

注册核安全工程师  
岗位培训丛书

# 核安全

(修订版)

## 综合知识

《注册核安全工程师岗位培训丛书》编委会  
编著

中国环境科学出版社

HE ANQUAN

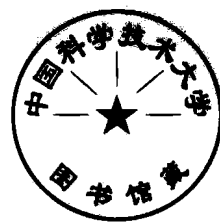
ZONGHIE ZHISHI

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



中国环境科学出版社·北京

## 图书在版编目(CIP)数据

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. —修订版. —北京: 中国环境科学出版社, 2009.3  
(注册核安全工程师岗位培训丛书)  
ISBN 978-7-80209-904-3

I. 核… II. 注… III. 核工程—安全技术—工程  
技术人员—技术培训—教材 IV. TL7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 209220 号

责任编辑 沈建 刘大澍  
封面设计 龙文视觉

---

出版发行 中国环境科学出版社  
(100062 北京崇文区广渠门内大街 16 号)  
网 址: <http://www.cesp.cn>  
联系电话: 010-67112765 (总编室)  
发行热线: 010-67125803

印 刷 北京市联华印刷厂  
经 销 各地新华书店  
版 次 2004 年 10 月第 1 版 2009 年 3 月修订版  
印 次 2009 年 3 月第 3 次印刷  
印 数 6001-8000  
开 本 787×1092 1/16  
印 张 18.5  
字 数 460 千字  
定 价 总价 185.00 元(全套丛书共 4 册)

---

【版权所有。未经许可请勿翻印、转载, 侵权必究】  
如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

## 《注册核安全工程师岗位培训丛书》编委会

主任委员：陈金元

副主任委员：汤 搏

委 员：（以姓氏笔画为序）

马校正	卞洪兴	王秀清	王青松	王瑞平	池雪丰	宋福祥
陈伯显	杨孟琢	张 健	罗上庚	郁祖盛	郑继师	洪润生
俞尔俊	赵亚民	顾洪坤	桂立明	贾宝山	常向东	商照荣
蒋云清	熊本和	嵇凤官	潘英杰			

## 修订版说明

《注册核安全工程师岗位培训丛书》自出版发行几年以来，得到了广大专家、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，我们深感到这套丛书还存在许多不足之处，因此，《注册核安全工程师岗位培训丛书》编委会又组织了部分专家、学者对本丛书进行了修订，以趋日臻完善。

本丛书修订工作是在编委会陈金元主任主持下进行的。《核安全相关法律法规》由杨孟琢、张天祝、王青松负责修订。《核安全综合知识》由洪润生、范深根、许明霞、潘英杰、罗上庚、卞洪兴、陈竹舟、桂立明、赵亚民、施仲齐、杨孟琢负责修订。《核安全专业实务》由潘英杰、许明霞、范深根、罗上庚、张宝钢、施仲齐负责修订。《核安全案例分析》由杨孟琢负责修订。全套丛书修订的汇总协调工作由杨孟琢完成。中国环境科学出版社沈建主任、刘大澍编辑担任了修订版丛书的责任编辑工作。

虽然经过反复斟酌和努力，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。

编委会

2008年12月15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、科研等领域得到广泛利用，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，有些核设施已经进入退役阶段，如果监管不严或者处置不当，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五万多枚，由于用户多而分散，有的单位管理不善等原因，近年来因放射源使用不当或者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的作用。

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国家环境保护总局组织制定、人事部审定的《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。

本套丛书共有四册，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》。

《核安全综合知识》第一章由陈伯显编写；第二章由顾洪坤、蒋云清、潘英杰、池雪丰、罗上庚、贾宝山、熊本和编写；第三章由桂立明编写；第四章由赵亚民编写；第

五章由熊本和编写；第六章由杨孟琢、商照荣编写。

本书编写完成后，由《注册核安全工程师岗位培训丛书》编写委员会组织了多位专家、学者对全书进行了审定和统稿，在此表示谢意。

在本书编写过程中，虽然经过反复斟酌和修改，但由于时间紧迫，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

<b>第一章 原子核物理基础</b> .....	1
考试要求 .....	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 .....	10
第三节 射线及其与物质相互作用 .....	17
第四节 原子核反应 .....	29
第五节 核裂变及核能的利用 .....	35
本章小结 .....	42
思考题 .....	42
<b>第二章 核能和核技术应用</b> .....	44
考试要求 .....	44
引 言 .....	44
第一节 辐射源种类 .....	45
第二节 反应堆和加速器生产放射性同位素基本知识 .....	53
第三节 放射性同位素在医学、工业、农业、食品加工等行业的应用 .....	56
第四节 放射性同位素应用中的辐射安全问题 .....	66
第五节 射线装置在医学、工业、农业等行业的应用 .....	70
第六节 射线装置应用中的辐射安全问题 .....	76
第七节 核燃料循环设施 .....	84
第八节 核动力厂和其他反应堆 .....	113
第九节 核动力厂和其他反应堆的安全问题 .....	134
本章小结 .....	148
思考题 .....	148
<b>第三章 辐射防护</b> .....	150
考试要求 .....	150
引 言 .....	150
第一节 辐射防护的概念、目的与任务 .....	151
第二节 电离辐射对人类和环境的影响 .....	152
第三节 辐射照射的类别 .....	158



第四节	电离辐射对人体的作用 .....	160
第五节	辐射剂量与辐射防护中常用量及其单位.....	167
第六节	实践与干预 .....	172
第七节	辐射防护的基本原则 .....	176
第八节	辐射防护标准及其安全评价.....	178
第九节	外照射防护与内照射防护的基本方法.....	183
第十节	辐射防护监测 .....	187
第十一节	辐射防护大纲 .....	192
第十二节	应急准备的基本要求 .....	194
	本章小结 .....	196
	思考题 .....	196
<b>第四章</b>	<b>流出物和环境放射性监测 .....</b>	<b>197</b>
	考试要求 .....	197
	引 言 .....	197
	第一节 环境放射性本底调查 .....	198
	第二节 天然放射性的来源与水平.....	199
	第三节 人工放射性核素的来源及水平.....	202
	第四节 控制流出物排放的原则 .....	211
	第五节 环境放射性监测 .....	215
	第六节 放射性核素在环境中迁移和蓄积.....	224
	第七节 人为活动对环境辐射水平的影响.....	226
	本章小结 .....	232
	思考题 .....	232
<b>第五章</b>	<b>核与辐射安全的概念 .....</b>	<b>234</b>
	考试要求 .....	234
	引 言 .....	234
	第一节 核安全的历史发展 .....	235
	第二节 核与辐射安全的基本原则.....	236
	第三节 纵深防御 .....	239
	第四节 核安全的基本技术原则 .....	243
	第五节 质量保证 .....	248
	第六节 安全目标 .....	251
	第七节 风险分析 .....	253
	本章小结 .....	257
	思考题 .....	258

---

第六章 安全文化 .....	259
考试要求 .....	259
引 言 .....	259
第一节 安全文化概述 .....	259
第二节 安全文化的组成部分 .....	262
第三节 核安全文化的发展阶段及弱化识别 .....	266
第四节 安全文化的评价方法 .....	269
第五节 培育安全文化的良好实践 .....	274
本章小结 .....	277
思考题 .....	278
参考文献 .....	279

# 第一章 原子核物理基础

## 考试要求

1. 熟悉原子结构的知识（原子、原子核、同位素）。
2. 熟悉放射性的概念、原子核衰变及其规律（核素图、半衰期、放射性活度的单位计算和测量）。
3. 熟悉射线（ $\alpha$ 射线、 $\beta$ 射线、 $\gamma$ 射线、X射线、中子等）及其与物质的相互作用。
4. 掌握核反应的类型。
5. 了解核裂变及裂变反应的知识。

## 引言

在 1895 年、1896 年和 1897 年，相继发现了 X 射线、放射性和电子，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）发现天然放射性现象，成为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，到 20 世纪 50 年代就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。三者各有独立的研究领域和对象，但又紧密关联。本书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，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的影响，放射性及由此产生的各种辐射也成为人们关注的一个问题。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《核安全综合知识》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

世界万物是由原子、分子构成，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，人们已经知道

了一百多种元素了。

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所组成。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的两个层次,但也是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,也是人类发现的一个微观粒子。电子带负电荷,电子电荷的值为

$$e = 1.60217733 \times 10^{-19} \text{ C}$$

且电荷是量子化的,即任何电荷只能是 $e$ 的整数倍。电子的质量为

$$m_e = 9.1093897 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

原子核带正电荷,原子核的电荷集中了原子的全部正电荷。

而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、在距核非常远的若干轨道上运行。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,我们这里仅讨论其原子的壳层结构。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,本节将着重讨论原子核的组成、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,把电子看成沿一定的轨道运动,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,但在一定的“轨道”上的概率分布较大而已。

原子的轨道电子离核的距离是不能取任意值的,这也是微观世界的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的支壳层。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, $L_1$

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。假如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。在图的右侧可见。用三个量子数  $n$ 、 $l$ 、 $j$  来描述不同的能级。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  $l=0, 1, 2, \dots, (n-1)$ 。而  $j$  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。

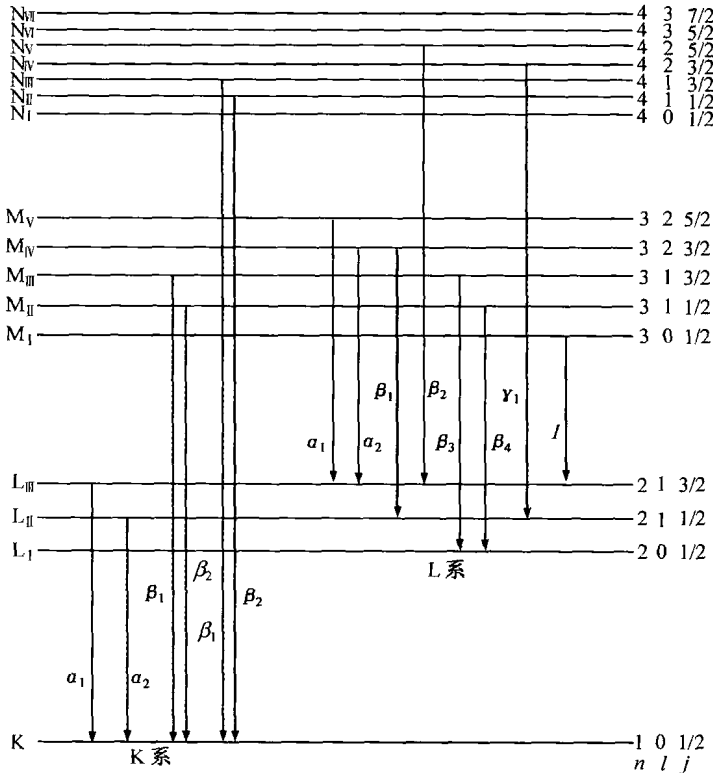


图 1-1 原子能级图和主要的 K 系和 L 系特征 X 射线

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，相应放出此两能级之差的能量，一般这部分能量主要以电磁辐射的形式释放一个光子。当发生内壳层电子跃迁（如 K 层出现一个空位，L 层电子跃迁到 K 层），此时光子能量较高，或者说其电磁辐射的频率比较高，而且，不同的元素的原子均有不同、特定的能量，所以，又通常称作特征 X 射线。其特征 X 射线的能量（或相应的波长）满足下面公式。

$$E_x = \frac{hc}{\lambda} = E_1 - E_2$$

上式中普朗克常数  $h=6.626\ 075\ 5\times 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s}$ ；光速  $c=2.997\ 925\times 10^{10}\text{ cm/s}$ ； $E_1$ 、 $E_2$  分别为跃迁前后的两个能级的能量。

特征 X 射线根据其产生的情况可以分为 K 系、L 系、M 系特征 X 射线，每系都含有若干能量不同的 X 射线。K 系特征 X 射线是由 K 壳层之外壳层的电子跃迁到 K 壳层空位时发射的特征 X 射线，主要的射线有  $K_{\alpha_1}$ 、 $K_{\alpha_2}$ 、 $K_{\beta_1}$ 、 $K_{\beta_2}$  等，称为 K 系特征 X 射线。同样还有 L 系、M 系，等等。

但需说明，并不是所有较高的能级的电子都可以向较低的能级跃迁，而需满足一定的选择定则，在这里就不展开讨论了。

## 二、原子核的组成及其稳定性

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。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。1911 年进而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）立刻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

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的想法就非常自然的，但从其一开始就遇到了不可克服的困难。

在查德威克发现中子之后，海森堡很快就提出原子核由质子和中子所组成的假说。上述困难就不再存在，而且有一系列的实验事实支持这一假说。

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  $^{12}\text{C}$  原子质量的 1/12 定义为原子质量单位，用 u 表示

$$\begin{aligned}
 1 \text{ u} &= 1.660\,540\,2 \pm 0.000\,001\,0 \times 10^{-27} \text{ kg} \\
 &= 1.660\,540\,2 \pm 0.000\,001\,0 \times 10^{-24} \text{ g} \\
 &= 931.494\,013 \text{ MeV}/c^2
 \end{aligned}$$

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  ${}^A_Z\text{X}_N$  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， ${}^4_2\text{He}$ 、 ${}^{16}_8\text{O}$ 、 ${}^{238}_{92}\text{U}$ ，等等。实际上，只要简写为  ${}^A\text{X}$ ，它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，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，它们的核性质完全不同。

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  ${}^{208}_{86}\text{Ti}$ 、 ${}^{208}_{82}\text{Pb}$  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； ${}^{90}_{38}\text{Sr}$ 、 ${}^{91}_{39}\text{Y}$  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，而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，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%。

### (3) 同质异能素 (isomers)

寿命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  $m$  表示，这种核素的原子核一般处于较高能态，例如  ${}^{87\text{m}}_{38}\text{Sr}$  称为  ${}^{87}_{38}\text{Sr}$  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。

## 2. 原子核的稳定性及核素图

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。

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所谓核素图上。核素图与元素周期表不同之处在于，除了电荷数（核内质子数） $Z$  外，还必须考虑中子数  $N$ 。这样，核素图就必须是含有  $N-Z$  的两维图。图 1-2 是核素图（部分），以  $N$  为横坐标、 $Z$  为纵坐标（也可以反过来表示），然后让每一核素

对号入座。图 1-2 中，每一格代表一个特定的核素。黑色或带有斜线条的核素为稳定核素，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 $\alpha$ 、 $\beta^-$ 、 $\beta^+$ 表示该核素的衰变方式，箭头指向为衰变后的子核，时间表示半衰期的值。

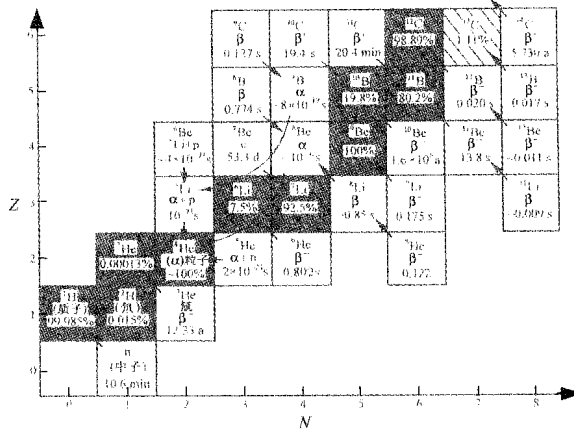


图 1-2 核素图（部分）

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。

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 $\beta$ 稳定核素分布图，如图 1-3 所示，图中横坐标为质子数  $Z$ ，纵坐标为 neutron 数  $N$ 。在图 1-3 中，在同一垂直线上（ $Z$  相同）的所有核素是同位素；在同一水平线上（ $N$  相同）的所有核素是同中子异荷素；在  $N$  轴和  $Z$  轴上截距相等的直线上（ $A$  相等）的所有核素是同量异位素。

由图 1-3 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 $\beta$ 稳定曲线。由图 1-3 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。在  $Z$  小于 20 时核素的  $N$  与  $Z$  之比约为 1， $Z$  为中等数值时约为 1.4， $Z$  等于 90 左右时约为 1.6。相对于稳定曲线而言，中子数过多或偏少的核素都是不稳定的。位于稳定线上方的核素为丰中子核素，易发生 $\beta^-$ 衰变。位于稳定线下方的核素为缺中子核素，易发生 $\beta^+$ 衰变。

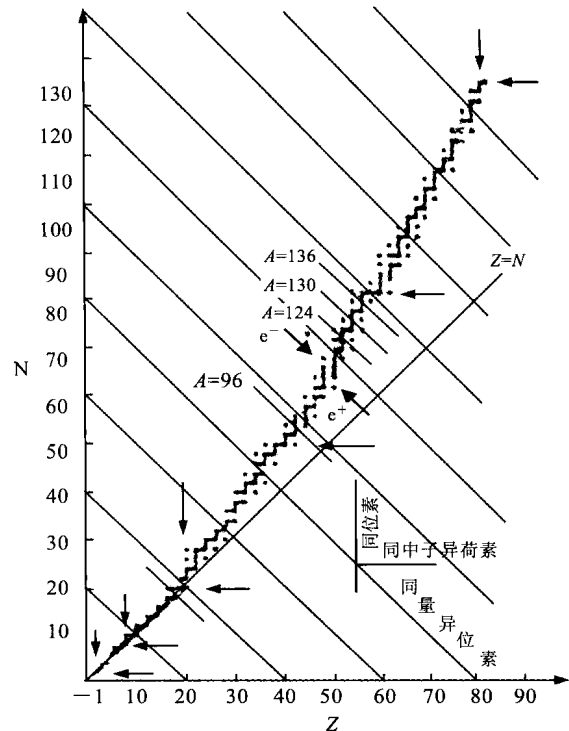


图 1-3  $\beta$  稳定核素分布图



由于库仑力是长程相互作用力，它能作用于核内的所有质子，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， $A$  也随之增加，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  $Z=A$  直线。不过，当  $Z$  大到一定程度，稳定核素就不复存在，稳定核素区慢慢就终止了。

在 1966 年左右，理论预告在远离  $\beta$  稳定曲线的  $Z=114$  附近，存在一个超重稳定元素“岛”。近 10 多年来，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，为验证这种理论提供了有效的工具。

原子核的稳定性还与核内质子数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。

根据核内质子数和中子数的奇偶性，可以看出：偶偶核是最稳定的，稳定核最多；其次是偶奇核和奇偶核；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均为 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”。

### 三、原子核的大小

一个原子的线度约为  $10^{-8}$  cm，根据卢瑟福用  $\alpha$  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。若想象原子核近似于球形，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，由于所用方法的不同，测出的原子核半径的意义也不相同，有核力半径和电荷分布半径之分。但无论如何，用各种方法测出的结果是相近的。

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  $\alpha$  粒子去轰击各种原子核。根据这一方法，发现轻原子核的半径遵从如下的规律

$$R = r_0 A^{1/3}, \quad r_0 = 1.20 \text{ fm}$$

其后，出现了许多其他更精确的测量方法。如用中子衍射截面测量原子核的大小（核力半径）；用高能电子散射测量原子核的大小及电荷形状因子（电荷分布半径），等等。并依据所采用的方法，分别给出电荷半径或核力半径。

总结以上的实验结果，原子核半径  $R$  与  $A^{1/3}$  成正比，而其比例常数  $r_0$  的最近数据为

$$R = (1.20 \pm 0.30) A^{1/3} \text{ fm} \quad (\text{电荷半径})$$

$$R = (1.40 \pm 0.10) A^{1/3} \text{ fm} \quad (\text{核力半径})$$

这时，原子核的密度——单位体积内的核子数为