

核反应堆工程

〔美〕 S. 格拉斯登 A. 塞桑斯基

原子能出版社

核反应堆工程

〔美〕 S. 格拉斯登 A. 塞桑斯基 著

原子能出版社

内 容 简 介

本书系统、全面地阐述了核反应堆工程领域内基本的科学和工程原理。

本书内容十分广泛。全书共十二章，分别介绍了核反应和核辐射、核反应堆中子学、核反应堆动力学和控制、载热、材料、辐射防护、环境效应、屏蔽、安全、以及各种动力堆系统。全书深入浅出，在适当之处还附有习题。叙述的重点放在核动力所特有的那些理论、设计和运行问题上。

本书适合于反应堆工程专业的教师、学生以及从事核动力工程的研究、设计、运行人员阅读使用，也很适合于参加核电厂工作的各类技术人员自修和培训的需要。

S. Glasstone & A. Sesonske

Nuclear Reactor Engineering

Third Edition

Van Nostrand Reinhold Company, 1981

核 反 应 堆 工 程

〔美〕 S. 格拉斯登 著
A. 塞桑斯基

吕应中 译
许汉铭
施建忠

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

昊海印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 787×1092 1/16 ·印张38.75·字数960千字

1986年6月北京第一版·1986年6月北京第一次印刷

印数 1—900·统一书号: 15175·690

定价: 7.95元

前 言

本书叙述核反应堆系统——特别是核电系统——的基础科学与工程原理，重点放在与裂变过程及其辐射有关的反应堆设计和运行方面，对那些并非核反应堆所独有的工程问题，仅在必要时附带提及。这种处理使本书能够作为大学教科书和工程师的参考书。

核反应堆系统的设计是一个很复杂的过程，它需要有各方面专家（包括中子学、热工水力学、控制、仪表、燃料、非燃料材料等方面专家）之间的密切合作。由于每个方面都与其他方面紧密相关，所以工程师们在从事某一特定领域的专业工作之前，需要对整个核反应堆工程全貌有一个广泛的通盘了解。本书的任务之一，在于提供这种全面的知识。

近年来，若干专业学会（包括美国核学会）在它们的出版物中已经采用国际单位制（通常称为SI）。由于这一原因，同时，也由于我们确信这种单位制在简化计算方面具有许多优点，所以本书全部采用SI单位。在本书的附录中给出了关于国际单位制的说明以及常用单位与SI单位之间的换算因子。

在本书的撰写过程中，我们得到了同仁们的巨大帮助，他们审阅了手稿的各个部分。作者向他们表示谢意，特别要感谢M.C.Edlund, O.H.Gailar, J.A.Horak, F.Kerze, Jr., H.J.C.Kouts, D.R.O'Boyle, T.H.Pigford, 以及D.K.Trubey等人对本书所作的贡献。我们也对Elizabeth G.Douglas女士在本书出版过程中所提供的帮助表示谢意。

作者还要感谢美国能源部的一些成员（或前成员），他们以各种方式帮助了我们，其中在行政事务方面有J.G.Gratton, 还有R.F.Pigeon；在插图工作方面有C.R.Bruce以及R.L.Connatser。

最后，愿对我们各自妻子的一贯帮助和鼓励表示感谢。

S. 格拉斯登

A. 塞桑斯基

目 录

前言

第一章 核裂变能

引言	1
核能基础	2
核裂变	10
核裂变反应堆	13
反应堆发展的历史	16
美国的动力反应堆	20

第二章 核反应和核辐射

引言	27
放射性	27
α 粒子和 β 粒子与物质的相互作用	34
γ 射线与物质的相互作用	39
中子与物质的相互作用	45
中子反应的截面	53
截面随中子能量的变化	61
裂变过程	68

第三章 中子的扩散和慢化

中子扩散理论	87
中子在倍增系统内的扩散	99
中子的慢化	105
无限介质内的慢化	111
慢化中子的空间分布	117
基于扩散理论的临界方程	121
临界测量	127

第四章 反应堆分析原理

多群扩散理论	132
燃料贫化计算	145
中子输运方程及其近似	148

第五章 核反应堆动力学和控制

反应堆动力学	155
裂变产物中毒	171
温度对反应性的影响	179
反应堆稳定性分析	186
反应堆控制的一般特征	201
反应堆运行的控制	212

第六章 能量的载出

引言	228
反应堆系统内的热源	232
传热原理	236
普通流体的传热	252
液态金属的传热	256
沸腾传热	263
堆芯水力学	267
热工-水力分析	276
堆芯设计的约束条件	281

第七章 反应堆材料(非燃料材料)

引言	294
材料的力学性质	294
应力分析	298
材料中的辐照效应	304
金属的腐蚀	312
结构材料与包壳材料	314
慢化剂与反射层材料	323

第八章 反应堆燃料系统

引言	332
反应堆燃料的生产	333
铀同位素的浓集	336
燃料材料性质	344
燃料模型程序	354
乏燃料的后处理	355
核燃料管理	366
核燃料利用	370
核能成本	381
核材料的安全保障	383

第九章 辐射防护和环境效应

引言	390
辐射危害	390
辐射单位	394
辐射防护标准	402
辐射的生物效应	408
放射性废物处理系统	412
辐射监测	420
热的排放	430

第十章 核反应堆屏蔽

反应堆屏蔽原理.....	441
辐射衰减计算.....	449
反应堆屏蔽分析.....	462
屏蔽内的发热.....	469
第十一章 核反应堆安全	
反应堆安全的一般原则.....	475
反应堆保护系统.....	478
专设安全设施.....	480
反应堆安全分析.....	486
可靠性与风险评价.....	500
第九级事故的概率与后果.....	503
核电厂的审批和管理.....	506
核反应堆安全保障.....	510
第十二章 动力反应堆系统	
引言.....	515
压水反应堆.....	515
沸水反应堆.....	521
重水慢化反应堆.....	525
快中子增殖反应堆.....	529
气冷反应堆.....	534
其他型式的反应堆.....	537
附录.....	543
索引.....	553

第一章 核裂变能

引言

对电力的需求

1.1 在1939年发现了核裂变现象。这是一件具有划时代意义的事件。这一事件为一种全新的能源——原子核能——的利用开辟了前景。铀元素和钚元素是能够通过其核的裂变而释放核能的基本物质。这类元素大量地存在于地壳之中。虽然它们的含量往往很低，以至于提炼费用十分昂贵，但是，能以合理的费用获取这类核素的数量仍然足以满足许多年内对能源的需要。

1.2 本世纪以来，世界能量消耗增长很快。这固然是由于人口的增加，但更主要的是在工业、农业、交通运输方面按每人平均所消耗的能量增加了。例如在美国，从1940年到1970年，人口的每年增长率大约是1.6%，而能量总消耗却以年平均3.5%左右的速率增长。

1.3 在讨论核能问题时特别值得注意的是，在能源消费之中电能的消费比例越来越大。美国从1940年到1973年前后，工业、商业和家庭耗电的总量大约每年增长7%。近年来，由于经济和其他方面的因素，增长率有所下降，对于未来电力需求的预测也各不相同。然而，即使按每年仅增长3%来计算，在本世纪的最后25年中需新建发电厂的装机容量就相当于1975年运行的全部发电厂装机容量的总和。这个估计还没有考虑更新陈旧装置的需要，或者交通工具等方面以电代油的可能性。

一次能源

1.4 发电需要某种一次能源。只有在易于取得这种一次能源的条件下，才能满足对电力不断增长的需求。发电所用的主要一次能源是化石燃料，也就是煤、天然气和石油，以及水力。已探明的煤储量本来足够几个世纪所用，但是露天采矿和烧煤对环境的有害影响以及煤价的不断提高，对于人们使用这种燃料进行发电正在缺乏吸引力。虽然不断地发现新的油田和天然气田，但是，看来全世界对该类燃料的生产量将在本世纪末前后开始下降，而其需求量却仍将继续增加。

1.5 在考虑用化石燃料发电的时候，必须记住煤和石油还能为生产化学制品（包括药品、染料、纤维、橡胶和塑料）提供基本的原料。从长远看，将化石燃料用于原料方面比用作一次能源可能更有价值。因此，应该强调要尽量地保存现有的煤和石油资源，以用于生产化学制品以及远距离运输中的燃料。

1.6 鉴于对电力需求的不断增长，必须开发某种新的一次能源以补充1.4节中所讲的那些一次能源。太阳能和核能就是这样的两种能源。利用太阳能的设想十分吸引人，但在能够使之用于商业规模发电以前，还要做大量的研究和开发工作。核能既可以通过某些重原子核

的裂变取得，也可以通过非常轻的原子核之间的聚变获得。聚变过程已由实验室中的实验和“氢”弹所证实；然而，它能否在本世纪末以前就开始对世界的动力需求作出有意义的贡献，还是值得怀疑的。

1.7 另一方面，核裂变已被公认为一种价格上能和其他一次能源相竞争的发电用能源。若要使电力供应满足不断增长的需要，至少在今后的30年或更长的时间里，对核裂变能的需求量将不断增加，这个结论看来是毋庸置疑的。

1.8 基本的核裂变“燃料”是铀元素和钍元素，它们大量存在于地壳之中。但从各种矿石中提取这些元素所需的费用可能相差很多。因此，所谓“可用的”核燃料数量在很大程度上取决于经济因素。当核电厂能够更加有效地利用铀和钍，并且与之相竞争的其他燃料的成本上涨的时候，较高的核燃料成本也将可以接受，结果，可用的核燃料量也就更多。

1.9 七十年代和八十年代初期运行的大部分核电厂将只能利用其初装铀的0.5%左右。目前，可以经济地利用的矿石至少需要含铀0.1%。在美国，这种矿石的数量估计可以满足当前设计的核电厂进入九十年代初期的需要。然而，核燃料的“增殖”过程（§1.64）原则上可以更加有效地利用铀，于是也就能经济地利用低品位的矿石。这样，即使没有其他的一次能源，铀资源也足够用几百年。

1.10 目前几乎所有的核电厂都以铀作燃料，因此人们缺乏兴趣去勘探高（或中等）品位的钍矿石。即使如此，还是知道存在着大量的这种矿石，从中能以合理的成本取得二氧化钍（ ThO_2 ）。可以想象，最后从含钍量不到百万分之五十的花岗岩中提取大量的钍也将是经济可行的。

核 能 基 础

原子结构和同位素

1.11 以可控方式释放核裂变能的装置叫做核反应堆。这种能量大部分以热的形式出现，可以用这种热来生产发电用的蒸汽，如同常规（化石燃料）电厂一样。核反应堆的运转依赖于中子同原子核的相互作用。为了理解这些反应的性质和特点，有必要简单地回顾一下有关原子结构和核结构方面的某些基本概念。

1.12 一个原子含有一个带正电荷的核，核周围有带负电荷的电子，因此作为一个整体来看，原子是电中性的。原子核由两种基本粒子组成：质子和中子。质子带一个单位的正电荷，其电量等于电子电荷的电量。这种粒子实际上就是氢原子的核，也就是去掉其唯一电子的氢原子。中子稍稍重于质子（§1.19），并且正如它的名字所示，它是电中性的粒子。除了普通氢的原子核以外，其余所有的原子核除含有质子外，还含有一个或多个中子。

1.13 对于某种给定的元素，其原子核内的质子数（等于它所带的正电荷数）称为这一元素的原子序数，并用符号 Z 表示。它也等于该元素在众所周知的元素周期表中的序数。这样，氢的原子序数就是1，氦是2，锂是3，一直到铀是92，后者是自然界中以显著量存在的原子量最大的元素。用人工方法已经制造出了几种更重的元素；其中原子序数为94的钚对于核能的释放是很重要的。

1.14 一个原子核里的核子（质子和中子）总数称为这种原子核的质量数，并用 A 表

示。上面说过，质子的数目是 Z ，所以原子核内中子的数目是 $A-Z$ 。中子和质子的质量用通常的原子质量单位标度时都接近于1，所以质量数就是最接近该元素原子量的整数。

1.15 一个核的成分可以通过它所包含的质子数(Z)和中子数($A-Z$)表示出来，换言之，可以用它的原子序数和质量数来表示。通常用核素这个术语来描述具有确定的核成分的原子粒种；也就是说，核素是具有给定原子序数和质量数的原子粒种。核素之间以其不同的原子序数或不同的质量数(或两者都不同)来相互区别。

1.16 由原子序数(即核中的质子数)可以知道元素的化学性质。这是因为化学性质取决于核周围的(轨道)电子，而其电子的数目必须等于质子数，因为整个原子是电中性的。因此，只要原子核内包含同样的质子数，即具有相同的原子序数，即使其质量数不同，其化学性质基本上也相同，虽然它们的核特性常常有明显的差异。这些原子序数相同而质量数不同的核素叫做同位素。它们在化学性质方面一般无法区别，但却具有不同的原子(同位素)量。

1.17 某种元素的某种特定同位素是用这种元素的名称或符号加上这个同位素的质量数来标志的。例如，氧的普通同位素，质量数为16，即核内有8个中子和8个质子，它可以表示成氧-16，O-16，或 ^{16}O 。在某些情况下，将原子序数也包括进去较为方便，虽然这不是必需的；原子序数写成元素符号的下标，这样，上述同位素便可写成 $^{16}_8\text{O}$ 。

1.18 在1962年以前一直作为原子量标度基础的氧元素，在自然界中存在着三种同位素，即 ^{16}O ， ^{17}O 和 ^{18}O ，后两种的相对比例较小。由于这种情况，形成了表示原子量的两种不同系统。在化学原子量标度中，大气中存在的氧的三种同位素按比例平均的(权重的)原子质量规定为恰好等于16.0000。而另一种标度，有时称为物理原子量标度，却以同位素氧-16的原子质量恰好等于16.0000的规定为基础。于是，在这种标度中原子的质量比相应的常规原子量大0.028%。从1962年1月1日起，所有的原子(或同位素)量都已经用单一标度表示，这种标度规定碳的普通同位素 ^{12}C 的原子质量恰好等于12.0000。

1.19 单个原子的质量借助于原子质量单位(缩写为 u)表示，一个原子质量单位精确地等于 ^{12}C 原子质量的十二分之一。原子质量单位的千克当量用下面的方法得到。定义摩尔(mole)为任何单一物质的这样一个量，其中所包含的基本实体(如原子、原子核或分子)的数目等于 $12 \times 10^{-3} \text{ kg}$ 的 ^{12}C 中所包含的原子数目；这个数目叫阿伏加德罗数，用 N_A 表示， $N_A = 6.022 \times 10^{23} / \text{mole}$ 。换言之，一个 ^{12}C 原子的质量为 $(12 \times 10^{-3} / N_A) \text{ kg}$ ；因此，原子质量单位(u)就是 $10^{-3} / N_A = 1.661 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 。一个质子的质量为 $1.007276u$ ，即 $1.673 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ，而中子的质量为 $1.008665u$ ，即 $1.675 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 。电子的质量仅为 $0.000549u$ ，即

表1.1 天然铀的同位素成分

质量数	原子百分比	同位素质量 (u)
234	0.0055	234.0410
235	0.720	235.0439
238	99.274	238.0508

$9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$, 所以整个原子的质量几乎就是原子核中质子和中子的质量。

1.20 目前, 铀是能通过裂变释放核能的最重要的元素。它在自然界中至少存在着三种同位素形式, 质量数分别为234, 235和238。表1.1给出了天然铀中存在的三种同位素的比例以及它们的质量。由表中可看出铀-238是丰度最大的同位素, 但也总是并存着略超过 0.7% 的铀-235。这两种同位素对核能的生产都是至关重要的, 虽然以后会看到, 能够直接用于释放裂变能的, 主要是铀-235。表中所列的最轻同位素铀-234在铀矿石中的比例很小, 故在实际应用中可以忽略。

1.21 从核能角度看, 另一种重要元素是钍, 它的原子序数为90。它在自然界中几乎只存在一种核素, 质量数为232。也有其他痕量同位素形式, 但它们所占的比例微不足道。

核的结合能

1.22 用质谱仪或其他方法直接测定核(或同位素)的质量表明, 它们的实际质量总是小于它们所包含的核子的质量之和。其差额叫做**质量亏损**, 它与核中粒子间的结合能有关。质量亏损可按下列方法确定。按电中性的要求, 一个原子除了包含核内的 Z 个质子和 $(A-Z)$ 个中子外, 还必须包含 Z 个核外电子。若以 m_p 、 m_n 、 m_e 分别表示质子、中子、电子的质量, 则组成一个原子的各种粒子的质量之和为 $Zm_p + Zm_e + (A-Z)m_n$ 。设这个原子的测量质量为 M ; 于是,

$$\begin{aligned} \text{质量亏损} &= [Z(m_p + m_e) + (A-Z)m_n] - M \\ &= Zm_H + (A-Z)m_n - M, \end{aligned} \quad (1.1)$$

这里已用氢原子的质量 m_H 代替 $m_p + m_e$ 。因为 m_H 等于 $1.007825u$, m_n 等于 $1.008665u$, 所以对于其质量已由实验确定的任何一种核素, 质量亏损可以通过计算求出。

1.23 按照以狭义相对论为基础的**质能等价**概念, 质量亏损是 Z 个单独质子与 $(A-Z)$ 个单独中子结合成一个原子核时释放出来的能量的一种量度*。它在数值上等于将该原子核分解为组成它的全部核子时所供给的能量。所以, 质量亏损的能量当量叫做原子核的**结合能**。

1.24 根据相对论, 以速度 v 运动的一个粒子的能量当量 E 可由爱因斯坦公式给出:

$$E = \frac{m_0 c^2}{(1 - v^2/c^2)^{1/2}} = mc^2, \quad (1.2)$$

其中 m_0 是该粒子的**静止质量**, 即粒子处在静止时($v \approx 0$)的质量, c 是光的速度; m 是运动粒子的**有效(或相对论)质量**, 由下式确定:

$$m = \frac{m_0}{(1 - v^2/c^2)^{1/2}}.$$

由此可见, 当一个粒子的速度接近光速时, 它的有效质量趋于无穷大。与核反应堆工程有关的粒子速度几乎总是远比光速为小。因而, v^2/c^2 很小, 与1相比通常可以忽略。所以在本书中, 方程(1.2)中的 m 可以取粒子的常规(或静止)质量而不必取它的相对论质量。

1.25 为了目前的用途, 可将方程(1.2)中的能量和质量理解为变化量, 而不是它们的实际值; 于是可以允许写为

* Z 个电子对结合能有一点贡献, 不过这一点已在方程(1.1)中以 m_H 代替 $m_p + m_e$ 时基本上作了考虑。

$$E = mc^2 \quad (1.3)$$

这里 m 是某种特定过程中常规质量的变化量， E 是与它相当的能量变化量。如果 m 以 kg 表示，则用焦耳(J)表示的能量当量为

$$\begin{aligned} E(\text{J}) &= m(\text{kg}) \times (2.998 \times 10^8)^2 \\ &= m(\text{kg}) \times 8.988 \times 10^{16}, \end{aligned}$$

其中采用了光速 $2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。正如§1.19中所述， 1u 等于 $1.661 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ；所以有

$$E(\text{J}) = m(\text{u}) \times 1.492 \times 10^{-10}$$

或

$$E(\text{pJ}) = m(\text{u}) \times 149.2, \quad (1.4)$$

其中 1pJ (微微焦耳) 是 10^{-12} J 。在核领域中，通常使用的一种能量单位是**电子伏特**或 eV ；这是一个单位(电子)电荷通过1伏特的电位差被加速而获得的能量。电子的电荷是 1.602×10^{-19} 库仑；所以 1eV 等于 $1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$ ，而1兆电子伏特(或 1MeV)等于 $1.602 \times 10^{-13} \text{ J}$ 或 0.1602pJ 。于是，方程(1.4)可写成

$$E(\text{MeV}) = m(\text{u}) \times 931.3. \quad (1.5)$$

1.26 如果由方程(1.1)给出的核的质量亏损用原子质量单位表示，则将它乘以149.2或931.3便可分别得到以 pJ 或 MeV 表示的相应结合能。一个更加有用的量是每个核子的平均结合能，它是总结合能(B.E.)除以该核中的核子数，也就是除以质量数 A 。过去一般的习惯是以每个核子的 MeV 数来表示 $\text{B.E.}/A$ ；因而从方程(1.1)和(1.5)可得

$$\frac{\text{B.E.}}{A} = \frac{931}{A} [(1.007825Z + 1.008665(A-Z) - M)],$$

此处用到§1.22中给出的氢原子和中子的(静止)质量。只要再乘以0.1602就可以得到以每个核子的 pJ 数表示的相应值。

例题1.1 确定每个核子的结合能：(a) 锡-120 (M 为 119.9022u)，(b) 铀-235。

(a) 锡的原子序数是50；所以，对于质量数为120的核素，

$$\begin{aligned} \frac{\text{B.E.}}{A} &= \frac{931}{120} [(1.007825 \times 50) + (1.008665 \times 70) - 119.9022] \\ &= 8.50\text{MeV} (1.36\text{pJ}) \text{ (对每个核子)}. \end{aligned}$$

(b) 铀的原子序数是92，铀-235的同位素质量由表1.1给出为 235.0439 ；于是，

$$\begin{aligned} \frac{\text{B.E.}}{A} &= \frac{931}{235} [(1.007825 \times 92) + (1.008665 \times 143) - 235.0439] \\ &= 7.59\text{MeV} (1.21\text{pJ}) \text{ (对每个核子)}. \end{aligned}$$

1.27 用以上方法得到的以每个核子的 MeV 数表示的各种核素的结合能值，作为质量数的函数绘制于图1.1中。由图看到，大多数的点都落在一条曲线上或接近于这条曲线。该曲线表明，对于质量数小的核，每个核子的结合能相对较低，但是它随着质量数的增加而增加，在质量数约为50到75的范围内，达到一个大约 8MeV 的最大值；然后平稳地下降。可以证明(见§1.50)，每个核子的结合能比较低(即稳定性比较差)的核在转化为结合能比较高(即比较稳定)的核的过程中，必然伴随有能量的释放。因而从图1.1中可以明显看出，通过最轻核的聚合(或聚变)或者高质量数核的分裂(或裂变)应该可以获得能量。

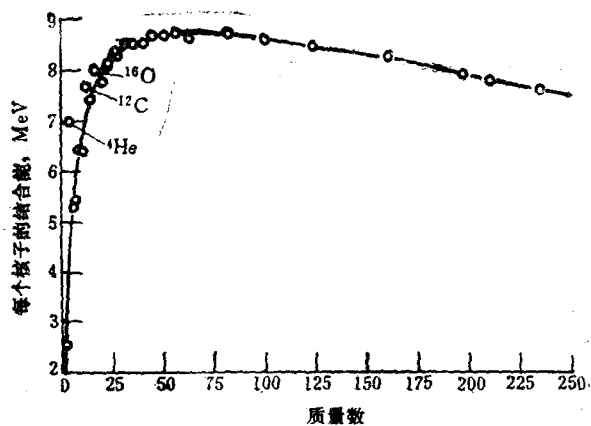


图1.1 每个核子的结合能随质量数的变化

核的稳定性

1.28 对于大约270种已知的稳定核素，若以它们每个核内的中子数为纵坐标，以相应

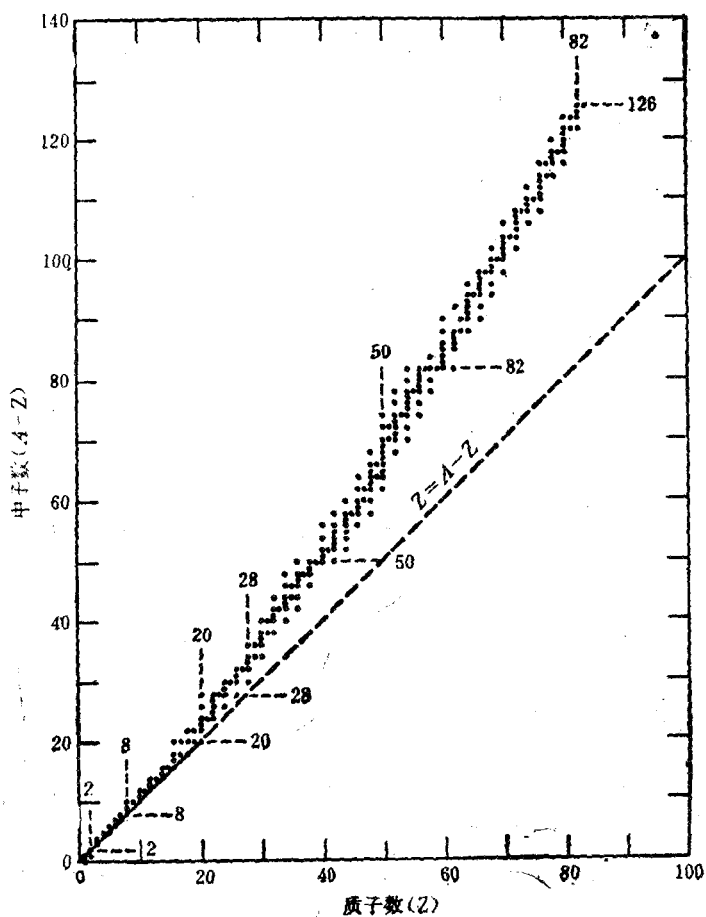


图1.2 稳定核中的中子和质子数 (短虚线表示幻中子数和幻质子数)

的质子数为横坐标画图，则得到一系列如图1.2中所示的点。图中对角线上的点表示中子数和质子数相等。可以看到，在许多低质量数的稳定核中，中子数和质子数是相等的或接近相等的。换句话说，中子-质子比恰好等于1或稍稍大于1。然而，随着质量数（或原子序数）的增加，只有当一个核所包含的中子数多于质子数的时候，它才是稳定的。这样，对于原子序数大于80的那些最重的稳定核，中子-质子比增加到1.5左右。

1.29 在试图解释前述的结果之前，应该指出，某些核表现出异常的稳定性。这些所谓的幻核，或者所包含的质子数是幻数：2, 8, 20, 50, 82，或者所包含的中子数是幻数：2, 8, 20, 50, 82, 126，在图1.2中用虚线标出。质子数和中子数均为幻数的核叫做“双幻”核，如 ${}^1_8\text{O}$ ， ${}^{40}_{20}\text{Ca}$ 和 ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ 。作为稳定性与幻数有关的一例，可以指出，核内具有50个质子的锡有10种稳定的同位素形式。

1.30 幻核的特殊稳定性被认为是由于其中存在填满（或闭合）的中子壳层或质子壳层（或两者兼有）的缘故。正如具有闭合电子壳层的惰性元素氦、氖、氩等具有极好的化学稳定性一样，具有幻数核子的核素表现出异常的核稳定性。除了表示闭合主壳层的幻数以外，还有半幻数，如6, 14和28，它们表示一个或几个闭合壳层加一个填满的亚壳层。丰量元素碳和硅的同位素就属于此类。

1.31 暂不讨论有关幻数的细节，图1.2中的一般性特征可以用核子之间存在着两类力的这种假定来加以解释。首先，核子之间存在着数值大体相等的吸引力，也就是质子与质子，中子与中子，以及质子与中子之间都以程度几乎相同的力互相吸引着。这些力是核内特有的极短程作用力，其作用范围仅为 10^{-15}m 的量级。短程作用使核内的总吸引力大致正比于它所包含的核子数。这就是为什么在一个相当大的质量数范围内，每个核子的结合能近似为常数（图1.1）的主要原因。除了短程（吸引）力以外，在带正电荷的质子之间还有通常的静电（或库仑）排斥力，其作用距离相对来说比较大。核内质子之间总的静电排斥力正比于质子数的平方，即 Z^2 。核子之间还有其他的排斥力，不过对于当前的用途说来它们是不重要的。

放 射 性

1.32 如果原子序数（质量数）不高，则质子之间的排斥力较小。因为质子-质子、中子-中子和质子-中子的吸引力大致相等，所以可预期中子-质子比近于1的核比较稳定。但是随着原子序数的增加，随 Z^2 变化的质子之间的静电排斥变得越来越重要。为了维持稳定性，核内必须包含较高比例的中子。只有这样，中子-中子和中子-质子的吸引力才能够抵偿质子之间迅速增加的排斥力。然而，在仍然能保持稳定的前提下，一个核内所能包含的多于质子数的中子数目是有限的。因而，原子序数大于和等于84的元素没有稳定的同位素。在自然界中存在84（钋）到92（铀）的元素，但它们是不稳定的，而且呈现出放射性现象。

1.33 放射性核素以一定的速率进行自发的变化，这个速率随核素的性质而不同。不稳定的核放出一个特征粒子（或辐射）从而转化成一个新的核，这个核也可以是（或不是）放射性的。因质量数偏高而引起不稳定的核素，或者放出带正电荷的 α 粒子，即由两个质子和两个中子组成的氦核，或者放出带负电荷的 β 粒子，即普通电子。核本身不包含电子，而在放射性 β 衰变中产生的这种电子，是由于一个中子自发转化成一个质子和一个电子的缘故；于是，

中子 $\rightarrow$ 质子 + 电子 (β 粒子) + 中微子。

其中附加的中性粒子叫做中微子^{*}，其质量几乎为零，但它带走一些放射性转化过程中释放的能量。

1.34 从前面的讨论中可以推断， α 衰变的生成核（或子核）比它的母核少两个质子和两个中子，所以其质量数少4。而在 β 衰变中，子核比它的母核少一个中子，多一个质子，故其质量数不变。

1.35 放射性也可以是由于质量数高以外的原因所引起的。从图1.2中看到，所有表示稳定核的点都落在一个狭窄的中子-质子比的范围内。任何一种核素，只要它的组成不在这个范围之内，就都是放射性的。如果这种核素位于稳定性范围的上方，也就是说，对给定的原子序数，它具有的中子数比稳定性所要求的多，这种核素就具有类似上面所描述的 β 放射性。核内的一个中子被一个质子所代替，于是中子-质子比就降低；子核将比它的母体更加稳定，虽然不一定完全稳定。

1.36 如果一种核素所包含的中子数偏少，不足以生成一种具有给定质子数的稳定核，它可以放出一个 α 粒子，增大中子-质子比而变得更加稳定。然而，对于低质量数和中等质量数的不稳定核素来说，这是很少发生的；除了少数例外， α 衰变仅在最重的核素中才能观察到。另一种方式是核俘获一个轨道电子，然后这个电子同个质子结合形成一个中子（加一个中微子）；其结果是增大了中子-质子比。然而更常见的还是正 β 衰变，即转化的结果放出一个正电子（或正子），

质子 $\rightarrow$ 中子 + 正电子 + 中微子。

现在已知有许多放射性核素发生正 β 衰变，但在核反应堆的运转中，它们是不被考虑的。故在本书中将不进一步讨论这类放射性核素。

1.37 在许多场合（虽然不是所有场合）中，放射性衰变除了放出一个 α 粒子或 β 粒子外，还放出 γ 射线。 γ 射线是高能穿透性电磁辐射，基本上同X射线一样。事实上， γ 射线同X射线之间的唯一差别只在于，前者是从原子核内产生的，而后者是在核外过程中产生的。当放射性变化中所形成的子核处在一种所谓的激发态，即其内能高于该核的正常态（或基态）时，就会产生 γ 射线。过剩的能量几乎立刻以 γ 辐射的形式被释放。 γ 射线也伴随其他生成激发态核的核过程出现。

中子反应

1.38 虽然中子一般是被束缚在核内的，但也可以获得自由态的中子（见§2.70及其后有关小节）。这种自由中子能以不同的方式与核相互作用。我们感兴趣的中子-核反应主要有三种类型，即散射、俘获和裂变。在**散射反应**中，最终结果是中子与核之间的能量交换。这种反应所以用“散射”这个术语来描述，是因为中子在相互作用后的运动方向一般都与在相互作用之前的不同。散射可以是弹性的，也可以是非弹性的。在**弹性散射**中，中子与核之间能量的交换完全属于动力学性质。因为中子的动能一般比原子核的大，所以在弹性碰撞中，中子的动能减少，而被撞击核的动能相应增加。而在**非弹性散射**中，中子的一部分动能转化成核的内能（势能）。任何能量的中子都可能发生弹性散射，而非弹性散射只有当中子的

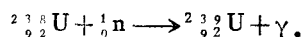
^{*}严格地讲，这个粒子是一个反中微子，但这个差别在这里没有什么影响。

能量大到足以使核处于某种激发态的时候才会发生。

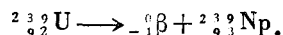
1.39 自由中子在刚被释放时，通常具有MeV量级的高动能，所以称为**快中子***。然而，当它们穿过介质时，由于同介质中的各种核发生散射碰撞，它们会丧失大量的动能而成为能量在1eV以下的**慢中子**。最后，它们的平均动能有可能降低到同介质原子（或分子）的动能差不多的程度。由于这个时候的动能值取决于温度，所以叫做**热能**。能量降低到这种程度的中子叫做**热中子**。在常温下，热中子的平均能量小于0.04eV。

1.40 除了大部分的弹性散射情况以外，在中子-核相互作用的第一阶段，中子通常被核吸收而形成一个处于激发（高能）态的**复合核**。在非弹性散射中，复合核几乎立刻放出一个能量较低的中子而留下一个处于激发态的初始核。由于吸收一个中子而形成的复合核也可能不放出中子而以别的方式发生变化。例如激发的复合核可以以 γ 辐射的形式放出剩余能量；这种过程称为**辐射俘获**或简称为**俘获**。增加了一个中子的余核是初始核的一种同位素，但质量数增加1。以记号 (n, γ) 表示的辐射俘获过程是十分常见的，并且慢中子几乎总是比快中子更易引起这种反应。

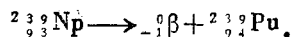
1.41 有几种辐射俘获反应对于核反应堆的运行具有重要的意义，这里叙述具有直接意义的两种。第一种是中子被天然铀中丰度最高的同位素铀-238（见表1.1）所俘获；其 (n, γ) 过程可以表示为



产物核铀-239是放射性的，它在衰变过程中放出一个负 β 粒子，以 $-\beta$ （电荷为-1，质量数为0）表示；于是，

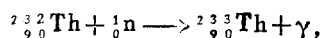


产物 ${}^{239}_{93}\text{Np}$ 是镎元素的一种同位素，原子序数为93，在地球上通常测不出它的存在。镎-239也具有 β 放射性，并且按下述过程迅速衰变：

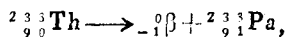


这里形成了一种原子序数为94的钚元素的同位素 ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ ，它在自然界中仅以极微量存在。

1.42 由天然钍-232的 (n, γ) 反应所引起的一系列过程，和刚叙述的过程很相似；这时，



其产物是同位素钍-233。该核素连续进行两级 β 衰变：第一级是



其中 ${}^{233}_{91}\text{Pa}$ 是镤-233的符号；第二级是



产物铀-233是一种自然界中含量极微以致无从测出的铀同位素。

1.43 §1.38中提到的第三种重要的中子与核相互作用的类型是**裂变**，或者更准确地说**是核裂变**。裂变过程对于核反应堆的运行是关键性的；因此，下面将比其他两种中子-核相互作用更加详细地讨论这一过程。

* 中子的能量已经习惯于用单位eV和MeV表示；这里保留这些原有单位；记住 $1\text{eV} = 0.160 \times 10^{-18}\text{J} = 0.160 \times 10^{-6}\text{pJ}$ ，而 $1\text{MeV} = 0.160 \times 10^{-12}\text{J} = 0.160\text{pJ}$ 。

核 裂 变

裂 变 过 程

1.44 某些原子序数（和质量数）高的核吸收了一个中子后发生裂变： Z^2 值大，核内的排斥力大，是起作用的一种重要因素。当裂变发生时，吸收了一个中子后形成的激发复合核碎裂为两个较轻的核，后者称为**裂变碎片**。如果这个中子是低动能中子，即慢中子，则两个碎片核的质量一般是不相等的。换言之，慢中子很少引起对称性裂变；在大多数的慢中子裂变中，两个碎片的质量比大约为2比3。

1.45 只有三种核素（即铀-233、铀-235和钚-239）具有足够的稳定性，允许长时间贮藏，并可以由任何能量的中子引起裂变，中子能量范围可以从热能值（或更低）到几百万电子伏特。这三种核素中，只有铀-235存在于自然界中；其他两种则用人工方法分别从钍-232和铀-238中生产出来，其方式如§1.41和§1.42中所述，即，该两种核素通过钍-232和铀-238核俘获中子后经过两级放射性衰变而生成。已经知道还有其他几种核素也可以由任何能量的中子引起裂变，不过它们都是高度放射性的核素，衰变得非常快，因此对于核能的释放没有什么实际价值。

1.46 除了那些可以由任何能量的中子引起裂变的核素以外，还有一些核素要求快中子来引发裂变；其中最主要的是钍-232和铀-238。对于能量大约在1MeV以下的中子，除散射以外的唯一反应是辐射俘获，但在这个阈值以上，也能够发生裂变。由于足够快的中子可以引起钍-232和铀-238裂变，所以它们被称为**可裂变核素**。为进行区别，将任何能量的中子都能引起裂变的铀-233、铀-235和钚-239称为**易裂变核素**。此外，由于钍-232和铀-238可以分别转化为易裂变核素铀-233和钚-239，所以它们也称做**可转换核素**。

李

1.47 从利用核能的观点看，裂变的重要意义在于以下两个事实：第一，这种过程中每单位质量的核燃料释放出极大量的能量；第二，这种由中子引发的裂变反应又同时释放出中子。正是这两个条件相结合，才有可能设计出一种既能形成自持链式反应又能连续释放能量的核反应堆。一旦借助于某个外中子源使少数几个核发生裂变反应，就可以由该反应中产生的中子维持其他核的裂变反应。应当指出，只有易裂变核素才能形成自持链式反应。钍-232和铀-238不可能保持链式裂变，因为即使对于能量超过1MeV阈值的中子，其裂变几率也是很小的，况且非弹性散射又将许多中子的能量迅速降低到这个阈值以下。

1.48 裂变反应中释放中子的现象可以解释如下。在一个铀-235核俘获了一个中子后形成的复合核 ^{236}U 内，中子-质子比将近为1.57；因此，当这个核裂变成质量数大致在95到140范围内的两部分时，这两个瞬时产物内的中子-质子比也必然具有相同的值。然而，从图1.2中可见，这个比值大于中等质量核的稳定性所要求的值（参看§2.201）。因此，只要这些裂变中产生的核具有足够的激发能，它们就会放出中子以求更加稳定。

1.49 然而，以这种方式放出的实际中子数很少，不足以使生成的裂变碎片具有稳定性。大部分裂变碎片的中子-质子比仍然太高，因此，根据§1.32中的论述，它们是放射性的，并且发生负 β 衰变。平均来说，裂变碎片在形成稳定核之前大约要经过四级放射性衰变。由裂变碎片以及它们的各种衰变产物组成的复杂的高放射性混合物统称为**裂变产物**。