

放射卫生防护培训系列教材

# 放射防护基础

◎ 万 杜  
编 国  
著 玲 生



原子能出版社

放射卫生防护培训系列教材

# 放射防护基础

杜国生 万 玲 编著

原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

放射防护基础 杜国生,万玲编著. —北京:原子能出版社,2009.3

ISBN 978-7-5022-4463-7

I. 放… II. ①杜… ②万… III. 辐射防护 IV. TL7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 025298 号

放射防护基础

---

出版发行 原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

责任编辑 刘 朔

责任校对 冯莲凤

责任印制 丁怀兰 刘芳燕

印 刷 廊坊市佳艺印务有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 850 mm×1168 mm 1/32

印 张 1.625

字 数 41 千字

版 次 2009 年 4 月第 1 版 2009 年 4 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-4463-7

印 数 1—15 000 定 价 18.00 元

---

版权所有 侵权必究

网址:<http://www.aep.com.cn>

# 目 录

第一章 基本概念 .....	1
一、原子和原子核 .....	1
二、放射性 .....	6
三、X 射线 .....	12
第二章 射线与物质的相互作用 .....	23
一、带电粒子与物质相互作用 .....	24
二、X、 $\gamma$ 射线与物质的相互作用 .....	28
三、单能 X、 $\gamma$ 射线的减弱 .....	32
四、中子与物质的相互作用 .....	33
第三章 常用辐射量单位 .....	36
一、照射量和照射量率 .....	36
二、比释动能和比释动能率 .....	38

三、吸收剂量和吸收剂量率 .....	39
四、当量剂量和当量剂量率 .....	39
五、有效剂量与组织权重因子 .....	41

# 第一章 基本概念

## 一、原子和原子核

### (一) 原子

地球上自然存在的物质是由 92 种不同元素组成的,最轻的元素是氢,最重的元素是铀。构成元素的最基本的单位是原子。原子的几何尺寸很小,其直径为  $10^{-10}$  m 左右,原子的质量也很小,一个氢原子的质量是  $1.673 \times 10^{-24}$  g,最重的铀原子的质量也只有  $3.951 \times 10^{-22}$  g。

各种元素的原子尽管性质各异,但其结构却十分相似,都是由原子核和围绕原子核旋转的电子组成,原子核带正电荷,原子核的质量占原子质量的 99.98%,核外电子运行轨道以壳层模型排列,每个壳层有一定数目的轨道,每个轨道上只能有一个电子运行。距核最近的电子壳层(第一层)称为 K 壳层,由内向外数第二层叫 L 壳层,其他依次称为 M、N、O…壳层。在不同壳层的轨道上

运行的电子具有不同能量,靠核最近的 K 壳层上的电子受原子核束缚最紧,位能最低。距核越远的壳层电子受原子核束缚程度越小,位能越高。在没有外界作用的情况下,原子作为一个系统,电子处于位能最低的轨道上运行,电子数等于原子核所带正电荷数,整个原子呈电中性。

## (二) 原子核

原子核是由质子和中子组成的。质子的质量为 1 个原子质量单位,一个质子带一个单位正电荷,数值上和一个电子所带电荷量相等。中子不带电,其质量和质子的质量相近。质子或中子的质量约为电子的 1 840 倍。核内的质子数与中子数之和就是原子的质量数或称为相对原子质量 (A)。原子好像一个太阳系,原子核是“太阳”,轨道电子是“行星”,在直径为  $10^{-10}$  m 的空间内,绝大部分是空虚无物的。组成原子核的质子和中子在核内不是简单地堆积在一起,而是以某种方式不停地运动。因此,同一质子数和中子数所组成的原子核,有核能量状态的区别。

## (三) 原子序数

某元素原子核中质子数目称为原子序数,用

符号  $Z$  表示,见表 1-1。

表 1-1 元素组成示例表

元素名称	原子核中质子数	原子核外 电子数	原子序数 $Z$
氢(H)	1	1	1
碳(C)	6	6	6
铝(Al)	13	13	13
铅(Pb)	82	82	82
铀(U)	92	92	92

元素的原子序数确定了元素的化学性质,原子序数越高,原子质量越大,密度越大。原子序数  $Z$  等于原子核所带正电荷数,也等于核外电子数。

#### (四) 同位素

一种元素所有原子都有相等数目的质子,但其中子数不尽相同,也就是说,一种元素可以有多种类型的原子。例如元素氢(H)的原子序数为 1,原子核中只有一个质子,但氢原子核有三种不同类型,如表 1-2 所示。



表 1-2 同位素示例表

元素名称	Z	核内质子数	核内中子数	相对原子质量 A
氢-1	1	1	0	1
氢-2	1	1	1	2
氢-3	1	1	2	3

又如：原子序数  $Z=53$  的元素碘 (I)，有 20 种不同的原子，原子核内中子数最少的为 67，最多的为 86。这些质子数相同、中子数不同、属于同一元素的原子，具有相同的化学性质，在化学元素周期表上排在同一位置，称之为同位素。

### (五) 核素

具有一定质量数、质子数和核能量状态的一类原子称为核素。核素通常用符号  ${}^A_ZX$  表示，其中 X 代表元素符号，A 是质量数，Z 是原子序数即质子数。例如上面提到的元素氢的三种同位素是由三种不同核素即  ${}^1_1\text{H}$ ， ${}^2_1\text{H}$ ， ${}^3_1\text{H}$  组成的。质量数和质子数相同、核能态不同，不属同一种核素。例如  ${}^{99}_{43}\text{Tc}^m$  和  ${}^{99}_{43}\text{Tc}$ ， ${}^{60}_{27}\text{Co}^m$  和  ${}^{60}_{27}\text{Co}$  是两种不同核素。

## (六) 爱因斯坦狭义相对论要点

1) 物体运动的最高速度是光速

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

2) 物体质量随其运动速度而变化

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

式中,  $m_0$ ——物体运动速度为 0 时的质量;

$m$ ——物体运动速度为  $v$  时的质量;

$c$ ——光速(无线电波、X、 $\gamma$  射线等都是光速传播)。

3) 物体的质量与能量可以相互转化

例如, 速度为 0 时的电子质量  $m_0$  转换为能量  $E_0$

$$\begin{aligned} E_0 &= m_0 c^2 \\ &= 9.109 \times 10^{-31} \times (3 \times 10^8)^2 \\ &= 0.511 \text{ MeV} \end{aligned}$$

一个正电子和一个负电子相碰时, 转换成两个质量为 0、能量为 0.511 MeV 的  $\gamma$  光子。(能量单位 eV: 电子伏特, 是一个电子在电场中经过 1 伏特电位差所获得或失去的能量。1 eV = 1.602  $\times$  10<sup>-19</sup> J, 1 keV = 10<sup>3</sup> eV, 1 MeV = 10<sup>3</sup> keV = 10<sup>6</sup> eV)

## 二、放射性

### (一) 放射性衰变

法国科学家贝可勒尔(H Becquerel)在 1896 年研究 X 射线时发现,铀化合物自发地放出一种辐射使感光材料感光,由此发现了天然放射性。

某些核素能自发地放出粒子或射线,或自发分裂,称这种性质为放射性。具有放射性的核素称为放射性核素,含有放射性核素的物质称为放射性物质;放射性核素放出粒子后变成其他类型的新核素,其放射性随着时间增加而减少,称这种现象为放射性衰变,放射性衰变的速率与温度、压力及化学过程无关。

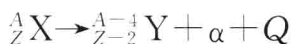
### (二) 放射性衰变的种类

1898 年居里夫妇从铀矿石中发现放射性物质镭,镭放出三种射线,即  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  射线。原子核自发地放出  $\alpha$  射线而转变成另一种原子核的衰变过程叫做  $\alpha$  衰变;放出  $\beta$  射线而转变成另一种原子核的衰变过程叫做  $\beta$  衰变; $\alpha$  或  $\beta$  衰变中通常伴随发射  $\gamma$  射线,称为同质异能跃迁。

### 1. $\alpha$ 衰变

$\alpha$  射线实际上就是带两个正电荷的氦核流。

原子核发生  $\alpha$  衰变的一般过程可以写成



式中,  ${}^A_Z X$  称为母体核素;  ${}^{A-4}_{Z-2} Y$  称为子体核素;  $Q$  为衰变能, 它是  $\alpha$  粒子的初始动能与子核体反冲能之和。

### 2. $\beta$ 衰变

$\beta$  射线是高速电子流, 这些电子是从衰变核中发射出来的。 $\beta$  衰变可以看成是母核内一个中子衰变成一个质子, 放出一个电子和一个称为反中微子的过程。 $\beta$  衰变的一般衰变式是



### 3. 同质异能跃迁

原子核发生  $\alpha$  或  $\beta$  衰变时, 所生成的子核常常处于较高的能量状态或叫做核激发态, 激发态是不稳定的状态。当子核从激发态跃迁到能量较低的激发态或基态时, 发出  $\gamma$  射线达到能量守恒。原子核的激发态的寿命常常极短, 一般为  $10^{-11} \sim 10^{-13} \text{s}$ , 因而可以认为  $\gamma$  射线与  $\alpha$ 、 $\beta$  粒子同时放出。放出  $\gamma$  射线的原子核的质量数、电荷数都保

持不变。

$\gamma$  射线实质上是波长极短的电磁波, 又称  $\gamma$  光子。

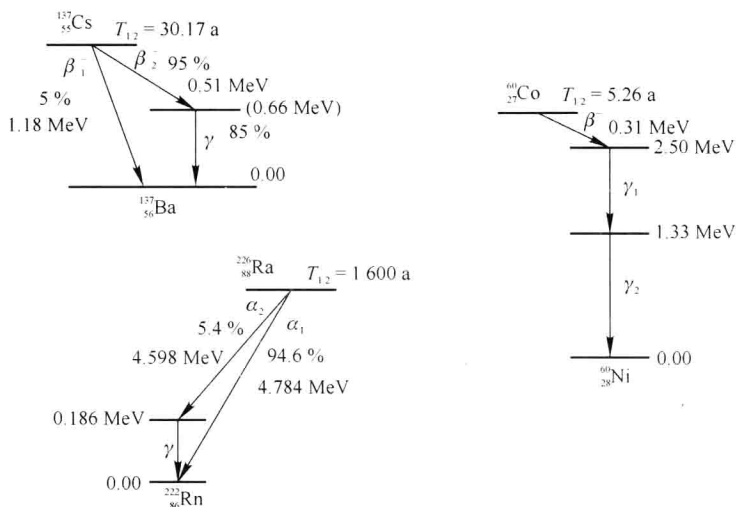


图 1-1 核素衰变图

核素衰变图(图 1-1)能给我们直观、形象的认识。

### (三) 半衰期

放射性原子核数目因不断衰变而减少。这种变化规律可以用下式来表示:

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 e^{-\frac{0.693}{T_{1/2}} t}$$

式中,  $N_0$ ——开始时(即  $t = 0$  时)的放射性核数;

$N_t$ —— $t$  时刻的核数;

$T_{1/2}$ ——放射性核素的半衰期, 即该核素原子核数目衰变到原来的一半所需的时间;

$\lambda$  被称为该放射性核素的衰变常数, 其值为  $(\ln 2)/T_{1/2}$ 。

每一种放射性核素都有自己的半衰期。例如天然铀中丰度最高的  $^{238}_{92}\text{U}$ , 其半衰期  $T_{1/2} = 4.5 \times 10^8$  a, 工业探伤用  $^{192}_{77}\text{Ir}$ , 其半衰期  $T_{1/2} = 74$  d, 医用放射性核素  $^{125}_{53}\text{I}$  的半衰期是 60.2 d, 而  $^{99}_{43}\text{Tc}^m$  的半衰期只有 6.02 h。

半衰期是非常重要的参数。无论是辐射防护, 还是放射性核素的生产、应用都要认真考虑核素半衰期这个因素。

$^{210}\text{Po}$  的衰变曲线见图 1-2。

#### (四) 放射性活度

活度是描述放射性核素衰变率的物理量, 即单位时间发生衰变的数量(不是单位时间内发射的粒子数或光子数)。

放射性活度的国际制(SI 制)单位的定义是:

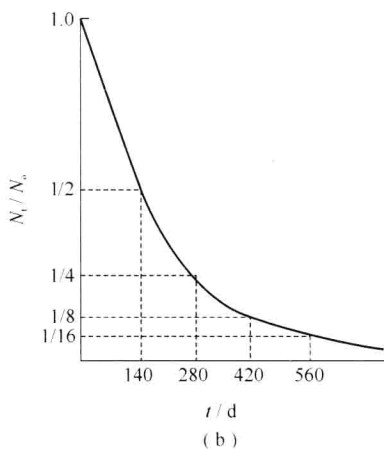
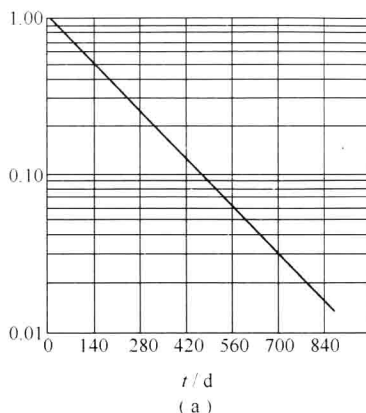


图 1-2  $^{210}\text{Po}$  的衰变曲线  
(a) 半对数坐标; (b) 线性坐标

1 次核衰变/s。其专用名称为贝可勒尔,简称贝可,符号为 Bq。贝可是一个很小的单位,实际上常用下列倍数词来表示某一核素的活度:

$$\begin{aligned} 1 \text{ 千贝可 (kBq)} &= 10^3 \text{ 贝可} \\ &= 10^3 \text{ 次衰变/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ 兆贝可 (MBq)} &= 10^6 \text{ 贝可} \\ &= 10^6 \text{ 次衰变/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ 吉贝可 (GBq)} &= 10^9 \text{ 贝可} \\ &= 10^9 \text{ 次衰变/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ 太贝可 (TBq)} &= 10^{12} \text{ 贝可} \\ &= 10^{12} \text{ 次衰变/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ 帕贝可 (PBq)} &= 10^{15} \text{ 贝可} \\ &= 10^{15} \text{ 次衰变/s} \end{aligned}$$

过去一直使用居里作为放射性活度单位,居里与贝可有下列关系:

$$1 \text{ 居里 (Ci)} = 3.7 \times 10^{10} \text{ 贝可 (Bq)}$$

$$1 \text{ 毫居里 (mCi)} = 3.7 \times 10^7 \text{ 贝可 (Bq)}$$

$$1 \text{ 微居里 } (\mu\text{Ci}) = 3.7 \times 10^4 \text{ 贝可 (Bq)}$$

活度  $A_t$  可以用下式表示:

$$A_t = \lambda N_t$$

$$A_t = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

$$A_t = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\frac{0.693}{T_{1/2}} t}$$

式中,  $A_t$  为  $t$  时刻的活度;

$A_0$  为  $t = 0$  时的活度。

例如:某探伤室购进一个铯-192 源,出厂标定



活度为 1.48 TBq, 标定日期为元月五日, 问同年三月二十日, 五月二十日该源的活度是多少?

解: ①  $A_0 = 1.48 \text{ TBq}$ ,  $T_{1/2} = 74 \text{ d}$ 。  $t = 74 \text{ d}$ 。  
从标定日起到三月二十日, 正好是一个半衰期, 故该源的活度为  $A_t = \frac{1}{2}A_0 = 0.74 \text{ TBq}$

②元月五日到五月二十日一共经过了 124 d, 按公式计算

$$\begin{aligned} A_t &= A_0 e^{-\lambda t} = 1.48 \text{ TBq} \times e^{-\frac{0.693}{74} \times 124} \\ &= 0.463 \text{ TBq} \end{aligned}$$

### 三、X 射线

#### (一) X 射线的产生

自从 1895 年德国科学家伦琴发现 X 射线以来, X 射线发生器经过了几代变化, 目前已能制造性能稳定、便于调节、适应各种不同需要的 X 射线发生器。X 射线发生器的核心部件是 X 射线管, 现代医用 X 射线管, 多采用高真空旋转阳极、热阴极电子式。旋转阳极和阴极都密封于高真空的玻璃管或金属管内, 当阴极灯丝电源接通后, 灯丝被加热, 产生热电子发射。从阴极发射出的电子在阳极—阴极间电场的加速下, 到达阳极表面