

第二章 核 转 变



学习目标

1. 掌握:放射性核素的衰变类型,单一放射性核素的衰变规律。
2. 熟悉:医学放射性核素的生产与制备方法及其放射性核素的临床应用。
3. 了解:放射性核素长期平衡与暂时平衡的区别。

第一节 放射性核素衰变类型

核素有两大类,即放射性核素和稳定性核素。放射性核素又分为天然放射性和人工放射性核素(简称人造核素),人造核素主要由反应堆和加速器制备。目前已知的元素有 107 种,而核素有 2000 多种,近 90% 是放射性核素。原子序数很高的那些重元素,如铀(U)、钍(Th)、镭(Ra)等,它们的核很不稳定,自发地放出射线,变为另一种元素的原子核,这一现象称为放射性核素衰变(radioactive decay),简称核衰变(decay)。核衰变过程遵守电荷、质量、能量、动量和核子数守恒定律。下面讨论几种主要核衰变类型。

一、 α 衰 变

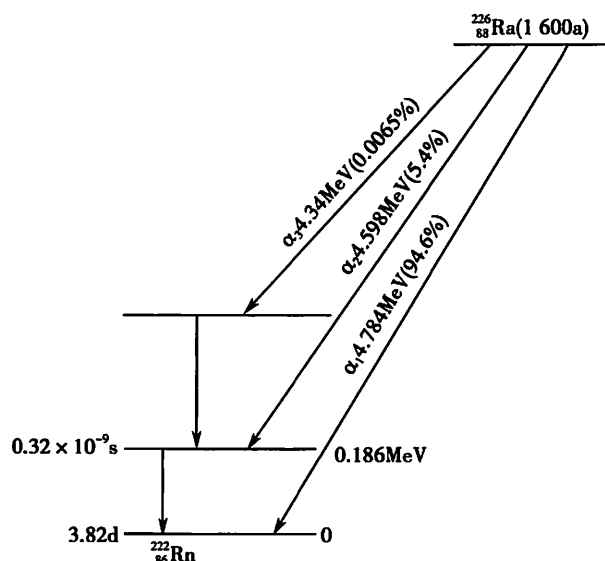
放射性元素中有些放射所谓 α 射线,有些放射 β 射线,有些在放射 α 射线或 β 射线时,伴随着有 γ 射线放出。

α 射线是氦核 ${}^4_2\text{He}$,它是由 2 个质子和 2 个中子构成的。质量数 $A > 209$ 的重核发射 α 射线(放出 α 粒子)后,变为质量数 A 值较低的原子核,这种衰变叫 α 衰变。其过程可写成



式中 X 叫母核, Y 叫子核, Q 为衰变能(decay energy),是由母核放出的能量,其值用两侧的原子质量差值计算,不同核素 Q 值不同,单位用 MeV。从式(2-1)中可知衰变前后的核子数和电量数量是守恒的。子核比母核的质量数 A 少 4,电量数 Z 少 2,在元素周期表中的位置比母核前移两位,这就是 α 衰变的位移法则。 α 衰变过程放出的能量主要反映在 α 粒子的动能,子核的动能很小。 α 粒子以很高的速度从核中飞出,受物质所阻而失去动能,捕捉两个电子变成一个中性氦原子。原子核发生 α 衰变时,子核一般处于基态,也有时暂处于激发态,且能量状态是分立的。图 2-1 是最早用于临床的镭(${}^{226}_{88}\text{Ra}$)衰变图,图中横线表示核能级,最低一横线表示基态,在它上面的横线表示激发态;图中右侧的数字为能级的能量 MeV,左侧的数字为半衰期。图中说明 ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ 放出能量为 4.784 MeV 的 α 粒子后,衰变到 ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ (氡)的基态,此种能量的 α 粒子占总数的 94.6%;放出能量为 4.598 MeV 的 α 粒子占 5.4%,同时还有占比例很小的,能量为 4.34 MeV 的 α 粒子。后两种 α 粒子从处于激发态衰变到 ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ 的基态,即向基态跃迁放出能量为 0.186 MeV 的 γ 射线。



图 2-1 镭($^{226}_{88}\text{Ra}$)衰变图

二、 β 衰 变

β 衰变是指一种核自发地变成另一种核,其质量数 A 不变,而原子序数 Z 在元素周期表中向前或后移 1 个位置,有 β^- 、 β^+ 衰变和电子俘获(electron capture, EC)3 种类型。

(一) β^- 衰变

β^- 射线是电子,是由母核放出电子的一种衰变。放射 β^- 射线的原子核放出 1 个电子后,其电荷增加 1 单位,而质量变化很小(因电子的质量比原子核的质量小得多),变成原子序数增加 1 的另一个原子核。式(2-2)中 ^A_ZX 和 $^{A}_{Z+1}\text{Y}$ 代表母核和子核, $\bar{\nu}$ 为反中微子,它是在衰变中与 β^- 粒子同时放射出的一种粒子,不带电,静止质量为零, Q 为衰变能。原子核中并不存在电子,而是在衰变时原子核中的一个中子放出一个电子变为一个质子的过程,遵守位移法则。



(二) β^+ 衰变

有些人工产生的放射性元素是放正 β 射线的,这些原子核放射后,转变为原子序数减去 1 的另一个原子核。

在 β^+ 衰变过程中,原子核放出一个正电子,即原子核中一个质子放出一个正电子而变成中子,同时放射出一个中微子,遵守位移法则。



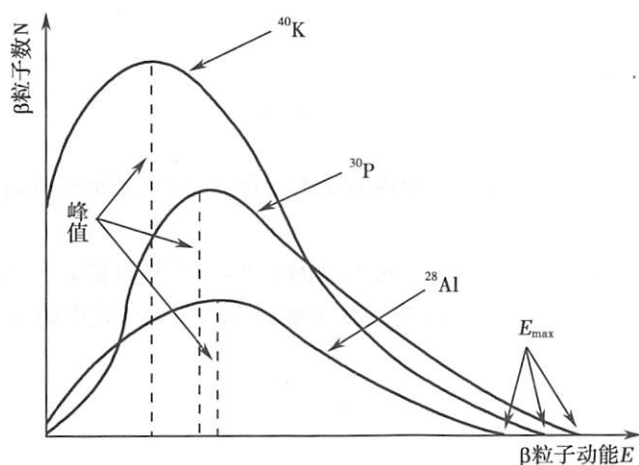
不管是 β^- 或 β^+ 衰变都有 3 种产物,因此衰变时所放出的能量为三者共有,而且 β 所携带的能量不是分立的,而是连续的 β 能谱。图 2-2 给出了 ^{40}K 、 ^{30}P 和 ^{28}Al 的 β 能谱图。其特点有: β 粒子数按能量连续分布;每一种放射性物质的 β 能谱有固定的上限能量和峰值;不同的放射性物质有不同形状的能量分布,且其上限能量和峰值也不相同。

(三) 电子俘获

原子核俘获核外电子,使核内的一个质子变为一个中子,电荷数变为 $Z-1$,这种衰变称为电子俘获。



在电子俘获过程中,可能出现核外层电子填补内层电子空位,而产生特征 X 射线(characteristic X-ray)或俄歇电子(Auger electron)。俄歇电子是当高能级的电子跃迁至低能级,其多余的能量直接转移给同一能级的另一电子,而不辐射 X 射线,接受这份能量的电子脱离原子,成为自由电子,这种电子叫俄歇电子。在核医学中计算人体吸收的剂量时应考虑这一因素。

图 2-2 三种不同放射性核素的 β 能谱图

有些放射性核素在发生 β 衰变和电子俘获后,子核可以处于激发态,于是有 γ 射线伴随发射。由于从原子核中发射出来的正电子很快与周围的电子结合,形成两个能量为 0.511MeV 、传播方向相反的 γ 光子,检测这两个光子可用于确定 β^+ 衰变核素的位置。

三、 γ 衰变和内转换

α 和 β 衰变后的子核大部分处于激发态,并以 γ 射线的形式释放能量,跃迁到较低的能态或基态,这种跃迁叫 γ 衰变。可见, γ 射线是光子,不带电,无静止质量。它的放出不改变原子核的电荷,对质量的影响亦极微小。在核医学中使用的 ^{60}Co (钴)、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (锝)等放射源均有 β 和 γ 射线发射。

处于激发态的原子核还有另一种释放能量的方式,即原子核由激发态回到基态时并不发射 γ 射线,而是把全部能量交给核外电子,使其脱离原子的束缚而成为自由电子,这一过程叫内转换(internal conversion),发射的电子叫内转换电子(internal conversion electron)。这里要注意的是,不能将内转换过程理解为内光电效应,即不能认为是原子核先放出光子,然后再与核外轨道电子发生光电效应,这是因为发生内转换概率远大于发生内光电效应。另外无论是电子俘获还是内转换过程,由于原子的内壳层缺少电子而出现空位,外层电子将会填充这个空位。因此这两个过程都将伴随着特征 X 射线和俄歇电子的发射。

第二节 原子核的衰变规律

一、衰 变 规 律

核衰变是原子核自发变化的过程,在足够多的原子核中,每一个核在什么时候发生放射变化是不能预知的。但是如果在短时间 dt 内,有 dN 个核改变,从统计学的观点,改变率 dN/dt 必定与当时存在的总原子核数 N 成正比,即

$$-dN = \lambda N dt \quad (2-5)$$

式(2-5)中, dN 代表 N 的减少量,是负值,所以需加负号,使该式等号前后都是正值。 λ 称为衰变常数(decay constant),其值反映放射性核素随时间衰变的快慢。对式(2-5)进行积分,便可得到 t 时刻原子核数 N 与 $t=0$ 时原子核 N_0 之间的关系:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2-6)$$

式(2-6)说明放射性核素衰变服从指数规律。



(一) 衰变常数

由式(2-5)可知衰变常数

$$\lambda = -\frac{dN/N}{dt}$$

λ 值反映一个放射性核素在单位时间内衰变的规律,因而它是描写放射物放射衰变快慢的一个物理量,单位 s^{-1} 。

值得注意的是,一种核素能够进行几种类型的衰变,或子核可能处于几种不同的状态。对应于每种衰变类型和子核状态,有各自的衰变常数 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$,式中的 λ 应是各衰变常数之和,即

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n$$

(二) 半衰期 T

如果经过一段时间 T ,放射性核素的数目减少到原数的一半,则称 T 为半衰期(half life),它也是用来表示放射性核数衰变快慢的物理量,是不同放射物的又一标志。在式(2-6)中,当 $t = T, N = N_0/2$ 代入后,得 T 和 λ 的关系为

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (2-7)$$

式(2-7)给出了半衰期 T 同衰变常数 λ 的关系。 λ 大的, T 短。单位用秒(s),对半衰期长的核素用分(min)、小时(h)、天(d)和年(a)。

经过一个 T 后,其放射性核素衰减到原来的 $1/2$,两个 T 后衰减到原来的 $1/4$,依此类推,经过 n 个 T 后,将衰减到原来的 $(1/2)^n$ 。将式(2-7)代入式(2-6)得到

$$N = N_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{t/T} \quad (2-8)$$

当放射性核素引入动物体内时,其原子核的数量除按前述的规律衰变而减少外,还应考虑通过生物代谢而排出体外的部分,使体内的放射性数量减少比单纯的衰变要快。若用上述的 λ 代表物理衰变常数, λ_b 代表单位时间内从体内排出的原子核数与当时存在的原子核数之比,即放射性核素的排出率,称为生物衰变常数,于是 $\lambda_e = \lambda + \lambda_b$,称为有效衰变常数。3种衰变常数的半衰期分别为有效半衰期 T_e 、物理半衰期 T 和生物半衰期 T_b ,三者的关系为:

$$\frac{1}{T_e} = \frac{1}{T} + \frac{1}{T_b}$$

可得到:

$$T_e = \frac{TT_b}{T + T_b} \quad (2-9)$$

显然, T_e 比 T 和 T_b 都短。

(三) 平均寿命 τ

在一种放射物中,有些原子核早变,有些晚变,这就是说有的寿命短,有的寿命长。平均寿命(mean lifetime) τ 也是反映放射性核素衰变快慢的物理量,不过它具体反映的是某种放射性核素的平均生存时间。假设 $t=0$ 时有 N_0 个母核, $t=t$ 时还有 N 个母核。这 $N_0 - N$ 个已衰变掉的母核中每个核的寿命不一定是 t 。又经过 dt 时间后还有 $N - (-dN)$ 个母核。在 dt 时间内衰变掉的母核数为 $-dN$,可以认为这 $-dN$ 个母核中每个核的寿命都是 t 。因此,这 $-dN$ 个母核的总寿命为 $t(-dN)$

所以 N_0 个母核的总寿命为 $\int_0^{N_0} t(-dN)$

$$N_0 \text{ 个母核的平均寿命为 } \tau = \frac{\int_0^{N_0} t(-dN)}{N_0} = \frac{1}{N_0} \int_0^\infty t \lambda N dt = \lambda \int_0^\infty t e^{-\lambda t} dt$$



$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{T}{0.693} \quad (2-10)$$

值得注意的是,上述的衰变规律是一个统计规律,当放射性样品实际衰变的原子核个数足够多时,其结果就会愈接近趋于准确。

(四) 放射性活度

常用单位时间内衰变的原子核数来表示放射性强度,或叫放射性活度(radioactivity),用 A 表示

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t} \quad (2-11)$$

式(2-11)中, $A_0 = \lambda N_0$ 为 $t=0$ 时刻的放射性活度。可见,若某时刻母核数为 N ,则该时刻的放射性活度为 $A = \lambda N$ 。放射性活度的国际单位是贝可勒尔,简称贝可,符号 Bq。1Bq=1 衰变·秒⁻¹,在此之前,放射性活度单位用居里(Ci)表示。

$$1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{Bq}$$

在放射治疗中常用放射性比活度,是指单位质量放射源的放射性活度,其单位是贝可·克⁻¹(Bq·g⁻¹),它是衡量放射性物质纯度的指标。任何放射性物质不可能全部由该种物质组成,而是由相同物质的稳定同位素所稀释,还可能含有与放射性元素相化合的其他元素的一些稳定同位素和有衰变的子核。含其他核素少的,放射性比活度就高,反之则低。

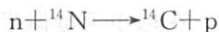


知识拓展

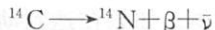
放射性鉴年法

放射性的一个重要应用是鉴定古物年龄,这种方法称为放射性鉴年法。例如,测定岩石中铀和铅的含量可以确定该岩石的地质年龄。下面介绍一种对于生物遗物的¹⁴C放射性鉴年法。

¹⁴C放射性鉴年法是利用¹⁴C的天然放射性来鉴定有生命物体的遗物(如骨骼、皮革、木头、纸等)的年龄的方法。它是20世纪50年代里贝(W. F. Libby)发明的,并因此获得1960年诺贝尔化学奖。各种生物都要吸收空气中的CO₂用来合成有机分子。这些天然碳中绝大部分是¹²C,只有很小一部分是¹⁴C。这些¹⁴C是来自太空深处的宇宙射线中的中子和地球大气中的¹⁴N核发生下述核反应产生的:



这¹⁴C核接着以(5730±30)a的半衰期进行下述衰变:



由于产生的速率不变,同时又进行衰变,经过上万年空气后的¹⁴C已达到了恒定的自然丰度,约1.3~10⁻¹⁰%。植物活着的时候,它不断地吸收空气中的CO₂来制造新的组织代替旧的组织。动物一般要吃植物,所以它们也要不断地吸收碳进行新陈代谢。生物组织不能区别¹²C和¹⁴C,所以它们身体组织中¹⁴C的丰度和大气中的一样。但是一旦它们死亡,就不再吸收CO₂了。在它们的遗体中,¹²C的含量不会改变,但¹⁴C由于衰变而不断减少,于是由此衰变产生的活度也将不断减小,测量一定量遗体的活度就能判定该遗体的存在时间,或者说年龄。

二、衰变平衡

有些放射性核素并不是发生一次衰变就稳定下来的,由于它们的子体仍然有放射性,于是接二连三地衰变,新生子体一代一代地产生出来,直到稳定下来为止,这种衰变现象叫做递次衰变。例如镭衰变为氡,氡衰变为钋,钋还要衰变下去。由某一个最初的放射性核素递次衰变而产生一系列放射性核素,就构成了一个所谓放射族或放射系,简称放射系。天然存在的放射族



有铀族、钍族和锕族,它们都是从一个长寿命的核素开始。这个起始的核素称为母体,这些母体的半衰期都很长,有些可和地质年代相比拟。如

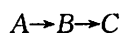
铀族:母体是 ^{238}U ,半衰期 $T=4.51\times 10^9\text{a}$,经过 8 次 α 衰变和 6 次 β^- 衰变,最后生成稳定的 ^{206}Pb (铅)。系中各放射性核素的质量数 A 都是 4 的整数倍加 2,所以也叫 $(4n+2)$ 系。

钍族:母体是 ^{232}Th ,半衰期 $T=1.4\times 10^{10}\text{a}$,经 6 次 α 衰变和 4 次 β^- 衰变,最后达到稳定的 ^{208}Pb 。系中各放射性核素的质量数 A 都是 4 的整数倍,所以也叫做 $4n$ 系。

锕族:母体是铀的同位素 ^{235}U ,半衰期 $T=7.04\times 10^8\text{a}$,又叫锕铀(AcU),经 7 次 α 衰变和 4 次 β^- 衰变,最终生成铅同位素 ^{207}Pb 。系中各放射性核素的质量数 A 都是 4 的整数倍加 3,所以也叫做 $(4n+3)$ 系。

递次衰变现象使我们注意到,使用放射性核素时会遇到几代共存的放射源,了解放射源中各代子体衰变的特点是很有价值的。

我们来考究母体 A 衰变为子体 B ,再衰变为子体 C 的情况:



对于母体 A ,其数量变化只决定于 $A\rightarrow B$,不管 B 的变化如何都不会影响 A 的数量变化规律,其数的变化只决定于它本身的衰变常数而与它的后代无关。对于子体 B 情况就要复杂得多,这是因为,一方面 B 的原子核不断衰变为 C 的原子核,另一方面 B 的原子核又从 A 核的衰变中得到补充。这样一来,子体 B 在数量上的变化不仅和它自己的衰变常数有关,而且也 and 母体的衰变常数有关。其具体情况我们可以分如下 3 种类型来讨论。

(一) 母体半衰期远大于子体半衰期的情况

我们先假设开始时没有子体存在,由于母体 A 的衰变,子体 B 的核数将逐渐增加。另一方面,这些新生成的子体将按照自己的规律进行衰变,由于每秒衰变数是与现有核数成正比的,所以随着子体的积累,子体每秒衰变的核数也将增加。经过一段时间后,子体每秒衰变的核数将等于它从母体衰变而得到补充的核数,子体的核数就不再增加,达到了动态平衡。达到动态平衡所需时间大约是子体半衰期的几倍,通常认为 5 倍就接近平衡了。我们假设开始时没有子体存在,这实际上是不必要的,因为即使开始时有子体存在,经过几个半衰期以后,这些原先的子体,不管有多少,都可以认为基本改变了。因此开始时子体的存在只是影响达到动态平衡的快慢,而不会影响最终的平衡状态。由于放射性强度是以每秒衰变的核数来衡量的,所以在动态平衡时,母体与子体的放射性强度相等。在远小于母体半衰期的时间内,母体核数的衰减是可以忽略的,因而它的放射性强度可以认为保持不变,所以子体的放射性强度在达到平衡后也是保持不变的,这种动态平衡称为长期平衡。如果在达到动态平衡后把子体分离出来,那么经过子体半衰期几倍时间后,又将重新达到动态平衡。

(二) 母体的半衰期只比子体的半衰期大几倍

这是在实际应用中经常遇到的情况。我们知道,子体和母体达到动态平衡需要子体半衰期几倍的时间。在这段时间内,母体的核数和它的放射性强度显著地减少了,因此子体每秒衰变的核数将略多于每秒从母体衰变而补充的核数。在这种情况下,子体与母体之间并不能达到稳定的动态平衡,随着母体的核数和放射性强度不断减少,子体由于衰减稍多于补充,它的核数和放射性强度也随着母体的衰减而不断地减少。这种近似的动态平衡称为暂时平衡。由于放射性强度是以每秒衰变数来衡量的值,在暂时平衡的条件下,子体的放射性强度将随时保持稍大于母体的放射性强度,并且随着母体的衰减而衰减,它们之间的比值是稳定的,与两个半衰期的差值有关。如果在达到暂时平衡后把子体分离出来,在经过子体半衰期几倍时间后,又能达到新的暂时平衡。但是如果母体的半衰期与子体的半衰期很接近,这种暂时平衡是达不到的,因为母体在这以前就几乎衰减完了,子体也随之很快几乎全部衰变而消失。



(三) 母体半衰期小于子体半衰期

这也是实际应用中常常遇到的状况。在经过母体的几个半衰期后,母体就几乎全部衰变为子体。子体的核素最初由于从母体的衰变得补充而很快增加,当补充来源几乎完全断绝以后,子体就将按照自己的规律而缓慢衰变。

放射性平衡在放射性核素的应用中具有一定的意义。半衰期短的核素在医学应用中有很多优越性。因为寿命较短,无法单独存在较长时间,在供应上有很大困难。但有些短寿命核素是由长寿命核素衰变产生的,由递次衰变现象可知,当母体、子体达到放射平衡后,子体会与母体共存并保持一定的含量比例。如果通过化学方法把子体从母体中分离出去,则经过一定时间后,母体与子体又会达到新的放射平衡。于是可再把子体分离出去,这样我们可以不断地从母体内取得短寿命的核素以供使用。这种由长寿命核素不断获得短寿命核素的分离装置叫核素发生器,俗称“母牛”(cow),常用的“母牛”有 ^{99}Mo (钼) $\rightarrow^{99\text{m}}\text{Tc}$ (锝), ^{68}Ge (锗) $\rightarrow^{68}\text{Ga}$ (镓), $^{226}\text{Ra}\rightarrow^{222}\text{Rn}$ 等。

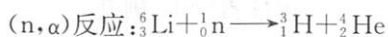
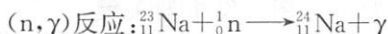
由于母体的寿命较长,因而一条“母牛”可以在较长时间内供应短寿命核素,很适合远离放射性核素生产中心或交通不便的地方开展短寿命核素的应用工作。如在 $^{113}_{50}\text{Sn}$ (锡) $\rightarrow^{113}_{49}\text{In}$ (铟)母牛中, $^{113}_{50}\text{Sn}$ 半衰期为118天,因而可连续使用2~3个月。

第三节 医用放射性核素的生产与制备

一、放射治疗常用放射性核素及其生产

1. 核反应堆中子照射生产 核反应堆(nuclear reactor)是使核燃料 ^{235}U 或 ^{239}Pu 等发生原子核裂变以取得核能的装置,反应堆中核燃料受中子照射后产生链式裂变反应,并释放出大量的核能及中子。

用核反应堆的中子轰击稳定性核素是获取人工放射性核素的主要方法,其主要反应是(n, γ)反应,发生这类反应的中子能量较低,靶原子核俘获中子并伴发 γ 光子;还有少量(n,p)和(n, α)反应等,产生这类反应的中子能量较高,释放出带电粒子。



反应堆生产的放射性核素是富中子核素,主要发生 β^- 衰变,放出 γ 射线。表2-1列出反应堆生产的医学上常用的放射性核素。

表 2-1 反应堆生产的医用放射性核素

放射性核素	半衰期	核反应
^{51}Cr	27.7d	$^{50}\text{Cr}(n, \gamma)^{51}\text{Cr}$
^{99}Mo	66.02h	$^{98}\text{Mo}(n, \gamma)^{99}\text{Mo}$
^{125}I	60.2d	$^{124}\text{Xe}(n, \gamma)^{125}\text{Xe} \rightarrow ^{125}\text{I}$
^{131}I	8.04d	$^{130}\text{Te}(n, \gamma)^{131\text{m}}\text{Te} \rightarrow ^{131}\text{Te} \rightarrow ^{131}\text{I}$
^{133}Xe	5.25d	$^{132}\text{Xe}(n, \gamma)^{133}\text{Xe}$
^{153}Sm	46.8h	$^{152}\text{Sm}(n, \gamma)^{153}\text{Sm}$
^3H	12.33a	$^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$
^{14}C	5730a	$^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$
^{32}P	14.3d	$^{32}\text{S}(n, p)^{32}\text{P}$



2. 从裂变产物中分离和提取 核反应堆中的核燃料 ^{235}U 或 ^{239}Pu 裂变后产生许多裂变产物,可以从中提取出许多有价值的放射性核素。由裂变产物中提取的放射性核素有 ^{90}Sr 、 ^{99}Mo 、 ^{131}I 、 ^{133}Xe 等。但是从裂变产物中分离和提取高比活度的放射性核素有一定难度,因为裂变产物中常含有同一元素的多种同位素,它们的化学性质基本一致,难以分离纯化。

二、核医学常用放射性核素及其生产

1. 放射性核素发生器 放射性核素发生器(radionuclide generator)是一种从长半衰期母体核素中分离出短半衰期子体核素的分离装置。由反应堆或加速器产生母体核素后,将母体核素注入一个装有吸附剂的层析柱内,母体被牢固地吸附在吸附剂上。母体核素不断衰变成子体核素,因其化学性质与母体不同,子体核素即从吸附剂上解吸附下来。选用适当的洗脱液淋洗层析柱,可将子核洗脱下来备用。表 2-2 列出了目前临床上一些常用的放射性核素发生器。

表 2-2 常用的放射性核素发生器

母体核素	母体核素半衰期	子体核素	子体核素半衰期	子体核素主要光子能量(keV)
^{99}Mo	66.02h	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	6.02h	140
^{113}Sn	115d	$^{113\text{m}}\text{In}$	99.5min	392
^{68}Ge	271d	^{68}Ga	68min	511
^{62}Zn	9.3h	^{62}Cu	9.7min	511
^{81}Rb	4.6h	$^{81\text{m}}\text{Kr}$	13s	190
^{82}Sr	25.5d	^{82}Rb	75s	511
^{87}Y	80h	$^{87\text{m}}\text{Sr}$	2.8h	388
^{132}Tc	78h	^{132}I	2.28h	668
^{188}W	69.4d	^{188}Re	16.9h	155

图 2-3 为 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器示意图。发生器关键部分是中间的层析柱,柱中装有 Al_2O_3 吸附剂, Al_2O_3 对母体核素 ^{99}Mo 有很强的亲和力,子体核素 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 则几乎不被吸附。淋洗液用生理盐水,则仅有 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 被洗出, ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器每隔 23 小时可淋洗一次。然后将新鲜淋洗的 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 加到不同的试剂盒中,经摇动、加热便可制得不同的放射性药物。

2. 回旋加速器生产 回旋加速器(cyclotron)通常是指将带电粒子加速后轰击靶原子核制造放射性核素的装置,用它加速带电粒子,如质子、氘核、氚核、 α 粒子,使其具有足够的能量去引起核反应。

回旋加速器主要生产短寿命和超短寿命的贫中子放射性核素,多以电子俘获(EC)和 β^+ 的形式衰变。临床上用于心肌显像的 ^{201}Tl 和肿瘤显像的 ^{67}Ga 就是回旋加速器产生的放射性核素。用于 PET 诊断的生理性放射性同位素,如 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{18}F 等正电子核素也只能用回旋加速器产生。表 2-3 列出了回旋加速器生产的医用放射性核素。

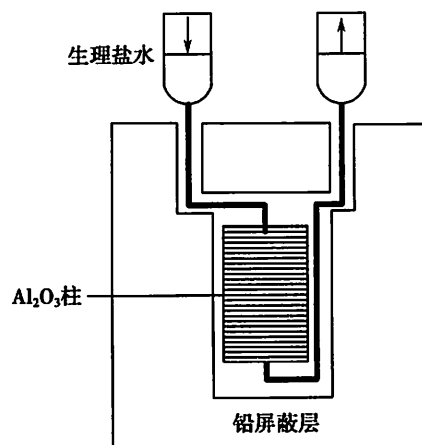


图 2-3 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器示意图



表 2-3 回旋加速器生产的医用放射性核素

放射性核素	半衰期	核反应
^{11}C	20.4min	$^{10}\text{B}(\text{d},\text{n})^{11}\text{C}$, $^{11}\text{B}(\text{d},2\text{n})^{11}\text{C}$, $^{14}\text{N}(\text{p},\alpha)^{11}\text{C}$
^{13}N	9.96min	$^{12}\text{C}(\text{d},\text{n})^{13}\text{N}$, $^{10}\text{B}(\alpha,\text{n})^{13}\text{N}$
^{15}O	2.03min	$^{14}\text{N}(\text{d},\text{n})^{15}\text{O}$
^{18}F	109.8min	$^{18}\text{O}(\text{p},\text{n})^{18}\text{F}$, $^{16}\text{O}(\text{p},\alpha)^{18}\text{F}$
^{67}Ga	78.3h	$^{66}\text{Zn}(\text{d},\text{n})^{67}\text{Ga}$, $^{67}\text{Zn}(\text{p},\text{n})^{67}\text{Ga}$, $^{68}\text{Zn}(\text{p},2\text{n})^{67}\text{Ga}$
^{111}In	2.83d	$^{109}\text{Ag}(\alpha,2\text{n})^{111}\text{In}$, $^{111}\text{Cd}(\text{p},\text{n})^{111}\text{In}$
^{123}I	13.0h	$^{124}\text{Te}(\text{p},2\text{n})^{123}\text{I}$, $^{121}\text{Sb}(\alpha,2\text{n})^{123}\text{I}$
^{201}Tl	74h	$\text{Hg}(\text{d},\text{xn})^{201}\text{Pb} \rightarrow ^{201}\text{Tl}$, $^{203}\text{Tl}(\text{p},3\text{n})^{201}\text{Pb} \rightarrow ^{201}\text{Tl}$

第四节 放射性核素的临床应用

一、放射性核素在肿瘤放射治疗中的应用

随着核医学的发展,人们不断开展放射性核素治疗工作,特别是肿瘤的导向治疗,如放射免疫治疗,使核医学治疗也进入了分子水平。临床上常用的放射性治疗如下。

1. ^{131}I 治疗 ^{131}I 其物理半衰期为 8.04 天,放射多种能量的 β^- 粒子和 γ 光子,其中两种主要的、最大的 β 射线能量为 606keV(89%)和 334keV(7%)。主要的 γ 射线能量是 365keV(82%),还有 637keV(6.8%)和 284keV(5.4%)等。

通过 β 射线的电离辐射作用,可对甲状腺疾病进行放射性治疗,如甲状腺功能亢进症、分化型甲状腺癌及其转移灶、功能自主性甲状腺腺瘤等。

利用 γ 射线可进行甲状腺显像和功能检查,如 ^{131}I 甲状腺静态、动态显像,异位甲状腺的诊断,寻找分化型甲状腺癌的转移灶,甲状腺摄 ^{131}I 率试验和甲状腺激素抑制试验等。

2. ^{32}P 治疗 ^{32}P 半衰期为 14.28 天,只发射 β^- 粒子而不发射 γ 光子,是释放纯 β 射线的放射性核素,最大能量 1.71MeV,在机体组织内平均射程为 3.2mm,用于恶性肿瘤骨转移,腔内注射、皮肤病、血管瘤和恶性肿瘤的治疗,还用于真性红细胞增多症和原发性血小板增多症治疗等。

3. ^{198}Au 治疗 ^{198}Au 其半衰期为 2.69 天, β 射线的能量为 0.96MeV, γ 射线为 412MeV,组织间最大射程 3.9mm,常用于腔内血管瘤、恶性肿瘤等治疗。

4. ^{60}Co 治疗 利用 ^{60}Co 所放出的 γ 射线,从人体外照射患病部位。 ^{60}Co 发出能量分别为 1.17MeV 和 1.33MeV 的两种 γ 射线,主要用于治疗深部肿瘤,如颅脑内的肿瘤。癌细胞较正常细胞生长迅速,对射线的敏感性高,因此经射线照射,癌细胞受到的损害比正常细胞大,利用这种敏感性的差别,可杀死癌细胞或抑制其发展。



知识拓展

γ 刀

γ 刀是一种立体定向放射技术,根据半圆弧等中心聚焦原理,将高能量的 γ 射线聚焦于某一部局组织靶区,使之发生放射性坏死。其特点是受照病灶的损毁边界清晰,如刀割样,故称 γ 刀。目前主要用来治疗颅内肿瘤和脑血管疾病。 γ 刀治疗系统主要由辐射装置、头架准直器、病



人治疗床、控制台、治疗计划系统等组成。其中辐射装置是核心部件,由 201 个⁶⁰Co 放射源组成,用来发射 γ 射线。

治疗时将患者头部移入头盔内,借助于磁共振成像(MRI)或 X 射线 CT 扫描确定病变组织的位置和大小,应用立体定向装置使病灶精确地位于准直线束的聚焦中心。 γ 刀无手术创伤,不经开颅便可切除颅内肿瘤,手术精度高,定位误差小,对周围组织不会造成损伤。

5. 放射免疫治疗 放射免疫治疗(radio-immunotherapy, RIT)是将对肿瘤具有特异亲和力的抗体用放射性核素标记后,经一定途径引入体内,以肿瘤细胞为靶细胞,与相关肿瘤细胞表面抗原特异结合,使大量的放射性核素滞留在肿瘤细胞,对其进行集中照射,抑制或杀伤肿瘤细胞,而周围组织损伤较轻。从理论上讲,RIT 具有靶向性高、靶/本(target/background, T/B)比值较高和血本底低等优势,是一种革新的、有前途的临床治疗方法。

二、放射性核素在核医学检查中的应用

(一) 示踪诊断

任何一种元素的各种同位素都有相同的化学性质,它们在机体内的分布、转移和代谢都是一样的。如果要了解一种元素在机体内的分布情况,可在机体中掺入少量该元素的放射性核素,这些放射性核素在体内参与各种过程的变化,借助它们放出的射线,在体外探查该元素的行踪,这种方法称为示踪原子法。引入的放射性核素称为示踪原子(也称为标记原子)。将带有放射性核素的药物引入体内,然后探测其分布和流量,可以作为诊断疾病的重要依据。探测和跟踪示踪原子共有以下 3 种方法。

1. 直接探测 它是用探测仪在体外直接探测示踪原子由体内发射的射线。例如用¹³¹I 标记的马尿酸作为示踪剂,将其静脉注射后,通过肾图仪描记出肾区放射性活度随时间变化的情况,可以反映肾动脉血流、肾小管分泌和尿路的排泄情况,从而提供肾功能和尿路有无梗阻的诊断。

2. 外标本测量 它是将放射性药物引入体内,然后取其血、尿、粪或活体组织等样品,测量其放射性活度。如口服维生素 B₁₂ 示踪剂后,通过测定尿液排出的放射性活度,可以间接测得胃肠道吸收维生素 B₁₂ 的情况。

3. 放射自显影 放射性核素发出的射线能使胶片感光,可利用胶片来探测和记录放射性。它是追踪标记药物或代谢物在体内去向的一种有效方法。如把细胞培养在含有放射性脱氧核糖核酸(DNA)的水中,就可以把细胞内的染色体标记上放射性核素,通过放射自显影,可观察到染色体分裂过程中 DNA 的变化细节。

(二) 核素成像

它是一种利用放射性核素示踪方法显示人体内部结构、功能的医学影像技术。它的基本原理是:用不同的放射性核素制成标记化合物注入人体,在体外对体内核素发射的 γ 射线进行跟踪探测,可以获得反映放射性核素在脏器或组织中的浓度分布及其随时间变化的图像。目前在临床上广泛应用的放射性核素成像有 3 种: γ 照相机、单光子发射型计算机断层成像和正电子发射型计算机断层成像。

1. γ 照相机 可将体内放射性核素分布一次性成像,其特点是成像速度快,可提供静态和动态图像,把形态和功能结合起来进行观察和诊断。使用时只要将 γ 照相机的探头放置在待测部位体表上一段时间,采集这段时间内从体内放射出的 γ 射线,即可得到 γ 射线在该方向的全部投影,在屏幕上得到放射性核素分布的图像。

一台 γ 照相机一般由探头、位置通道、能量通道及显示系统组成。 γ 照相机常用的放射性核素有^{99m}Tc, ²⁰¹Tl, ¹³¹I 和⁶⁷Ga 等。

2. 单光子发射型计算机断层成像(single photon emission computed tomography, SPECT)



它的图像重建原理与 X-CT 有某些相似之处,所不同的是:X-CT 的 X 射线源位于体外,X 射线透过组织时,根据不同组织对 X 射线的衰减值的不同,重建某断层的 CT 数矩阵,并用灰度来显示断层图像;而 SPECT 是先将示踪核素(如 ^{99m}Tc , ^{131}I , ^{201}Tl 等)注入体内,本身成为一个发射体,再由探测器将示踪核素在机体内的吸收代谢,在器官或组织的分布测出,经计算机处理并重建图像。

3. 正电子发射型计算机断层成像(positron emission tomography, PET) 它的基本原理是利用正电子的湮没辐射特性,将能发生 β^+ 衰变的核素或其标记化合物引入体内某些特定的脏器或病变部位,通过探测正电子湮没时向体外辐射的 γ 光子,获得成像所需的各向投影数据,再由计算机分析处理,实现图像重建。发射正电子的示踪核素有 ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O , ^{18}F 等,这些放射性核素半衰期短(^{11}C 为 20 分钟, ^{13}N 为 10 分钟, ^{15}O 为 2 分钟, ^{18}F 为 110 分钟),衰变快对受检者的辐射剂量很小,在短时间内可重复使用,也可大剂量使用以获取清晰影像,其中 C, H, O 是人体组成的基本元素,易于标记各种生命活动所必需的化合物或代谢产物,而不改变他们的生物活性。

目前,随着融合技术的开发及临床应用, PET/CT、SPECT/CT 等融合显像设备大量应用于临床,将解剖、功能、灌注、代谢的图像融合成为核医学的一个重要内容。



本章小结

放射性核素的衰变类型,包括 α 衰变、 β^- 衰变、 β^+ 衰变、电子俘获、 γ 衰变;放射性核素的衰变规律: $N=N_0e^{-\lambda t}$,即按指数规律衰变,半衰期 $T=\frac{\ln 2}{\lambda}$,平均寿命 $\tau=1.44T$,放射性活度 $A=A_0e^{-\lambda t}$;放射性核素的 3 种制备方法:反应堆中子照射生产、放射性核素发生器生产、回旋加速器生产;放射性核素在肿瘤放射治疗中的应用主要有 ^{131}I 治疗、 ^{32}P 治疗、 ^{198}Au 治疗、 ^{60}Co 治疗及放射免疫治疗;放射性核素在核医学检查中的应用主要在示踪诊断及核素成像两方面。

思考题

- ^{238}U 发出一个 α 粒子衰变为 ^{234}Th 。其后接着发生一连串的 α 衰变或 β 衰变。最后达到一个稳定的核素后再不可能进一步发生衰变。在 ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb 和 ^{209}Pb 这些稳定核素中,哪一个是 ^{238}U 放射性衰变链的最后产物?
- 在 α , β^- , β^+ , 电子俘获衰变中,所产生的子核的原子序数和质量数是怎样变化的? 在元素周期表中的位置有何变化?
- ^{32}P 的半衰期为 14.3 天,求它的衰变常数和平均寿命?
- 向一人静脉注射含有放射性 ^{24}Na 而活度为 300kBq 的生理盐水。10 小时后其血液活度为 30Bq/cm³。求此人全身血液的总体积。已知 ^{24}Na 的半衰期为 14.97 小时。
- 分别计算要经过多少个半衰期某种放射性核素可以减少到原来的 1%, 0.1%?

(刘东华)



第三章 X射线的产生



学习目标

1. 掌握:X射线的发现、本质与特性;X射线的产生条件与装置;X射线的量与质、X射线的产生效率。
2. 熟悉:电子与物质的相互作用以及两种X射线的产生原理;X射线强度的空间分布。
3. 了解:X射线的发现及用途。

第一节 X射线的发现及用途

一、X射线的发现过程

X射线即伦琴射线,是德国物理学家伦琴(Wilhelm Conrad Rontgen)于1895年发现的。它与放射线和电子的发现并称为“19世纪末20世纪初物理学的三大发现”,是现代物理学兴起的标志。X射线的发现让人类社会,特别是生命科学的研究翻开了崭新的一页。美国时代杂志曾介绍了2000多年来对世界医学作出重大贡献的17位关键人物,其中一位就是伦琴。

1895年11月8日,50岁的伦琴在威尔茨堡大学的实验室(The Physical Institute of the University of Wurzburg)用克鲁克斯管做实验时,偶然发现工作台上的纸屏可以发出荧光,他分别用纸和书本遮住纸屏,纸屏仍能发光。使伦琴更为惊讶的是,当他把手放在纸屏前时,纸屏上留下了手骨的阴影。经过反复的实验,伦琴认为从克鲁克斯管中放出的是一种穿透力极强的射线。他一连多天将自己关在实验室里,集中全部精力进行彻底研究。6周后,伦琴确认这的确是一种新的射线。当时因不详其性质,他将这种射线称之为“X”射线。同年12月22日,伦琴好奇地用这种射线给自己的妻子Ludwig拍摄了一张手部照片,照片清晰地显示出她的左手掌骨骼和无名指上戒指的轮廓,这也是人类历史上第一张人体X射线骨骼照片。12月28日,伦琴向威尔茨堡市物理医学会递交了他的论文《关于一种新射线的初步报告》。1896年1月4日,伦琴的论文和这张X射线照片在柏林大学物理系的“柏林物理学会50周年纪念会”上第一次展出。1月5日,奥地利《维也纳日报》在头版以《耸人听闻的发现》为标题的独家新闻,第一次报道了X射线的发现,引起全球轰动。伦琴也因发现X射线及对其性质的深入研究,荣获了第一届(1901年)诺贝尔物理学奖。1905年,第一届国际放射学会召开,大会正式把X射线命名为伦琴射线,以纪念他为人类进步作出的杰出贡献。但伦琴仍把这种射线称为X射线并延续至今。

在伦琴发现X射线的启示下,人们开始从天然元素中寻找具有放射性的物质。1896年,亨利·贝克勒在发光材料的试验中偶然发现钍盐的放射性,接着居里夫妇又发现了具有放射性的元素钋(Po)和镭(Ra)。1903年,贝克勒和居里夫妇被共同授予诺贝尔物理学奖。

