times 10^6}{1} = 958300.$$

需要多少个半减弱厚度才能减弱这些倍呢? 即

$$2^n = K,$$

得

$$n \approx 20.$$

⁶⁰Co γ 射线能量为 1.25 兆电子伏，半减弱厚度为 11.2 厘米，求得所需水层厚为

$$11.2 \text{ 厘米} \times 20 = 224 \text{ 厘米}.$$

(iv) 中子及其屏蔽。中子的穿透能力也很强，它与屏蔽材料的作用过程较为复杂。通常采用含氢多的物质作为屏蔽材料，例如含硼石蜡块，硼酸水等。表 6 给出了不同通量的中子源所用的石蜡层厚度。

表 6 不同通量中子源所需石蜡*层厚度

中子源通量, 中子/秒	1×10^6	5×10^6	1×10^7	5×10^7
石蜡层厚度, 厘米	9.5	13.5	15.3	20

* 每公斤石蜡含 20 克硼酸。

上面谈到的只是对单一射线的屏蔽。有的放射源放出不止一种射线，这时就必须综合考虑，使几种射线都得到屏蔽。例如，镭-铍中子源，它在放出中子的同时又伴有很强的 γ 射线，对这种源既要屏蔽中子，同时又要屏蔽 γ 射线。

以上所述均指外照射的防护方法。开放型的操作(特别是操作液体和粉末状同位素)容易造成人体、环境、水源和空气的污染而导致内照射。内照射防护的目的在于采取必要措施防止或尽量减少放射性物质进入体内(或从消化系统，或从呼吸系统，或从皮肤、伤口进入)。为此，要求做到：① 作为开放型放射性工作的建筑物，要满足卫生防护的基本要求。② 建立和健全规章制度。比如工作时要穿好工作服，戴好口罩、手套；不得在工作场所吸烟、进食、饮水或存放食品；工作完毕要洗手或洗澡；皮肤有伤口则可考虑暂不参加放射性工作；放射性废物不得乱丢，放入专用筒内定期处理。③ 熟练操作技术，杜绝事故发生。还可视具体情况采取相应措施。

五、常用仪器

射线是看不见、摸不着的，只能用仪器才能探测它。从事放射性工作，选备一两件测量仪器是必要的。

选用仪器要根据实际工作情况。比如，使用 ⁶⁰Co、¹³⁷Cs 等 γ 源，可选用 FJ-311 G2 型 γ 微伦计，经常测量工作人员活动范围的剂量情况。工作人员若需随时出入辐射场，象医院操作 ⁶⁰Co 治疗机的医生，可配备个人剂量检查仪(常用 FJ-301 G 1 型)，这是一种笔式剂量仪(又称剂量笔)，戴在身上可直接测出工作人员所受剂量。对于使用液体放射性同位素的单位，经常会遇到表面沾污问题，需要检查工作人员手、衣服及设备的沾污情况，可选用 FJ-335 B 型测 α 沾污，用 FJ-335 G 型测 β 沾污。对于使用中子源的单位，可选用 FJ-342 G 1 型便携式中子雷姆剂量仪。

使用这类仪器除仪器说明书所述内容外，一般还应注意：(1) 仪器在出厂时都已刻度过，使用一段时间或检修后要再刻度一次；(2) 测量时不要离被测物太近或贴在上面，免得仪器受沾污。一旦发现仪器沾污，要及时去污。可用棉花沾酒精擦，但要注意不能将探头上的铝膜擦破；(3) 对一些较强源的测量可由远及近，仪器量程由大到小，特别是被测物强度不清楚时更应这样；(4) 各种仪器都有它本身的能量范围，使用时注意被测射线的能量是否在仪器测量范围之内，否则所测结果会不准确。