

# 核技术与材料科学

田军 王齐祖 薛群基 编著

兰州大学出版社

7

# 核技术与材料科学

田军 王齐祖 薛群基 编著

兰州大学出版社

## 内 容 提 要

本书是为适应现代科学技术急速发展的需要而编写的。全书共六章,内容首先涉及到核物理基础知识,在此基础上,对辐射加工、离子注入及离子束分析、活化分析、超精细相互作用核分析等现代核技术的原理、方法及在材料加工与材料科学研究中的应用概括地作了介绍。

本书可供高等理、工科院校材料科学专业的大学生与研究生作教学参考书,也可供从事材料科学、核科学与技术、冶金、化工、航空、航天、机械、医药卫生、水文、地质等各领域的科技人员参考。

责任编辑:王民新

封面设计:王尚杰

### 核技术与材料科学

田 军 王齐祖 薛群基 编著

兰州大学出版社出版发行

兰州市天水路 308 号 电话:8617156 邮政编码:730000

---

兰州大学印刷厂印刷

开本:787×1092 毫米 1/16

印张:10.375

1998 年 4 月第 1 版

1998 年 4 月第 1 次印刷

字数:229 千字

印数:1—1000 册

---

ISBN7-311-01149-3/O·131

定价:12.00 元

# 目 录

第一章 核技术基础知识	(1)
第一节 同位素	(1)
1.1.1 原子和原子核	(1)
1.1.2 核素和同位素	(2)
第二节 原子核的衰变	(5)
1.2.1 放射性的发现	(5)
1.2.2 衰变类型	(5)
1.2.3 放射性衰变的规律	(14)
第三节 射线与物质的相互作用	(17)
1.3.1 荷电粒子与物质的相互作用	(17)
1.3.2 $\gamma$ 射线与物质的相互作用	(23)
1.3.3 中子和物质的相互作用	(25)
第四节 原子核反应	(26)
1.4.1 核反应的机制和条件	(26)
1.4.2 核反应的种类	(26)
参考文献	(29)
第二章 辐射加工	(31)
第一节 $\gamma$ 辐射装置	(31)
2.1.1 辐照室	(31)
2.1.2 迷道	(32)
2.1.3 控制系统	(32)
第二节 电子辐射装置	(33)
2.2.1 倍压加速器原理	(34)
2.2.2 高频高压加速器	(34)
第三节 中子辐射源	(35)
2.3.1 同位素源	(35)
2.3.2 加速器中子源	(37)
2.3.3 反应堆中子源	(38)
第四节 辐射加工	(44)
2.4.1 高分子材料的辐射聚合	(45)
2.4.2 高分子材料的辐射改性	(47)
2.4.3 烟气辐射脱硝、脱硫	(52)
参考文献	(53)

第三章 离子束加工 .....	(54)
第一节 离子注入装置 .....	(55)
3.1.1 离子注入机的类型 .....	(55)
3.1.2 离子注入机的结构 .....	(56)
第二节 离子注入的射程分布 .....	(58)
3.2.1 射程及投影射程 .....	(58)
3.2.2 射程分布的统计理论 .....	(59)
3.2.3 注入离子在非晶靶的浓度分布 .....	(62)
第三节 离子注入的损伤及退火效应 .....	(63)
3.3.1 离子注入产生的缺陷 .....	(63)
3.3.2 热退火效应 .....	(63)
3.3.3 其它退火方式 .....	(67)
3.3.4 辐射增强扩散效应 .....	(69)
3.3.5 反冲注入 .....	(71)
第四节 离子注入技术的应用 .....	(72)
3.4.1 离子注入器件的应用 .....	(72)
3.4.2 离子注入在其它工艺上的应用 .....	(78)
3.4.3 离子注入金属材料表面改性 .....	(80)
3.4.4 离子注入其它材料 .....	(84)
第五节 离子束混合 .....	(85)
3.5.1 离子束混合用于材料改性 .....	(85)
3.5.2 离子束混合微合金 .....	(86)
参考文献 .....	(86)
附录 投影射程表 .....	(91)
第四章 离子束分析技术 .....	(100)
第一节 质子激发 X 射线分析 .....	(100)
4.1.1 特征 X 射线的发射 .....	(100)
4.1.2 实验装置 .....	(100)
4.1.3 薄靶分析 .....	(101)
4.1.4 应用举例 .....	(102)
第二节 光子激发能量色散 X 射线分析 .....	(104)
4.2.1 引言 .....	(104)
4.2.2 基本原理和定量分析方法 .....	(104)
4.2.3 实验设备 .....	(105)
4.2.4 应用举例 .....	(105)
第三节 背散射分析 .....	(106)
4.3.1 基本原理 .....	(106)
4.3.2 基本物理量 .....	(106)

4.3.3	实验仪器和设备	(109)
4.3.4	实验分析技术	(110)
	参考文献	(116)
<b>第五章</b>	<b>活化分析</b>	(118)
第一节	活化分析的分类及特点	(118)
5.1.1	分类	(118)
5.1.2	活化分析的优、缺点	(119)
第二节	活化方程	(122)
第三节	分析技术	(124)
5.3.1	样品的制备	(124)
5.3.2	放射性测量	(124)
5.3.3	非破坏性分析	(124)
5.3.4	破坏性分析	(125)
第四节	活化分析的应用	(125)
	参考文献	(128)
<b>第六章</b>	<b>超精细相互作用核分析技术</b>	(130)
第一节	穆斯堡尔技术	(130)
6.1.1	序言	(130)
6.1.2	基本原理	(130)
6.1.3	核与化学环境间的超精细相互作用	(133)
6.1.4	穆斯堡尔谱仪	(137)
6.1.5	穆斯堡尔谱学在材料科学中的应用	(139)
第二节	核磁共振技术	(142)
6.2.1	核磁共振的基本原理	(142)
6.2.2	核磁共振的主要参数	(143)
6.2.3	核磁共振实验方法	(144)
6.2.4	核磁共振的应用	(146)
第三节	正电子湮没技术	(149)
6.3.1	正电子与正电湮没	(149)
6.3.2	基本实验方法	(150)
6.3.3	正电子湮没技术的应用	(155)
	参考文献	(155)

# 第一章 核技术基础知识

## 第一节 同位素

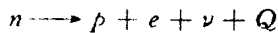
### 1.1.1 原子和原子核

自然界各种物质,尽管形态和性质各不相同,但都是由原子构成的。原子是元素的最小单元。元素周期表给出了各种不同的元素。有 92 种天然元素,除此之外,人们还用现代科学技术人工制造元素,使元素的数目增加到 100 种以上。原子的体积很小,它的直径只有  $10^{-8}$ cm 左右。原子是由带正荷的原子核和带负电荷的电子组成,电子的数目恰好使原子成为中性。原子核位于原子的中心,其半径可由下式近似的给出:

$$r(\text{cm}) = 1.5 \times 10^{-13} \times A^{1/3} \quad (1-1)$$

$A$  为质量数,等于在原子核中的质子数(或正电荷数目)和中子数的总和。原子核的直径还不到原子本身直径的  $1/1000$ ,可见它只占整个原子的极小部分。但是,原子质量的 99.9% 以上集中在原子核上。所以原子核的密度很大,大约是  $10^{14}$ g/cm<sup>3</sup>。

原子核是由质子和中子组成的,质子和中子称为核子。质子就是氢原子核,带有一单位正电荷,与电子的电量相等,电量为  $1.602 \times 10^{-19}$  库仑,质量为  $1.67265 \times 10^{-24}$ g。中子是一种带正负电荷相等的中性粒子,其质量为  $1.67495 \times 10^{-24}$ g,比质子略重。中子在自然界中并不单独存在,只在核反应时被释放出来。当它处于自由状态时是不稳定的,会衰变成一个氢核(即质子)、一个电子和中微子。用式子表示,则为



式中的  $\nu$  代表中微子,它是一个质量十分小的中性粒子(其质量比电子质量的  $5/10000$  还小), $Q$  代表衰变过程中释放出来的能量。在原子核内,核子之间的作用,除了质子—质子之间的静电斥力外,尚存在一种很强的力叫做核力。核力的特点是很强,力程(力作用到能达到的空间距离)短。实验证明,对各核子(质子,中子)言,核力的大小大致相等。

在原子核中,质子和中子是以一定比例相结合的。原子序数即质子数( $Z$ )与中子数( $N$ )的总数称为质量数,常以  $A$  表示,亦即  $A = N + Z$ 。 $A$  的数值总是用与该元素的原子量最接近的整数来表示。

通常用  ${}^A_Z X$  或  ${}^A X$  形式表示某种核素的原子核组成,其中  $X$  表示原子符号, $A$  表示质量数(即为核内核子总数), $Z$  表示原子序数(即为核内质子数)。例如碳—14 核素可用  ${}^{14}_6\text{C}$  或  ${}^{14}\text{C}$  来表示,硫—35 可用  ${}^{35}_{16}\text{S}$  或  ${}^{35}\text{S}$  来表示。原子核有的稳定,有的不稳定。不稳定的原子核能自发地改变核的结构而转变成另一种原子核,这种现象称为核衰变。在核衰变时,由于总是伴随着放射出带电的或非带电的粒子,所以核衰变亦称为放射性衰变。不稳定的核亦称放射性核。例如: ${}^{31}\text{P}$  原子核是稳定的,但  ${}^{32}\text{P}$  原子核是不稳定的,它会自发地放射出

带电粒子( $\beta$  粒子)而转变成另一种新原子核即 $^{32}\text{S}$ 。又如 $^{60}\text{Co}$  原子核亦是不稳定的,它会自发地放出带电粒子( $\beta$  粒子)和不带电的粒子( $\gamma$  射线)而转变成 $^{60}\text{Ni}$ 。 $^{32}\text{P}$  和 $^{60}\text{Co}$  原子核,都称为放射性核。

原子可以描绘成电子围绕着原子核运转着的行星系。例如氟原子的情况,如图 1-1 所示。氟原子核是由 9 个质子和 10 个中子组成,故质量数为 19,核外 9 个电子以椭圆和圆形的轨道绕原子核旋转。这些确定的轨道,组成一系列壳层,这一个个壳层叫能级或量子级。壳层或用字母(K,L,M,N,O,P,Q) 或用量子数(1,2,3,4,5,6,7) 来表示。

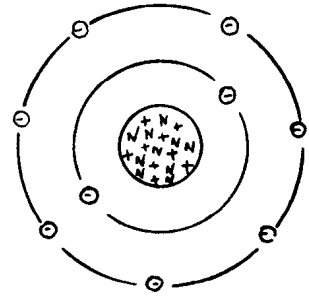


图 1-1 稳定的氟原子( $^{19}\text{F}$ )  
原子核由 9 个质子和 10 个中子组成

在壳层里每个电子的能态用四个独立的量子数( $n, l, m, s$ ) 描述出来。泡里不相容原理告诉我们:在任何一个原子中,不可能有两个状态完全相同的电子。换言之,不可能有四个量子数( $n, l, m, s$ ) 都相同的两个电子。这个原理决定了每个能级中电子数目的最大限值。这个限值由公式  $N_0 = 2n^2$  给出, $n$  是壳层的主量子数,对于原子中的各个壳层, $n$  相应地取整数值 1,2,3,4,5,6,7。

元素的原子质量可以用原子质量单位(amu) 表示。现在,国际上规定以 $^{12}\text{C}$  原子质量的 1/12 作为原子质量单位。用符号  $u$  表示。经科学实验准确测定。

$$1u = 1.660\ 571 \times 10^{-24}\text{g}$$

任何原子的质量若以克为单位,则等于它的原子量除以阿伏加德罗常数  $N_A(6.025 \times 10^{23}$  原子/克原子)。阿伏加德罗常数的倒数等于以克为单位的 1 原子质量单位的质量即  $1\text{amu} = 1.66 \times 10^{-24}\text{g}$ 。一定质量的某元素的原子数由下面公式给出:

$$N = \frac{m}{A} N_A \quad (1-2)$$

$m$  是以克为单位的质量,例如 1 克 $^{32}\text{P}$  的原子数为  $N = \frac{m}{A} N_A = \frac{1}{32}(6.025 \times 10^{23}) = 2.86 \times 10^{21}$  个原子。

克原子量或克分子量是常用的单位。这些量等于以克为单位的原子量或分子量。1 克原子量的 $^{32}\text{P}$  是 32g,1 克分子量的  $\text{H}_2\text{O}$  是 18g。1 克原子量的元素由  $6.025 \times 10^{23}$  个原子组成,1 克分子的物质由  $6.025 \times 10^{23}$  个分子组成。

### 1.1.2 核素和同位素

#### 核素

核素(亦称核种)是具有特定核特征的某种原子的统称。例如  $A$  分别为 1,2,3, $Z$  均为 1 的氢(H)、氘(D)、氚(T); $A$  分别为 31,32, $Z$  均为 15 的 $^{31}\text{P}$ 、 $^{32}\text{P}$ ;  $A$  分别为 235,238, $Z$  均为 92 的 $^{235}\text{U}$ 、 $^{238}\text{U}$  及  $Z$  为 27 的 $^{60}\text{Co}$  等,都分别是一种核素。有的核素稳定,称为稳定核素,例如, $^{12}\text{C}$ 、 $^{13}\text{C}$ 、 $^{31}\text{P}$ 、 $^{32}\text{S}$  等。有的核素不稳定,称为放射性核素,例如 $^{14}\text{C}$ 、 $^{32}\text{P}$ 、 $^{35}\text{S}$ 、 $^{238}\text{U}$  等。

据报导,现在已知的核素约有 2 000 种左右(其中 1 600 种左右属放射性核素,300 种



左右属稳定核素),所有核素中的 1/10 可供作示踪剂应用。核素的基本性质(半衰期,衰变方式,粒子能量等)可由核素表中查出。

### 同位素

上面已叙述过,人类已经知道了 100 多种元素。每一种元素用它的原子序数描述。然而一种元素可以具有不同质量的原子。同位素这个术语表示原子序数相同,但原子质量不同的元素,也就是说:凡是  $Z$  值相同而  $A$  值不同的一组核素(亦就是属同一类元素的一类核素,在元素周期表中占据同一位置),称为该元素的同位素。例如,核素 $^{31}\text{P}$ 和核素 $^{32}\text{P}$ 都是磷的同位素,又如核素 $^{12}\text{C}$ 和核素 $^{13}\text{C}$ 、 $^{14}\text{C}$ 都是碳的同位素。因为原子序数是相同的,所以同位素的原子核里有相同的质子数,而中子数是各异的。一般每种元素都有一种以上的同位素,多的可达几十种。例如碳有 11 种同位素,磷有 12 种同位素,硫有 10 种同位素,汞有 20 种同位素。而在一种元素的所有同位素中,有的是放射性的,有的是稳定的,但亦有的全部是放射性的。例如碳的 11 种同位素中有 6 种是放射性的( $^9\text{C}$ , $^{10}\text{C}$ , $^{11}\text{C}$ , $^{14}\text{C}$ , $^{15}\text{C}$ , $^{16}\text{C}$ )。从钋(Po)元素开始,以后的各元素的所有同位素均为放射性的。

同位素这个术语,过去曾用得不够确切,有时应该用“核素”的场合却往往习惯地用“同位素”。例如我们常可以听到“在研究中使用了同位素 $^{60}\text{Co}$ 或 $^{32}\text{P}$ ”这类话。确切讲应该为:“在研究中使用了核素(或放射性核素) $^{60}\text{Co}$ 或 $^{32}\text{P}$ ”。或者亦可这样讲:“在研究中使用了钴的同位素 $^{60}\text{Co}$ 或磷的同位素 $^{32}\text{P}$ ”。因为同位素是相对某一种元素而言的。 $^{32}\text{P}$ 和 $^{31}\text{P}$ 均为磷的同位素, $^{32}\text{P}$ 和 $^{31}\text{P}$ 互为同位素; $^{59}\text{Co}$ 和 $^{60}\text{Co}$ 均为钴的同位素, $^{59}\text{Co}$ 和 $^{60}\text{Co}$ 互为同位素, $^{32}\text{P}$ 和 $^{60}\text{Co}$ 则互不为同位素,而分别是两种核素。由于长期习惯沿用“同位素”这个术语,因此在应该用“核素”的场合下还经常使用“同位素”这个名词,但在今后的使用中应该将二者区别开来。

通常认为一种元素的同位素在物理、化学和生物学方面的性质是相同的,但具有不同的核物理性质。所以,某种化合物不管其相应同位素的组成如何改变,其化学性质、物理性质和生物学性质等基本不变。同位素示踪技术正是依据这种性质进行的。但是,实际上,一种元素的各个同位素(放射性同位素或稳定性同位素)所组成的同一化合物,它们的性质并不绝对相等。尤其较轻的元素,它们的同位素原子之间原子量差别较大,如 $^2\text{H}$ (D)是 $^1\text{H}$ 的两倍, $^3\text{H}$ (T)是 $^1\text{H}$ 的三倍。所以它们在物理学、化学和生物学的性质上表现的差异也较明显。如氚水( $\text{HTO}$ , $\text{T}_2\text{O}$ )和普通水的物理和物理化学性质之间就有所不同。在化学性质上,氚水( $\text{T}_2\text{O}$ )和其它化合物进行化学反应时,一般比普通水的作用要慢。氚水和 $\text{Al}_2\text{C}_2$ 的反应速度比普通水的慢 20 多倍。又如电解氚水( $\text{T}_2\text{O}$ )时,氢优先从阴极上释放出来,在液相中氚的浓度随电解过程的进行而增加。在物理性质上氚水与普通水的差异如表 1-1 所示。在核性质上更不相同,如 $^1\text{H}$ 容易吸收中子,而 $^2\text{H}$ 则不容易吸收中子,因而 $^2\text{H}$ 所组成的重水是建造反应堆作为减速剂的宝贵原料。这种由于同位素不同而引起性质上的差异的现象,称为同位素效应。在进行示踪实验时,要注意这种同位素效应,尤其在生物示踪实验时更应注意。例如,用氢的同位素 $^2\text{H}$ 做示踪实验时, $^2\text{H}$ 与 $^1\text{H}$ 的比例一般不应超过 1:5。因为重水( $\text{D}_2\text{O}$ )的浓度太高,改变了水的物理常数,因而影响细胞膜的渗透和细胞质粘性。又如, $^{14}\text{C}$ 标记化合物在生物体内的反应速度及其生成物的产率,也往往比相应的非标记化合物为低。

表 1-1 普通水和氘水的物理性质

物质	沸点 C	密度 g/cm <sup>3</sup>	100 C 时蒸气压(mmHg)
H <sub>2</sub> O	100.0	1.000 0	760
HTO	100.8	1.107 5	738.8
T <sub>2</sub> O	101.6	1.215 0	718.2

除了经常碰到上述所讲的核素和同位素术语外,有时也会遇到下面几个术语:

同量异位素:  $Z$ 、 $A$  不同,而  $N$  相同的核素。

同质异能素:  $A$ 、 $Z$  都相同,只是原子核处于不同能级的核素(不同于化学上的同分异构体)。高能态的常常是放射性的,而较低能态的则可能是稳定性的,也可能是放射性的。

等中子过量素:  $A$ 、 $Z$ 、 $N$  都不相同,但  $N - Z$  的差(即过量的中子数)相等。 $A$ 、 $Z$ 、 $N$  三者之间的相互关系,可概括如表 1-2。

表 1-2 核素的类别对  $A$ 、 $N$ 、 $Z$  的关系

名称	$Z$	$A$	$N$	例子
同位素	同	异	异	$^{32}_{15}\text{P}$ , $^{31}_{15}\text{P}$
同量异位素	异	同	异	$^{32}_{15}\text{P}$ , $^{32}_{16}\text{S}$
同中子异位素	异	异	同	$^3_1\text{H}$ , $^3_2\text{He}$
同质异能素	同	同	同	$^{110m}_{47}\text{Ag}$ , $^{110}_{47}\text{Ag}$
等中子过量素	异	异	异	$^{12}_6\text{C}$ , $^{15}_7\text{N}$

\*  $m$  表示处于较高能态的核素与处于较低能态的核素的差别。

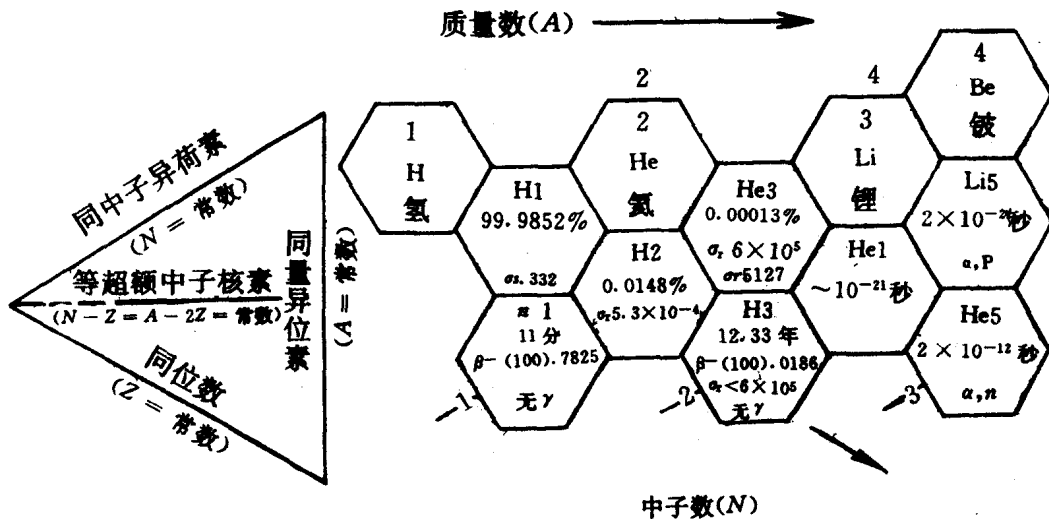


图 1-2 核素图一角

类同于化学元素周期表,将所有已知核素用图表示出来,称为核素图。图 1-2 是我国编制的核素图的起首部分,每一核素由一正六边形表示,内中表明核素符号、质量数、天

然丰度等有关参数。

## 第二节 原子核的衰变

### 1.2.1 放射性的发现

1896年,法国物理学家贝克勒尔(*H. Becquerel*)研究物质的荧光时发现,某些铀盐使被黑纸包裹封存起来的照相底片感光,这种铀盐放在黑暗中储存数月之后,使照相底片感光的能力无明显减弱。贝克勒尔由此得出结论,铀盐能放射出一种人眼看不见的射线,照相底片的感光是由于这种射线能透过黑纸、玻璃、金属箔所致。这种射线不是荧光。他还曾观察到,靠近铀盐的空气是电离的,以致带电的验电器可以放电。另外,他还发现,所有的铀盐都能放出这种射线,金属铀更为明显。

1898年,居里夫人和施密特各自独立观察到,钍的化合物也能放出类似的射线。居里夫人对铀、钍化合物的放射现象进行了研究之后指出,放出射线的多少只与铀钍在化合物中的含量成正比,而与它们所处的化学状态,以及外界温度、压力的变化无关。她由此推断:能发出辐射是某些元素的一种特殊性能,放射现象是一种原子现象,并把这种现象称为放射性。

随后,科学家又对射线的性质进行了研究。在将镭源放入具孔铅室中,从小孔放出来的射线在磁场中分解为三束,如图1-3所示。图中磁场系自纸面向外。显然,向左偏转角度较大的是质量较轻的带负电荷的粒子束,称为 $\beta$ 射线,它们的行为类似于电子。向右偏转角度较小的是带正电荷的粒子束,称为 $\alpha$ 射线。进一步的研究揭示出, $\alpha$ 粒子实际上是氦的原子核( ${}^4_2\text{He}$ ,带两个正电荷,质量数为4)。磁场内不转的应是不带电的粒子,称为 $\gamma$ 射线,它是类似于光的电磁辐射。

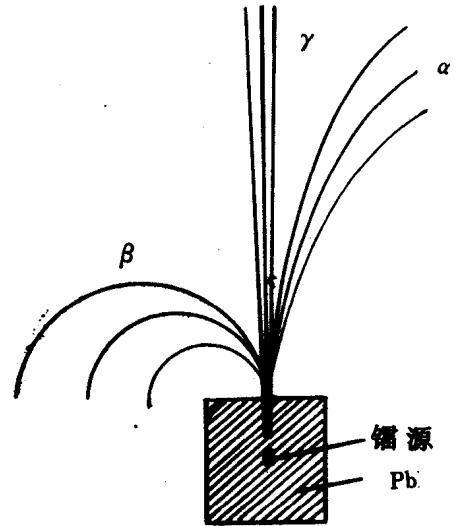


图1-3 镭源放射的三种射线

### 1.2.2 衰变类型

放射性核素的衰变类型是多种多样的,有 $\alpha$ 衰变、 $\beta$ 衰变、电子俘获和 $\gamma$ 衰变等。通常将衰变前的核称为母体核,衰变后产生的核称为子体核。

每种放射性核素的衰变过程和状态,可简明地使用衰变图来表示。图1-4表示放射性核素的一些典型的衰变图。在衰变图上,上面是母体核素符号,下面是衰变产生的子体核素符号(基态)。横线表示起始和终了的核能态。向右单线表示 $\beta$ 衰变;向左单线表示 $\beta^+$ 衰变;双线表示 $\alpha$ 衰变;虚线表示电子俘获;垂直线或波浪形线表示 $\gamma$ 衰变。线旁边的数字相应为每种辐射的能量(MeV)和百分比(几率)。例如,图1-5为 ${}^{40}\text{K}$ 的衰变图,表明 ${}^{40}\text{K}$

有两种衰变方式。第一种方式是有88%的 $^{40}\text{K}$ 放出能量为1.325MeV的 $\beta$ 粒子而衰变成基态的 $^{40}\text{Ca}$ ；第二种方式是有12%的 $^{40}\text{K}$ 发生电子俘获，放出能量为1.459MeV的 $\gamma$ 射线，而衰变成基态 $^{40}\text{Ar}$ 。

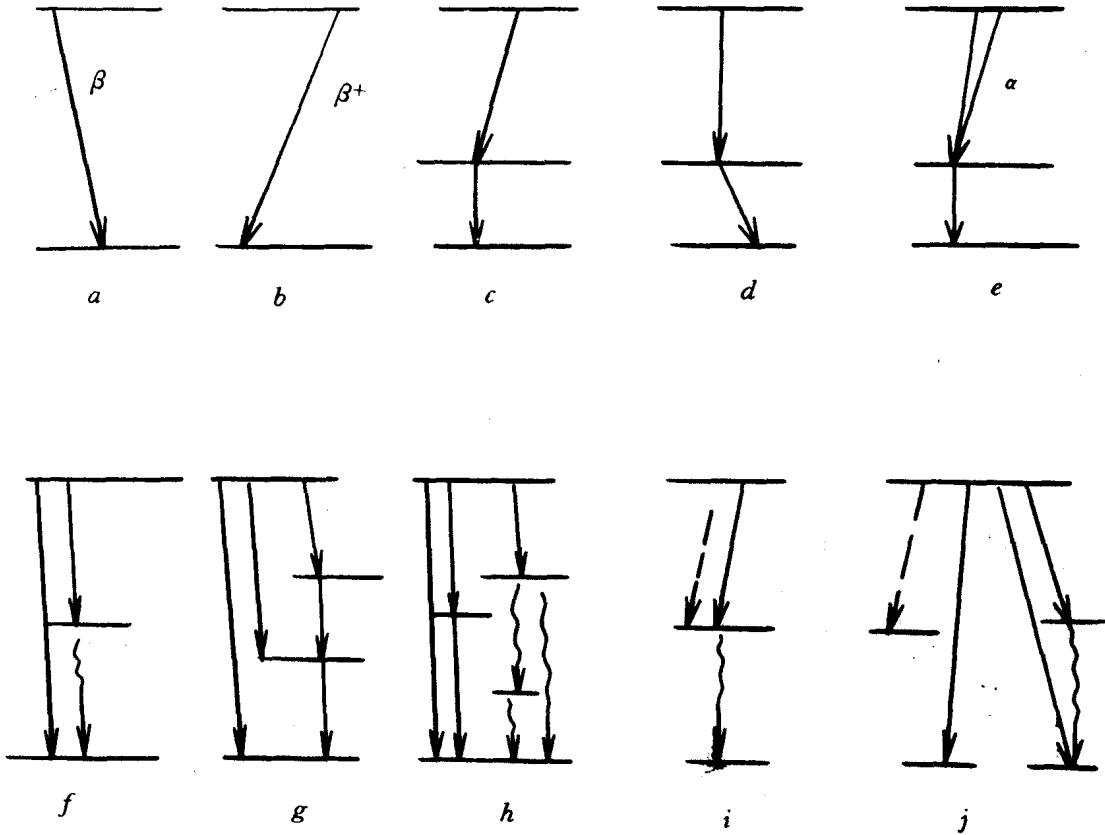


图 1-4 放射性核素衰变图型式

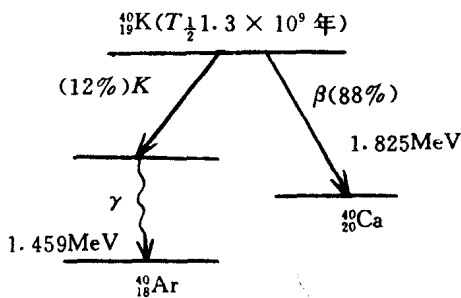


图 1.5  $^{40}\text{K}$  的衰变期

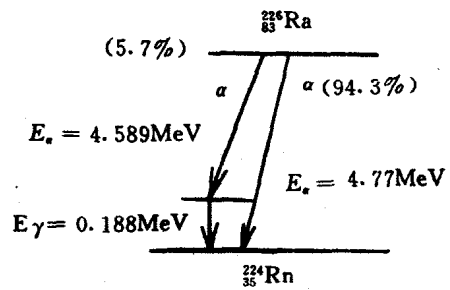


图 1-6  $^{226}\text{Ra}$  的衰变期

下面将各种类型的衰变分别加以讨论。

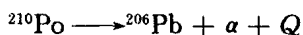
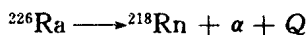
### (一) $\alpha$ 衰变

从放射性核素的核里放射出  $\alpha$  粒子的过程称为  $\alpha$  衰变。 $\alpha$  粒子由 2 个质子和 2 个中子组成,带  $2e$  正电荷,它的质量和氦核相等。所以, $\alpha$  粒子实际上就是氦原子核。在  $\alpha$  衰变中,子体的质量数  $A$  比母体核减少 4 单位,核电荷亦即原子序数  $Z$  降低 2,即子体与母体相比,在元素周期表中的位置向左移了两格。这就是  $\alpha$  衰变的位移定则。根据这定则,若令  $X$  代表母体, $Y$  代表子体,则  $\alpha$  衰变可用下式表示:



式中  $Q$  为衰变能,它的值应为母体核的质量和子体核及  $\alpha$  粒子的总质量的差数。

作为  $\alpha$  衰变的天然放射性,绝大部分是属于原子序数大于 82 的同位素,如  ${}_{88}^{226}\text{Ra}$ 、 ${}_{84}^{210}\text{Po}$  等均是



原子序数低于 82 放射  $\alpha$  粒子的天然放射性同位素只有  ${}_{62}^{147}\text{Sm}$  ( $T = 6.7 \times 10^{11}$  年),  ${}_{60}^{144}\text{Na}$  ( $T \approx 5 \times 10^{15}$  年),  ${}_{74}^{180}\text{W}$  ( $T = 2.2 \times 10^{17}$  年),  ${}_{78}^{190}\text{Pt}$  ( $T \approx 10^2$  年) 等。他们的半衰期都长。人造放射性同位素大部分都是  $\alpha$  衰变的,而那些具有  $\alpha$  衰变的人造放射性同位素也大多数是原子序数大于 82 的同位素(包括超铀元素)。例如:  $82 < Z < 92$  的有  ${}_{83}^{108}\text{Bi}$ 、 ${}_{84}^{200}\text{Po}$ 、 ${}_{85}^{213}\text{At}$ 、 ${}_{88}^{213}\text{Ra}$ 、 ${}_{92}^{230}\text{U}$  等好几种;  $Z > 92$  的有  ${}_{93}^{233}\text{Np}$ 、 ${}_{94}^{232}\text{Pu}$ 、 ${}_{95}^{231}\text{Am}$ 、 ${}_{96}^{233}\text{Cm}$ 、 ${}_{97}^{243}\text{Bk}$  等数十种。

它们的数目随着制造同位素技术的进步而时有增加,利用加速器的高能质子( $\sim 200\text{MeV}$ )的轰击,人们也得到一些低原子序数而能放射  $\alpha$  粒子的放射性同位素。例如  ${}_{79}^{190}\text{Au}$ 、 ${}_{80}^{189}\text{Hg}$ 、 ${}_{66}^{149}\text{Dy}$ 、 ${}_{65}^{161}\text{Tb}$  及  ${}_{62}^{146}\text{Sm}$  等。

由一种同位素放射出来的  $\alpha$  粒子的能量是单一的。但是伴有  $\gamma$  射线的  $\alpha$  衰变同位素常常放射出不只一种能量的  $\alpha$  粒子,例如  ${}_{88}^{226}\text{Ra}$  衰变时伴有  $\gamma$  射线( $E_\gamma = 0.188\text{MeV}$ ),它的  $\alpha$  粒子的能量就有两种,一种能量是  $4.777\text{MeV}$ (占总强度的  $94.3\%$ )。另一种的能量是  $4.589\text{MeV}$ (占总强度的  $5.7\%$ )。图 1-6 就是  ${}_{88}^{226}\text{Ra}$  的衰变图。

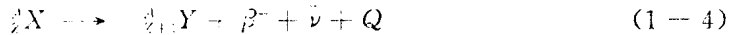
上图应作如下的理解:  ${}_{88}^{226}\text{Ra}$  具有两种衰变方式。第一种方式是镭放射出能量为  $4.777\text{MeV}$  的  $\alpha$  粒子,而变成基态的氡-222,另一种方式是镭-226 放射出能量为  $4.589\text{MeV}$  的  $\alpha$  粒子而变成处于激发态的氡-222;然后很快地跃迁到氡-222 的基级而放射出能量为  $0.188\text{MeV}$  的  $\gamma$  射线。第一种衰变方式占  $94.3\%$ ,第二种方式占  $5.7\%$ 。有的放射性同位素的衰变图比这复杂得多,但也可用同样的方法加以分析。

### (二) $\beta$ 衰变

#### 1. 定义

从放射性核素的核里放射出快速  $\beta^-$  粒子的过程为  $\beta^-$  衰变。 $\beta^-$  粒子的质量为  $9.1091 \times 10^{-28}\text{g}$ ,并带  $1e$  单位的负电荷。所以, $\beta^-$  粒子实际上就是电子。为了与一般电子相区别,通常把从核里放射出的电子称为  $\beta^-$  粒子或  $\beta^-$  射线。

从  $\beta^-$  粒子的性质可知,发生  $\beta^-$  衰变后的子体核质量数  $A$  和母体核的相同,而原子序数  $Z$  将增加 1,即子体由母体在元素周期表中的位置向右移了一格。所以, $\beta^-$  衰变可用下式表示:



式中 $\bar{\nu}$ 称为反中子微子,它的质量比电子质量的 $5/10000$ 还小, $Q$ 为衰变能。

### 2. $\beta^-$ 粒子的能谱

从(1-4)可以看出,衰变有三个生成物: ${}^A_{Z-1} Y$ 、 $\beta^-$ 和 $\bar{\nu}$ 。因此,在衰变时所释放出来的衰变能将由这三个粒子共同带走。由于三个粒子的发射方向所成的角度可以是任意的,所以每个粒子所带走的能量将是不固定的。由于子体核的质量比 $\beta^-$ 粒子质量大几千倍以致几十万倍,子体核所带走的能量是微不足道的,故有:

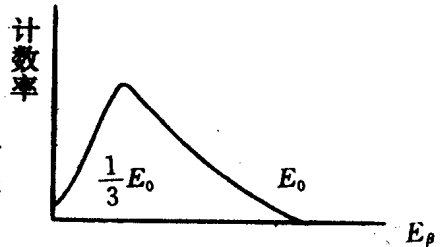
$$Q = E_Y + E_\beta + E_\nu \approx E_\beta + E_\nu$$

$E_Y$ 、 $E_\beta$ 、 $E_\nu$ 分别是子体核、 $\beta^-$ 粒子和中微子的动能。 $E_\beta$ 的值可以从最小值零( $E_\nu \approx Q$ ),以至最大的值 $Q$ ( $E_\nu = 0$ ),形成一个连续的能谱。实验上用摄谱仪来分析 $\beta^-$ 粒子的能量,则得到如图1-7所示的形状。能谱曲线有个最大的能量 $E_0$ ,比 $E_0$ 大时就测不到 $\beta^-$ 粒子。在能量约为 $E_0/3$ 的地方,曲线有一高峰。一般图上所给的 $\beta^-$ 能量都是指 $\beta^-$ 粒子的最大能量 $E_0$ 而言,它的数值和 $Q$ 几乎都是相等的。测定 $\beta^-$ 粒子的最大能量是一个相当重要的工作。使用摄谱仪来测定 $\beta^-$ 能谱,当 $\beta^-$ 能量接近 $E_0$ 时,计数率非常低,很难准确定出 $E_0$ 的位置。因此需要将能谱曲线用弗密(或居里)绘图法(Fermi or Curie Plot)绘成一条直线来求出 $E_0$ 值。除了摄谱仪之外,通常在实验室里是用全吸收法或费梭分析法来测定 $E_0$ 的。

对于不同的 $\beta^-$ 放射性核素放出的射线其能量曲线又略有差异。如图1-8所示。

### 3 $\beta^-$ 衰变图

许多原子核发生的 $\beta^-$ 衰变很简单,只放射出 $\beta^-$ 粒子就转变成一种稳定态(基态)的核素。例如 ${}^{14}\text{C}$ 、 ${}^{32}\text{P}$ 、 ${}^{35}\text{S}$ 等(图1-9)。



但是,有更多的原子核放射 $\beta^-$ 粒子的同时,常常伴随放射出 $\gamma$ 射线。这样的放射性同位素有的只有一组 $\beta^-$ 粒子,即只有一个 $E_0$ 值。例如钴-60衰变时,除了放射性 $\beta^-$ 粒子( $E_0 = 0.306\text{MeV}$ )外,还放射两种 $\gamma$ 射线( $E_\gamma = 1.17\text{MeV}$ 和 $1.33\text{MeV}$ )如图1-10。有些同位素的 $\beta^-$ 衰变不只有一种衰变,因而就有两组或两组以上的 $\beta^-$ 粒子。例如铯-137衰变时,有一部分(占8%)直接跃迁至钡-137的基态,而放射出最大能量为 $1.13\text{MeV}$ 的 $\beta^-$ 射线;另一部分(占92%)则跃迁至钡-137的激发态能级,而放射出最大能量为 $0.523\text{MeV}$ 的 $\beta^-$ 射线,然后再跃迁至其基态而放射出能量为 $0.661\text{MeV}$ 的 $\gamma$ 射线(如图1-11所示)。有的放射性同位素的 $\beta^-$ 粒子多至四组五组,例如镓-72,碘-131,铯-134,镥-239等都是,它们的衰变图比起图1-11要复杂得多。

### (三) $\beta^+$ 衰变

$\beta^+$ 粒子又称正电子或阳电子,是一种质量和电子相等,但带 $1e$ 单位正电荷的粒子。从放射性核素里放射 $\beta^+$ 粒子的过程为 $\beta^+$ 衰变。这种过程可以看成由于核里一个质子转变成一个中子而放出 $\beta^+$ 和中微子的结果。

在发生 $\beta^+$ 衰变时,有三种生成物:与母体核质量数 $A$ 相同但核电荷要小于一单位的子体核、 $\beta^+$ 粒子和中微子。所以, $\beta^+$ 衰变可以用下式表示:

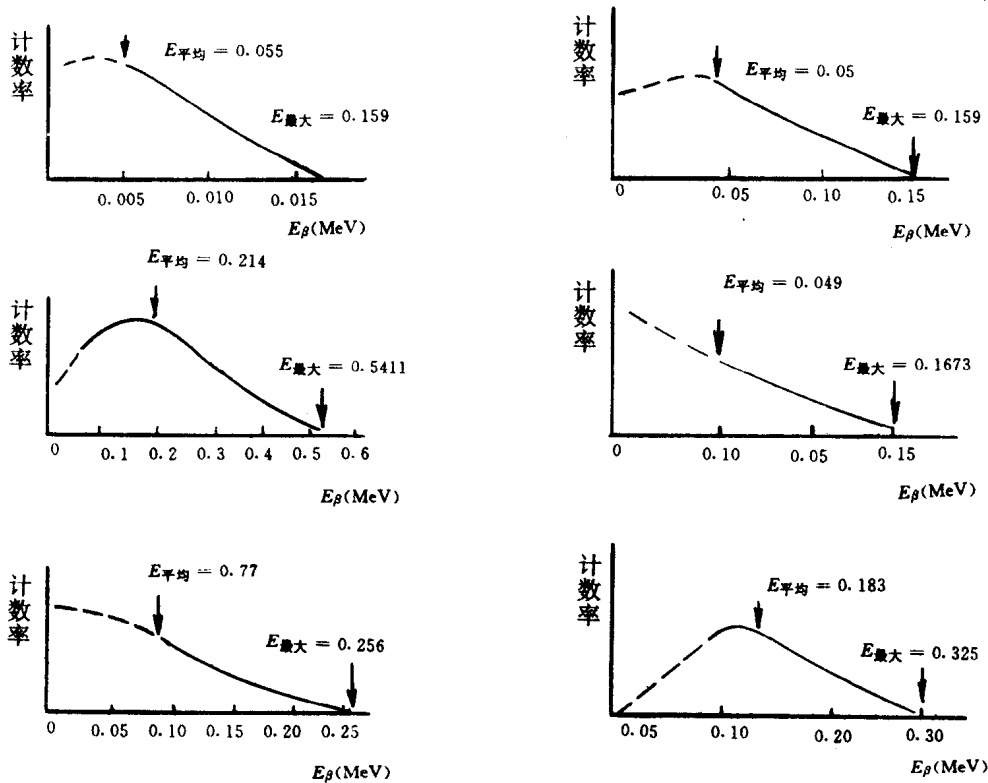


图 1—8 几种常见放射性核素的  $\beta$  能谱曲线

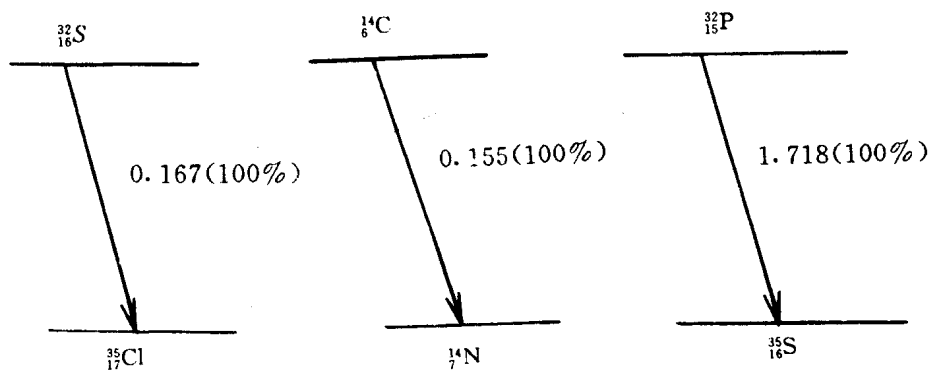


图 1—9  $^{14}\text{C}$ 、 $^{32}\text{P}$ 、 $^{35}\text{S}$  的衰变图

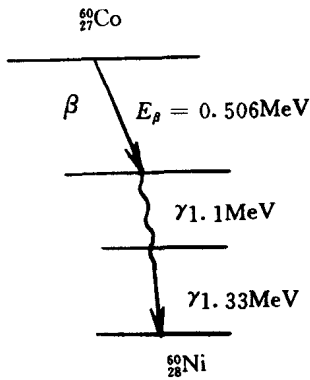


图 1—10  $^{60}\text{Co}$  的衰变图

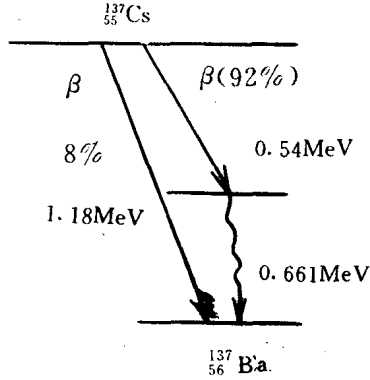
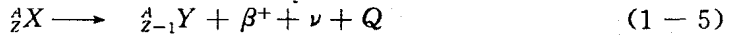


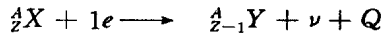
图 1—11  $^{137}\text{Cs}$  的衰变图



$Q$  为衰变能,它的值可以从质量守恒定律求得。如同  $\beta^-$  粒子一样,  $\beta^+$  的能谱也是连续的。也有最大值和最小值。它们的不同之处在于  $\beta^+$  粒子只能在极短的时间内存在,当它被物质阻止住而丧失了动能时,它将和物质中的电子相结合而把两个正负电子的静止质量转化为电磁辐射,此时两个正电子的静止质量全部亏损,转化的电磁辐射则称为光化辐射。光化辐射可以是一个光子、两个光子或三个光子,其中以两个光子为最普遍。因为每个电子的静止质量为  $0.511\text{MeV}$ ,所以产生两个光子的光化辐射时,它的每个光子的能量应为  $0.511\text{MeV}$ ,探测这个能量的射线存在与否,常常可以判断是否有  $\beta^+$  衰变产生。

#### (四) 电子俘获

不稳定原子核俘获了一个核外绕行电子,而使核内的一个质子转变成中子和中微子的过程称电子俘获,常用符号  $EC$  表示。它的核衰变过程可用下式表示:



因为  $K$  壳层最靠近核,  $K$  电子被俘的几率比其它壳层 ( $L, M, N, \dots$ ) 的大,所以这种过程常称为  $K$  俘获。

一般在原子核中亏缺中子的话,如衰变能  $Q$  大于  $1.02\text{MeV}$  (即  $M_Z - M_{Z-1} > 2\text{MeV}$ ),则可能发生  $\beta^+$  衰变,使子体达到更高的稳定性。例如  $^{13}\text{N}$  (图 1—12) 发生  $\beta^+$  衰变后,生成稳定态的  $^{13}\text{C}$ 。而如果衰变能量小于  $1.02\text{MeV}$ ,则可能发生  $K$  电子俘获。如  $^{55}\text{Fe}$  和  $^{51}\text{Cr}$  (图 1—13) 发生  $K$  俘获后,生成稳定态  $^{55}\text{V}$  和  $^{51}\text{Mn}$ 。

这里应该指出,能满足产生  $\beta^+$  衰变的条件,也就能满足产生电子俘获的条件。所以有许多放射性同位素,同时只有放射  $\beta^+$  粒子和电子俘获的衰变。还有为数不多的放射性同位素即能满足  $\beta^+$  衰变的条件,同时又能满足  $\beta^-$  衰变的条件。这样的同位素(如  $^{108}\text{Ag}$ 、 $^{80}\text{Br}$ 、 $^{74}\text{As}$ 、 $^{60}\text{Cu}$ ) 都是同时具有放射  $\beta^-$  粒子、 $\beta^+$  粒子和电子俘获的衰变的。图 1—14 是同时具有  $\beta^+$  衰变和电子俘获的  $^{65}\text{Zn}$  的衰变图,图 1—15 则是同时具有  $\beta^+$  衰变、电子俘获的  $^{40}\text{K}$  的衰变图,图 1—16 则是同时具有  $\beta^+$  衰变,电子俘获和  $\beta^-$  衰变的  $^{64}\text{Cu}$  的衰变图。



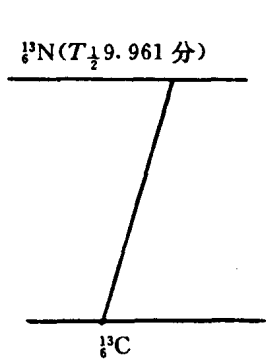


图 1-12  $^{13}\text{N}$  的  $\beta^+$  衰变图

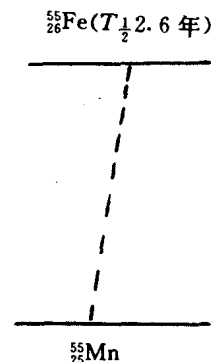
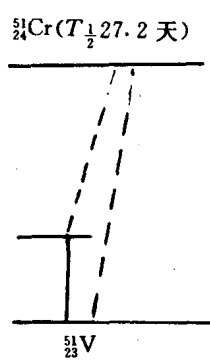


图 1-13  $^{51}\text{Cr}$ 、 $^{55}\text{Fe}$  的电子俘获图

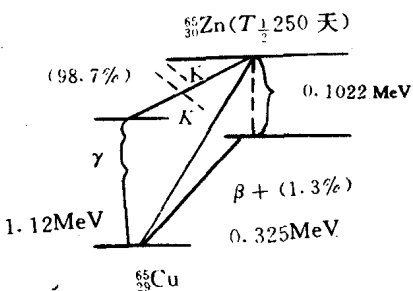


图 1-14  $^{65}\text{Zn}$  的衰变图  
(同时具有  $\beta^+$  衰变和电子俘获)

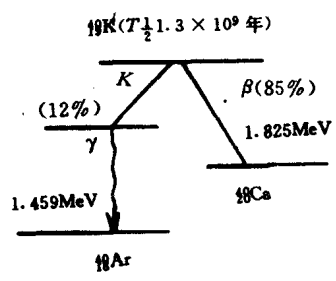


图 1-15  $^{40}\text{K}$  的衰变图  
(同时具有  $\beta^+$  衰变和电子俘获)

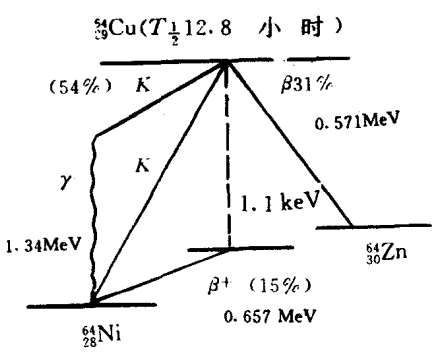


图 1-16  $^{64}\text{Cu}$  的衰变图(同时具有  $\beta^-$  衰变、 $\beta^+$  衰变和电子俘获)

总结(二)、(三)、(四)节讨论的结果,可以得出一个结论:凡是原子序数相邻的同量异位素不可能都是稳定的。在天然同位素中情形确是如此。唯一的例外是 $^{123}\text{Pb}$ 和 $^{123}\text{Te}$ ,它们两个都是稳定的。这可能是因为它们的同位素质量相差非常小;或者是它们当中有一个是半衰期十分长的放射性。原子序数相差为两个单位的同量异位素则可以同时是稳定的。

作为电子俘获的衰变,除了有些同位素因子体在激发态而放射出 $\gamma$ 射线外,核并没有放射出任何易于探测的射线;可是它却有次级放射线能够得到探测。现以K电子俘获为例来说明次级放射的来源。当电子被俘获后,K壳层少了一个电子。此时比K壳层能级更高的绕行电子(如L电子)有可能跃迁至K壳层来填充被俘获电子的空位,而将两壳层的