



注册核安全工程  
师岗位培训丛书

注册核安全工程师  
岗位培训丛书

# 核安全综合知识

HEANQUAN ZHUYANESHU (修订版)

《注册核安全工程师岗位培训丛书》编委会 编著

经济管理出版社

注册核安全工程师岗位培训丛书

# 核安全综合知识

## (修订版)

《注册核安全工程师岗位培训丛书》编委会 编著

经济管理出版社

## 图书在版编目 ( CIP ) 数据

注册核安全工程师岗位培训丛书/《注册核安全工程师岗位培训丛书》编委会编著. —北京: 经济管理出版社, 2013. 5

ISBN 978 - 7 - 5096 - 2476 - 0

I. ①注… II. ①注… III. ①核安全—安全工程师—岗位培训—教材 IV. ①TL7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 104866 号

## 核安全综合知识(修订版)

组稿编辑: 勇 生

责任编辑: 勇 生

技术编辑: 杨国强

责任校对: 陈 颖

出版发行: 经济管理出版社

(北京市海淀区北蜂窝 8 号中雅大厦 A 座 11 层 100038)

网 址: [www.E-mp.com.cn](http://www.E-mp.com.cn)

电 话: (010) 51915602

印 刷: 三河市延风印刷厂

经 销: 新华书店

开 本: 787mm × 1092mm/16

印 张: 22.25

字 数: 541 千字 (全套丛书 2438 千字)

版 次: 2013 年 5 月第 1 版 2013 年 5 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978 - 7 - 5096 - 2476 - 0

定 价: 350.00 元 (全套共 4 册)

• 版权所有 翻印必究 •

凡购本社图书, 如有印装错误, 由本社读者服务部负责调换。

联系地址: 北京阜外月坛北小街 2 号

电话: (010) 68022974 邮编: 100836

## 《注册核安全工程师岗位培训丛书（修订版）》编委会

主任委员：李宗明

副主任委员：梁士彪 张志刚 柴建设 陈金融 柴国早

委员：（以姓氏笔画为序）

卞洪兴 王青松 李洪训 许明霞 吴钟旺 张天祝

张健 罗上庚 周志伟 洪润生 施仲齐 赵亚民

顾洪坤 奚树人 潘英杰

## 修订版出版说明

《注册核安全工程师岗位培训丛书》自出版发行以来，深得专家、学者和广大读者的热情支持，在此表示感谢。随着我国核能与核技术利用领域的形势发展及注册核安全工程师培训任务的需要，结合本丛书几年来的应用实践，我们深感本丛书还存在许多不足之处，因此，组织了部分专家、学者对本丛书进行了修订，以趋日臻完善。

随着时代的发展，我国政府对核安全的重视程度在不断提高，国务院及其核安全监管部門陆续发布了一些核安全法规和部门规章。为了适应核安全管理的发展形势，修订组对《核安全相关法律法规》一书进行了调整，按照法律法规的层次体系编排内容，并补充了部分法律、法规和部门规章。

结合核安全管理工作的实际情况和需要，修订组对《核安全综合知识》、《核安全专业实务》两书进行了重新编排，充实和增加了部分章节，使其内容更具全面性、系统性。同时尽量避免艰深的理论，简化了理论推导，力求做到深入浅出，理论联系实际。

《核安全相关法律法规》由王青松负责修订。《核安全综合知识》和《核安全专业实务》由卞洪兴、顾洪坤、洪润生、李洪训、罗上庚、潘英杰、施仲齐、吴钟旺、奚树人、许明霞、张健、赵亚民、周志伟等负责修订。丛书修订的汇总协调工作由王青松完成，宋少良、王承智、李莉、邢丹、张波、王冠一、陈方强、张振华、李筠斐等参与了丛书有关章节的校核工作。

虽经反复斟酌和努力，但由于时间紧迫和水平所限，《注册核安全工程师岗位培训丛书（修订版）》仍难免存在一些不足之处，敬请广大读者指正。

编者

2013年2月25日

# 前 言

我国对核能与核技术的开发利用始于 20 世纪 50 年代。经过多年的不懈努力，核能与核技术已在我国国防、医疗、能源、工业、农业、科研、教育等领域得到了广泛利用，这对维护我国国防安全，促进国民经济和社会发展，增强我国的综合国力，起到了十分积极的作用。但是，核能与核技术开发利用过程中的安全问题和放射性污染防治问题，也越来越突出，主要表现在：一是我国已有多座核设施，有些核设施已进入退役阶段，如果监管不严或处置不当，其遗留的放射性物质将对环境和公众健康构成威胁；现正在运行的核设施，也存在着潜在危险，一旦发生泄漏或者因发生安全事故产生放射性污染，将危及周边广大范围内的生态环境安全和公众健康。二是我国现有放射源近十万枚，由于用户多而分散、部分单位管理不善等原因，近年来因放射源使用不当或丢失导致的放射性污染事故不断发生，造成严重后果。三是在铀（钍）矿和伴生放射性矿开发利用过程中，由于对放射性污染防治重视不够，缺乏对放射性污染防治的专项管理制度，乱堆、乱放放射性废矿渣的情况时有发生，由此造成的放射性污染事故威胁着环境安全和公众健康。四是我国已产生了不少放射性废物，虽然国家有放射性废物处置政策，但是由于缺乏强制性的法律制度和措施，致使对放射性废物的处置监管不力，在一定程度上对环境和公众健康构成了威胁。为了解决上述问题，进一步做好放射性污染防治工作，在总结我国放射性污染防治的实践经验、借鉴一些有核国家防治放射性污染的成功经验的基础上，全国人大常委会于 2003 年 6 月 28 日通过了《中华人民共和国放射性污染防治法》，对我国核安全的统一监管起到了巨大作用。

为了提高核安全专业技术人员素质，确保核与辐射环境安全，维护国家、社会和公众利益，根据《中华人民共和国环境保护法》和《中华人民共和国民用核设施安全监督管理条例》的有关规定，人事部、国家环境保护总局于 2002 年 11 月 19 日颁布了关于印发《注册核安全工程师执业资格制度暂行规定》的通知（人发〔2002〕106 号），决定在核安全及相关领域中建立注册核安全工程师执业资格制度。根据《注册核安全工程师执业资格制度暂行规定》，注册核安全工程师执业资格考试科目为《核安全相关法律法规》、《核安全综合知识》、《核安全专业实务》和《核安全案例分析》。

为了方便考生复习和准备考试，本丛书编写委员会依据《全国注册核安全工程师执业资格考试大纲》的具体要求编写了此书，供广大专业人员培训或自学使用。本丛书共有四个分册，包括《核安全相关法律法规》、《核安全综合知识》、《核安全专业实务》和《核安全案例分析》。在本丛书编写过程中，虽经反复斟酌和努力，但由于时间紧迫和水平所限，难免存在不足之处，诚望广大读者提出宝贵意见，以便再版时修改完善。

# 目 录

第一章 原子核物理基础	1
引 言	1
第一节 原子和原子核的基本性质	1
第二节 原子核的放射性	6
第三节 核辐射射线及其与物质相互作用	10
第四节 原子核反应	17
第二章 核反应堆工程基础	21
引 言	21
第一节 核裂变及核能的利用	21
第二节 核反应堆的基本工作原理	25
第三节 反应性与反应性的控制	38
第四节 核反应堆内的释热与传热	44
第三章 核反应堆与核动力厂	56
引 言	56
第一节 核反应堆的主要类型	56
第二节 压水堆核电厂	59
第三节 核动力厂使用的其他核反应堆堆型	79
第四节 新型压水反应堆	104
第五节 研究堆	123
第六节 反应堆及核动力装置的功率控制	140
第七节 核反应堆保护系统	147
第四章 民用核安全设备基础知识	152
引 言	152
第一节 民用核安全设备的特殊性	152
第二节 民用核安全设备的核安全分级要求	153
第三节 民用核安全设备标准规范	155
第四节 民用核安全设备常用金属结构材料	157
第五节 主要民用核安全设备举例	165

<b>第五章 核燃料循环设施</b> .....	182
引 言.....	182
第一节 铀矿地质勘探.....	184
第二节 铀矿开采.....	185
第三节 铀的提取和精制（纯化）.....	188
第四节 铀化合物的转化.....	195
第五节 铀浓缩.....	202
第六节 燃料组件制造.....	208
第七节 乏燃料及其后处理.....	212
<b>第六章 核技术利用基础知识</b> .....	223
第一节 辐射源.....	223
第二节 常用的放射源和放射性同位素.....	231
第三节 核反应堆和加速器生产放射性同位素.....	238
第四节 放射性同位素的应用.....	241
第五节 射线装置的应用.....	250
第六节 国内外核技术利用的发展状况.....	255
<b>第七章 辐射防护基础</b> .....	257
引 言.....	257
第一节 辐射防护的目的与任务.....	257
第二节 辐射源种类、来源与水平.....	258
第三节 辐射照射的分类.....	264
第四节 电离辐射的生物效应.....	267
第五节 辐射防护中使用的量及其单位.....	274
第六节 实践与干预.....	280
第七节 辐射防护的基本原则.....	284
第八节 辐射防护剂量限值.....	285
第九节 外照射防护与内照射防护的基本方法和技术.....	291
第十节 辐射防护监测.....	299
第十一节 辐射防护大纲.....	308
<b>第八章 IAEA 提出的核基本安全原则</b> .....	311
第一节 基本安全原则的提出.....	311
第二节 基本安全原则的适用范围.....	312
第三节 安全目标.....	313
第四节 基本安全原则.....	313

---

第九章 核安全文化	320
第一节 核安全文化概述	320
第二节 组织核安全文化的建设	324
第三节 IAEA 对单位核安全文化的评价方法	330
第四节 推进核安全文化建设的良好实践	335

# 第一章 原子核物理基础

## 引言

在 1895 年、1896 年和 1897 年，X 射线、放射性和电子相继被发现，这三大发现揭开了近代物理的序幕，物质结构的研究开始进入微观领域。其中，1896 年法国科学家贝克勒尔（Becquerel A. H.）发现的天然放射性现象是人类第一次观察到核变化的情况，通常人们把这一重大发现看成是原子核物理的开端。20 世纪 50 年代，逐步形成了研究物质结构的三个分支学科，即原子物理、原子核物理和粒子物理，这三者各有独立的研究领域和对象，但又紧密关联。本章重点论述原子核物理这一领域。

随着核能和核技术应用的发展，它们给人类带来巨大收益的同时，也给人类的生存和发展带来一定的负面影响，同时放射性及由此产生的各种辐射也成为人们关注的问题。为趋利避害，使核能和核技术更好地为人类服务，核安全便成为一个独立的学科而存在。核安全涉及的知识领域十分广泛，其中，对原子、原子核的基本性质的了解，对核衰变、核反应和核裂变的了解，是其重要的一个方面。因此，在本章中，首先介绍有关原子核物理的基础知识。

## 第一节 原子和原子核的基本性质

世界万物都是由原子和分子构成的，每一种原子对应一种化学元素。例如，氢原子对应氢元素，氧原子对应氧元素。到目前为止，包括人工制造的不稳定元素在内，人们已经知道了 100 多种元素。

1911 年卢瑟福（Rutherford R. C.）根据  $\alpha$  粒子的散射实验提出了原子的核式模型的假设，即原子是由原子核和核外电子组成。从此以后，原子就被分成两部分来处理：核外电子的运动构成了原子物理学的主要内容，而原子核则成了另一门学科——原子核物理学的主要研究对象。原子和原子核是物质结构互相关联又泾渭分明的两个层次。

电子是由英国科学家汤姆逊（Thomson J. J.）于 1897 年发现的，也是人类发现的第一个微观粒子。电子带负电荷，电子电荷的值为

$$e = 1.602\ 177\ 33 \times 10^{-19} \text{ C}$$

电荷是量子化的，即任何电荷只能是  $e$  的整数倍。电子的质量为

$$m_e = 9.109\ 389\ 7 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

原子核带正电荷，原子核的电荷集中了原子的全部正电荷。

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，原子可以设想为电子以原子核为中心的、在距核一定距离的若干轨道上运行的粒子。原子的大小即半径约为  $10^{-8} \text{ cm}$  的量级。以铝原子为例，其半径约为  $1.6 \times 10^{-8} \text{ cm}$ ，铝金属的密度  $\rho = 2.7 \text{ g/cm}^3$ 。

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  $10^8 \text{ t/cm}^3$ 。物质的许多化学及物理性质、光谱特性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。

对于原子，我们这里仅讨论其壳层结构；对原子核将讨论其一般性质，即原子核作为整体所具有的静态性质。其中本节着重讨论的是原子核的组成、电荷、质量、半径、稳定性等性质，对原子核自旋、磁矩、宇称和统计性质等较深入的问题不在此处展开讨论。如在今后的工作中遇到这些问题，一般的核物理书籍均有论述。

## 一、原子的壳层结构

根据原子的核式模型，原子由原子核和核外电子组成。对于原子核的组成将在下面讨论。原子核核外电子又常称为轨道电子，即把电子看成沿一定的轨道运动，这不过是一种近似的模型，但它能很好地解释元素周期表及一系列光谱的特性。实际上，电子在核外各轨道呈一定的概率分布，只是在一定的“轨道”上的概率分布较大而已。

原子的轨道电子离核的距离不能取任意值，这也是微观世界量子特性的一种表现。电子轨道按照一定的规律形成彼此分离的壳层。

最靠近核的一个壳层称为 K 层，在它外面依次为 L 壳层、M 壳层、N 壳层、O 壳层等，依次类推。通常用量子数  $n$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) 代表壳层，并分别对应 K 壳层，L 壳层，M 壳层，……壳层。每个壳层最多可容纳  $2n^2$  个电子，以 K 壳层而言，最多可容纳 2 个电子；L 壳层最多可容纳 8 个电子；M 壳层为 18 个电子，……除了 K 壳层外的其他壳层又可分成若干个支壳层。支壳层的数目等于  $(2l + 1)$  个，其中  $l = n - 1$ ， $l$  也是描述电子轨道的量子数。这样，对 L 壳层， $l = n - 1 = 1$ ，就有三个支壳层；M 壳层、N 壳层就分别有 5 个和 7 个支壳层等。通常用壳层符号及其右下标的罗马数字来表示支壳层。例如， $L_I$  表示 L 壳层的第一个支壳层， $M_{II}$  表示 M 壳层的第二个支壳层，并分别称为  $L_I$  壳层和  $M_{II}$  壳层。

处于不同壳层的电子具有不同的位能，通常用能级图来表示其大小。由于原子核带正电，电子带负电，当电子由无穷远处移动到靠近原子核的位置时是电场力做功，K 壳层的能级最低，或者说负得最多。在 K 层以上，依次为  $L_I$ ， $L_{II}$ ， $L_{III}$ ， $M_I$ ， $M_{II}$ ……但在外壳层有些能级的顺序会出现一些例外。

能级的能量大小就等于该壳层电子的结合能。要使该壳层电子脱离核的束缚成为自由电子就需外界做功。结合能是负值，通常以 keV 为单位，K 壳层电子的结合能的绝对值

最大。

图 1-1 是原子能级的一个典型例子，从图中可以看到相应的 K, L, M……能级及其支能级。用三个量子数  $n$ 、 $l$ 、 $j$  来描述不同的能级。见图 1-1 的右侧其中  $n$ 、 $l$  是与电子轨道运动相关的量子数， $n=1, 2, 3, \dots$ ， $l$  的取值范围为  $l=0, 1, 2, \dots, (n-1)$ ， $j$  是与电子的自旋运动相关的量子数， $j$  与  $l$  的关系是  $j = |l \pm 1/2|$ 。量子数  $n$ 、 $l$ 、 $j$  的不同组合可以用来区别不同的支壳层。例如 M 壳层， $n=3$ ， $l$  的取值可以是 0、1 和 2：在  $l=0$  时， $j$  只能为  $1/2$ ；在  $l=1$  时， $j$  可以是  $1/2$  和  $3/2$ ；在  $l=2$  时， $j$  可以是  $3/2$  和  $5/2$ 。因此，M 壳层共有 5 个支壳层。每个支壳层最多可容纳  $(2j+1)$  个电子。

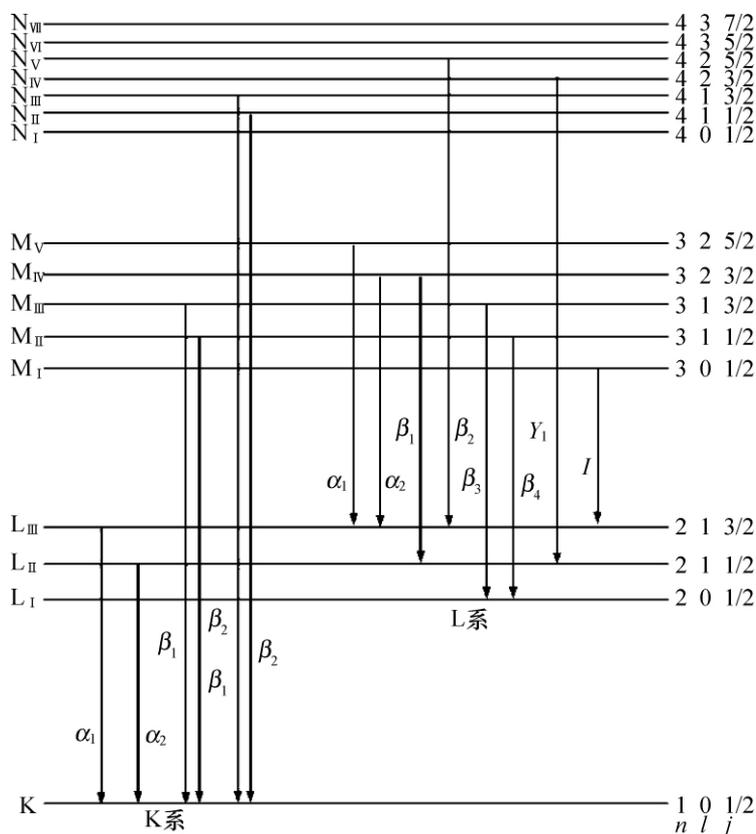


图 1-1 原子能级图和主要的 K 系和 L 系特征 X 射线

在正常状态下，电子先充满较低的能级，但当原子受到内在原因或外来因素的作用时，处在低能级的电子有可能被激发到较高的能级上（称为激发过程）或电子被电离到原子的壳层之外（称为电离过程）。在这种情况下，在原来的低能级上会留下一个空位，更高能级上的电子就跃迁到这个空位，相应放出两个能级之差的能量。一般这部分能量主要是以电磁辐射的形式释放一个光子。不同的元素的原子均有不同、特定的能量，通常称作特征 X 射线。

## 二、原子核及其稳定性

1896年贝克勒尔 (Becquerel A. H.) 发现了铀的放射现象, 这是人类第一次在实验室里观察到原子核现象。在实验中, 他发现用黑纸包得很好的铀盐仍可以使照相底片感光, 实验结果说明铀盐可以放射出能透过黑纸的射线。通常人们把这一重大发现看成是核物理学的开端。随后, 1897年居里夫妇 (Curie P. & Curie M.) 发现放射性元素钋和镭。1903年, 卢瑟福证实了 $\alpha$ 射线是正电荷的氦原子核,  $\beta$ 射线是电子, 进而于1911年提出原子的核式模型。1932年查德威克 (Chadwick J.) 发现中子, 海森堡 (Heisenberg W.) 随之在同年提出原子核由质子和中子组成的假设。

### 1. 原子核的组成及其表示方法

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, 把原子核假定是由质子和电子组成。

在查德威克 (Chadwick J.) 发现中子之后, 海森堡 (Heisenberg W.) 很快就提出原子核由质子和中子所组成的假说。这一假说得到了一系列的实验事实支持。

中子为中性粒子, 质子为带有单位正电荷的粒子。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由符号 ${}^A_Z X_N$ 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。核素符号 $X$ 与质子数 $Z$ 具有唯一、确定的关系, 例如, ${}^4_2\text{He}$ 、 ${}^{16}_8\text{O}$ 、 ${}^{238}_{92}\text{U}$ 等。实际上, 只要将原子核简写为 ${}^A_Z X$ 已足以代表一个特定的核素, 左下标 $Z$ 往往可以省略。 $Z$ 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上相同, 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, 且它们的化学性质及一般物理性质几乎完全相同; 但是, 它们是两个完全不同的核素, 具有完全不同的核性质。

以下先介绍表示原子核的一些常用术语。

#### (1) 核素 (nuclide)

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, ${}^{208}_{86}\text{Ti}$ 和 ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ 是独立的两种核素, 它们有相同的质量数但原子核内含有不同的质子数; ${}^{90}_{38}\text{Sr}$ 和 ${}^{91}_{39}\text{Y}$ 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; ${}^{60}_{27}\text{Co}$ 和 ${}^{60\text{m}}_{27}\text{Co}$ 是独立的两种核素, 它们的原子核内含有相同的质子数和中子数, 但核所处的能态是不同的。

#### (2) 同位素 (isotopes) 和同位素丰度

具有相同原子序数但质量数不同的核素称为某元素的同位素。同位是指该同位素的各核素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, 氢同位素有三种核素: ${}^1\text{H}$ 、 ${}^2\text{H}$ 、 ${}^3\text{H}$ , 分别取名为氢、氘、氚。某些元素, 例如锰、铍、氟、铝等在天然条件下, 只存在一种核素, 只能称为单一核素而不能说它们只有一种同位素。某元素中各同位素天然含量的原子数百分比称为同位素丰度。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%。

## 2. 原子核的稳定性

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着密切的关系。

天然存在的核素可分为两大类:一类是稳定的核素,例如 ${}^{40}_{20}\text{Ca}$ 、 ${}^{209}_{83}\text{Bi}$ 等,其中自然存在的稳定核素约有280个;另一类是不稳定的核素,是指原子核会自发地转变成另一种原子核或另一种状态并伴随一些粒子或碎片的发射的核素,又称为放射性原子核,例如, ${}^{210}_{80}\text{Po}$ (发射 $\alpha$ 粒子)、 ${}^{222}_{88}\text{Ra}$ (发射 $\alpha$ 粒子、 $\beta$ 粒子)、 ${}^{198}_{79}\text{Au}$ (发射 $\beta$ 粒子)。

## 3. 质能联系定律

质量和能量是物质同时具有的两个属性,任何具有一定质量的物体必须与一定的能量相关联。质量和能量的相互关系为

$$E = mc^2, \text{ 或 } m = \frac{E}{c^2}$$

其中,物体的能量 $E$ 以J为单位,物体的质量 $m$ 以kg为单位,在真空中的光速 $c = 2.997\,924\,58 \times 10^8 \text{ m/s} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

## 4. 比结合能

原子核由中子和质子所组成,那么,原子核的质量似乎应该等于核内中子和质子的质量之和,但实际情况却并非如此。以最简单的例子——氘核为例,氘是氢的同位素,氘( ${}^2\text{H}$ )由一个中子和一个质子组成,但氘核的质量小于组成它的质子和中子质量之和。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 $\Delta m(Z, A)$

$$\Delta m(Z, A) = Zm_p + (A - Z)m_n - m(Z, A)$$

式中, $m(Z, A)$ 为电荷数为 $Z$ 、质量数为 $A$ 的原子核的核质量。

既然原子核的质量亏损 $\Delta m > 0$ ,由质能关系式,相应减少的能量就是 $\Delta E = \Delta mc^2$ 。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

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

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

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

比结合能 $\varepsilon$ 的单位是MeV/Nu, Nu代表核子。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, $\varepsilon$ 表征了原子核结合的松紧程度, $\varepsilon$ 大则核结合紧,稳定性高; $\varepsilon$ 小则核结合松,稳定性差。

图1-2是将核素的比结合能对质量数作图得到的比结合能曲线。从图1-2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(约8MeV),然后又缓慢地变小。曲线两头低、中间高,说明中等质量的核素的 $B/A$ 比轻核、重核都大。

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到结合得紧的核时，就会释放能量。从图 1-2 可以看出，有两个途径可以获得能量：一是重核裂变，即一个重核分裂成两个中等质量的核；二是轻核聚变。人们依靠重核裂变的原理制造出原子反应堆与原子弹，依靠轻核聚变的原理制造出氢弹和进行正在探索的可控聚变反应。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。

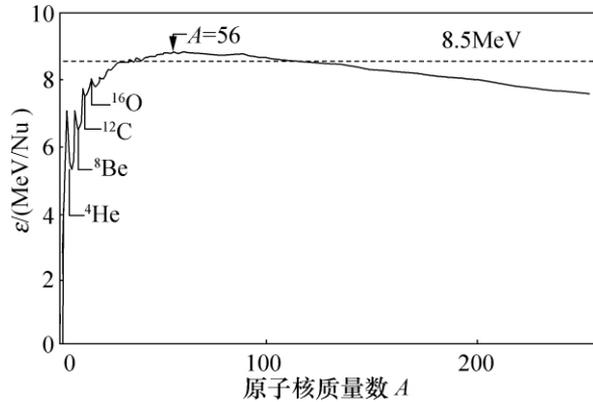


图 1-2 比结合能曲线

从图 1-2 还可见，当  $A < 30$  时，曲线在趋势上升的同时有明显的起伏。为此，在  $A \leq 25$  的范围加大了坐标的单位。图中峰的位置都位于  $A$  为 4 的整数倍的地方，如  ${}^4\text{He}$ 、 ${}^{12}\text{C}$ 、 ${}^{16}\text{O}$ 、 ${}^{20}\text{Ne}$  和  ${}^{24}\text{Mg}$  等偶偶核，并且有  $N = Z$ ，这表明对于轻核可能存在  $\alpha$  粒子的集团结构。

## 第二节 原子核的放射性

如前所述，已经发现的天然存在的和人工生产的核素约有 2 600 个，其中天然存在的核素约有 332 个，其余皆为人工制造的。

### 一、放射性衰变的基本规律

不稳定的原子核会自发地发生衰变，放射出  $\alpha$  粒子、 $\beta$  粒子和  $\gamma$  光子等。本节讨论原子核放射性衰变的基本规律。

当同一类核素的许多放射性原子核放在一起时，我们不能预测某个原子核在哪个时刻将发生衰变。实际上，衰变是一个统计的过程，大量全同的放射性原子核会先后发生衰变，总的效果是随着时间的流逝，放射源中的原子核数目按一定的规律减少。在此我们将讨论单一放射性的衰变规律。

### 1. 单一放射性的指数衰减规律

以 $^{222}_{86}\text{Rn}$  (常称氡射气) 的 $\alpha$ 衰变为例, 把一定量的氡射气单独存放, 实验发现, 在大约 4 d 之后氡射气的数量减少一半, 经过 8 d 减少到原来的 1/4, 经过 12 d 减到 1/8, 一个月后就不到原来的 1/100 了, 衰变情况如图 1-3 (a) 所示。以氡射气的数量的自然对数为纵坐标, 以时间为横坐标作图 1-3 (b), 则可得到线性方程

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

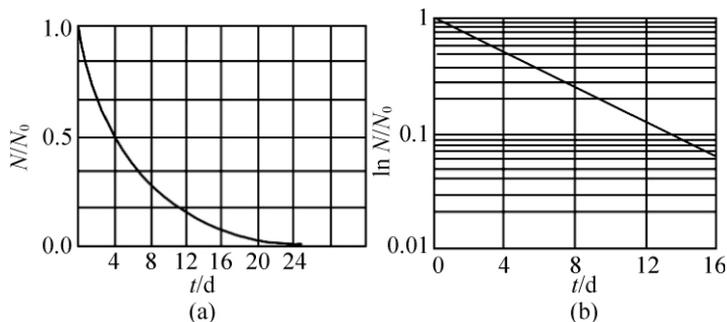


图 1-3  $^{222}\text{Rn}$  的衰变规律图

其中  $N(0)$  和  $N(t)$  是时间  $t=0$  和  $t=t$  时刻 $^{222}_{86}\text{Rn}$  的核数;  $-\lambda$  为直线的斜率, 是一个常数。将上式化为指数形式, 则得

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

可知氡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。指数衰减规律不仅适用于单一放射性衰变, 如 $\alpha$ 衰变、 $\beta$ 衰变、 $\gamma$ 衰变 (或跃迁), 而且对于同时存在分支衰变的衰变过程也是适用的, 这是一个普遍的规律。但是对各种不同的核素来说, 它们衰变的快慢又各异, 这体现在它们的衰变常数  $\lambda$  (或半衰期  $T_{1/2}$ , 平均寿命  $\tau$ ) 各不相同, 所以衰变常数又反映了它们的个性。

应该指出, 放射性指数衰减规律是一种统计规律, 它是由大量的全同原子核参与衰变得到的。对于单个原子核的衰变, 只能说它具有一定的衰变概率  $\lambda$ , 而不能确切地确定它何时发生衰变。

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不能改变指数衰减规律, 也不能改变其衰变常数  $\lambda$ 。这表明放射性衰变是由原子核内部运动规律所决定的。

### 2. 衰变常数、半衰期和平均寿命

在放射性指数衰减公式中的比例常数  $\lambda$  称为衰变常数。由上式微分得

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

式中  $-dN$  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  $\lambda$ 。因此,  $\lambda$  可写为

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

显然，式中的分子  $-dN(t)/N(t)$  表示一个原子核的衰变概率。可知  $\lambda$  是单位时间内一个原子核发生衰变的概率，其单位为时间的倒数，如  $s^{-1}$ 、 $\text{min}^{-1}$ 、 $\text{h}^{-1}$ 、 $\text{d}^{-1}$ 、 $\text{a}^{-1}$  等。衰变常数表征该放射性核素衰变的快慢， $\lambda$  越大，衰变越快； $\lambda$  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  $\lambda$  的大小与这种核素如何形成的或何时形成的都无关。

除了  $\lambda$  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，叫做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

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

用指数衰减律公式代入，可得

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda \approx 0.693 / \lambda$$

由此可见， $T_{1/2}$  与  $\lambda$  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。上式也说明半衰期  $T_{1/2}$  与何时作为时间起点是无关系的，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是一样的。

还可以用平均寿命  $\tau$  来量度衰变的快慢， $\tau$  简称寿命。任一核的平均寿命  $\tau$  为

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

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

$$\tau = \frac{T_{1/2}}{0.693} = 1.44 T_{1/2}$$

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，即得

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

可见，放射性核素的平均寿命  $\tau$  表示经过时间  $\tau$  以后，剩下的核素数目约为原来的 37%。

### 3. 放射性的活度和单位

一个放射源的强弱不仅取决于放射性原子核的数量的多少，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  $N(t)$  个放射性原子核，放射源核素的衰变常数为  $\lambda$ ，则这个放射源的放射性活度为

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

代入  $N(t)$  的指数规律，得到

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

即

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

这里  $A_0 = \lambda N_0$  是放射源的初始放射性活度。由上式可见，一个放射源的放射性活度也应随时间增加而指数地衰减。