

Part 2 辐射防护基本知识

2.1 放射性基础知识

2.1.1 放射性

放射性是指某些核素自发地放出粒子或 γ 射线,或在轨道电子俘获后放出 X 射线,或发生自发裂变的性质。

1896 年,法国物理学家贝克勒尔在研究铀盐的实验中,首先发现了铀原子核的天然放射性。在进一步研究中,发现铀盐放出的这种射线能使空气电离,也可以穿透黑纸使照相底片感光。他还发现,外界压强和温度等因素的变化不会对实验产生任何影响。贝克勒尔的这一发现意义深远,它使人们对物质的微观结构有了更新的认识,并由此打开了原子核物理学的大门。

按原子核是否稳定,可把核素分为稳定性核素和放射性核素两类。一种元素的原子核自发地放出某种射线而转变为别种元素的原子核的现象,称作放射性衰变。能发生放射性衰变的核素,称为放射性核素。

放射性有天然放射性和人工放射性之分。天然放射性是指天然存在的放射性核素所具有的放射性。它们大多属于由重元素组成的三个放射系(即钍系、铀系和锕系)。人工放射性是指用核反应的办法所获得的放射性。人工放射性最早是在 1934 年由法国科学家约里奥-居里夫妇发现的。

在目前已发现的 100 多种元素中,约有 2600 多种核素。其中稳定性核素仅有 280 多种,属于 81 种元素。放射性核素有 2300 多种。放射性衰变最早是从天然的重元素铀的放射性发现的。

2.2.2 放射性衰变

放射性与放射性物质的原子核衰变有密切关系。原子核衰变是指原子核自发

地放射出 α 或 β 等粒子而其本身转变为另一种原子核。放射性核素衰变的快慢常用半衰期来表示，即一定量的原子核衰变掉一半所需要的时间。半衰期的范围可从 10^{10} a 到 10^{-9} s。原子核衰变的形式有多种，主要有 α 衰变、 β 衰变、 γ 衰变、同质异能跃迁及自发裂变等。

2.1.3 放射性活度

由于测量放射性核的数目极不方便，且常常没有必要，而人们感兴趣又便于测量的是一定量的某种放射性物质，在一个适当短的时间间隔中所发生的自发衰变数除以该时间间隔所得的商，即衰变率 $-dN/dt$ ，亦称放射性活度。其表达式为：

$A = -dN/dt = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t}$ ，式中 $A_0 = \lambda N_0$ ，是 $t=0$ 时的放射性活度。放射性活度和放射性核数具有同样的指数衰减规律。

有的原子核经过一次衰变并不稳定，衰变过程仍继续进行，直到成为稳定核为止，其衰变规律较为复杂，这种衰变叫做连续衰变。连续衰变系列通称为放射系，在地壳中存在三个天然放射系。例如，钍系从 ^{232}Th 开始，经过 10 次连续衰变，最后到稳定核素 ^{208}Pb 。裂变产物常常要连续衰变，直至转变为稳定核素为止。例如， ^{140}Xe 要经过 4 次 β 衰变，转变到稳定核素 ^{140}Ce 。

放射性活度的专用单位为贝可 (Bq) 和居里 (Ci)， $1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10}$ 衰变/s，国际制单位叫做贝可， $1\text{Bq} = 1\text{s}^{-1}$ ， $1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{Bq}$ ，即每秒发生 3.7×10^{10} 次衰变，或者说，一秒钟内有 3.7×10^{10} 个核发生衰变，其放射性强度就叫做 1 居里。

$$1\text{mCi} = 1/1000\text{Ci} = 3.7 \times 10^7 \text{ 衰变/s};$$

$$1\mu\text{Ci} = 1/10^8 \text{Ci} = 3.7 \times 10^4 \text{ 衰变/s}。$$

居里、毫居里也简称居、毫居。

连续衰变中，有可能出现放射性平衡。某一种衰变链中，各放射性活度均按该

链前驱核素的平均寿命随时间作指数衰减变化。这种放射性平衡只有在前驱核素的平均寿命比该衰变链中其他任何一代子体核素的平均寿命长时，才是可能的。一种情况是，当前驱核素的平均寿命不是很长，但比该链中其他任何一代子体核素的平均寿命长，在时间足够长以后，整个衰变系列会达到暂时平衡，即各放射体的活度之比不随时间变化，各子体随母体的半衰期（或平均寿命）而衰减。另一种情况是，如果前驱核素的平均寿命很长，以致在考察期间，前驱核素总体上的变化可以忽略，那么在相当长时间以后（一般为连续衰变系列中最长的子体半衰期的5~7倍以上），放射系列可达到长期平衡，即各子体的放射性活度都等于母体的活度。在未达到平衡以前，子体的活度随时间而增加，一直到达放射性平衡为止。

2.2 辐射生物效应

2.2.1 辐射基本概念

1. 电离辐射

电离辐射是一切能引起物质电离的辐射总称，其种类很多，高速带电粒子有 α 粒子、 β 粒子、质子，不带电粒子有种子以及X射线、 γ 射线。在辐射防护领域，指能在生物物质中产生离子对的辐射。

2. 辐射照射

辐射照射是指受到辐射的行为或状态。辐射照射可以是外照射（体外源的照射），也可以是内照射（体内源的照射）。照射可以分为正常照射或潜在照射；也可以分为职业照射、医疗照射或公众照射；在干预情况下，还可以分为应急照射或持续照射。

3. 干预

干预的目的在于减小或避免不属于受控实践的或因事故而失控的源所致的照

射或照射可能性的行动。

4. 防护与安全

保护人员免受电离辐射或放射性物质的照射和保持实践中源的安全，包括为实现这种防护与安全的措施，如使人员的剂量和危险保持在可合理达到的尽量低水平并低于规定约束值的各种方法或设备，以及防止事故和缓解事故后果的各种措施等。

5. 随机性效应

发生几率与剂量成正比而严重程度与剂量无关的辐射效应。一般认为，在辐射防护感兴趣的低剂量范围内，这种效应的发生不存在剂量阈值。

6. 确定性效应

通常情况下存在剂量阈值的一种辐射效应，超过阈值时，剂量愈高则效应的严重程度愈大。

7. 照射量

X 或 γ 辐射在单位质量空气中产生一种符号离子总电荷的绝对值。

严格的定义是光子在质量为 dm 的空气中释放的全部电子（负的和正的）完全被空气阻止时，在空气中产生的任一种符号的离子总电量绝对值 dQ 被 dm 除所得的商，用 X 表示。它的国际单位制单位是库/千克 (C/kg)，以前习惯使用的单位是伦琴 (R)， $1R = 2.58 \times 10^{-4} C/kg$ 。1R 相当于在 1 cm^3 标准状况的空气（质量为 0.001293 g ）中产生的正、负离子电荷各为 1 静电单位。

8. 照射量率

照射量率是描述 γ 射线或 X 射线强弱的单位，表示单位时间里的照射量。国际制单位为库/（千克·秒）或 $C/(kg \cdot s)$ 。

9. 比释动能

比释动能是指不带电粒子与物质相互作用时在单位质量的物质中释放出来的所有带电粒子的初始动能的总和。

$K = dE_{tr} / dm$ 。比释动能的国际制单位是焦耳每千克 (J/kg)。

10. 吸收剂量

吸收剂量是用来表征受照物体吸收电离辐射能量程度的一个物理量。

严格的定义是电离辐射给予质量为 dm 的物质的平均授予能量 dE 被 dm 除所得的商，用 D 表示。吸收剂量的国际制单位名称为戈瑞，简称戈，符号为 Gy ， $1Gy = 1J/kg$ 。以前习惯使用的单位是拉德 (rad)， $1rad = 0.01Gy$ 。

吸收剂量与照射量成正比，即：

$$D = C \cdot X$$

C 值随 γ 射线能量及被照射物质的不同而不同，在我们所使用的 ^{60}Co 及 ^{137}Cs 放射源情况下，对人体组织器官来说，当以拉德为单位， X 以伦琴为单位时， $C \approx 1$ 。

吸收剂量率 (D) 表示单位时间内吸收剂量的增量，严格定义为：某一时间 dt 内吸收剂量的增量 dD 除以该时间间隔 dt 所得的商即： dD/dt ，吸收剂量率的单位为戈/时 (Gy/h)、毫戈/时 (mGy/h)。

11. 当量剂量

当量剂量是反映各种射线或粒子被吸收后引起的生物效应强弱的辐射量。

吸收剂量只反映被照射物质吸收了多少电离辐射的能量，吸收能量越多产生的生物效应就越厉害。同样的吸收剂量由于射线的种类不同，能量不同，引起的生物效应就不同，改变这一因素，应该有一个与辐射种类和能量有关的因子对吸收剂量进行修正。这个因子叫做辐射权重因子 (W_R)，用于对不同种类和能量的辐射进行修正。在辐射防护领域中，人们关注的往往不是受照体某点的吸收剂量，

而是某个器官或组织吸收剂量的平均值。辐射权重因子正是用来对某组织或器官的平均吸收剂量进行修正的。用辐射权重因子修正的平均吸收剂量即为当量剂量。

对于某种辐射 R 在某个组织或器官 T 中的当量剂量 $H_{T,R}$ 可由下式给出：

$$H_{T,R} = W_R \cdot D_{T,R} \quad (2-1)$$

式中， W_R ——辐射 R 的辐射权重因子；

$D_{T,R}$ ——辐射 R 在器官或组织 T 内产生的吸收剂量。

如果某一器官或组织受到几种不同种类和能量的辐射的照射，则应分别将吸收剂量用不同的辐射种类进行修正，而后相加即可得出总的当量剂量。

对于受到多种辐射的组织或器官，其当量剂量应表示为：

$$H_T = \sum_R W_R \cdot D_{T,R} \quad (2-2)$$

辐射权重因子数值的大小是由国际放射防护委员会选定的。其数值的大小表示特定种类和能量的辐射在小剂量时诱发生物效应的几率大小。X、 γ 射线不论其能量大小其辐射权重因子 $W_R = 1$ 。

W_R 是量纲为一的，当量剂量的国际制单位为 J/kg，专用名称为希沃特(Sv)，简称希。因此， $1\text{Sv} = 1\text{J/kg}$ 。

12. 有效剂量

辐射防护中通常遇到的情况是小剂量慢性照射，这种情况下引起的辐射效应主要是随机性效应。随机性效应发生几率与受照器官与组织有关，即不同的器官或组织虽然吸收相同当量剂量的射线，但发生随机性效应的几率可能不一样。为了考虑不同器官或组织对发生辐射随机性效应的不同敏感性，引入一个新的权重因子对当量剂量进行修正，使其修正后的当量剂量能够正确地反映受照组织或器官吸收射线后所受的危险程度。这个对组织或器官 T 的当量剂量进行修正的因子称为组织权重因子，用 W_T 表示。每个 W_T 均小于 1，对射线越敏感的组织， W_T 越

大，所有组织的权重因子的总和为 1。

经过组织权重因子 阳加权修正后的当量剂量称为有效剂量，用 E 表示。由于 W_T 为量纲一，所以 E 的单位与当量剂量 H_T 单位相同，为 J/kg，专用单位 Sv 通常在接受照射中，会同时涉及几个器官或组织，所以应该有不同组织或器官的时对相应的器官或组织的剂量当量进行修正，所以有效剂量 E 是对所有组织或器官加权修正的当量剂量的总和。用公式表示如下：

$$E = \sum_T W_T \cdot H_T \quad (2-3)$$

2.2.2 辐射防护标准

我国辐射防护的基本标准为《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871- 2002)，该标准规定了对电离辐射防护和辐射源安全的基本要求，它适用于实践和干预中人员所受电离辐射照射的防护和实践中源的安全。

1. 辐射防护的目的

辐射防护的出发点是要减低辐射对人类健康的危害。根据辐射效应的特点，辐射防护的主要目的是在保证不对伴随辐射照射的有益实践造成过度限制的情况下为人类提供合适的保护。具体来讲：

- (1) 防止有害的确定性效应；
- (2) 限制随机性效应的发生率使之达到被认为可以接受的水平。

2. 辐射防护基本原则

(1) 实践的正当性

对于一项实践，只有在考虑了社会、经济和其他有关因素之后，其对受照个人或社会所带来的利益足以弥补其可能引起的辐射危害时，该实践才是正当的。对于不具有正当性的实践及该实践中的源，不应予以批准。

(2) 剂量限制和潜在照射危险限制

应对个人受到的正常照射加以限制，以保证来自各项获准实践的综合照射所致的个人总有效剂量和有关器官或组织的总当量剂量不超过规定的剂量限值。

应对个人所受到的潜在照射危险加以限制，使来自各项获准实践的所有潜在照射所致的个人危险与正常照射剂量限值所相应的健康危险处于同一数量级水平。

(3) 防护与安全的最优化

对于来自一项实践中的任一特定源的照射，应使防护与安全最优化，使得在考虑了经济和社会因素之后，个人受照剂量的大小、受照射的人数以及受照射的可能性均保持在可合理达到的尽量低的水平；这种最优化应以该源所致个人剂量和潜在照射危险分别低于剂量约束和潜在照射危险约束为前提。

3. 剂量限值规定

(1) 职业照射的剂量限值

应对任何工作人员的职业照射水平进行控制，使之不超过下述限值：

- 1) 连续 5 年的年平均有效剂量，20mSv；
- 2) 任何一年中的有效剂量，50mSv；
- 3) 眼晶体的年当量剂量，150mSv；
- 4) 四肢（手和足）或皮肤的年当量剂量，500mSv。

对于年龄为 16~18 岁，接受涉及辐射照射就业培训的徒工和年龄为 16~18 岁在学习过程中需要使用放射源的学生，应控制其职业照射水平使之不超过下述限值：

- 1) 年有效剂量，6mSv；
- 2) 眼晶体的年当量剂量，50mSv；
- 3) 四肢（手和足）或皮肤的年当量剂量，150mSv。

特殊情况下，可对剂量限值进行如下临时变更：

1) 依照审管部门的规定, 可将剂量平均期由 5 个连续年破例延长到 10 个连续年; 并且, 在此期间内, 任何工作人员所接受的年平均有效剂量不应超过 20mSv, 任何单一年份不应超过 50mSv; 此外, 当任何一个工作人员自此延长平均期开始以来所接受的剂量累计达到 100mSv 时, 应对这种情况进行审查;

2) 剂量限制的临时变更应遵循审管部门的规定, 但任何一年内不得超过 50mSv, 临时变更的期限不得超过 5 年。

(2) 公众照射的剂量限值

实践使公众中有关关键人群组的成员所受到的平均剂量估计值不应超过下述限值:

- 1) 年有效剂量 1mSv;
- 2) 特殊情况下, 如果 5 个连续年的年平均剂量不超过 1mSv, 则某一单一年份的有效剂量可提高到 5mSv;
- 3) 眼晶体的年当量剂量 15mSv;
- 4) 皮肤的年当量剂量 50mSv。

预习测试

一、 选择题

1、应对任何工作人员的职业照射水平进行控制，使之不超过下述限值剂量限值规定，对于连续 5 年的年平均有效剂量是： (A)

A 20mSv B 50mSv C 150mSv D 300mSv

2、对于 X、 γ 射线常用的屏蔽材料是 (A)

A 铅板和混凝土墙 B 石墨烯 C 锡纸 D 生铁

3、辐射对生物体的作用是一个非常复杂的过程，生物体从吸收辐射能量开始到产生辐射生物效应，要经历许多不同性质的变化，一般认为将经历几个阶段的变化？ (D)

A 1 个 B 2 个 C 3 个 D 4 个

4、射线直接与生物大分子作用将生物大分子的化学链轰断引起生物大分子的损伤：只有在含水量为以下的化合物受到几十万伦琴的照射时，才有可能产生直接作用。 (B)

A 5% B 3% C 20% D 10%

5、原子核俘获轨道电子而转变为电荷数减 1、质量数不变的原子核的现象是 (B)

A α 衰变 B β 衰变 C γ 衰变 D 重核裂变

6、辐射作用于生物体时能造成电离辐射，这种电离作用能造成生物体的细胞组织、器官等损伤，引起病理反应，称为辐射生物效应，辐射作用于生物体时在很短时间内造成的影响是 (A)

A 细胞被电离；

B 反应产物与细胞分子作用可能破坏复杂分子；

C 可能破坏细胞或其功能。

D 出现在受照者后代的称为遗传效应。

7、C 值随 γ 射线能量及被照射物质的不同而不同，在我们所使用的 ^{60}Co 及 ^{137}Cs 放射源情况下，对人体组织器官来说，当以拉德为单位，X 以伦琴为单位时，C 约等于多少？ (D)

A 4 B 3 C 2 D 1

8、国际上公认的比较安全的行业，危险度为 10^{-4} ，而多少范围的危险度可以被公众中的任何人接受？ (A)

A $10^{-6} \sim 10^{-5}$ B $10^{-5} \sim 10^{-4}$ C $10^{-4} \sim 10^{-3}$ D $10^{-3} \sim 10^{-2}$

9、经过大量的统计表明，我国放射性工作人员中的 80%~90%，实际每年受到的剂量当量为(B)

A 0~2mSv B 0~5mSv C 0~7mSv D 0~9mSv

10、在单次照射剂量阈值/Gy 为 3~5 次的情况下，皮肤可能出现以下哪种状况 (B)

A 红斑 B 暂时性脱发 C 永久性脱发

二、 判断题

- 1、所有辐射对人体都是有害的（×）
- 2、电离辐射在辐射防护领域，指能在生物物质中产生离子对的辐射。（√）
- 3、屏蔽防护的要点是在射线源与人体之间放置一种能有效吸收射线的屏蔽材料。（√）
- 4、辐射生物效应只可以表现在受照者本身。（×）
- 5、电离辐射的随机性效应是在放射防护中，发生几率与剂量的大小有关的效应，即剂量越大，随机性效应的发生率越大。（√）
- 6、电离辐射的随机性效应是在放射防护中，发生的严重程度与剂量大小有关。（×）
- 7、在照射率不变的情况下，缩短照射时间可以达到防护目的。（√）
- 8、平方反比定律公式说明射线一定时，两点的射线强度与它们的距离平方成反比，则随着距离的增大将迅速减少受辐照的剂量。（√）
- 9、如果长期在小剂量照射下工作，即在国家规定的个人剂量当量限值以下长期工作，对工作人员健康的影响现代医学手段检查不出来，可不予考虑。（√）
- 10、通常情况下存在剂量阈值的一种辐射效应，超过阈值时，剂量愈高则效应的严重程度愈大。（√）