

黑龙江省精品工程专项资金资助出版

核工程概论

HEGONGCHENG GAILUN

阎昌琪 丁 铭◎编著



哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

黑龙江省精品工程专项资金资助出版

核工程概论

阎昌琪 丁 铭 编著



内 容 简 介

本书全面介绍了核工程的基本知识,主要内容以核反应堆及核动力为主线,同时也包括核物理基础知识、核裂变、核聚变及核武器的介绍。涉及核反应堆方面的内容有:各种类型反应堆的介绍、反应堆结构与材料、反应堆物理和热工基础知识;核动力方面主要介绍了核动力装置的基本组成、核动力安全等。

本书覆盖的核工程领域的专业面较宽,内容由基础到专业,但不包含复杂的理论和计算。本书适合涉核专业本科低年级学生作教材使用,也可作为与核工程有关专业技术人员自学和培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

核工程概论/阎昌琪,丁铭编著. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2018.12
ISBN 978-7-5661-2141-7

I. ①核… II. ①阎… ②丁… III. ①核工程
IV. ①TL

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 265927 号

选题策划 石 岭
责任编辑 石 岭
封面设计 张 骏

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区南通大街 145 号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司
开 本 787 mm × 1 092 mm 1/16
印 张 15.5
字 数 409 千字
版 次 2018 年 12 月第 1 版
印 次 2018 年 12 月第 1 次印刷
定 价 48.00 元

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

随着我国国民经济和工业技术的快速发展,核工程技术近年来有了长足进步,核电、核供热、海上浮动核电站、核动力破冰船等民用核工程逐渐融入百姓的生活;在大国竞争越来越激烈的背景下,核武器、核动力舰船等也越来越受到人们的关注。为了使人们对民用核工程与军用核工程有概括的了解,需要一本比较通俗和全面介绍核工程的书籍。另外,随着核工程技术人员需求量的大幅度增加,培养核工程专业技术人员的专业数量和大学招生人数也在快速增长。在核工程专业的本科学习阶段,深入学习专业课之前需要一本全面介绍核工程专业的教材,使学生对核工程专业有全面的了解。

核工程领域范围很宽,但是目前与国民经济和人民生活密切相关的主要是核反应堆及核动力工程,因此本书以核反应堆及核动力工程相关的内容为主。为了使内容涵盖面宽、知识结构完整,书中也包括一些核物理的基础知识、核聚变的知识及核武器的基础知识等。本书注重核工程的基础理论和基本概念介绍,不包含复杂的理论和计算推导,内容由浅入深,由基础到专业,充分体现内容的全面性。本书从核工程最基本的概念和专业知识讲起,内容通俗易懂。通过阅读和学习本书学生对核工程知识会有概括的了解,可建立正确的基本概念。本书可以作为核工程专业低年级学生了解专业的初步教材,也可作为核化工、核技术等相关专业的学生掌握核工程知识的教科书,使学生在短时间内对核工程专业有较全面的了解。

本书共分8章,其中1~4章由阎昌琪教授编撰;5~8章由丁铭教授编撰。本书的初稿已经过两轮教学使用,已对教学实践中发现的问题进行了修订,但由于作者水平有限,书中难免存在缺点和不足,敬请读者提出宝贵意见。

编著者

2018年10月

目 录

第 1 章 原子核物理基础	1
1.1 原子核	1
1.2 放射性衰变和衰变规律	6
1.3 核反应与核裂变	13
1.4 核聚变	22
思考题	29
第 2 章 核能的开发利用	30
2.1 核能发展历程	30
2.2 核能的和平利用	35
2.3 核能的军事利用	49
思考题	63
第 3 章 典型核反应堆	64
3.1 核反应堆概述	64
3.2 压水堆(PWR)	64
3.3 沸水堆(BWR)	78
3.4 重水堆	81
3.5 气冷堆	84
3.6 钠冷快中子堆	87
3.7 第三代反应堆和第四代反应堆	89
思考题	97
第 4 章 核工程材料	99
4.1 核燃料	99
4.2 反应堆结构材料	107
4.3 慢化剂和冷却剂材料	113
4.4 反应堆控制材料	122
思考题	129
第 5 章 特殊用途的核动力	130
5.1 船用核动力	130
5.2 浮动式核动力	137

5.3 研究试验用核反应堆	139
5.4 小型模块化反应堆	142
5.5 空间核动力	146
思考题.....	158
第 6 章 核反应堆物理和热工基础	159
6.1 可控自持的链式裂变反应	159
6.2 反应性效应	167
6.3 反应堆的释热	171
6.4 反应堆内的导热和输热	175
思考题.....	185
第 7 章 核动力装置系统与运行	186
7.1 核动力装置系统	186
7.2 核动力装置的运行	199
思考题.....	212
第 8 章 核安全基础	213
8.1 核安全概述	213
8.2 典型的设计基准事故	219
8.3 反应堆严重事故	226
8.4 事故下放射性物质的释放	232
8.5 国际核和放射事件分级表	238
思考题.....	241
参考文献	242

第 1 章 原子核物理基础

1.1 原 子 核

早在 20 世纪初科学家就提出了原子的核式模型,即原子是由原子核和核外电子所组成的。从此以后,原子的研究就被分成两部分来处理:原子核是原子核物理学的主要研究对象;而核外电子的运动构成了原子物理学的主要内容。原子和原子核是物质结构的两个层次,但也是互相关联又完全不同的两个层次。

原子由原子核和核外电子组成,原子核带正电,核外被束缚的电子带负电,两者所带的电荷数相等,符号相反,因此原子本身是电中性。原子核由质子和中子构成,质子和中子统称为核子,质子和中子是核子的两种不同形态。原子核中的质子数用 Z 表示,它等于原子序数和电荷数,中子数用 N 表示,则原子核的质量数 $A = Z + N$ 。原子核的基本性质通常是指原子核作为整体所具有的性质,它与原子核的结构及其变化有密切关系。

质子、中子和电子是所有原子的三个主要组成部分。各种原子的质量之所以不同,就是它们所包含的以上三种粒子的数目变化的结果。质子数相同的原子和原子核具有相似的化学性质和物理性质,差别主要在它们的质量上,它们称为同位素,例如氕和氘就是氢的同位素。

原子的大小是由核外运动的电子所占的空间范围来表征的,可以设想为电子在以原子核为中心、距核非常远的若干轨道上运行。原子的半径约为 10^{-8} cm 的量级,50 万个原子排列在一起相当于一根头发丝的直径。

原子核的质量远远超过核外电子的总质量,因此原子的质量中心和原子核的质量中心非常接近。原子核的线度只有几十飞米 ($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m} = 10^{-13} \text{ cm}$),而密度高达 $10^8 \text{ t} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。原子核的许多特性正是通过对原子或分子现象的观察来确定的。但也有许多性质仅仅取决于原子或原子核,例如物质的许多化学及物理性质基本上只与核外电子有关,而放射现象则主要归因于原子核。

1.1.1 原子核的特性

1. 原子核的组成

在发现中子之前,当时人们知道的“基本”粒子只有两种:电子和质子。因此,当时把原子核假定为由质子和电子组成。1932 年查德威克发现中子,海森堡立刻提出原子核由质子和中子组成的假设,而且被一系列的实验所证实。

中子和质子的质量相差甚微,它们的质量分别为

$$m_n = 1.008\ 664\ 92\ \text{u}$$

$$m_p = 1.007\ 276\ 46\ \text{u}$$

这里, u 为原子质量单位,1960 年国际上规定把 ^{12}C 原子质量的 $1/12$ 定义为原子质量单位,

即 $1\text{ u} = 1.660\ 538\ 73 \times 10^{-27}\text{ kg} = 1.660\ 538\ 73 \times 10^{-24}\text{ g}$ 。

中子为中性粒子,质子为带单位正电荷的粒子。在提出原子核由中子和质子组成之后,任何一个原子核都可用符号 ${}_Z^AX_N$ 来表示。右下标 N 表示核内中子数,左下标 Z 表示质子数或称电荷数,左上标 A ($A = N + Z$)为核内的核子数,又称质量数。元素符号 X 与质子数 Z 具有唯一确定的关系,例如 ${}_2^4\text{He}$, ${}_8^{16}\text{O}$, ${}_{92}^{238}\text{U}$ 等。实际上,简写 AX ,已足以代表一个特定的核素,左下标 Z 往往省略。 Z 在原子核中为质子数,在原子中则为原子序数。只要元素符号 X 相同,不同质量数的元素在周期表中的位置相同,就具有基本相同的化学性质。例如, ${}^{235}\text{U}$ 和 ${}^{238}\text{U}$ 都是铀元素,两者只相差三个中子,它们的化学性质完全相同;但是,它们是两个完全不同的核素,它们的核性质完全不同。

2. 描述原子核的术语

在研究原子核特性中常用到一些术语,现给出它们的定义如下:

(1) 核素

核素是指在其核内具有一定数目的中子和质子,以及特定能态的一种原子核或原子。例如 ${}_{86}^{208}\text{Tl}$ 和 ${}_{82}^{208}\text{Pb}$ 是独立的两种核素,它们有相同的质量数,而原子核内含有不同的质子数; ${}_{38}^{90}\text{Sr}_{52}$ 和 ${}_{39}^{91}\text{Y}_{52}$ 是原子核内含有不同的质子数和相同的中子数的独立的两种核素; ${}^{60\text{m}}\text{Co}$ 和 ${}^{60}\text{Co}$ 也应该看成独立的两种核素,它们的原子核内含有相同的质子数和中子数,但所处的能态是不同的。

(2) 同位素和同位素丰度

我们把具有相同质子数,但质量数(即核子数)不同的核所对应的原子称为某元素的同位素。同位是指该同位素的各种原子在元素周期表中处于同一个位置,它们具有基本相同的化学性质。例如,氢的同位素有三种核素: ${}^1\text{H}$, ${}^2\text{H}$, ${}^3\text{H}$,分别取名为氕、氘、氚。某元素中各同位素原子数的天然含量称为同位素丰度。例如天然存在的氧的同位素有三种核素: ${}^{16}\text{O}$, ${}^{17}\text{O}$, ${}^{18}\text{O}$,它们的同位素丰度分别为99.756%,0.039%和0.205%。

(3) 同质异能素

半衰期较长的激发态原子核称为基态原子核的同质异能素或同核异能素,它们的 A 和 Z 均相同,只是能量状态不同,一般在元素符号的左上角质量数 A 后加上字母 m 。这种核素的原子核一般处于较高能态,例如 ${}_{38}^{87\text{m}}\text{Sr}$ 称为 ${}_{38}^{87}\text{Sr}$ 的同质异能素,其半衰期为2.81 h。同质异能素所处的能态,又称同质异能态,它与一般的激发态在本质上并无区别,只是半衰期即寿命较长而已,上面所说的 ${}^{60\text{m}}\text{Co}$ 就是 ${}^{60}\text{Co}$ 的同质异能素。

3. 核素图和放射性

根据原子核的稳定性,可以把核素分为稳定的核素和不稳定的放射性核素。原子核的稳定性与核内质子数和中子数之间的比例存在密切关系。

正如在化学和原子物理学中把元素按原子序数 Z 排成元素周期表一样,我们可以把核素排在一张核素图上。核素图与元素周期表的不同在于,除了电荷数(即核内质子数) Z 外,还必须考虑中子数 N 。这样,核素图就必须是 N 和 Z 的二维图。图1.1中是核素图(部分),以 N 为横坐标、 Z 为纵坐标,然后让每一个核素对号入座。图中每一格代表一个特定的核素。带有斜线条和加黑的核素为稳定核素,格中百分数为该核素的丰度。白底的核素为不稳定的放射性核素,格中 α , β^- , β^+ 表示该核素的衰变方式,箭头指向为衰变后的子核,时间表示半衰期的长短。

在现代的核素图上,既包括了天然存在的 332 个核素(其中 280 多个是稳定核素),也包括了自 1934 年以来人工制造的 1 600 多个放射性核素,一共约 2 000 个核素。

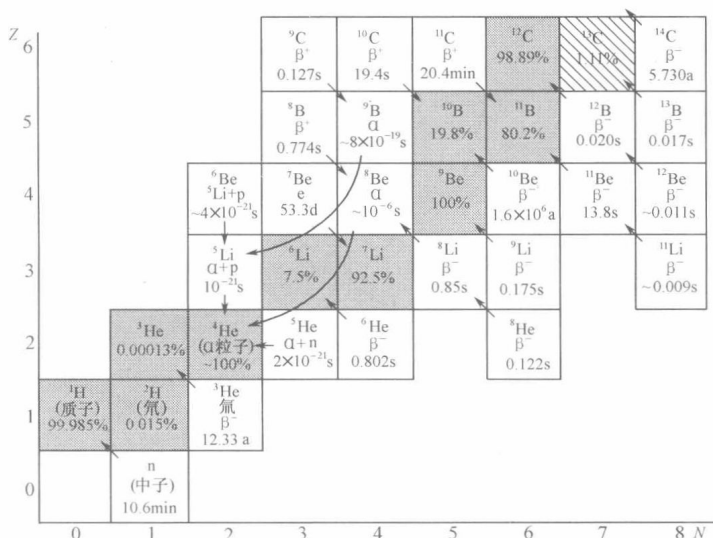


图 1.1 核素图(部分)

为了从核素图中得到更多的有关核稳定性的认识,有人绘制了 β 核素分布图,如图 1.2 所示,图中横坐标为质子数 Z ,纵坐标为中子数 N 。在图 1.2 中,在同一垂直线上(即 Z 相同)的所有核素是同位素;在同一水平线上(即 N 相同)的所有核素是同中子异荷素;在 N 和 Z 轴截距相等的直线上(即 A 相等)的所有核素称为同量异位素。由图 1.2 可以发现,稳定核素几乎全落在一条光滑曲线上或紧靠曲线的两侧,我们把这条曲线称为 β 稳定曲线。由图 1.2 可见,对于轻核,稳定曲线与直线 $N=Z$ 相重合;当 N, Z 增大到一定数值之后,稳定线逐渐向 $N>Z$ 的方向偏离。相对于稳定曲线而言,中子数偏多或偏少的核素都是不稳定的。位于稳定曲线上方的核素为丰中子核素,易发生 β^- 衰变;位于稳定曲线下方的核素为缺中子核素,易发生 β^+ 衰变。

由于库仑力是长程相互作用力,它能作用于原子核内的所有质子,正比于 $A(A-1)$;而核力是短程力,只作用于相邻的核子,正比于 A 。随着 Z 的增加, A 也增加,库仑相互作用的影响增长得比核力快,要使原子核保持稳定,必须靠中子数的较大增长来减弱库仑力的排斥作用,因此随着 $Z(A)$ 的增长,稳定核素的中子数比质子数越来越多、越来越大地偏离 $Z=N$ 直线,最终稳定核素不复存在,当 Z 大到一定程度时,连长寿命放射性核素也不复存在,这样核素在目前的已知核素区慢慢终止了。

在 1966 年左右,理论预测在远离 β 稳定曲线的 $Z = 114$ 附近,存在一个超重稳定元素“岛”。近十年来,由于重离子加速器的大量建造,重离子核反应得以广泛实现,为实现和验证这一理论提供了有效的工具。

原子核的稳定性还与核内质子和中子数的奇偶性有关,自然界存在的稳定核素共 270 多种,若包括半衰期 10^9 年以上的核素则为 284 种,其中偶偶(e-e)核 166 种;偶奇(e-o)核 56 种;奇偶(o-e)核 53 种;奇奇(o-o)核 9 种。

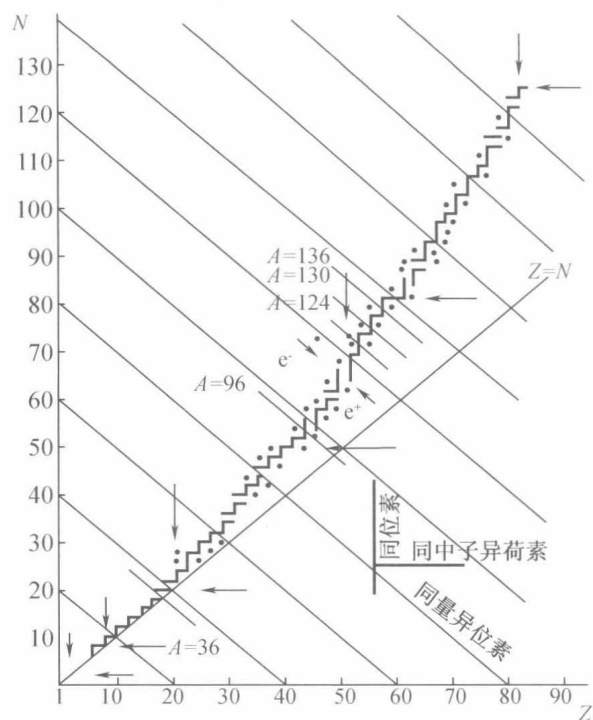


图 1.2 β 稳定核素分布图

根据核内质子和中子数的奇偶性可以看出:偶偶核是最稳定的,稳定核素最多;其次是奇偶核和偶奇核;而奇奇核最不稳定,稳定核素最少。

事实表明,当原子核的中子数或质子数为 2,8,20,28,50,82 和中子数为 126 时,原子核特别稳定,我们把上述数目称为“幻数”。

放射性是指放射性同位素连续经受自发的衰变,这个过程通常包括从母核发射出一个或多个若干种更小的粒子,此后的母核变为另一种核,即子核,这就是所谓的母核衰变为子核,这个子核本身也可能是不稳定的,因而在形成稳定同位素以前,可能要发生好几级连续的衰变。放射性总是伴随母核质量的减少,即总是释放能量。这种释放的能量往往以发射粒子动能的形式或电磁辐射的形式出现。轻粒子在高速下发射出来,同时重粒子以慢得多的速度向相反的方向运动。

1.1.2 原子核的大小

一个原子的线度约为 10^{-8} m,根据卢瑟福用 α 粒子轰击原子的实验得知原子核的线度远小于原子的线度。若想象原子近似于球形,则就有原子核半径的概念。由于原子核的半径很小,需要通过各种间接的方法进行测量。由于所用方法不同,测出的原子核半径的意义也不相同,产生了核力半径和电荷分布半径的概念。但无论如何,用各种方法得出的结果是相近的。

在历史上,最早研究原子核大小的是卢瑟福和查德威克。他们用质子或 α 粒子去轰击各种原子核,根据这一方法,发现原子核半径 $r_0 = 1.20$ fm,原子核的密度为 $\rho_N = 2.84 \times 10^8$ t/cm³。这就意味着在每立方厘米体积中竟有近 3 亿吨的物质。

1.1.3 原子核的结合能

1. 质能联系定律

根据爱因斯坦的质量和能量转换原理,质量和能量都是物质同时具有的两个属性,任何具有一定质量的物体必定与一定的能量相联系。如果物体(粒子)的能量 E 以 J(焦耳)表示,物体(粒子)的质量 m 以 kg(千克)表示,则质量和能量的相互关系为

$$E = mc^2 \quad (1.1)$$

式中, c 为在真空中的光速, $c = 2.997\,924\,58 \times 10^8 \text{ m/s} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。(1.1)式称为质能联系定律。

$E = mc^2$ 中的能量包括两部分,一部分为物体的静止能量 $E_0 = m_0 c^2$,另一部分为物体的动能 T ,在通常情况下(即非相对论情况), $v \ll c$,则

$$T \approx m_0 c^2 \left\{ \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{v}{c} \right)^2 + \frac{3}{8} \left(\frac{v}{c} \right)^4 + \cdots \right] - 1 \right\} \approx \frac{1}{2} m_0 v^2 \quad (1.2)$$

这与经典力学所推出的结果是一致的。

2. 原子核的质量亏损

原子核既然是由中子和质子所组成,那么,原子核的质量应该等于核内中子和质子的质量之和,实际情况并非如此。举一个最简单的例子——氦核,氦是氢的同位素,氦(^2H)由一个中子和一个质子组成。中子的质量 $m_n = 1.008\,665 \text{ u}$,质子的质量 $m_p = 1.007\,276 \text{ u}$,则 $m_n + m_p = 2.015\,941 \text{ u}$;而氦核的质量 $m(Z=1, A=2) = 2.014\,102 \text{ u}$ 。可见,氦核的质量小于组成它的质子和中子质量之和,两者之差为

$$\Delta m(1,2) = m_p + m_n - m(1,2) = 0.001\,839 \text{ u} \quad (1.3)$$

推而广之,定义原子核的质量亏损为组成原子核的 Z 个质子和 $A-Z$ 个中子的质量与该原子核的质量之差,记作 $\Delta m(Z, A)$,即

$$\Delta m(Z, A) = Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - m(Z, A) \quad (1.4)$$

式中, $m(Z, A)$ 是电荷数为 Z 、质量数为 A 的原子核的质量。从原子核质量亏损的定义可以明确看出,所有的原子核都存在质量亏损,即 $\Delta m(Z, A) > 0$ 。

3. 原子核的结合能

既然原子核的质量亏损 $\Delta m > 0$,由质能关系式,相应能量的减少就是 $\Delta E = \Delta m c^2$ 。这表明核子结合成原子核时,会释放出能量,这个能量称为结合能。由此, Z 个质子和 $(A-Z)$ 个中子结合成原子核时的结合能 $B(Z, A)$ 为

$$B(Z, A) \equiv \Delta m(Z, A) c^2 \quad (1.5)$$

一个中子和一个质子组成氦核时,会释放 2.225 MeV 的能量,这就是氦的结合能,它已被精确的实验测量所证明。实验还证实了它的逆过程:当有能量为 2.225 MeV 的光子照射氦核时,氦核将一分为二,飞出质子和中子。

其实,一个体系的质量小于组成体的个体质量之和这一现象,在化学和原子物理学中同样也存在。分子的质量并不等于原子质量之和,原子的质量也不等于原子核的质量与电子质量之和。结合能的概念在原子核物理中要比原子、分子物理中重要得多,而在高能物体中更有其特别的意义。

4. 比结合能曲线

原子核的结合能 $B(Z, A)$ 除以质量数 A 所得的商, 称为平均结合能或比结合能 ε , 即

$$\varepsilon(Z, A) = B(Z, A) / A$$

比结合能 ε 的单位是 MeV。

比结合能的物理意义是原子核拆散成自由核子时, 外界对每个核子所做的最小的平均功。或者说, 它表示核子结合成原子核时, 平均一个核子所释放的能量。因此, ε 表征了原子核结合的松紧程度。 ε 大, 核结合紧, 稳定性高; ε 小, 核结合松, 稳定性差。

图 1.3 是核素的比结合能对质量数作图得到的比结合能曲线。它与核素图一起, 是原子核物理学中十分重要的两张图。由图 1.3 可见, 比结合能曲线在开始时有些起伏, 逐渐光滑地达到极大值, 然后又缓慢地变小。

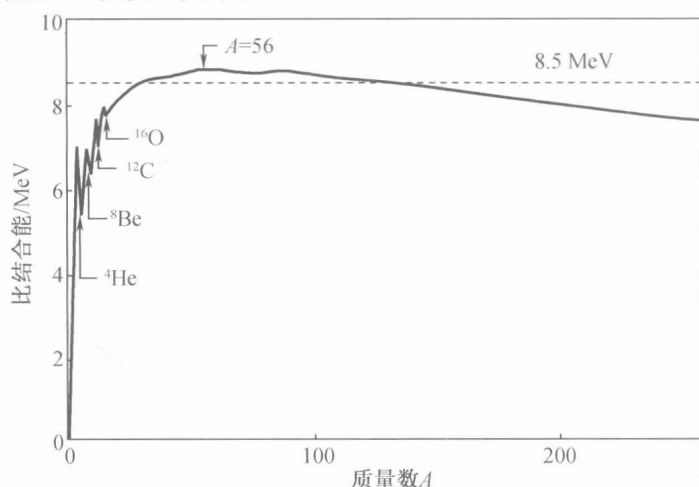


图 1.3 比结合能曲线

当结合能小的核变成结合能大的核, 即当结合得比较松的核变成结合得紧的核, 就会释放能量。从图 1.3 可以看出, 有两个途径可以获得能量: 一个是重核裂变, 即一个重核分裂成两个中等质量的核; 另一个是轻核聚变。人们依靠重核裂变的原理制造出了核反应堆与原子弹; 依靠轻核聚变的原理制造出氢弹, 目前人们正在探索可控的聚变反应。由此可见, 所谓原子能, 主要是指原子核结合能发生变化时释放的能量。

由图 1.3 还可见, 当 $A < 30$ 时, 曲线是上升的, 同时有明显的起伏。在 A 为 4 的整数倍时, 曲线有周期性的峰值, 如 ${}^4\text{He}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{16}\text{O}$ 和 ${}^{24}\text{Mg}$ 等偶偶核, 并且 $N = Z$ 。这表明对于轻核可能存在 α 粒子的集团结构。

1.2 放射性衰变和衰变规律

目前已经发现的天然存在的和人工生产的核素约有 2 000 多种, 其中已知的天然存在的核素有 332 种, 其余皆为人工制造的。天然存在的核素可分为两大类: 一类是稳定的核素, 一类是不稳定的核素, ${}^{40}_{20}\text{Ca}$, ${}^{209}_{83}\text{Bi}$ 等核素属于前者。如前所述, 自然存在的稳定核素约有 270 多种。不稳定核素是指会自发地蜕变成另一种原子核的核素, 在蜕变过程中往往伴随一些粒子或碎片的发射, 例如 ${}^{210}_{80}\text{Po}$ (发射 α 粒子), ${}^{222}_{88}\text{Ra}$ (发射 α, β 粒子), ${}^{198}_{79}\text{Au}$ (发射 β 粒

子)。在无外界影响下,原子核自发地发生蜕变的现象称为原子核的衰变,例如 U 系的衰变,母核 $^{238}_{92}\text{U}$,半衰期 $T_{1/2}=4.468\times 10^9\text{ a}$,经 8 次 α 衰变和 6 次 β 衰变到稳定核素 $^{206}_{82}\text{Pb}$,全系列共有 20 个核素,见图 1.4。

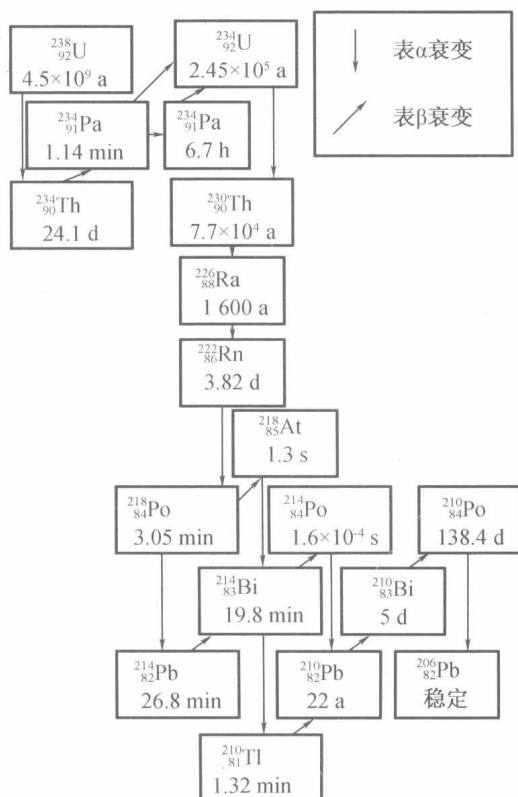


图 1.4 铀系衰变图

核衰变有多种形式,如 α 衰变, β 衰变, γ 衰变,还有自发裂变及发射中子、质子等过程。重核($A>140$)都具有 α 放射性,其衰变方式可以表示为

$$^A_Z\text{X}\rightarrow^{A-4}_{Z-2}\text{Y}+\alpha$$

其中 X 为母核, Y 为子核。

放射性核素是否发生 β 衰变,如 1.1.1 小节中所述,主要由核内中子与质子数之间的比例确定。 β 衰变包含 β^- 衰变、 β^+ 衰变和轨道电子俘获(EC)三种过程。对丰中子核而言,核内中子数过多而处于不稳定的状态,核内一个中子就会蜕变为质子,同时放出一个电子 e^- 和一个反中微子 $\tilde{\nu}_e$,其衰变方式表示为

$$^A_Z\text{X}\rightarrow^{A}_{Z+1}\text{Y}+e^-+\tilde{\nu}_e$$

对欠中子核(或称丰质子核),则发生 β^+ 衰变和轨道电子俘获(EC),分别表示为

$$^A_Z\text{X}\rightarrow^{A}_{Z-1}\text{Y}+e^++\nu_e$$

和

$$^A_Z\text{X}+e^-\rightarrow^{A}_{Z-1}\text{Y}+\nu_e$$

式中 e^+ 、 ν_e 分别为正电子和中微子, $\tilde{\nu}_e$ 是反中微子。

常用衰变量纲图来表示原子核各种衰变的初始过程。一个完整的衰变量纲图包括核素

的所有衰变方式、它们的分支比、辐射能量、放出射线的测序,以及任何一个中间态可测的半衰期等,如图 1.5 所示。

α 衰变, β 衰变过程中形成的子核往往处于激发态,原子核从激发态通过发射 γ 射线或内转换电子跃迁到较低能态的过程称为 γ 跃迁(或 γ 衰变)。

处于激发态的核若以放射出 γ 射线的形式退激,则 γ 射线能量等于退激前后核能级之差,而各能级之差等于相应的各 α 衰变能之差。

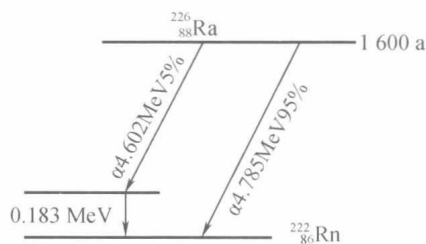


图 1.5 Ra 衰变纲图

1.2.1 放射性衰变的基本规律

不稳定原子核会自发地发生衰变,放射出 α 粒子、 β 粒子和 γ 光子等。本节仅讨论原子核放射性衰变的基本规律。

一个放射源包含同一种核素的大量原子核,它们不会同时发生衰变。我们不能预测某个原子核在某个时刻将发生衰变,但是我们可以发现,随着时间的流逝,放射源中的原子核数目按一定的规律减少,这是由微观世界粒子的全同性和统计性决定的。下面我们先讨论单一放射性的衰变规律,然后再讨论多代连续放射性的衰变规律。

1. 单一放射性的指数衰减规律

以 $^{222}_{86}\text{Rn}$ (常称氡射气) 的 α 衰变为例,把一定量的氡射气单独存放,实验发现,大约 4 天之后氡射气的数量减少一半,经过 8 天减少到原来的 $1/4$,经过 12 天减少到 $1/8$,一个月后就不到原来的百分之一了,衰变情况如图 1.6 所示。如果以氡射气数量的自然对数为纵坐标,以时间为横坐标作图,则可得到线性方程

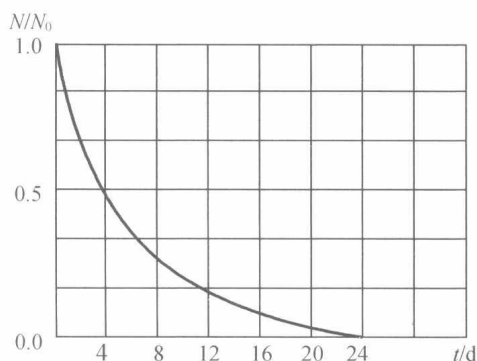
$$\ln N(t) = -\lambda t + \ln N(0) \quad (1.6)$$

式中, $N(0)$ 和 $N(t)$ 是时间 0 和 t 时刻 $^{222}_{86}\text{Rn}$ 的核数; $-\lambda$ 为直线的斜率, λ 是一个常数,称为衰变常数。将 (1.6) 式化为指数形式,得

$$N(t) = N(0)e^{-\lambda t} \quad (1.7)$$

可见, $^{222}_{86}\text{Rn}$ 的衰变服从指数规律。实验表明,任何放射性物质在单独存在时都服从相同的规律,只是具有不同的衰变常数 λ 而已。不仅只有一种衰变方式的放射源适用指数衰减规律,对具有多种衰变方式,例如同时具有 α 、 β 衰变的放射源,指数衰减规律仍是适用的。

实验发现,用加压、加热、加电磁场、机械运动等物理或化学手段都不能改变指数衰减规律,也不能改变其衰变常数 λ 。这表明,放射性衰变是由原子核内部运动规律所决定的。对各种不同的核素来说,它们衰变的快慢又各不相同,这反映它们的衰变常数 λ 各不相同,所以衰变常数又反映了它们的个性。

图 1.6 ^{222}Rn 的衰变规律图

2. 衰变常数、半衰期和平均寿命

由(1.7)式微分可得到

$$-dN(t) = \lambda N(t) dt \quad (1.8)$$

式中 $-dN(t)$ 为原子核在 t 到 $t+dt$ 时间间隔内的衰变数。由此可见,此衰变数正比于时间间隔 dt 和 t 时刻的原子核数 $N(t)$,其比例系数正好是衰变常数 λ 。因此 λ 可写为

$$\lambda = \frac{-dN(t)/N(t)}{dt} \quad (1.9)$$

式中的分子 $-dN(t)/N(t)$ 表示一个原子核的衰变概率。可见, λ 为单位时间内一个原子核发生衰变的概率,其量纲为时间的倒数,如 s^{-1} , min^{-1} , h^{-1} , d^{-1} , a^{-1} 等。衰变常数表征该放射性核素衰变的快慢, λ 越大,衰变越快; λ 越小,衰变越慢。实验指出,每种放射性核素都有确定的衰变常数,衰变常数 λ 的大小与这种核素如何形成的或何时形成的都无关。

如果一种核素同时有几种衰变模式,如 ^{137}Cs 有两种 β^- 衰变,还有一些放射性同位素同时放射 α 和 β 粒子等,则这一核素的总衰变常数 λ 是各个分支衰变常数 λ_i 之和,即

$$\lambda = \sum_i \lambda_i \quad (1.10)$$

于是,可以定义分支比 R_i 为

$$R_i = \frac{\lambda_i}{\lambda} = \frac{\lambda_i}{\sum_i \lambda_i} \quad (1.11)$$

可以看出, R_i 是第 i 个分支衰变在总衰变中所占的比例。

除了 λ 外,还有其他一些物理量,比如半衰期 $T_{1/2}$,也可用于表征放射性衰变的快慢。放射性核素衰变掉一半所需要的时间,叫作该放射性核素的半衰期 $T_{1/2}$,单位可采用 s , min , h , d , a 等。根据定义

$$N(T_{1/2}) = N(0)/2 \quad (1.12)$$

将指数衰减律(1.7)式代入,可得

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda \approx 0.693 / \lambda \quad (1.13)$$

由此可见, $T_{1/2}$ 与 λ 成反比,因此 $T_{1/2}$ 越大,衰变越慢,而 $T_{1/2}$ 越小,则衰变越快。(1.13)式也表示半衰期 $T_{1/2}$ 与何时作为时间起点无关,从任何时间开始算起这种原子核的数量减少一半的时间都一样。

还可以用平均寿命 τ 来度量衰变的快慢。平均寿命可以计算如下:若在 $t=0$ 时放射性

核素的数目为 $N(0)$, t 时刻就减为 $N(t) = N(0)e^{-\lambda t}$, 因此, 在 $t \sim t + dt$ 这段很短的时间内, 发生衰变的核数为 $-dN(t) = \lambda N(t) dt$, 这些核的寿命为 t , 它们的总寿命为 $t \cdot \lambda N(t) dt$ 。由于有的原子核在 $t \approx 0$ 时就衰变, 有的要到 $t \rightarrow \infty$ 时才发生衰变, 因此所有核素的总寿命为

$$\int_0^{\infty} t \lambda N(t) dt \quad (1.14)$$

于是, 任一核的平均寿命 τ 为

$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} t \lambda N(t) dt}{N(0)} = \frac{1}{\lambda} \int_0^{\infty} (\lambda t) \cdot e^{-\lambda t} d(\lambda t) = \frac{1}{\lambda} \quad (1.15)$$

所以, 原子核的平均寿命为衰变常数的倒数。由于 $T_{1/2} = 0.693/\lambda$, 故

$$\tau = \frac{T_{1/2}}{0.693} = 1.44 T_{1/2} \quad (1.16)$$

因此, 平均寿命比半衰期长一点, 是 $T_{1/2}$ 的 1.44 倍。在 $t = \tau$ 时, 有

$$N(t = \tau) = N_0 e^{-1} \approx 37\% N_0 \quad (1.17)$$

可见, 平均寿命为 T 的放射性核素经过时间 τ 以后, 剩下的核素数目约为原来的 37%。

3. 放射性活度及其单位

一个放射源的强弱不仅取决于放射性原子核的数量多少, 还与这种核素的衰变常数有关。因此, 放射源的强弱用单位时间内发生衰变的原子核数来衡量。一个放射源在单位时间内发生衰变的原子核数称为它的放射性活度, 通常用符号 A 表示。

如果一个放射源在 t 时刻含有 $N(t)$ 个放射性核, 放射源核素的衰变常数为 λ , 则这个放射源的放射性活度为

$$A(t) = -\frac{dN(t)}{dt} = \lambda N(t) \quad (1.18)$$

代入 $N(t)$ 的指数规律, 得到

$$A(t) = \lambda N(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

即

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} \quad (1.19)$$

这里 $A_0 = \lambda N_0$ 是放射源的初始放射性活度。由 (1.19) 式可见, 一个放射源的放射性活度也应随时间增加而呈指数衰减。

由于历史的原因, 放射性活度最初采用居里 (Ci) 为单位。最初 1 Ci 定义为 1 g 镭每秒衰变的数目。为了统一起见, 1950 年国际上统一规定: 一个放射源每秒钟有 3.7×10^{10} 次核衰变定义为 1 居里, 即

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ s}^{-1} \quad (1.20)$$

更小的单位有毫居里 ($1 \text{ mCi} = 10^{-3} \text{ Ci}$) 和微居里 ($1 \mu\text{Ci} = 10^{-6} \text{ Ci}$)。

在 1975 年的国际计量大会上, 规定了放射性活度的 SI 单位为 Bq (贝可 [勒尔]), 1 贝可定义为每秒有一次衰变, 即

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1} \quad (1.21)$$

由 (1.20) 式有

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq} \quad (1.22)$$

应该指出,放射性活度仅仅是指单位时间内原子核衰变的数目,而不是指在衰变过程中放射出的粒子数目。有些原子核在发生一次衰变时可能放出多个粒子。例如放射源 $^{137}_{55}\text{Cs}$,在某一个时间间隔内有100个原子核发生衰变,但放出的粒子数却不止100个。其中放出最大能量为1.17 MeV的电子有6个,放出最大能量为0.512 MeV的电子有94个,并伴随94个能量为0.662 MeV的光子,因此总共放出194个粒子。

在实际工作中除放射性活度外,还经常用到“比放射性活度”或“比活度”的概念。比放射性活度就是单位质量放射源的放射性活度,即

$$a = \frac{A}{m} \quad (1.23)$$

式中, m 为放射源的质量,比放射性活度的单位为 $\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ 或 $\text{Ci} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

衡量一个放射源或放射性样品的放射性强弱的物理量,除放射性活度外,还常用“衰变率”这一概念。设 t 时刻放射样品中,某一放射性核素的原子核数为 $N(t)$,该放射性核素的衰变常数为 λ ,我们把这个放射源在单位时间内发生衰变的核的数目称为衰变率 $J(t)$,则

$$J(t) = \lambda N(t) \quad (1.24)$$

可见,放射性活度和衰变率具有相同的物理意义和相同的单位,是同一物理量的两种表述。前者多用于给出放射源或放射性样品的放射性活度,而后者则常作为描述衰变过程的物理量。

4. 放射性同位素的特性

已知的放射性同位素的半衰期有很宽的分布范围,从零点儿毫秒到几十亿年不等,没有两种放射性同位素具有完全相等的半衰期。因此可以把放射性同位素的半衰期看作是“指纹”,根据它可以辨认出放射性同位素。做到这一点的办法是:测定放射性强度随时间的变化,算出衰变常数 λ ,再由 λ 值算出半衰期 $T_{1/2}$,根据半衰期就能辨认出是哪一种同位素。

放射性同位素的衰变规律可以在很多领域得到应用,例如在考古工作中广泛采用的碳-14测年法。其原理是:宇宙射线与空气中氮-14作用,产生碳-14。碳-14是放射性同位素,放出 β^- 射线,半衰期为5760年。碳-14进入空气中的二氧化碳里,被植物所吸收,经过食物链进入动物或人体。碳-14以一定的速率产生和衰变着。因此,所有活着的生物体内碳-14与非放射性碳的比值,与大气中的比值相同。但是当生物死亡之后,碳-14只有衰变减少但是得不到补充。而碳-14按其固有的规律一直在衰减,因此,通过测定碳-14的量,就可以推算出古生物的年龄。该方法能对过去数万年时间范围内的物体做出精确的年龄测定。例如,意大利都灵大教堂的圣殿上,在一个有防弹玻璃护罩的精致银盒里供奉着一件“神圣之物”,每50年才展示一次,这就是耶稣裹尸布。这块“裹尸布”经过碳-14测年法测定后,证明是公元1200年之后制的赝品,不是真正的耶稣裹尸布。这个神话也从此被揭穿了。

1.2.2 放射系

地球年龄约为10亿年(即 10^9 年)。经过了如此长的地质年代之后,半衰期比较短的核素都已衰变完了。目前还能存在于地球上的放射性核素只能维系在三个处于长期平衡状态的放射系中。这些放射系的第一个核素的半衰期都很长,和地球的年龄相近或更长。如钍系的 $^{232}_{90}\text{Th}$,半衰期为 1.41×10^{10} 年;铀系的 $^{238}_{92}\text{U}$,半衰期为 4.47×10^9 年;锕-铀系的 $^{235}_{92}\text{U}$,其