

核 反 应 堆 分 析

[美] J. J. 杜德斯塔特 著
L. J. 汉密尔顿
吕应中 王大中 奚树人 译

原 子 能 出 版 社

内 容 简 介

本书比较系统地介绍了核裂变反应堆分析的基础理论和计算方法。书中首先扼要介绍与核裂变反应堆有关的基本概念,然后比较详细地讨论了核反应堆分析的基本理论及其应用,其中包括:中子输运方程、单速扩散理论、多群扩散理论、反应堆动态、临界计算、热工水力计算、燃耗和控制的研究。本书强调了物理计算与热工水力计算及其他工程问题之间的联系,同时着重介绍了在电子计算机上使用的数值计算方法。每章末都附有一定数量的习题,包括简单的计算机程序练习,有助于读者掌握所学的基本理论与相应的现代计算技术。

本书在内容编排上注意到适应本专业与从事核电站工作的其他相关专业人员的需要,可作高等院校核反应堆专业的教科书或主要参考书,也可供从事核电站工作的其他专业科学技术人员阅读。

James J. Duderstadt

Louis J. Hamilton

NUCLEAR REACTOR ANALYSIS

John Wiley & Sons, Inc., 1976.

核反应堆分析

[美] J. J. 杜德斯塔特 著

L. J. 汉密尔顿

吕应中 王大中 奚树人译

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

北京印刷一厂印刷

(北京市西便门)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本787×1092¹/₁₆·印张33·字数786千字

1980年9月第一版·1980年9月第一次印刷

印数001—1300·统一书号:15175·202

定价: 4.60元

目 录

第一部分 核反应堆分析概念简介

第 1 章 核动力绪论	(2)
I. 核裂变反应堆	(2)
II. 核工程师的任务	(4)
III. 本书的范围	(5)
第 2 章 链式裂变反应的核物理学	(8)
I. 核反应	(9)
II. 核裂变	(40)
第 3 章 链式裂变反应与核反应堆——绪论	(57)
I. 倍增因子与核临界	(57)
II. 核动力反应堆介绍	(67)
III. 核反应堆设计	(73)

第二部分 核反应堆的单速扩散模型

第 4 章 中子输运	(80)
I. 基本概念	(81)
II. 中子输运方程	(85)
III. 输运方程的直接数值解	(90)
IV. 扩散近似	(95)
第 5 章 单速扩散理论模型	(114)
I. 单速扩散方程	(114)
II. 中子在非倍增介质内的扩散	(120)
III. 核反应堆的单速扩散理论	(150)
IV. 反应堆临界计算	(164)
V. 微扰理论	(168)
第 6 章 核反应堆动态学	(179)
I. 点反应堆动态模型	(180)
II. 点反应堆动态方程的解	(185)
III. 反应性反馈与反应堆动力学	(197)
IV. 反应堆动态参数及反应性的实验测定	(206)
V. 反应堆动态的空间效应	(212)

第三部分 多群扩散方法

第 7 章 多群扩散理论	(218)
I. 多群扩散方程的直观推导	(219)
II. 由包含能量变化的扩散理论推导多群方程	(220)
III. 多群扩散模型的简单应用	(225)
IV. 多群扩散方程的数值求解	(230)
V. 多群微扰理论	(236)

VI. 结束语	(238)
第 8 章 快谱计算和快群常数	(242)
I. 无限介质内的中子慢化	(243)
II. 共振吸收 (无限大介质)	(255)
III. 有限介质内的中子慢化	(267)
IV. 快谱计算和快群常数	(276)
第 9 章 热谱计算和热群常数	(290)
I. 热中子谱的一般特性	(291)
II. 中子热化的近似模型	(297)
III. 热中子谱计算总论	(303)
第 10 章 非均匀堆芯栅格的栅元计算	(309)
I. 核反应堆分析中的栅格效应	(310)
II. 热中子物理学中的非均匀效应	(320)
III. 快中子物理学中的非均匀效应	(331)
IV. 关于多群扩散方法的结束语	(340)

第四部分 核反应堆堆芯设计介绍

第 11 章 核反应堆堆芯设计概貌	(346)
I. 堆芯核分析	(347)
II. 反应堆堆芯分析的其他领域	(351)
III. 反应堆计算模型	(356)
第 12 章 核反应堆堆芯热工水力分析	(362)
I. 绪言	(362)
II. 核反应堆堆芯中功率的产生	(366)
III. 反应堆燃料元件中的径向导热	(368)
IV. 单相冷却剂内的强迫对流传热	(374)
V. 核反应堆内的沸腾传热	(379)
VI. 堆芯的流体动力学分析	(387)
VII. 堆芯热工水力分析	(389)
第 13 章 堆芯功率分布计算	(400)
I. 静态多群扩散计算	(401)
II. 热工水力学、中子学和燃耗之间的相互关系	(403)
III. 少群常数的参数化	(405)
IV. 通量综合法	(407)
V. 局部功率峰效应	(410)
第 14 章 反应性控制	(416)
I. 绪言	(416)
II. 可移动的控制棒	(418)
III. 可燃毒物	(426)
IV. 化学补偿	(429)
V. 固有的反应性效应	(430)
第 15 章 堆芯成份变化的分析	(439)
I. 裂变产物中毒	(439)
II. 燃耗分析	(450)
III. 核燃料管理	(457)

附 录

A. 一些有用的核数据.....	(471)
I. 各种物理常数.....	(471)
II. 一些有用的转换因子.....	(471)
III. 自然界存在元素在2200米 / 秒下的截面.....	(472)
IV. 一些特别重要的2200米 / 秒截面.....	(474)
B. 一些有用的数学公式.....	(474)
C. 阶跃函数、 δ 函数和其它奇异函数.....	(475)
I. 绪言.....	(475)
II. 狄喇克 δ 函数的性质.....	(476)
(A) 另外的表示方式.....	(476)
(B) 性质.....	(476)
(C) 导数.....	(477)
D. 一些特殊函数的性质.....	(478)
E. 关于线性算符的某些知识.....	(482)
I. 内积.....	(482)
II. 线性算符.....	(482)
III. 线性矢量空间.....	(483)
IV. 算符的性质.....	(484)
V. 微分算符.....	(484)
F. 矩阵和矩阵代数简介.....	(485)
I. 一些定义.....	(485)
II. 矩阵代数.....	(487)
G. 拉普拉斯变换介绍.....	(488)
I. 起源.....	(488)
II. “查表”式拉普拉斯变换.....	(490)
H. 典型核动力反应堆数据.....	(492)
I. 本书所采用的单位.....	(494)
索 引.....	(497)

第 一 部 分

核反应堆分析概念简介

第 1 章

核 动 力 绪 论

自从在芝加哥大学古老的斯塔格足球运动场看台下的第一座核反应堆实现临界链式裂变反应以来，已经有三十多年了。从那时起，就在世界范围内广泛开展了核反应堆的研究和发展工作，希望能掌握原子核内的这种巨大能量，使它为发电的和平目的服务。今天，核反应堆已经由一种新生的科研工具发展成为巨型发电装置，正在全世界数百座中心电站内运行。最近出现的化石燃料短缺现象，使得核裂变反应堆显然将在未来几十年内对于满足人类能源的需求起决定性作用。

一段时间以来，许多电力公司优先选择建造核电站来代替火电站。这类核电站容量确实巨大，其电功率的典型数值达一百万千瓦以上（足以供应一座四十万人口城市的需要），建造成本超过五亿美元。据估计到公元2000年，仅美国一国就将建造大约一千座左右的核电站，其总发电容量约达十亿千瓦，基本投资总计超过六千亿美元¹，而世界上其他国家也将仿效这种作法。这种惊人地迅速转向核电站的原因是多方面的，不仅由于核电站在经济与运行方面比常规电站优越得多，而且还由于它们对环境的污染小得多，同时核燃料资源比化石燃料更为丰富²⁻⁷。

可以预计，核裂变反应堆在发电方面的重要地位将一直维持到下一世纪。对大多数国家而言，至少在公元2000年之前，核电站是代替火电站的唯一现实的能源^{2,3}。由于化石燃料储量的日益枯竭而引起其成本的迅速上涨，可预计在未来几十年内核电站的经济利益将愈加显著^{4,6}。当然，还有其它一些采用新技术的远期新能源，如太阳能、地热能和受控热核聚变。然而，这些新能源即使在技术上证明是现实的，其大规模应用可能也要等到本世纪之后；因为经验已表明，能源工业由一种燃料变换到另一种燃料需要几十年的时间²；这一方面是由于现有的电厂运行寿命很长，另一方面由于要重新安排制造力量，也需有很长的准备时间。因此，在目前这一代工科学生毕生的工作期间，核裂变能可能是主要的电力新能源。

I. 核 裂 变 反 应 堆

本书内将用“核反应堆”一词表示维持受控链式裂变反应的装置。（这种狭隘的定义可能遭到核聚变研究部门的反对，但由于即使是一座原型核聚变反应堆看来也要好几年之后才可能出现，我们这种称呼法将不致引起什么混乱。）在这种装置内，用中子引起重核的裂变反应。这些重核分裂成为轻核（裂变产物），同时释放出能量（每一裂变约200兆电子伏）和几个额外的中子。然后，这些裂变中子又可用于引起另外的裂变反应，这样就构成了链式裂变反应。于是，从狭义上说，一座核反应堆就是大量的某种裂变材料（如 ^{235}U 或 ^{239}Pu ）的堆积，其数量足够维持这种受控链式裂变反应。实际上一个直径略大于8厘米的金属 ^{235}U 小球就足以维持这种链式反应，从而也可以认为是一个核反应堆。

然而，现代核动力堆是复杂得多的一个庞然大物。它不仅需要有一个精心制作的核燃料栅格，而且在进行链式反应释放出大量能量的过程中，还需要使核燃料充分冷却，同时采用适当的结构材料使核燃料保持精确的几何位置。除此之外，还要有一些设施来控制链式反应，屏蔽由裂变反应所产生的强烈核辐射使之不危害反应堆周围环境，以及在链式反应消耗了裂变核之后更换核燃料组件。如果要求这种反应堆提供有用的电力，其设计还必须能保证它经济地与安全地运行。这些工程上的要求使实际的核反应堆结构变得相当复杂(读者翻阅一下第3章的插图，就可以得到一个概念)。

三十多年来核反应堆已获得多方面的应用。因为它们可以产生大量的核辐射，主要形式为中子及 γ 射线，所以是特别有价值的核研究工具。这类辐射可用于探索物质的微观结构及其动力学(中子或 γ 能谱学)。

也可以利用由反应堆产生的辐射使原子核转变为人工放射性同位素，其用途例如在工业或医学上用作放射性示踪剂。按同样原理也可用反应堆由非裂变物质生产核燃料。例如， ^{238}U 在反应堆内受中子照射后可以转变为核燃料 ^{239}Pu 。这就是快中子反应堆内“增殖”核燃料所利用的核过程，这种堆目前正在发展之中，将成为八十年代的商用堆型。

小型、紧凑的反应堆已用于推动潜艇、船舶、飞机和火箭。目前这一代核电站内所用的轻水反应堆，实际上不过是核潜艇所用动力堆的巨大的年轻兄弟而已。反应堆还可用作小型、紧凑的长寿命电源，例如用于遥远的极地研究站或人造卫星上。

然而，核裂变反应堆最重要的用途是用于大型中心电站。一座核电站实际上与火电站极为相似，只是它采用了一座核反应堆代替了烧煤或烧油的锅炉，而依靠反应堆燃料栅格内的链式裂变反应产生热量。当然，在核反应堆与烧煤锅炉之间，有某些显著的差别。但两者所生产的有用产品都是高温、高压蒸汽，然后用后者推动汽轮发电机组而生产电力。近代核电站的核心是核蒸汽供应系统(NSSS)，后者包括核反应堆、相应的冷却剂管道和水泵以及使水转化为蒸汽的热交换器(“蒸汽发生器”)。(读者再看一下第3章的插图，可以对这些部件有一些概念。)核电站的其余部分基本上与常规电站相似。

然而，我们不要让核电站与火电站表面上的相似之点掩盖了这两种系统之间的重大差别。例如，核电站必须在反应堆堆芯中装入足够的燃料，使之能运行一段较长的时间(其典型数值为一年)。核燃料循环本身也是极为复杂的，包括燃料的精炼与制造、在反应堆内使用过燃料的再处理以及最终对放射性燃料废物的处置。核电站的安全问题也是很不相同的，因为它涉及到防止可能的放射性危险的问题。除此之外，核电站在建造与运行之前申请许可证时要求进行极其复杂的分析工作，这是与火电站全然不同的。

因此，虽然核蒸汽供应系统在整个核电站的投资中只占较小的一部分(目前约占20%)，但却是关键性的部分，因为它不仅决定着电站其余部分的具体设计，而且支配着整个电站建造与运行的程序。此外，正是由于核蒸汽供应系统的燃料成本低廉，才保证了目前核电站在经济上的优越性。

核蒸汽供应系统内的最主要部件，当然是核反应堆本身。目前已运行的以及建议将发展的核反应堆类型很多。反应堆堆型可以按各种特征进行分类。一种最普通的办法是把这些反应堆分为两类：由能量相当于堆芯材料原子热运动动能的中子维持链式反应的反应堆(热中子堆)，和其中子平均能量接近于核裂变反应所释放的高能中子能量的反应堆(快中子堆)。

1108875

然而还有另一种常用的区分方法,即按反应堆所用的冷却剂分类。在美国(实际上也是在全世界)目前一代的反应堆中最常见的是轻水堆(LWR),它采用普通水作冷却剂。为了使水在很高的运行温度下能保持液态,这些反应堆需在极高的压力下运行(约70—150巴^①)。如果允许水在堆芯内沸腾,则此种反应堆称为沸水堆(BWR),而如果在系统内保持足够高的压力(155巴)以阻止发生总体沸腾,则此种反应堆称为压水堆(PWR)。在这两类反应堆中,利用了核潜艇计划已充分发展了的工艺与已取得的运行经验。

与此极为相似的另一种反应堆中,采用高压下的重水(D₂O)作为一回路的冷却剂,或仅用重水促进链式裂变反应。这种特定的方案在核性能上具有一定的优点,其中可以采用低加浓铀燃料(包括天然铀在内)。这种反应堆有加拿大正在发展的CANDU系列的重水动力堆,和英国正在发展的沸腾轻水冷却的重水慢化堆(SGHW)^②。

动力反应堆也可利用气体作为冷却剂。例如,英国早期发展的MAGNO X反应堆采用低压CO₂作为冷却剂。特别吸引人的一种最新设计是美国建造的高温气冷堆(HTGR),它采用高压氦作为冷却剂。其它新型气冷堆内还包括西德发展的球床堆与英国发展的先进气冷堆(AGR)。

所有上述堆型都可归入热中子反应堆一类,因为它们都是由低能中子维持链式裂变反应的。这类反应堆占当前世界上核电容量的绝大部分,其中又以轻水堆为最常用。一般认为在八十年代,虽然轻水堆的市场可能会被成功发展了的高温气冷堆或先进重水堆侵占一部分,但前者仍将继续在核动力工业中占据主要地位。

然而,正如在下一章内将看到的那样,人们强烈地希望发展快中子反应堆,它可以一面生产电力,一面增殖新的核燃料,从而大大降低核燃料成本。这种快中子增殖堆既可采用液态金属冷却[称为液态金属冷却快中子增殖堆(LMFBR)]也可用氦气冷却[称为气冷快中子增殖堆(GCFR)]。虽然预计在1990年前快中子增殖堆不可能对核电市场产生明显的影响,但是目前全世界都在积极进行这项研究工作。

还曾提出并研究过许多其它类型的反应堆——有些甚至包含采用液态或气态燃料等奇特方案。虽然本书内的许多分析方法对它们同样适用,但我们的主要注意力将集中在水冷、钠冷或氦冷的固态燃料反应堆方面,因为这些反应堆将在今后几十年内占动力堆的绝大部分。

II. 核 工 程 师 的 任 务

核工程师将在发展与应用核能的工作中发挥关键的作用,因为只有他具备参加裂变反应堆的核设计并将其应用于大型电力系统的能力。在反应堆工业发展的初期,一般认为核工程师应是具有哲学博士水平的反应堆物理学家,他主要从事核反应堆堆芯的研究与设计工作。然而,今天不仅研究所与反应堆制造厂需要核工程师去从事发展与设计核反应堆的工作,而且电力公司也需要核工程师去购买与管理核电站,同时各工程公司也需要核工程师从事建造核电站和在其运行寿期中进行维护工作。

① 本书采用的压力单位“巴”,是一个可暂时与国际制单位“帕”并用的非国际制单位。1巴=0.1兆帕=1.020公斤/厘米²。——编注

② 据报道英国目前已决定停止发展此堆型。——译注

因此, 现代核工程师仅仅懂得反应堆物理学就不够了。他必须同时学会如何将核反应堆理论的专门知识与建造核动力堆的无数工程要求以及其他学科如力学、电学、土建、冶金、甚至经济学(和政治学)结合起来, 正如这些其他学科的专家必须学习如何与核工程师相互配合一样。就这种意义说, 他必须认识到反应堆核分析只是核动力工程中必须考虑的一个侧面。脱离开与其它学科的联系而单独学习与掌握反应堆核分析是很不恰当的。同样, 从事核电站其它部分设计的电气、机械或结构工程师(其人数愈来愈多), 也会发现学习一点核反应堆理论将有助于他们理解核设备以及配合核设计工作。

未来的核工程师必须面对并解决很复杂的问题, 例如关于核反应堆安全、环境影响的评价、核电站的可靠性以及核燃料循环等, 这些问题包含极其广泛的学科领域。核工程师还将经常遇到如何在符合安全与环境保护规定的条件下经济地设计、建造与运行核反应堆的问题。随着核工业的日益发展与成熟, 愈来愈多的核工程师还会参与诸如质量保证与部件标准化等活动, 当然所有这些问题的提出与解决就涉及社会活动的范畴了。

III. 本书的范围

本书的目的在于详细阐述核裂变反应堆的基础理论, 其编写方式将能使未来的核工程专业的学生以及愿意了解一些核反应堆工程知识的其他学科的工程师都便于掌握。因此, 对每一问题都力求从链式核裂变反应的基本科学原理开始, 再逐步将这些基本概念提高到能实际用于核反应堆工程设计的水平。在进行这种推导时, 我们将不断强调各种非核方面的设计考虑与反应堆堆芯核分析之间的相互影响, 这是在实际反应堆分析中必然会遇到的。

本书将优先讨论核动力堆, 因为大多数核工程师将从事核动力工业的工作。这一点将特别显示在我们所选取讨论的实例以及所侧重的习题中。然而, 由于我们经常强调的是基本概念而不是特殊应用, 因此所阐述的大多数问题都具有广泛得多的应用范围, 从而可以同样适用于其他类型反应堆的分析。同时, 虽然本书的主要对象是未来的核工程师, 我们也希望其他学科的工程师能利用本书作为掌握核反应堆分析的入门。

本书分四部分循序阐述。第一部分简单介绍与核裂变反应堆有关的主要核物理概念。这些课题不仅涉及核裂变过程本身, 而且还包括作为链式反应载体的中子与反应堆堆芯原子核之间的各种相互作用方式。然后我们再定性地讨论研究链式反应时所涉及的普遍性概念。在第一部分结尾时, 将概略叙述核反应堆工程问题, 包括简单介绍各种型式的现代核反应堆及其主要部件, 并定性地讨论核反应堆设计问题。

第二—第四部分的目的在于阐述核反应堆分析所依据的基本科学原理, 并运用这些原理推导出现代反应堆设计中最常用的分析手段。然后通过一些实例, 将这些分析手段应用于核工程师最经常遇到的一些重要问题上。

第二部分阐述反应堆内中子输运的数学理论。我们由中子输运方程的最普遍描述开始, 再简要地(极其定性地)概述这一方程的标准近似解法。在进行这些简单讨论后, 我们随即根据单速中子扩散理论推导出一个核反应堆的最简单的、但却是重要的模型。这种模型可用于分析核反应堆的定态与随时间变化的特性, 因为虽然这种模型在实际反应堆分析中用途非常有限, 但它可以阐明实际反应堆设计中所用的大部分概念与计算技术。

第三部分阐述近代核反应堆设计的主要手段——多群扩散模型。其中特别注意出现在

这些方程中的多群常数的计算, 以及方程本身的实用数值解法。

第四部分将概述核反应堆堆芯设计所用的方法。特别是讨论如何运用前面各章所推导的概念与分析手段去解决核工程师所面临的各种问题, 其中包括临界计算, 堆芯功率分布的确定与热工水力计算, 燃耗与控制的研究, 以及燃料装载的要求。虽然这些方面肯定不可能是完备的, 但所选来讨论的都是核反应堆设计中所遇到的有代表性的问题, 并且足以说明本书前面各章所推导的各种概念。

参 考 文 献

1. *The Nuclear Industry*, USAEC Report WASH-1174-73, 1973. 美国原子能委员会每年出版一本关于美国私营核工业的情况报告。报告对核动力工业的发展提供了十分广泛的调查资料。
2. Chauncey Starr, *Sci. Amer.* **225**, 39 (1971).
3. Fourth International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy (International Atomic Energy Agency, Geneva, 1972), Vol. 1.
4. A study of base-load alternatives for the Northeast Utilities System, Report to the Board of Trustees of Northeast Utilities, Arthur D. Little, Inc. (1973).
5. Nuclear Fuel Resources and Requirements, USAEC Report WASH-1243 (1973); *Nucl. Ind.* **21** (2) (1974); *Nucl. News* **17**, (5) (1974).
6. David J. Rose, *Science* **184**, 351 (1974).
7. An Assessment of Accident Risks in U. S. Commercial Nuclear Power Plants, USAEC Report WASH-1400 (1974).

在许多期刊内都可以找到有关核动力工业的大部分最新资料。虽然在核科学与工程领域内期刊的数量很多, 但最具有普遍意义的期刊可列举如下:

Nuclear Engineering International (Europressatom): 一种英国期刊, 以载有核电站的精美彩色图页而著名。

Nuclear Industry (Atomic Industrial Forum): 一种新闻性月刊, 主要刊载各电力公司(核动力产品用户)观点的文章。

Nuclear News (American Nuclear Society): 一种新闻性月刊, 由美国核能协会出版, 该协会为美国核工程界的主要技术性组织。

Nuclear Safety (Office of Information Services, U. S. Atomic Energy Commission): 一种主要登载核反应堆安全领域最新进展的期刊。

Nuclear Science and Engineering (American Nuclear Society): 主要的核工程技术研究期刊。

在核科学与工程领域内科研性更强的期刊有:

Annals of Nuclear Science and Engineering (formerly *Journal of Nuclear Energy*) (Pergamon, New York).

Journal of Nuclear Science and Technology (Atomic Energy Society of Japan).

Nuclear Engineering and Design (North-Holland, Amsterdam).

Nuclear Technology (American Nuclear Society).

Soviet Atomic Energy (Consultant's Bureau).

核反应堆理论的参考书包括:

Bell, G. I., and Glasstone, S., *Nuclear Reactor Theory*, Reinhold, New York (1970).

Henry, Allan F., *Nuclear Reactor Analysis*, M.I.T. Press, Cambridge, Mass. (1975).

Glasstone, S. and Edlund, M. C., *The Elements of Nuclear Reactor Theory*, Reinhold, New York (1952).

Glasstone, S. and Sesonske, A., *Nuclear Reactor Engineering*, 2nd Edition, Van Nostrand,

- Princeton, N.J. (1975).
- Lamarsh, J. R., *Introduction to Nuclear Reactor Theory*, Addison-Wesley, Reading, Mass. (1966).
- Lamarsh, John R., *Introduction to Nuclear Engineering*, Addison-Wesley, Reading, Mass. (1975).
- Meghreblian, R. V. and Holmes, D. K., *Reactor Analysis*, McGraw-Hill, New York (1960).
- Murray, Raymond L., *Nuclear Energy*, Pergamon Press, New York (1975).
- Weinberg, A. M. and Wigner, E. P., *The Physical Theory of Neutron Chain Reactors*, Chicago U. P. (1958).
- Zweifel, P. F., *Reactor Physics*, McGraw-Hill, New York (1973).

第 2 章

链式裂变反应的核物理学

设计与运行核反应堆的主要目的，在于利用堆芯内受控链式核裂变反应所释放的能量或射线。像 ^{235}U 这一类重原子核分裂(或称裂变)为两个较轻核时就构成这种裂变反应，并伴随着放出能量与射线。然而，反应堆内如何引起这种裂变反应？自然界内存在的这些重核自行裂变(称为自发裂变)的速率是非常缓慢的。而且由于重核的大量电荷具有强大的排斥力，我们显然也不可能简单地使两个核并合在一起而产生这种反应。较为理想的办法是使一个中性粒子(它不受核电荷作用)投射到一个大的“超重”核内，希望这样能引起后者分裂。这种入射粒子的理想对象就是中子。实际上已由实验证明某些核具有巨大的吞噬中子能力，而它们在吸收中子以后经历一种剧烈的痉挛而导致裂变。这种反应的一个例子是：当中子射入 ^{235}U 核内时

中子 + ^{235}U $\longrightarrow$ 裂变产物 + 更多的中子 + 能量。

这一反应的产物(如轻核、中子及 γ 射线)具有很大的动能(约200兆电子伏)。当它们打到反应堆燃料内的邻近原子上而被慢化时，动能就转化为热能。我们在核电站内正是利用这种热能产生蒸汽，并最终转化为电力。

同样重要的是，裂变反应还放出几个中子，它们可以继续引起更多的裂变反应。这样就可以利用中子产生链式裂变反应。因此，从这种意义上说，中子起着链式反应载体的作用，而裂变反应则提供我们所需要的能量。

然而，中子还可能引起裂变以外的其它核反应，这些反应是非生产性的。事实上由于每次裂变反应通常会产生2—3个中子，如果每一中子都引起另一次裂变，显然链式反应将迅速无限增长。这类非生产性反应之一就是原子核俘获中子之后释放 γ 射线而不分裂。另一种可能的反应是中子被核弹回或散射。在进行几次散射反应后，中子最后可能由含铀的堆芯中泄漏出去。这类核反应都会使中子在反应堆内消失，从而阻碍链式反应。

因此，核工程师的主要任务之一就是了解核反应堆内中子“利用”的情况，以便监测与控制链式裂变反应的进行。这就是说，他必须学会如何设计反应堆使得裂变反应所产生的中子与俘获反应及泄漏所损失的中子相平衡。对这类过程的研究称为核反应堆理论，或核反应堆物理，或者有时简称为中子学。这就是本书的基本内容。

然而，获得稳定的链式裂变反应仅仅是核工程师任务的一部分。除此之外，他还必须学会如何导出及利用由裂变反应所产生的能量。这一任务包含下列课题：传热，流体的流动，结构与材料分析，以及动力系统分析；同时它又与堆芯的核分析有密切联系。这些问题在本书后面各章加以研究。

我们首先集中注意于阐明那些决定核反应堆内中子分布规律的基本概念，以便了解与设计一个链式裂变反应系统。其中必须着重讨论两个不同的问题：(a)确定各种中子-核反应的发生几率；(b)利用这些几率推导出确定堆芯内中子密度及裂变反应率的方程式并求其解。

由以上的讨论显然可见确定反应堆内各种中子-核反应率的重要性。然而，记住以下

这一点也是很重要的,即堆芯内存在着极大量的中子(典型数值为每立方厘米 10^8 个)以及大量的核(每立方厘米 10^{22} 个)。因此我们实际上只需要按统计概念研究反应堆内大量中子与核的平均特性。这就是说,我们只需要计算各种中子-核反应发生的几率。这些反应几率用所谓核截面的参数来表示。

核工程师在核反应堆分析中采用核反应截面作为基本数据,正像机械工程师采用热工或结构数据,或者像电气工程师采用电路设备参数一样。因此,了解如何确定这类截面及其性质的物理基础对于实际的核反应堆分析是必要的。

本章将概述与研究链式裂变反应特别有关的核物理各个方面。应该着重指出,此处並不企图对此进行完整的阐述。我们估计大部分工科学生在先修课程中已经接触过一些近代原子物理与核物理知识。(对于本章内容感到完全陌生的学生最好能参看一本优秀的核物理导论参考书¹⁻⁴,其中相当详尽地讨论了这些问题。)然而不幸的是,通常对这些问题的讨论,大多没有把侧重点放在我们所需要的核反应,特别是中子-核反应上面(虽然也有几本书是明显的例外^{5,6})。

我们将首先简要介绍自发核放射性蜕变作为核反应的一个实例。然后讨论核碰撞反应並介绍核截面概念。其中特别注意定性地讨论表征中子-核反应的各种截面。最后将讨论核裂变反应本身以及所产生的射线。

I. 核 反 应

在核反应堆研究中最重要核反应基本上有两类:(a)核的自发蜕变;(b)由核和核粒子或它们各自之间碰撞引起的反应。第一类核反应的例子就是裂变产物的放射性蜕变,因为这些产物常常是不稳定的。这种蜕变反应只取决于某种核本身的特性。第二类核反应的实例是链式裂变反应内发生的中子-核碰撞过程。这类碰撞反应不仅取决于相撞粒子的性质(如中子与核),同时也取决于互撞的相对速度。

在进行核反应的讨论之前,首先介绍一些符号。我们用 Z (原子序数)代表原子核内的质子数目,用 N 代表核内的中子数目,用 A (质量数)代表核子总数(质子数加中子数)。某一特定核可用 ${}_Z^AX$ 符号表示,其中 X 为所研究原子的化学符号。例如, ${}_1^1\text{H}$, ${}_6^{12}\text{C}$ 与 ${}_{92}^{235}\text{U}$ 就是代表这三种核的符号。我们並称各种不同的核为核素。具有同一原子序数 Z 但质量数 A 不同的核称为同位素(如 ${}_{92}^{233}\text{U}$, ${}_{92}^{234}\text{U}$, ${}_{92}^{235}\text{U}$ 及 ${}_{92}^{238}\text{U}$)。由于核属于量子力学系统,它可能处于任一可能的能态中。普通的符号 ${}_Z^AX$ 表示核的基态,而用星号表示处于激发态的核,即 ${}_Z^AX^*$ 。长寿的核激发态称为核的同质异能素或同质异能态,並用符号 m 表示(如 ${}_{49}^{116m}\text{In}$)。

A. 放 射 性 蜕 变

某些核是不稳定的,因为它们可能自发地转变为另一种核,通常並伴随发射出能量很大的粒子。这种自发的核转变称为放射性蜕变。在自然界存在的原子核内发现的三种最常见的放射性蜕变形式为: α 蜕变,其中核发射一个氦核 ${}_2^4\text{He}$; β 蜕变,相当于核内的一个中子转变为质子,一般並伴随发射出一个电子和一个中微子;以及 γ 蜕变,即核由一个激

发态转变到另一较低的激发态，并伴随发射一个光子。然而，在核反应堆内还可能发生其它类型的放射性蜕变，因为裂变产生了许多在自然界并不存在的不稳定核。例如，某些核如 ${}_{36}^{87}\text{K}$ 可能在蜕变时发射一个中子。（我们在后面将看到，这种特定的蜕变过程对反应堆运行极为重要。）

描述放射性蜕变的基本规律是以如下的实验观察事实为基础的：即在任一给定的时间间隔内，一种核的蜕变几率为常数，此值只取决于核本身的类型，而与核的年龄及其环境无关。因此，对某一类型的核而言，其初始核的数目随时间的变化率必定正比于该时刻存在的核数目。令此比例常数为 λ 。于是，若 $N(t)$ 为初始核在 t 时刻剩余的数目，则可写出

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N(t). \quad (2-1)$$

此处 λ 为此种核的放射性蜕变常数，其单位为时间的倒数。如果开始时存在着 N_0 个核，则在其后任一时刻 t 所剩余的该种核数由如下指数规律给出：

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}. \quad (2-2)$$

此时刻的核蜕变率为

$$\text{蜕变率} = \lambda N_0 e^{-\lambda t}. \quad (2-3)$$

由此种时间特性可知，在时间间隔 t 到 $t+dt$ 之间某种核蜕变的几率显然是

$$p(t)dt = \lambda e^{-\lambda t} dt. \quad (2-4)$$

由于放射性蜕变属于统计现象，我们不能准确地预言某个核在何时蜕变。然而我们可以利用方程（2-4）的 $p(t)$ 公式计算核在蜕变前的平均寿期 $\bar{t}$ ：

$$\bar{t} \equiv \int_0^\infty dt t p(t) = \lambda \int_0^\infty dt t e^{-\lambda t} = \frac{1}{\lambda}. \quad (2-5)$$

因此平均说来，某个核将在 $1/\lambda$ 时间之后蜕变。

与此密切相关的一个量是初始核数中蜕变一半所需的时间。这一时间 $T_{1/2}$ 称为此种核的放射性半衰期，可以按其定义由下式算出：

$$N(T_{1/2}) = N_0/2 = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}, \quad (2-6)$$

即

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}. \quad (2-7)$$

在实际工作中，一般用表列出各种不稳定核的放射性半衰期，而不列出它们的平均寿期 $\bar{t}$ 或蜕变常数 λ 。

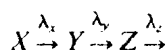
然而另一种比较重要的定义是某种放射性样品的活性。这个量就是每秒钟发生的总蜕变次数 $\lambda N(t)$ 。活性一般用居里为单位计量，1居里(Ci)定义为每秒蜕变 3.7×10^{10} 次的放射性物质的活性。（此值大致相当于1克镭的活性。）

实际上更为常见与更有用的是把因变量 $N(t)$ 取作所讨论核的原子密度（原子核数/厘米³），而不是某一样品内的原子总数。我们在以后的讨论中就采用这种定义。

大多数放射性蜕变过程要比方程(2-1)所描述的更加复杂。例如，蜕变核本身可能是由某种其它来源产生的，譬如等于 $R(t)$ 核/厘米³·秒。于是核平衡方程变为

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N(t) + R(t). \quad (2-8)$$

也可以写出与此类似的方程来描述几种依次蜕变的核。例如，考虑如下的放射性蜕变链：



于是描述每种核数目的相应方程为

$$\begin{aligned}\frac{dN_X}{dt} &= -\lambda_X N_X + R_X, \\ \frac{dN_Y}{dt} &= -\lambda_Y N_Y + \lambda_X N_X + R_Y, \\ \frac{dN_Z}{dt} &= -\lambda_Z N_Z + \lambda_Y N_Y + R_Z.\end{aligned}\quad (2-9)$$

其中 $R_X(t)$ 是 X 核的产生项，依此类推。由于这只是一个常系数的一阶线性微分方程组，可以很容易地用标准方法解出，因此我们将关于这一问题的进一步讨论留待本章末尾再进行。

对于不同激发态的核之间的相互转换，也可按非常相似的方式加以处理。这些状态代表该核可能的量子能级。我们再次可以采用一蜕变常数 λ 表征该核由某一激发态“蜕变”到较低能态的几率，同样也可以得出激发态平均寿期 $\bar{t}$ 这个概念。此处一个有用的概念就是激发态具有的能级不确定性或称宽度 Γ 。根据海森堡的测不准原理，这一能级宽度与其平均寿期的关系为

$$\Delta t \Delta E \geq \hbar. \quad (2-10)$$

因此，能级宽度可用蜕变常数表示为

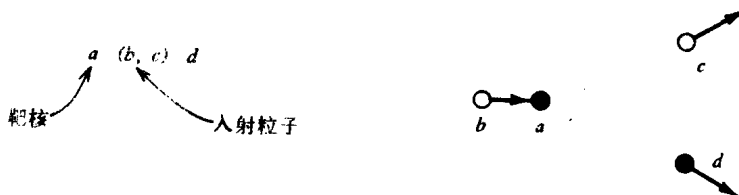
$$\Gamma = \Delta E \approx \hbar / \Delta t = \hbar \lambda. \quad (2-11)$$

B. 核碰撞反应

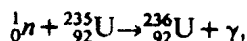
核碰撞反应可以采用与描述化学反应非常相似的公式来描写。实际上，常采用熟悉的化学反应表示法



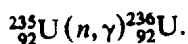
来描述核反应。然而，由于在核反应中常将一种粒子看作是入射粒子，而另一种粒子被看作靶核，我们有时采用更详细的符号：



例如，反应式



可以写成



这类反应的总称可以简单表示为 (n, γ) 反应。

核反应通常伴随着吸收或发射能量。采用相对论的重要结果

$$E = mc^2, \quad (2-13)$$

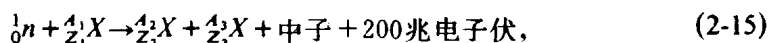
可以计算某一核反应中释放(或需要)的能量, 式中 c 为光速, m 为此反应中转化为能量的质量。在公式中出现的变量 m 应取碰撞前后相互作用粒子的总质量之差。对于核反应 $a(b, c)d$, 我们可用下式计算反应能:

$$Q = [(M_a + M_b) - (M_c + M_d)]c^2. \quad (2-14)$$

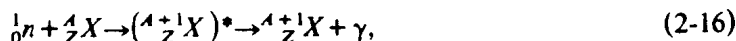
如 $Q > 0$, 则称此反应为**放热反应**, 相应于反应中释放能量。如 $Q < 0$, 则称为**吸热反应**, 此时必须向相撞核提供能量才能促使此核反应发生。显然, 核裂变是放热反应的一例。

可能发生的核反应类型很多。在分析核裂变反应堆内中子与核的各种反应时, 最重要的几种核反应是:

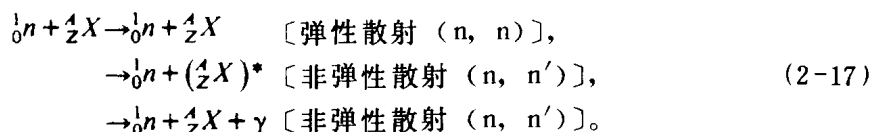
核裂变 (n , 裂变):



辐射俘获 (n, γ):



散射 (n, n) 或 (n, n'):



在前面已讨论过核裂变反应。辐射俘获内入射中子被靶核吸收生成一个质量数为 $A + 1$ 的新核。以后将看到, 这种“复核”处于激发态。在辐射俘获反应中, 复核最后将放出一个高能光子(即 γ 射线)而蜕变到基态。对反应堆控制具有一定重要性的另一种俘获反应是 (n, α) 反应, 例如 ${}_{10}^{10}\text{B}$ 与中子发生的反应。

第三种重要的核反应是**散射**。在这种反应内, 中子只是被核所散射 (n, n) , 虽然在某些情况下, 它可能首先与核结合而暂时生成复核, 然后再被重新发射出去, 並往往使核停留在激发态, 最后通过发射 γ 射线而蜕变。

裂变反应对核反应堆运行的重要性是显而易见的。辐射俘获与散射这两种反应也极为重要, 因为它们会影响中子的利用率从而影响链式反应。当对裂变链式反应中起重要作用的核反应进行定量分析时, 我们将集中研究中子与核的反应。

1. 微 观 截 面

中子与核发生反应的几率可以用称为**核截面**的量来表示。我们首先从实用的观点来定义这个量: 假定有一束中子, 全部以同样速度向同一方向运动, 垂直並均匀地射入靶物质的表面。如果靶很薄(例如只有一层原子厚度), 则靶内没有一个原子被其它原子挡住(见图2-1)。在此种情况下, 可以预计靶内的中子-核反应率正比于入射中子束强度 I (单位为: 中子数/厘米²·秒)及每单位面积上的靶核数目 N_A (原子核数/厘米²)。如果令此比例常数为 σ , 则可将靶上每单位面积内发生的反应率写为